



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

RICARDO AURÉLIO FRAGOSO DE SOUSA

**METODOLOGIA PARA CATEGORIZAÇÃO  
DOS VASOS DE PRESSÃO PARA FINS DA NORMA REGULAMENTADORA 13  
(NR-13)**

Recife

2025

RICARDO AURÉLIO FRAGOSO DE SOUSA

**METODOLOGIA PARA CATEGORIZAÇÃO  
DOS VASOS DE PRESSÃO PARA FINS DA NORMA REGULAMENTADORA 13  
(NR-13)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutorado em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira da Silva

Recife

2025



.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Sousa, Ricardo Aurélio Fragoso de.

Metodologia para categorização dos vasos de pressão para fins da Norma Regulamentadora 13 (NR-13) / Ricardo Aurélio Fragoso de Sousa. - Recife, 2025.

207f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2025.

Orientação: José Carlos Charamba Dutra.

Coorientação: Paulo Henrique Ferreira da Silva.

Inclui referências, apêndices e anexos.

1. Vaso de pressão; 2. Inspeção; 3. Norma Regulamentadora; 4. NR-13; 5. Integridade estrutural. I. Dutra, José Carlos Charamba. II. Silva, Paulo Henrique Ferreira da. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

RICARDO AURÉLIO FRAGOSO DE SOUSA

**METODOLOGIA PARA CATEGORIZAÇÃO  
DOS VASOS DE PRESSÃO PARA FINS DA NORMA REGULAMENTADORA 13  
(NR-13)**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia.

Aprovada em: 20 / 01 / 2025

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

---

Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira da Silva (Coorientador)  
Universidade Federal da Bahia – UFBA

---

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

---

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos (Examinador Externo)  
Universidade Federal da Paraíba – UFPB

---

Prof. Dr. Rogério Pontes de Araújo (Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco - UPE

## DEDICATÓRIA

Dedico à minha amada família!

## AGRADECIMENTOS

Nominar as pessoas importantes que contribuíram para a elaboração deste trabalho é uma tarefa impossível. Por mais que seja a minha intenção de relacionar todas e cada uma destas pessoas, tendo a certeza, infelizmente, que irei incorrer em esquecimentos.

Agradeço:

Ao professor José Carlos Charamba Dutra

Ao professor Paulo Henrique Ferreira da Silva

A Jorge Rodrigo da Silva Oliveira, uma excelente pessoa

Agradeço, em especial:

Minha esposa Cristiane

*In memoriam:*

*Meu pai Pedro e minha mãe Luzia*, que dedicaram incondicionalmente a vida para meus irmãos e para mim, orientando, não apenas por palavras, mas pelo exemplo, o nosso caminho.

Meus familiares, amigos, amigas, colegas, companheiros, companheiras..., muito obrigado!

*A humildade é a chave que abre as portas*

*São Francisco de Assis*

## RESUMO

O presente trabalho propõe uma metodologia para a determinação desta pressão máxima de operação de vasos de pressão através de uma análise estatística, para fins da categorização destes equipamentos em termos das normas legais que definem, dentre outros aspectos, o intervalo máximo entre as inspeções. Baseado em revisão bibliográfica, bibliométrica e ferramentas estatísticas, foram realizados estudos em um conjunto de dez equipamentos, instalados em uma planta brasileira de petróleo e gás, dos quais foram obtidos os registros horários reais da pressão de operação, ao longo de 10 anos de operação, totalizando mais de 800.000 dados, possibilitando, por meio da metodologia proposta, determinar a pressão máxima de operação (PMO) para cada equipamento. Também, para validação da metodologia, um estudo de caso contendo um conjunto de mais de 80.000 valores de pressão de operação, obtidos ao longo de 10 anos de funcionamento, de um equipamento foi analisado tendo a presente proposta sido capaz de identificar os eventos operacionais decorrentes de causas especiais (não normais), validando a análise. Documentos legais em diversos países definem o intervalo máximo permitido entre os exames externos e entre os exames internos, aos quais os vasos de pressão devem ser submetidos. No Brasil, a Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) define como um dos parâmetros a ser considerado para fins da categorização dos vasos de pressão a PMO, tendo esta norma sido submetida a várias revisões desde a sua publicação (1978), sendo a mais recente de 2022, onde se destacam a inclusão de aspectos relativos à inspeção baseada em risco, maior prazo para a inspeção em caldeiras que possuem o sistema de gerenciamento de combustão, e a renomeação do profissional habilitado (PH) para a denominação profissional legalmente habilitado (PLH). Os resultados obtidos pela metodologia mostraram a pertinência e consistência do procedimento proposto, que, por um lado mantém as condições de segurança exigidas pela NR-13, e, por outro lado, possibilita potenciais ganhos em termos de: otimização do uso dos ativos, com reflexos na redução dos custos operacionais; aumento da disponibilidade operacional; diminuição de geração de resíduos e mitigação de problemas originados de falha na execução de serviços de manutenção ou inspeção. Este trabalho propõe, ainda, o escopo de uma norma internacional, que

congregará as melhores práticas e técnicas aplicadas na indústria mundial, possibilitando a uniformização dos critérios de categorização dos vasos de pressão, com potenciais ganhos em segurança operacional, integridade estrutural, e a competitividade empresarial.

**Palavras-chave:** vaso de pressão, inspeção, norma regulamentadora, integridade estrutural.

## **ABSTRACT**

The present work proposes a methodology for determining this maximum operating pressure of pressure vessels through a statistical analysis, for the purposes of categorizing this equipment in terms of legal standards that define, among other aspects, the maximum interval between inspections. Based on a bibliographical, bibliometric review and statistical tools, studies were carried out on a set of ten pieces of equipment, installed in a Brazilian oil and gas plant, from which real hourly records of operating pressure were obtained, over 10 years of operation. , totaling more than 800,000 pieces of data, making it possible, through the proposed methodology, to determine the maximum operating pressure (PMO) for each piece of equipment. Also, to validate the methodology, a case study containing a set of more than 80,000 operating pressure values, obtained over 10 years of operation, of equipment was analyzed and the present proposal was able to identify the operational events arising of special (non-normal) causes, validating the analysis. Legal documents in several countries define the maximum interval allowed between external examinations and between internal examinations to which pressure vessels must be subjected. In Brazil, Regulatory Standard number 13 (NR-13) defines PMO as one of the parameters to be considered for the purposes of categorizing pressure vessels, and this standard has been subjected to several revisions since its publication (1978), with the most recent in 2022, which highlights the inclusion of aspects related to risk-based inspection, a longer period for inspection of boilers that have a combustion management system, and the renaming of the qualified professional (PH) to the legally professional designation enabled (PLH). The results obtained by the methodology showed the relevance and consistency of the proposed procedure, which, on the one hand, maintains the safety conditions required by NR-13, and, on the other hand, allows potential gains in terms of: optimizing the use of assets, with reflected in the reduction of operating costs; increased operational availability; reduction of waste generation and mitigation of problems arising from failure to perform maintenance or inspection services. This work also proposes the scope of an international standard, which will bring together the best practices and techniques applied in the global industry,



enabling the standardization of pressure vessel categorization criteria, with potential gains in operational safety, structural integrity, and competitiveness. business.

.

Keywords: pressure vessel, inspection, regulatory standard, structural integrity

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Acidentes em caldeiras e vasos de pressão, nos Estados Unidos .....                                                                   | 30 |
| Figura 2 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, por ano - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão .....                            | 31 |
| Figura 3 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por UF - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão .....                    | 32 |
| Figura 4 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por mais de 15 dias - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão.....        | 32 |
| Figura 5 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por CBO - Relacionados a caldeiras e vasos .....                              | 33 |
| Figura 6 - Acidentes por capítulo da CID - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão .....                                                     | 34 |
| Figura 7 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais em 2019 - Partes do corpo atingidas - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão ..... | 34 |
| Figura 8 - Situação geradora - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão.....                                                                  | 35 |
| Figura 9 - Natureza da lesão - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão .....                                                                 | 35 |
| Figura 10 - Divisão por subclasses de CNAE.....                                                                                                  | 36 |
| Figura 11 - Divisão por idade do trabalhador .....                                                                                               | 37 |
| Figura 12 - Situação em que ficou o vaso de pressão após o acidente .....                                                                        | 37 |
| Figura 13 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2023, vista aérea                                                                 | 38 |
| Figura 14 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2023, vista ao nível do solo.....                                                 | 39 |
| Figura 15 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2016.....                                                                         | 39 |
| Figura 16 - Principais temas identificados .....                                                                                                 | 44 |
| Figura 17 - Evolução da publicação, conforme o foco, ao longo do tempo .....                                                                     | 44 |
| Figura 18 - Quantidade de publicações por país do(s) autor(es) .....                                                                             | 45 |
| Figura 19 - Natureza da entidade publicadora .....                                                                                               | 45 |
| Figura 20 - Trecho da norma espanhola que categoriza os vasos de pressão conforme o risco .....                                                  | 59 |
| Figura 21 - Determinação do grupo dos fluidos.....                                                                                               | 60 |
| Figura 22 - Categorização dos vasos de pressão conforme norma espanhola.....                                                                     | 60 |
| Figura 23 - Categorização dos vasos de pressão conforme NR-13 .....                                                                              | 63 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 24 - Comparação da NR-13 e da norma espanhola congênere, em relação à categorização dos vasos de pressão .....                                                                                                                | 64  |
| Figura 25 - Relação entre as pressões em um vaso de pressão .....                                                                                                                                                                    | 66  |
| Figura 26 - Gráfico de controle de processo .....                                                                                                                                                                                    | 68  |
| Figura 27 - Probabilidades de uma distribuição normal .....                                                                                                                                                                          | 69  |
| Figura 28 - Indicação do desvio da normalidade, plotado em relação à probabilidade normal .....                                                                                                                                      | 71  |
| Figura 29 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando a posição 01 .....                                                                                    | 91  |
| Figura 30 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando a posição 02 .....                                                                                    | 92  |
| Figura 31 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando as posições 03, 04 e 05 .....                                                                         | 92  |
| Figura 32 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                                                  | 97  |
| Figura 33 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 ..... | 98  |
| Figura 34 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                                              | 99  |
| Figura 35 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                   | 100 |
| Figura 36 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                                                  | 103 |
| Figura 37 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 ..... | 104 |
| Figura 38 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                                              | 105 |
| Figura 39 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                   | 106 |

|                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 40 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 109 |
| Figura 41 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11..... | 110 |
| Figura 42 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                              | 111 |
| Figura 43 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                  | 112 |
| Figura 44 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 115 |
| Figura 45 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11..... | 116 |
| Figura 46 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                              | 117 |
| Figura 47 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                  | 118 |
| Figura 48 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 121 |
| Figura 49 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11..... | 122 |
| Figura 50 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                              | 123 |
| Figura 51 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                  | 124 |
| Figura 52 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 127 |

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 53 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) etapas 08, 09, 10 e 11 ..... | 128 |
| Figura 54 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                               | 129 |
| Figura 55 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                   | 130 |
| Figura 56 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                   | 133 |
| Figura 57 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 ..... | 134 |
| Figura 58 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                               | 135 |
| Figura 59 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                   | 136 |
| Figura 60 - Fluxograma simplificado da disposição operacional do equipamento sob análise .....                                                                                                                                       | 139 |
| Figura 61 - Pressão de operação, equipamento 1, medições horárias, por 10 anos .....                                                                                                                                                 | 140 |
| Figura 62 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                   | 155 |
| Figura 63 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 ..... | 156 |
| Figura 64 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                               | 157 |
| Figura 65 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                   | 158 |

|                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 66 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 161 |
| Figura 67 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11..... | 162 |
| Figura 68 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                              | 163 |
| Figura 69 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                  | 164 |
| Figura 70 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                                  | 167 |
| Figura 71 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11..... | 168 |
| Figura 72 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11.....                                                              | 169 |
| Figura 73 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11 .....                                  | 170 |

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                    |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 - Resumo das características de classificação dos vasos de pressão, para fins da elaboração do plano de inspeção .....    | 53  |
| Quadro 2 - Classe dos fluidos, conforme NR-13 .....                                                                                | 62  |
| Quadro 3 - Grupo dos vasos de pressão .....                                                                                        | 62  |
| Quadro 4 - Etapas da seleção dos artigos a serem utilizados na revisão bibliográfica .....                                         | 74  |
| Quadro 5 - Limitações e contramedidas.....                                                                                         | 76  |
| Quadro 6 - Etapas da metodologia de processamento dos dados.....                                                                   | 77  |
| Quadro 7 - Classe do vaso de pressão conforme o perfil de pressão.....                                                             | 79  |
| Quadro 8 - Fator $p \times V$ e intervalo máximo entre exames externos e exames internos, por país .....                           | 83  |
| Quadro 9 - Parâmetros a serem utilizados para a classificação dos vasos de pressão .....                                           | 85  |
| Quadro 10 - Categoria dos dados .....                                                                                              | 87  |
| Quadro 11 - Aspectos qualitativos da curva da “Pressão de operação padronizada” e da curva referente à pressão de operação.....    | 90  |
| Quadro 12 - Aspectos qualitativos da curva da “Pressão de operação padronizada” e da curva referente à pressão de operação.....    | 91  |
| Quadro 13 - Informações contidas em cada figura de cada equipamento .....                                                          | 94  |
| Quadro 14 - Descrição da ocorrência operacional que resultou no evento de causa especial, classificados como outliers tipo 2 ..... | 142 |
| Quadro 15 - Classificação dos eventos raros (causas especiais) .....                                                               | 143 |
| Quadro 16 - Características de convergência entre a média e a mediana.....                                                         | 144 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Características do vaso de pressão .....                            | 82  |
| Tabela 2 - Quantidade de dados utilizados .....                                | 93  |
| Tabela 3 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....      | 95  |
| Tabela 4 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia ..... | 96  |
| Tabela 5 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....      | 102 |
| Tabela 6 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia ..... | 102 |
| Tabela 7 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....      | 108 |
| Tabela 8 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia ..... | 108 |
| Tabela 9 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....      | 113 |
| Tabela 10 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 114 |
| Tabela 11 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 119 |
| Tabela 12 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 120 |
| Tabela 13 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 125 |
| Tabela 14 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 126 |
| Tabela 15 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 131 |
| Tabela 16 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 132 |
| Tabela 17 - Resumo dos resultados dos dez equipamentos analisados.....         | 137 |
| Tabela 18 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 141 |
| Tabela 19 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 153 |
| Tabela 20 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 154 |
| Tabela 21 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 159 |
| Tabela 22 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 160 |
| Tabela 23 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia.....     | 165 |
| Tabela 24 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia .... | 166 |



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|           |                                                                                  |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| ABC       | Municípios paulistas de Santo André, São Bernardo e São Caetano do Sul           |
| ABCD      | Municípios paulistas de Santo André, São Bernardo, São Caetano do Sul e Diadema  |
| ABQUIM    | Associação Brasileira da Indústria Química                                       |
| ABNT      | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                         |
| AP        | <i>Aparatos a Presión</i> <sup>1</sup>                                           |
| API       | <i>American Petroleum Institute</i> <sup>2</sup>                                 |
| AS        | <i>Australian Standard</i> <sup>3</sup>                                          |
| ASME      | <i>The American Society of Mechanical Engineers</i> <sup>4</sup>                 |
| bar       | Unidade de pressão, correspondendo a 10 <sup>5</sup> Pascals (Pa)                |
| BetrSichV | Betriebssicherheitsverordnung <sup>5</sup>                                       |
| BOE       | <i>Boletín Oficial del Estado</i> <sup>6</sup>                                   |
| CBO       | Código Brasileiro de Ocupação                                                    |
| CEP       | Controle estatístico de processo                                                 |
| CEPEL     | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica                                          |
| CID       | Código estatística internacional de doenças e problemas relacionados com a saúde |

---

<sup>1</sup> Aparato a pressão, em tradução livre.

<sup>2</sup> Instituto Americano do Petróleo, em tradução livre.

<sup>3</sup> Norma australiana, em tradução livre.

<sup>4</sup> Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos, em tradução livre.

<sup>5</sup> Regulamentos de segurança industrial, em tradução livre.

<sup>6</sup> Boletim Oficial do Estado, em tradução livre.

|             |                                                                       |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------|
| CLT         | Consolidação das Leis do Trabalho                                     |
| CNAE        | Código Nacional de Atividade Econômica.                               |
| DRT/SP      | Delegacia Regional do Trabalho em São Paulo                           |
| EU          | <i>European Union</i> <sup>7</sup>                                    |
| Fc          | Fator de compressibilidade e massa                                    |
| Ff          | Fator decorrente do tipo de fluido                                    |
| Fs          | Fator de instalação ou serviço                                        |
| FUNDACENTRO | Fundação Jorge Duprat Figueiredo, de Segurança e Medicina do Trabalho |
| GLP         | Gás Liquefeito de Petróleo                                            |
| HDS         | Unidade de Hidrodessulfurização                                       |
| IBP         | Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis       |
| INMETRO     | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia              |
| INPI        | Instituto Nacional de Propriedade Industrial                          |
| ITC         | <i>Instrucción Técnica Complementaria</i> <sup>8</sup>                |
| J           | Joule (grandeza física energia)                                       |
| kg          | Kilograma (10 <sup>3</sup> gramas)                                    |
| m           | Metro (unidade de medida linear)                                      |
| MIE         | <i>Ministerio de Industria y Energia</i> <sup>9</sup>                 |
| MJ          | Megajoule (10 <sup>6</sup> joules)                                    |

---

<sup>7</sup> União europeia, em tradução livre.

<sup>8</sup> Instrução Técnica Complementar, em tradução livre.

<sup>9</sup> Ministério da Indústria e Energia.

|              |                                                                                           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| MPa          | Megapascal (10 <sup>6</sup> newtons por metro quadrado)                                   |
| MTb          | Ministério do Trabalho                                                                    |
| MTBF         | <i>Mean Time Between Failures</i> <sup>10</sup>                                           |
| MTE          | Ministério do Trabalho e Emprego                                                          |
| MTIC         | Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio                                              |
| MTP          | Ministério do Trabalho e Previdência                                                      |
| MTPS         | Ministério do Trabalho e Previdência Social                                               |
| MTTF         | <i>Mean Time To Fail</i> <sup>11</sup>                                                    |
| NOM-020-STPS | <i>Norma Oficial Mexicana, da Secretaria del Trabajo y Previsión Social</i> <sup>12</sup> |
| NR-13        | Norma Regulamentadora número 13                                                           |
| OMS          | Organização Mundial de Saúde                                                              |
| $p \times V$ | Multiplicação do valor da pressão vezes o volume                                          |
| PV           | Multiplicação do valor da pressão vezes o volume                                          |
| Pd           | <i>Presión de diseño</i> <sup>13</sup>                                                    |
| PED          | <i>Pressure Equipment Directive</i> <sup>14</sup>                                         |
| PMA          | Pressão Máxima Admissível                                                                 |
| PMO          | Pressão Máxima de Operação                                                                |
| PMTA         | Pressão Máxima de Trabalho Admissível                                                     |

---

<sup>10</sup> Tempo médio entre falhas, em tradução livre.

<sup>11</sup> Tempo médio para ocorrência de falha, em tradução livre.

<sup>12</sup> Norma Oficial Mexicana, da Secretaria do Trabalho e Previdência Social, em tradução livre.

<sup>13</sup> Pressão de projeto, em tradução livre.

<sup>14</sup> Diretiva de equipamento a pressão, em tradução livre.

|       |                                                                                         |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| PPGEM | Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Pernambuco |
| PO    | Pressão de Operação                                                                     |
| POD   | <i>Probability Of Detection</i> <sup>15</sup>                                           |
| PPsv  | Pressão de ajuste da PSV                                                                |
| PSV   | <i>Pressure Safety Valve</i> <sup>16</sup>                                              |
| PT    | Portugal                                                                                |
| RBI   | <i>Risk-Based Inspection</i> <sup>17</sup>                                              |
| SI    | Sistema Internacional de unidades                                                       |
| SPIE  | Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos                                             |
| SSST  | Secretaria de Saúde e Segurança do Trabalho                                             |
| TNT   | Trinitrotolueno                                                                         |
| UE    | União europeia                                                                          |
| V     | Volume interno do equipamento (vaso de pressão)                                         |

---

<sup>15</sup> Probabilidade de Detecção, em tradução livre.

<sup>16</sup> Válvula de segurança de pressão, em tradução livre.

<sup>17</sup> Inspeção baseada em risco, em tradução livre.

## LISTA DE SÍMBOLOS

| SÍMBOLO          | DENOMINAÇÃO                                     |
|------------------|-------------------------------------------------|
| $m_2$            | Momento estatístico de segunda ordem            |
| $m_3$            | Momento estatístico de terceira ordem           |
| $m_4$            | Momento estatístico de quarta ordem             |
| $M_d$            | Mediana                                         |
| $n$              | Quantidade de elementos da população ou amostra |
| $p$              | Pressão                                         |
| $V$              | Volume                                          |
| $x$              | Variável                                        |
| $\bar{x}_i$      | Média da amostra, na etapa $i$                  |
| $X_i$            | Variável                                        |
| $\bar{X}$        | Média da população                              |
| $Z$              | Variável populacional aleatória                 |
| $\sqrt{\beta_1}$ | <i>Skewness</i> <sup>18</sup>                   |
| $\beta_2$        | <i>Kurtosis</i> <sup>19</sup>                   |
| $\sigma$         | Desvio padrão da população                      |
| $\mu$            | Média da população                              |

---

<sup>18</sup> Assimetria, em tradução livre.

<sup>19</sup> Curtose, em tradução livre.

## SUMÁRIO

|              |                                                                                                                                           |           |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b>    | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                                    | <b>25</b> |
| 1.1.         | JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA .....                                                                                                          | 29        |
| 1.2          | OBJETIVOS .....                                                                                                                           | 41        |
| 1.2.1        | Objetivo geral.....                                                                                                                       | <b>41</b> |
| 1.2.2        | Objetivos específicos.....                                                                                                                | <b>41</b> |
| <b>2.</b>    | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                                                                                         | <b>43</b> |
| 2.1          | ASPECTOS QUANTO À PERIODICIDADE DA INSPEÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO.....                                                                     | 46        |
| 2.2          | CARACTERÍSTICAS DAS NORMAS DE CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO.....                                                                     | 49        |
| 2.3          | A EVOLUÇÃO DA NR-13.....                                                                                                                  | 54        |
| 2.4          | A CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO CONFORME A NR-13 ...                                                                                 | 61        |
| 2.5          | CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRESSÃO DE OPERAÇÃO, PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO E PRESSÃO DE PROJETO .....                                          | 65        |
| 2.6          | FUNDAMENTOS ESTATÍSTICOS APLICÁVEIS AO PRESENTE ESTUDO..                                                                                  | 67        |
| <b>2.6.1</b> | <b>O controle estatístico de processo.....</b>                                                                                            | <b>67</b> |
| <b>2.6.2</b> | <b>Avaliação da normalidade de dados.....</b>                                                                                             | <b>69</b> |
| 2.7          | EVENTOS RAROS .....                                                                                                                       | 71        |
| <b>3.</b>    | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                                                                           | <b>73</b> |
| 3.1          | PESQUISA NA BASE DE DADOS CIENTÍFICOS.....                                                                                                | 73        |
| 3.2          | PESQUISA NAS LEGISLAÇÕES APLICÁVEIS À CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO .....                                                            | 74        |
| 3.3          | METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO .....                                                  | 75        |
| <b>4.</b>    | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                                                                       | <b>78</b> |
| 4.1          | PERFIL OPERACIONAL DOS VASOS DE PRESSÃO.....                                                                                              | 78        |
| 4.2          | AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA APLICAÇÃO DAS NORMAS INTERNACIONAIS NA CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO .....                                  | 81        |
| 4.3          | ASPECTOS QUALITATIVOS DOS DADOS E PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO .....                                                                         | 86        |
| 4.4          | PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DA CONVERGÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS REAIS À DISTRIBUIÇÃO NORMAL GAUSSIANA..... | 88        |

|     |                                                                                                     |            |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5 | PROCESSAMENTO DOS VALORES DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO ..... | 93         |
| 5.6 | AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS DADOS IDENTIFICADOS COMO SENDO ORIGINADOS DE CAUSA ESPECIAL.....          | 138        |
| 5.  | <b>CONCLUSÃO .....</b>                                                                              | <b>145</b> |
| 6.  | <b>RECOMENDAÇÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                          | <b>147</b> |
|     | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                            | <b>148</b> |
|     | <b>APÊNDICES.....</b>                                                                               | <b>153</b> |
|     | <b>Resultados do equipamento 02 .....</b>                                                           | <b>153</b> |
|     | <b>Resultados do equipamento 03 .....</b>                                                           | <b>159</b> |
|     | <b>Resultados do equipamento 04 .....</b>                                                           | <b>165</b> |
|     | <b>Tradução dos textos da figura 16 .....</b>                                                       | <b>171</b> |
|     | <b>ANEXO .....</b>                                                                                  | <b>172</b> |
|     | <b>Norma regulamentadora número 13 (NR-13) .....</b>                                                | <b>172</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos industriais envolvem, geralmente, grandes quantidades de energia, devendo esta ser adequadamente armazenada, utilizada e escoada. Em uma eventual liberação inesperada ou indevida desta energia, consequências podem causar danos aos trabalhadores, meio ambiente, comunidade circunvizinha ao empreendimento, bem como, à própria empresa. Prejuízos financeiros, materiais, comerciais, dentre outros, podem resultar, em cenários limites, até no encerramento das atividades da empresa (LEE, J.; CAMERON; HASSALL, 2024) (LIAO *et al.*, 2023) (CHEN, C. *et al.*, 2023).

Inúmeros países possuem normas ou instrumentos legais que definem as condições mínimas a serem atendidas para a utilização dos recipientes de pressão, apresentando, todavia, critérios e condições diferentes, que resultam em exigências diferentes para cenários e condições operacionais idênticas nos equipamentos. Alguns empreendimentos utilizam o RBI (Inspeção baseada na confiabilidade, da sigla em inglês, em tradução livre) (YEN-JU; WANG, C. H., 2023) (PU *et al.*, 2023) (SONG, J. S. *et al.*, 2021).

O recente uso da ciência de dados, gêmeos digitais e da *machine learning*<sup>20</sup> tem possibilitado o processamento de grandes quantidades de dados e a automação das análises (MENSAH; SRIRAMULA, 2023) (WILSON, 2022) (LU; LEE, W. C.; WANG, C. H., 2023) (ZHONG *et al.*, 2024) (DABAGH *et al.*, 2022) (VANDERHORN; WANG, Z.; MAHADEVAN, 2022).

A legislação brasileira possui um arcabouço de documentos que tratam das condições de segurança nas atividades laborais, sendo as Normas Regulamentadoras (usualmente nominadas NR), emitidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE)<sup>21</sup>, as disposições que definem as obrigações, direitos e deveres a que estão sujeitos os empregadores e empregados (FIGUEREDO *et al.*, 2022).

---

<sup>20</sup> Aprendizagem por máquina, em tradução livre.

<sup>21</sup> Órgão do poder executivo cuja competência aborda a definição da política e diretrizes à criação e manutenção do emprego e renda, fiscalização das condições laborais de segurança e saúde, atuação



No caso específico dos vasos de pressão a regulamentação legal, é a Norma Regulamentadora número 13, NR-13, do Ministério do Trabalho e Previdência (EMPREGO, 2022) (BRASIL, 2022a), que determina, dentre vários itens, como os vasos de pressão devem ser categorizados, de forma que, considerando a respectiva categoria, ações de treinamento, inspeção e operação sejam implementadas.

Os vasos de pressão<sup>22</sup>, conforme TELLES (1996), são equipamentos destinados a contenção de fluido (ou fluidos) no seu interior, estando esta(s) substância(s) submetidas a pressão diferente da atmosférica (podendo ser pressão manométrica positiva ou negativa). O material de fabricação destes equipamentos pode ser metálico, não metálico, ou combinação destes. Em termos da forma e posição de instalação, há uma grande variação de configurações, decorrente da necessidade do equipamento atender às especificações e requisitos do processo ao qual se destina.

O código ASME é o mais utilizado para fins de projeto e a fabricação de caldeiras e vasos de pressão (incluindo o controle da conformidade aos requisitos da norma).

Os fatores considerados para se realizar a categorização à NR-13 são: (a) Pressão Máxima de Operação (PMO); (b) Volume armazenado; (c) características químicas do fluido armazenado. A multiplicação dos dois primeiros corresponde a um indicativo da energia armazenada, no aspecto físico, enquanto que o último fator se refere à energia no aspecto químico (FIGUEREDO *et al.*, 2022).

---

na política salarial, formação, capacitação e desenvolvimento dos profissionais, dentre outras ações. Possuiu diversas denominações desde a criação (1930), sendo elas:

Ministério do Trabalho, Indústria e Comércio (MTIC), em 26 de novembro de 1930 (criação)

Ministério do Trabalho e Previdência Social, em 22 de julho de 1960

Ministério do Trabalho, em 1 de maio de 1974

Ministério do Trabalho e da Previdência Social, em 11 de janeiro de 1990

Ministério do Trabalho e da Administração Federal, em 13 de maio de 1992

Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), em 1 de janeiro de 1999

Ministério do Trabalho e Previdência Social (MTPS), em 2 de outubro de 2015

Ministério do Trabalho (MTb), em 12 de maio de 2016[4][5](extinto em 2019)

Ministério do Trabalho e Previdência (MTP), em 28 de julho de 2021 (recriação)

Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), em 1 de janeiro de 2023

<sup>22</sup> Conforme a NR-13 são vasos de pressão os equipamentos que: (a) cujo produto P.V seja superior a 8 (oito), onde P é o módulo da pressão máxima de operação em kPa e V o seu volume interno em m<sup>3</sup>; ou, (b) contenham fluidos da classe A, especificados na alínea “a” do subitem 13.5.1.1.1, independente do produto P.V; ou, (c) recipientes móveis com P.V superior a oito, onde P é o módulo da pressão máxima de operação em kPa, ou com fluidos da classe A, especificados na alínea “a” do subitem 13.5.1.1.1. A NR-13, versão de 04/07/2022 (que foi usada como referência bibliográfica para esta tese), está anexa, na forma integral.

A finalidade desta categorização dos vasos de pressão é possibilitar que as ações de instalação, operação, manutenção e inspeção sejam realizadas conforme o risco operacional potencial que apresentam. Desta forma, exemplificando, os equipamentos que apresentam maior risco devem ser submetidos às inspeções com frequência maior que aqueles de menor potencial de risco (STABILITY; PATTERNS, 2014) (COMMISSION; ENTERPRISE; FIF, 2004)

Determinando a PMO como sendo um dos critérios a ser utilizado para a categorização dos vasos de pressão, a legislação brasileira inovou, visto que não foi identificado nenhum outro país adotando tal grandeza<sup>23</sup>

A NR-13 define a PMO como sendo a máxima pressão manométrica esperada durante a operação normal do equipamento ou sistema, todavia não indica como esta deve ser determinada, o que resulta, em alguns casos, na adoção de valores elevados da pressão de operação como sendo a PMO, resultando em uma “supercategorização”<sup>24</sup> do equipamento, implicando, dentre outros aspectos, em maiores custos.

Não foi identificado na literatura nacional nenhum estudo que trate da forma como deve ser realizada esta determinação da PMO, o que indica a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia capaz de suprir esta lacuna, ao mesmo tempo que possibilitará a adequada identificação do risco operacional do equipamento.

O resultado deste trabalho, ao mesmo tempo que habilita o cálculo estatisticamente consistente da PMO, possibilita a identificação dos eventos potencialmente anômalos do processo, o que permite a implementação de estudos e análises de causas especiais indesejadas, que podem comprometer as condições de segurança, estabilidade e qualidade do processo e/ou produtos.

Esta tese está dividida em capítulos, e respectivas subdivisões, de forma que o conteúdo do trabalho esteja apresentado de forma estruturada e coesa, sendo o tema abordado adequadamente.

O presente capítulo 1, denominado INTRODUÇÃO, contém: (a) a introdução, propriamente dita; e, (b) as justificativas e relevâncias do estudo. Está apresentado o cenário da utilização dos vasos de pressão no tocante à categorização destes

---

<sup>23</sup> São usadas a Pressão de Projeto ou a Pressão de Atuação do Dispositivo de proteção contra a sobrepressão.

<sup>24</sup> “Supercategorização” corresponde à condição em que ao vaso de pressão é atribuída uma categoria da NR-13 maior que aquela que poderia ser considerada, caso fossem adotados os critérios corretos (potencialmente uma PMO obtida da condição operacional real).

equipamentos em termos da Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) e, aos aspectos da segurança na operação e estatísticas sobre acidentes associados à operação destes tipos de equipamentos, o que justifica a relevância o objeto em estudo. Também neste capítulo 2 são abordados o objetivo geral e os objetivos específicos, indicando a finalidade deste documento e os propósitos específicos perseguidos, estando, ainda, estes indicados, ao longo do trabalho, indicados à medida que são atingidos.

No segundo capítulo, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, são discutidos os aspectos dos trabalhos, estudos, entrevista, literatura técnica e literatura normativa, referentes ao tema, tendo como finalidade a apresentação robusta e concisa, de forma a permitir uma inserção adequada no assunto, à luz do estado da arte, bem como, no âmbito histórico da normalização brasileira pertinente.

No capítulo três são detalhados os MATERIAIS E MÉTODOS, estando descritas as etapas elaboradas e realizadas, com a finalidade de processarem os dados de entrada e obterem os resultados associados ao objetivo geral e objetivos específicos. Descrição é feita sobre o empreendimento industrial do qual os dados foram obtidos, em termos das características de produção e qualidade das informações operacionais.

O quinto capítulo, denominado RESULTADOS E DISCUSSÃO, corresponde à implementação da metodologia proposta é aplicada no cálculo da pressão máxima de operação, a partir da pressão de operação de 20 vasos de pressão, estando as estatísticas obtidas apresentadas e consolidadas em figuras e/ou quadros. Também alinhado a um dos objetivos específicos, é exibido um estudo de caso em que a aplicação da norma de categorização dos vasos de pressão pode derivar condições diferentes entre si. Em continuidade é feita a DISCUSSÃO, no qual é realizada a análise dos dados, apresentando a adequação e viabilidade da metodologia proposta, e os ganhos potenciais.

A CONCLUSÃO, presente no capítulo seis, onde se discorre que a metodologia, ao ser aplicada nos dados operacionais dos vasos de pressão, conseguiu determinar a PMO estatisticamente adequada à categorização dos equipamentos junto à NR-13, representando uma contribuição tanto no aspecto técnico (atualizaçã, como na vertente empresarial.

Já no Capítulo sete são propostos pontos a serem desenvolvidos em estudos futuros. Também indica itens que serão enviados ao Ministério do Trabalho e Emprego, como contribuições/recomendações, para serem avaliados pelo órgão quanto à conveniência de serem introduzidas nas versões futuras da NR-13.

Destaca-se, ainda, que aspectos deste trabalho têm o potencial de serem adotados em outros instrumentos normativos internacionais, e a metodologia será submetida ao processo de obtenção de patente junto ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial).

### 1.1. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O comércio mundial tem se deparado em um processo continuamente crescente de integração, denominado usualmente como globalização, fenômeno este que ocorre mesmo considerando a oposição das novas tendências nacionalistas.

As empresas, desta forma, devem estar buscando evolução e aperfeiçoamento permanente nos seus processos e gestão, para que possam adequadamente suplantar os desafios da competição que não mais está limitada às fronteiras geográficas nem políticas.

No Brasil, as indústrias que possuem vasos de pressão como sendo ativos fundamentais ao processo, principalmente aqueles que são categorizados conforme a NR-13 (BRASIL, 2022b) como de categorias I ou II, precisam que estes equipamentos sejam retirados da operação em intervalos de seis ou oito anos, ou seja, submetidos a paradas de produção, para que inspeções ou serviços sejam realizados.

Percebe-se que ao assim se proceder, para atender ao requisito legal de intervalo máximo entre inspeções, as empresas se defrontam com vários aspectos que impactam negativamente nos resultados financeiros e produtivos, dentre os quais destacam-se: interrupção da produção, perda de produtos, custos de mão-de-obra e materiais para os serviços. Não se pode deixar de destacar, ainda, que o fato de ser realizada a parada e posterior partida, ou seja, momentos em que há variações significativas de energias, eventos ou acidentes podem ocorrer, com potenciais consequências indesejadas.

Portanto, a categorização dos vasos de pressão, que segundo a NR-13 (BRASIL, 2022b) deve considerar a pressão máxima de operação, volume interno e

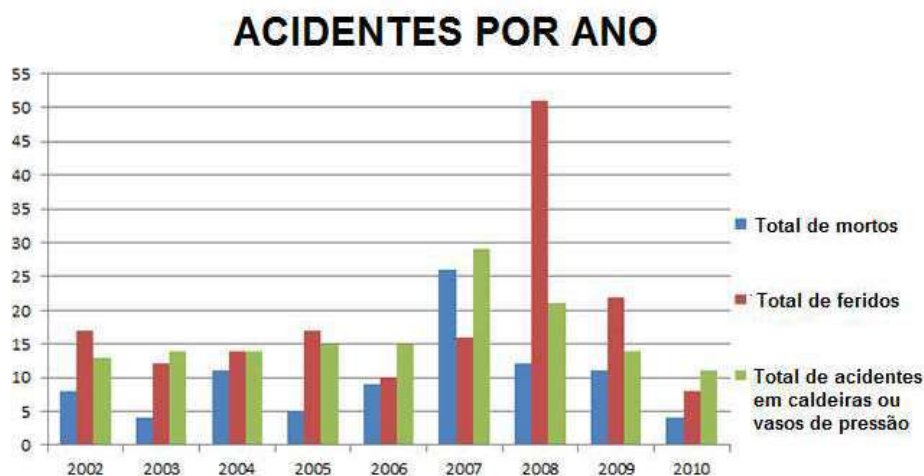
característica química do fluido contido, e que tem como um dos resultados a definição do intervalo máximo permitido entre inspeções, a caso não seja adequadamente realizada, poderá resultar em uma supercategorização, algo que se tem percebido ocorrer em uma grande parcela de empresas.

Portanto, há um enorme potencial e latente ganho empresarial que justifiquem a reavaliação da forma como os vasos de pressão são categorizados e este cenário é o que o presente trabalho busca contribuir.

Desta forma, além de propor uma metodologia estatística à categorização dos vasos de pressão, alinhada aos mais recentes conceitos, ter-se-á, também, como potencial resultado a colaboração à atualização da NR-13 perante às suas correlatas internacionais.

Não há como deixar de discorrer quanto à importância da adequada manutenção e inspeção dos vasos de pressão, bem como das caldeiras, para que acidentes de trabalhos sejam evitados. Segundo o *The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors*<sup>25</sup>, através do *The National Board Incident Report*<sup>26</sup> (INSPECTORS, 2015), que é a mais recente estatística disponível, ocorreram, conforme Figura 1, os seguintes quantitativos de eventos nos Estados Unidos no período de 2002 até 2010.

Figura 1 - Acidentes em caldeiras e vasos de pressão, nos Estados Unidos



Fonte: (INSPECTORS, 2015)<sup>27</sup>

<sup>25</sup> O Conselho Nacional de Inspetores de Caldeiras e Vasos de Pressão, em tradução livre.

<sup>26</sup> O Relatório de Incidentes do Conselho Nacional, em tradução livre.

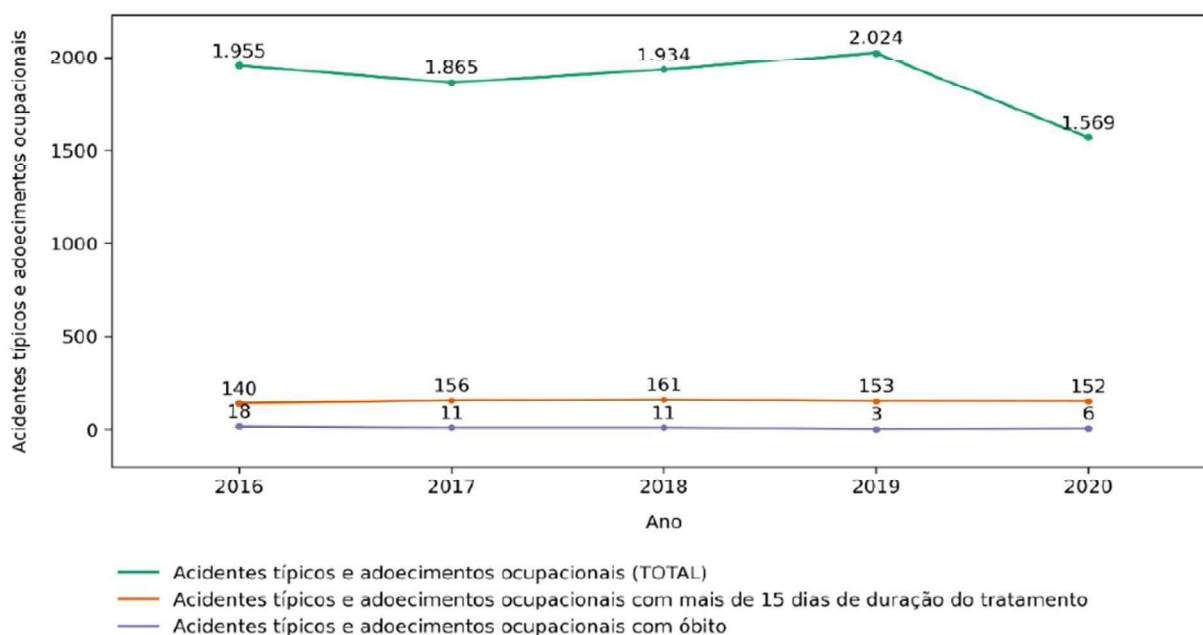
<sup>27</sup> A indisponibilidade de dados atualizados impossibilitou a apresentação de informações recentes sobre os eventos.

Enquanto que nos Estados Unidos as informações sobre acidentes em caldeiras ou vasos de pressão disponíveis em 2017 referem-se a eventos anteriores a 2010, no Brasil as fontes de consulta disponíveis são escassas.

Quando da implementação da versão de 2018 da NR-13, o MTP (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021), o citado órgão disponibilizou a estatística sobre acidentes típicos relacionados a caldeiras e vasos de pressão, podendo ser constatada a importância da implementação e evolução das condições de segurança nos equipamentos. Digno de nota, infelizmente, é que estes dados podem não representar adequadamente o cenário laboral, decorrente da subnotificação que, como se sabe, existe.(CORREIA, P. R. L; ASSUNÇÃO, 2003).

Na Figura 2 constata-se que há uma razoável, e infeliz, estabilidade na quantidade de acidentes associados às caldeiras e vasos de pressão, ocorrendo, em média, o registro formal de uma morte bimensalmente, enquanto que a cada duas semanas um trabalhador(a) fica afastado do trabalho por mais de 15 dias, também por acidentes nos citados equipamentos.

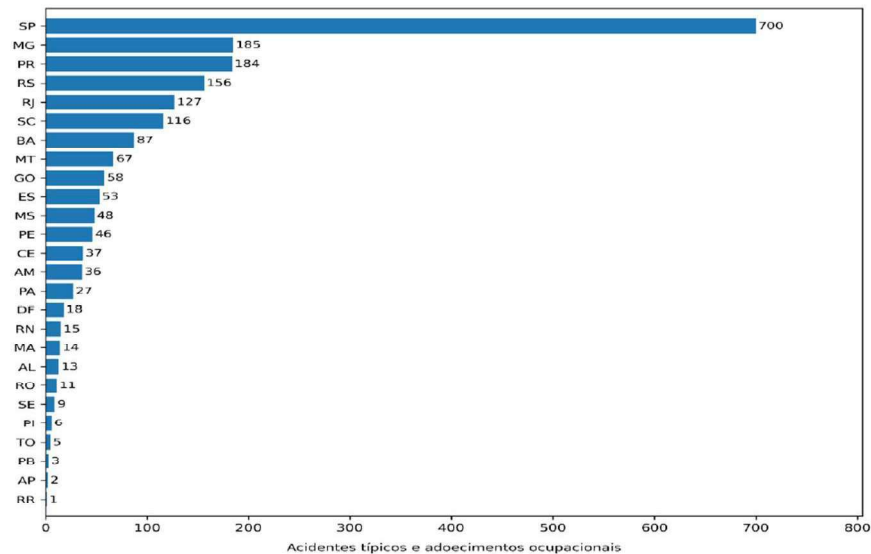
Figura 2 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, por ano - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

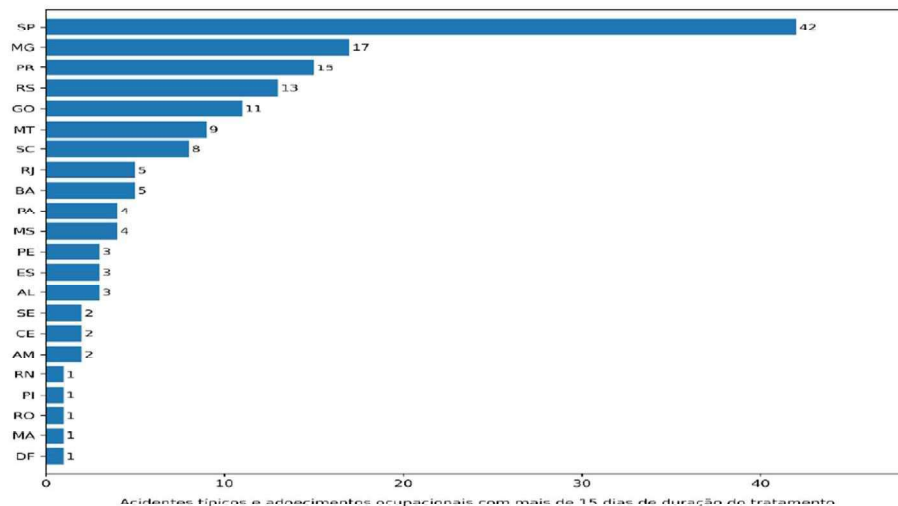
A predominância da maior quantidade de ocorrência de acidentes nos estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG), vista nas Figura 3 e Figura 4, decorre, naturalmente, do maior nível de industrialização. Também é verificado que, à medida que há menor desenvolvimento, há uma redução na quantidade de registros.

Figura 3 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por UF - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

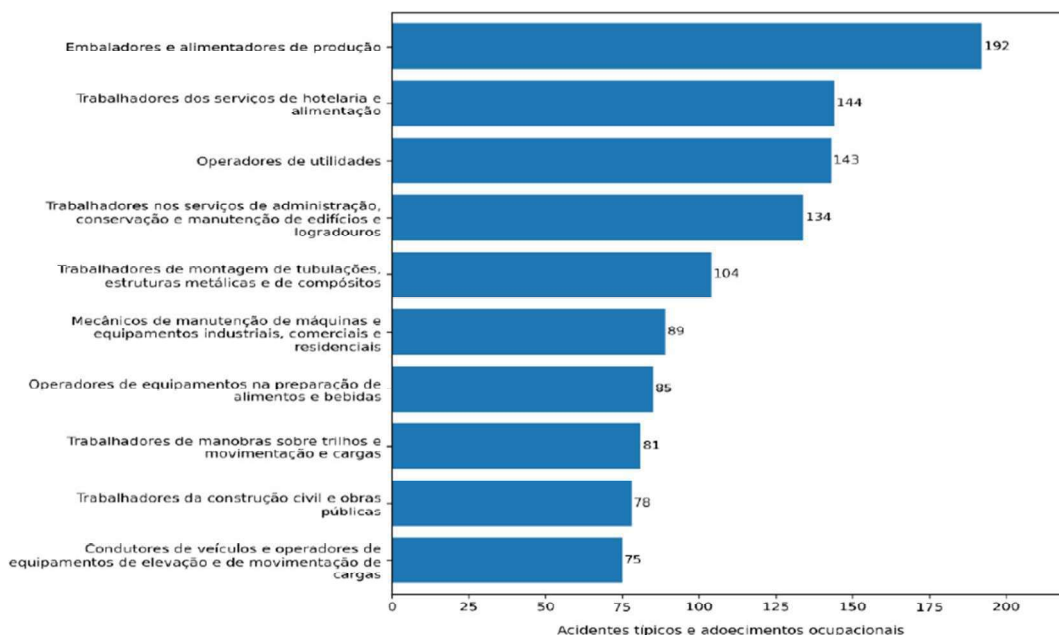
Figura 4 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por mais de 15 dias - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

Sob a ótica do CBO, Figura 5, constata-se a ocorrência de maior quantidade de registros para os(as) trabalhadores(as) atuantes nas operações de embalagem e alimentadores de produção, seguido pelos profissionais dos serviços de hospitalidade e, depois, pelos operadores de utilidades.

Figura 5 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais, em 2019, por CBO<sup>28</sup> - Relacionados a caldeiras e vasos



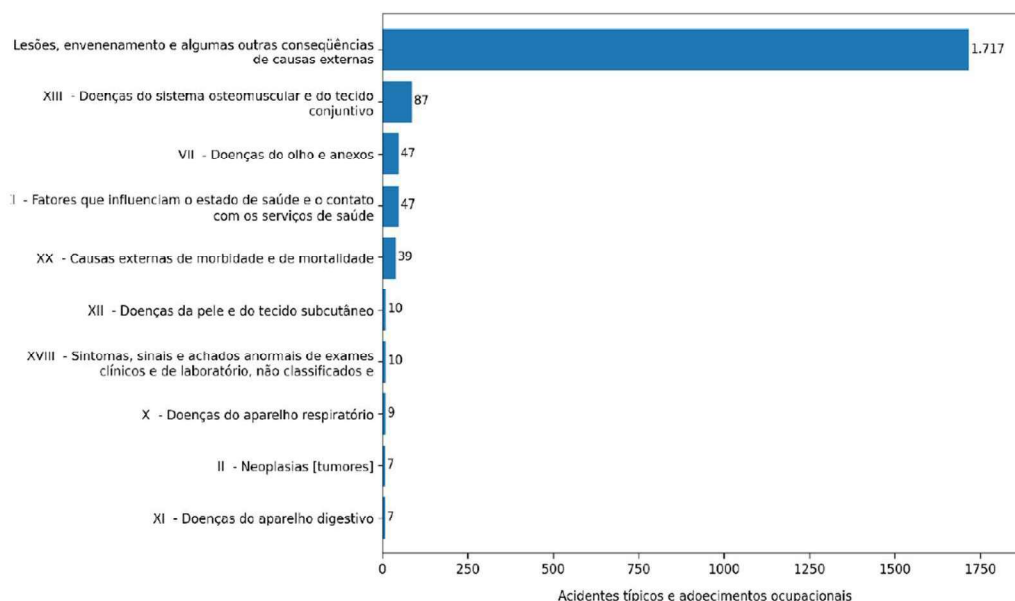
Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

A consequência da liberação, acidental ou não, do fluido contido nos equipamentos é constatada na Figura 6 sendo observado o efeito, físico e/ou químico, da substância no organismo do empregado(a), sendo, esta liberação, praticamente, o acidente-típico e a causa de envenenamento (Figura 6) ou lesões (principalmente nos dedos, mãos ou olhos - Figura 7).

<sup>28</sup> Código Brasileiro de Ocupação

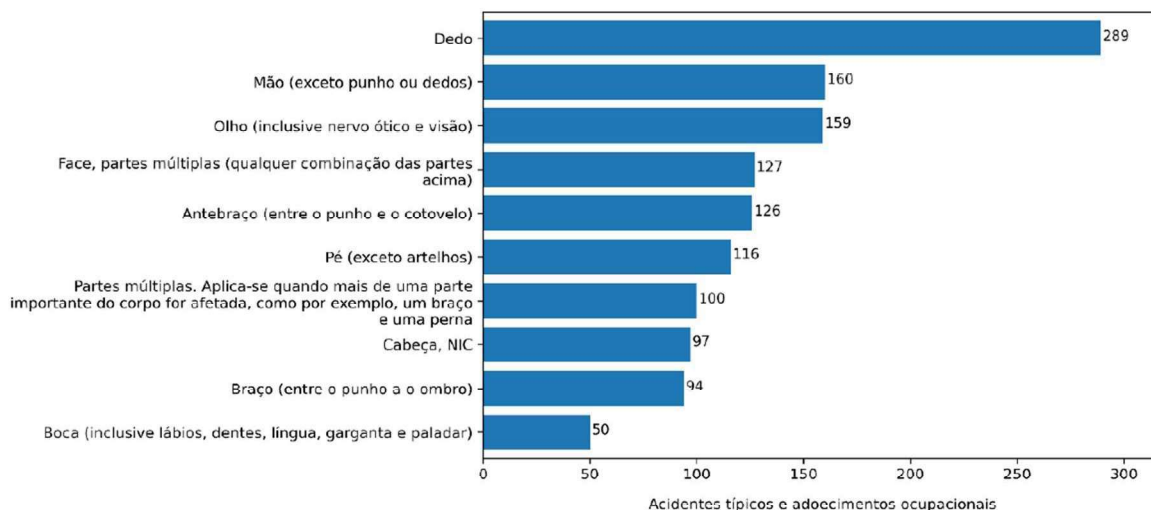


Figura 6 - Acidentes por capítulo da CID<sup>29</sup> - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

Figura 7 - Acidentes típicos e adoecimentos ocupacionais em 2019 - Partes do corpo atingidas - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão

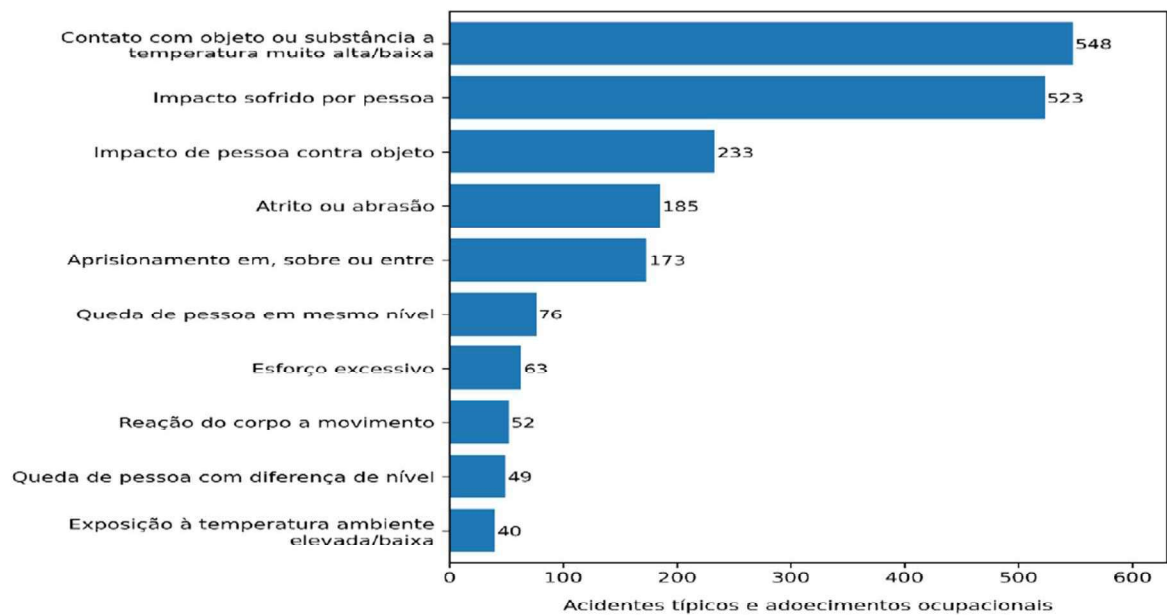


Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

<sup>29</sup> Código estatística internacional de doenças e problemas relacionados com a saúde, publicado pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Usualmente conceituada como Código Internacional de Doenças.

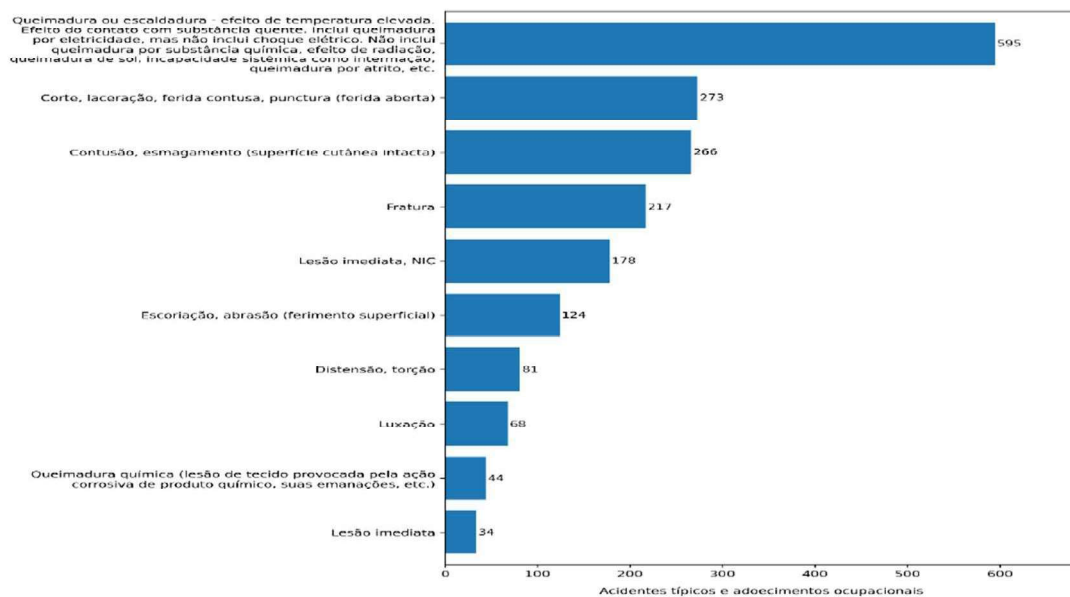
Nas Figura 8 e Figura 9, também pode ser constata a consequência do contato do fluido com o corpo do trabalhador(a). Evidencia-se, ainda, nas figuras, o efeito do aspecto térmico (alta ou baixa temperatura) do fluido.

Figura 8 - Situação geradora - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

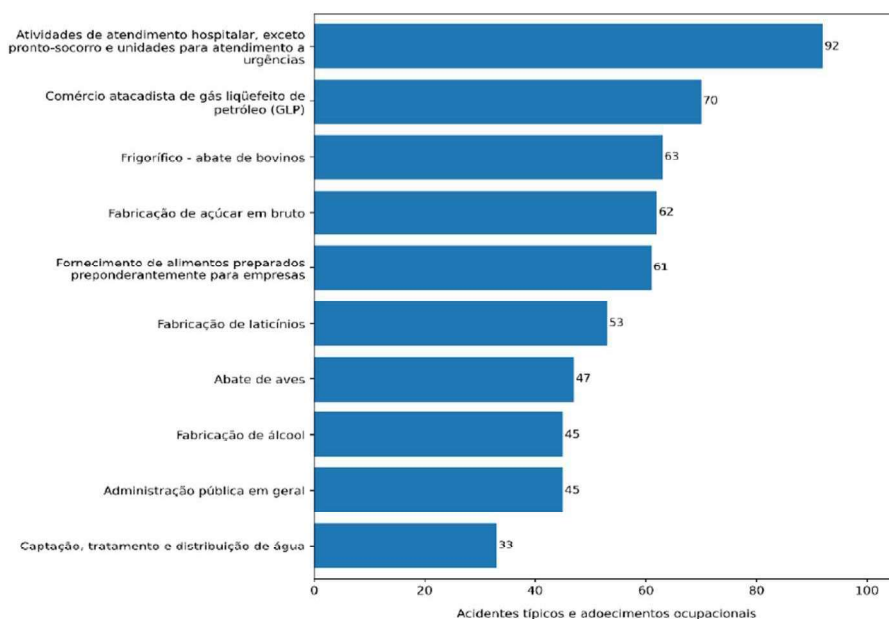
Figura 9 - Natureza da lesão - Relacionados a caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

A figura 10 indica que, provavelmente decorrente da formação e/ou cultura profissional, o registro dos acidentes de trabalho é mais frequente nas atividades de saúde. Os profissionais que labutam no comércio de GLP e aqueles que atuam em frigoríficos, apresentam, também, eleva ocorrência de acidentes originados de caldeiras ou vasos de pressão.

Figura 10 - Divisão por subclasses de CNAE<sup>30</sup>

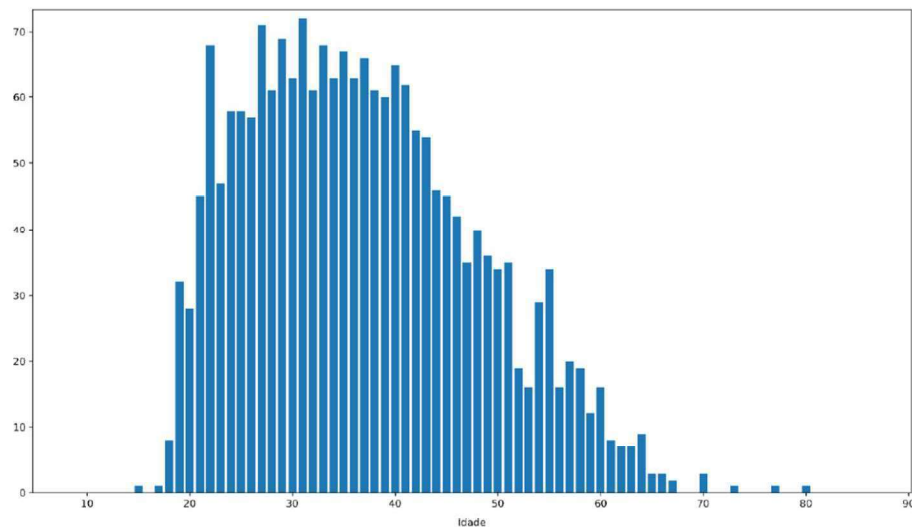


Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

A distribuição quantitativa das ocorrências dos acidentes com caldeiras e vasos de pressão concentra-se, conforme mostra a Figura 11, na faixa etária entre 20 a 40 anos, indicando, provavelmente, um grau elevado de inexperiência laboral ou insuficiência no treinamento do operador(a).

<sup>30</sup> Código Nacional de Atividade Econômica.

Figura 11 - Divisão por idade do trabalhador



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

Mesmo tendo pouca informação por meio da imprensa, notícias sobre acidentes são eventualmente divulgados, notadamente quando envolvem empresas de grande porte ou quantidade significativa de feridos ou mortos. Apresentam-se, a seguir, alguns registros obtidos na internet.

Na Figura 12 estão apresentadas fotografias da consequência da explosão de um vaso de pressão de um conjunto motor-compressor-vaso de pressão, que pode ser observado em oficinas mecânicas e borracharias. Consta-se a razoável deformação na estrutura do vaso de pressão e o deslocamento do conjunto motor-compressor, caracterizando o potencial consequência caso uma pessoa fosse atingida.

Figura 12 - Situação em que ficou o vaso de pressão após o acidente



Fonte: (CALTEC, 2012)

Em 2017, conforme (G1.COM, 2017), ocorreu a explosão de um cilindro de pressão (vaso de pressão), que resultou em três fatalidades, em uma fábrica

localizada em Andradina, SP. Segundo as informações, o acidente aconteceu em equipamentos novos, tendo a estrutura desabado, o que demonstra a quantidade de energia liberada.

Outro acidente referente a explosão de vaso de pressão, está relatado em (NFNOTICIAS.COM.BR, 2018), que descreve o evento que resultou em dois trabalhadores gravemente feridos.

Em termos de explosões em caldeiras, decorrente do grande volume de fluido contido no equipamento, a liberação indesejada favorece a ocorrência de acidentes de grandes proporções, geralmente com óbitos. (CNNBRASIL.COM.BR, 2023), (ALIMENTAÇÃO, 2016) (Figura 13, Figura 14 e Figura 15).

Figura 13 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2023, vista aérea



Fonte: (CNNBRASIL.COM.BR, 2023)

Além da esfera industrial, os acidentes com equipamentos pressurizados acontecem em ambiente residencial, também resultando em ferimentos ou fatalidades, conforme indicam (G1.COM, 2023), (BBC.COM, 2023), (NDTV, 2023), (SAMPI.NET.BR, 2023), o que evidencia a importância a ser dada a estes maquinários.

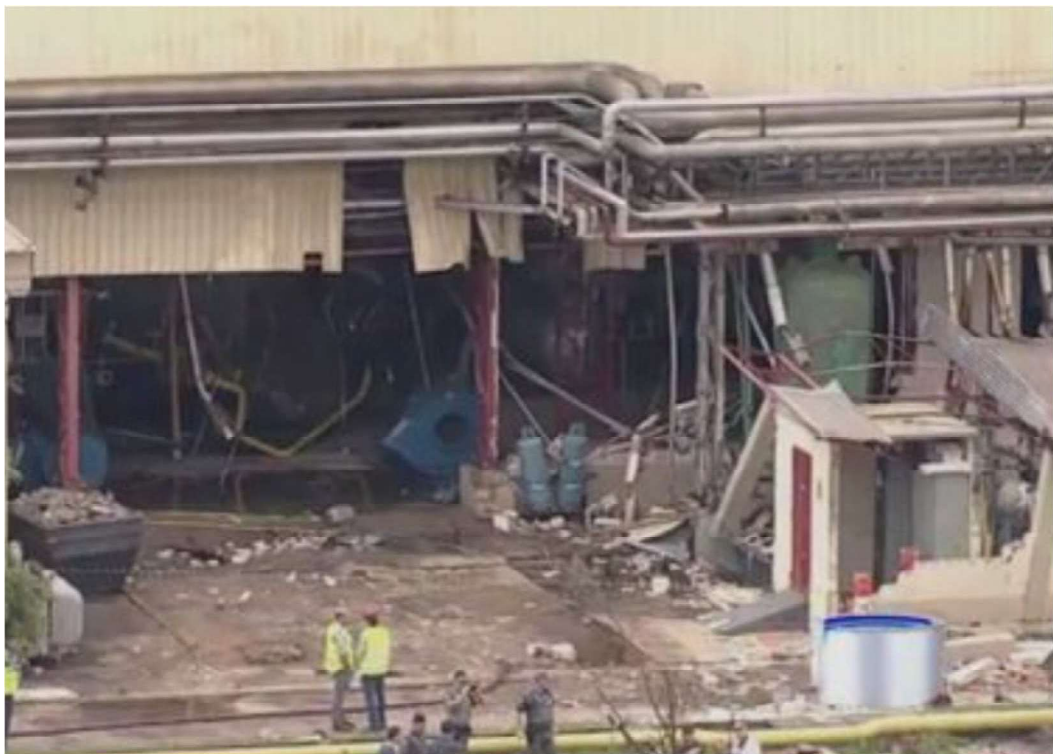


Figura 14 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2023, vista ao nível do solo



Fonte: (CNNBRASIL.COM.BR, 2023)

Figura 15 - Amplitude da explosão da uma caldeira, ocorrida em 2016



Fonte: (ALIMENTAÇÃO, 2016)

As inovações ao conhecimento que este trabalho apresenta são:

- a) Propor um critério de classificação dos vasos de pressão, considerando o perfil da pressão de operação, associando e interrelacionado este parâmetro operacional às características: (i) operacionais (pressão, regime de trabalho); (ii) mecânicas (tensões mecânicas, deformações); (iii) estatísticas (média, moda, curtose, normalidade).
- b) Propor os parâmetros operacionais (pressão, volume, tipo de fluido) e metodologia a ser utilizada em uma norma internacional que possibilite a adequada categorização dos vasos de pressão, para fins de definição dos intervalos de pressão, possibilitando uma uniformização global, assim como, permitindo o aumento da produção e a potencial redução: (i) dos custos operacionais. (ii) da geração de resíduos ambientalmente negativos; (iii) ocorrência de falhas/acidentes originados de erro de execução das atividades de inspeção/manutenção.
- c) Sugerir uma classificação qualitativa dos *outliers*, possibilitando a adequada utilização, processamento e interpretação dos dados sob análise.
- d) Implementar na metodologia apresentada por D'Agostino (D'AGOSTINO, 1990) etapas de análise e eliminação de dados que não sejam aplicáveis ao estudo, possibilitando a obtenção da distribuição real dos dados, permitindo a constatação da normalidade, ou não normalidade. Também é proposta uma métrica quantitativa para a verificação da convergência da distribuição dos dados à distribuição normal gaussiana.

Destaca-se, ainda, que a trajetória acadêmica e profissional do autor, tendo trabalhado em inúmeras empresas, em diversos ramos industriais (óleo e gás, combustíveis, alimentícia, siderúrgica, dentre outras), possibilitou constatar as dúvidas e incertezas quando da determinação da pressão máxima de operação, o que foi o propulsor para a pesquisa e desenvolvimento desta proposta de metodologia, na qual tratou de associar os aspectos da robustez estatística e mecânica, à celeridade, praticidade e aplicabilidade necessárias aos processos empresariais.

Também é digno de nota que a própria NR-13, conforme será discutido em seção deste documento, o qual só em 2017 incluiu uma definição da pressão máxima

de operação, tendo esta definição sido alterada na versão 2019, mas ainda com potencial de ser melhor definida, o que é o objetivo deste trabalho.

Em termos de contribuição do PPGEM, pode ser constatado que este trabalho, além de fornecer o histórico da NR-13 (com informações e descrição de fatos que não estão disponíveis na literatura), disponibiliza aos pós-graduandos do programa (bem como aos próprios graduandos e demais profissionais que têm atividades nas quais os vasos de pressão estão presentes) conhecimento sobre os equipamentos pressurizados, seus riscos e metodologia adequada à definição do intervalo entre inspeções. Também são indicadas potenciais linhas de pesquisa, que oportunizarão a evolução e aplicação do conhecimento.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Propor metodologia para a categorização dos vasos de pressão, através da engenharia de confiabilidade, considerando as condições operacionais, de forma a otimizar a execução do plano de inspeção dos equipamentos, alinhado aos aspectos de segurança, integridade estrutural, continuidade operacional e custos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- (i) Descrever a evolução da Norma Regulamentadora número 13, identificando os principais fatores técnicos que determinaram as modificações;
- (ii) Analisar as normas internacionais para a determinação da categorização dos vasos de pressão e para a definição do plano de inspeção;
- (iii) Propor uma normalização internacional para a determinação da categorização dos vasos de pressão, baseado na pressão máxima de operação, volume e fluido contido no equipamento;



- (iv) Analisar o comportamento da variável pressão de operação (PO) ao longo do período de 10 anos, em um conjunto de 10 vasos de pressão, instalados em uma planta de óleo e gás;
- (v) Calcular o valor da pressão máxima de operação de 10 vasos de pressão;
- (vi) Identificar, utilizando a metodologia proposta, aplicando-a a um estudo de caso de um vaso de pressão, os eventos raros que ocorreram durante a operação, e validando a efetividade do proposto neste trabalho, por meio da constatação, através da verificação dos registros operacionais, de que os eventos raros realmente foram originados de causas especiais (não normais).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A identificação da produção acadêmica científica foi realizada sob duas vertentes: quantitativa e qualitativa-quantitativa, sendo a primeira realizada por meio de uma análise de natureza bibliométrica<sup>31</sup>, estando os resultados apresentados no item 3.1, bem como, também estão presentes neste item, notadamente em termos: (i) da evolução quantitativa ao longo do tempo; (ii) quantidade de artigos por país do(s) autore(s); (iii) origem da entidade produtora da publicação.

Neste contexto qualitativo-quantitativo, observou-se no artigo de Amin et al (AMIN; KHAN; ZUO, 2019), no qual o autor aborda a literatura referente à falhas e confiabilidade em sistemas e processos industriais, que, dentre outros aspectos, os artigos publicados possuem as seguintes características:

- (a) foco na análise da confiabilidade (*reliability analysis*); (Figura 16).
- (b) uma crescente geração de documentos ao longo do período 1959-2018; (Figura 17).
- (c) concentração de autores americanos ou chineses; (Figura 18).
- (d) artigos/estudos originados da “Academia”, com pequena participação do ramo “Industrial” (Figura 19).

A academia é a origem da maioria das publicações. Verifica-se que o tema é presente entre os estudiosos, porém seria interessante uma maior presença do campo empresarial, principalmente para possibilitar a evolução do binômio academia-empresa.

Mesmo havendo, conforme Figura 16, uma prevalência do tema análise da confiabilidade (*reliability analysis*), também pode ser observada a presença dos tópicos: manutenção preventiva (*preventive maintenance*); inspeção (*inspection*) e inspeção periódica (*periodic inspection*); gerenciamento da integridade (*integrity mangement*), manutenção baseada na condição (*condition-based maintenance*); caracterizando a importância e atualidade do presente tema. (Figura 17)

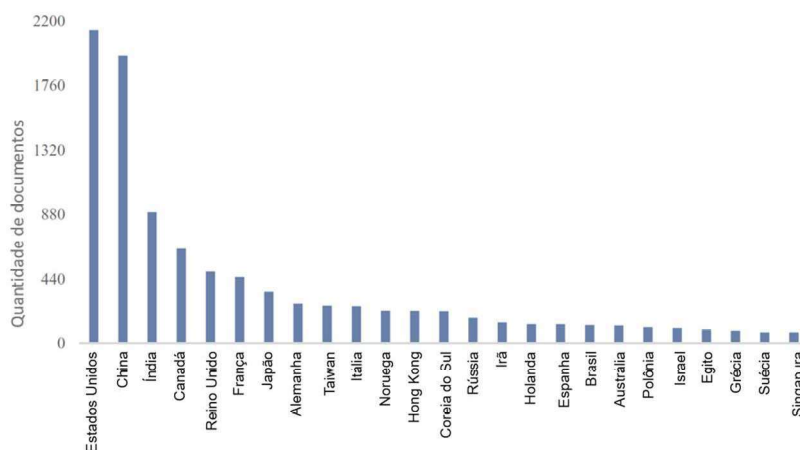
---

<sup>31</sup> Conjunto de técnicas que objetivam analisar quantitativamente a produção acadêmica científica, em relação a uma área de conhecimento.



participação na economia mundial (8ª maior economia, conforme o FMI, Fundo Monetário Internacional)(IMF.ORG, 2014)<sup>33</sup> (Figura 18).

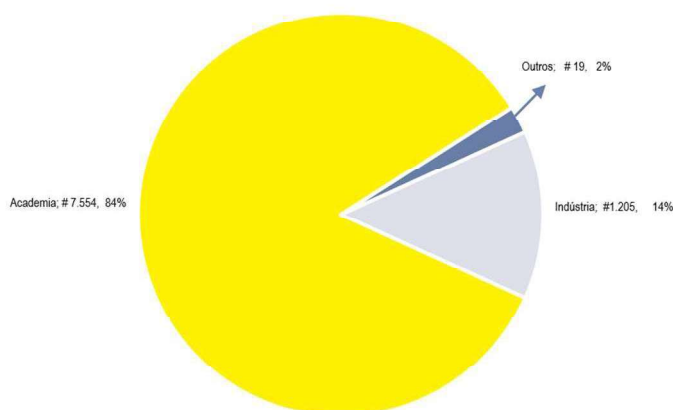
Figura 18 - Quantidade de publicações por país do(s) autor(es)



Fonte: Adaptado de (AMIN; KHAN; ZUO, 2019)

A Academia é a origem da enorme maioria das publicações. Verifica-se, portanto, que o tema é presente entre os estudiosos, porém seria interessante a maior presença do campo empresarial, principalmente para possibilitar a evolução do binômio Academia-Indústria (Figura 19).

Figura 19 - Natureza da entidade publicadora



Fonte: (AMIN; KHAN; ZUO, 2019), com adaptações.

<sup>33</sup> IMF é o acrônimo de *International Monetary Fund*. Fundo Monetário Internacional, FMI, em tradução livre.

## 2.1 ASPECTOS QUANTO À PERIODICIDADE DA INSPEÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO<sup>34</sup>

Em termos dos documentos técnicos e legais aplicáveis, a periodicidade e tipo das inspeções dos vasos de pressão podem ser planejadas baseadas em: (a) aspectos legais; (b) normas técnicas, estas propostas por organismos tais como API<sup>35</sup>, sendo usualmente baseadas no RBI<sup>36</sup>.

ZHONG *et al.* (2024) apresenta um estudo em que propõe um modelo híbrido para avaliar a acurácia da variação da confiabilidade de um sistema, considerando a variação do intervalo entre as manutenções.

Como Bradley *et al.* (2021) descrevem, mesmo sendo baixa a probabilidade de ocorrência de eventos em vasos de pressão, a perda da integridade estrutural e consequente liberação do fluido contido no equipamento, apresenta elevados impactos negativos e sociais, decorrentes da energia envolvida<sup>37</sup>.

Considerando a importância perante os resultados operacionais, financeiros e legais, o planejamento de manutenção e inspeção em vasos de pressão tem sido estudado por vários pesquisadores. Haladuick e Dann (2018) propuseram um modelo matemático, no qual a expectativa do resultado dos custos de uma instalação que possui vasos de pressão é influenciada pelo plano de manutenção e operação.

Vários autores estudam o planejamento da inspeção considerando o RBI. Um modelo matemático bi-objetivo foi apresentado por Javid (2021), no qual um algoritmo foi implementado para propor um plano de manutenção que garanta a integridade estrutural dos equipamentos, buscando reduzir o custo sem elevação do risco.

É notória a busca na evolução que é feita objetivando o aumento da segurança dos processos, sendo propostos metodologias dinâmicas para tal finalidade. LEE, J.; CAMERON; HASSALL (2024) apresentaram estudos apontando os recursos e limitações, quando aplicadas em sistemas de processos complexos.

Javid *et al.* (DABAGH *et al.*, 2022) apontaram que as falhas nos equipamentos de processo na indústria petroquímica podem ocasionar resultados catastróficos às comunidades próximas e ao meio ambiente, indicando que a implementação da RBI

---

<sup>34</sup> Adaptado do artigo publicado pelo autor na *Revista Observatório de La Economia Latinoamericana* (SOUSA, R. A. F. DE *et al.*, 2024).

<sup>35</sup> *American Petroleum Institute* (Instituto Americano do Petróleo, em tradução livre).

<sup>36</sup> *Risk-Based Inspection*. (Inspeção Baseada em Risco, em tradução livre.)

<sup>37</sup> Energia de origem mecânica (entalpia) e energia química (reatividade ou toxicidade).

permite uma redução dos custos e riscos, decorrente da robustez do plano de inspeção.

As causas mais comuns de falhas em reatores (vasos de pressão) indicadas por Khaleel e Simonen (KHALEEL; SIMONEN, 2000) são a fratura frágil e a fadiga, tendo os autores descrito um modelo para predição da probabilidade de falha em equipamentos, incluindo os efeitos da inspeção em serviço e erros no dimensionamento. Os autores destacam que a acurácia dos ensaios não destrutivos e a probabilidade de detecção das falhas POD<sup>38</sup> são fatores que impactam na capacidade do plano de inspeção atingir as metas de confiabilidade desejadas ou requeridas. Estudos semelhantes foram também realizados por Niu *et al.* (ZHANG, X.-P. N. S.-P. Z. J.-C. H. Y. A. K. S. L., [s.d.]).

No Japão, regulamentações foram implementadas nos anos 2010, baseadas na mecânica da fratura probabilística, na avaliação da integridade de vasos de pressão e tubulações (ONIZAWA; NISHIKAWA; ITOH, 2010).

Song *et al.*, (2021) ainda usando os conceitos da RBI, apresentam uma estratégia que pode ser aplicada na inspeção de tubulações de elevada energia, tendo considerado que a falha para fins da RBI corresponde à perda de contenção do fluido, resultando em vazamento à atmosfera, quer seja por ocorrência de furo, presença de trinca ou ruptura do equipamento (LIAO *et al.*, 2023) (PU *et al.*, 2023).

Utilizando conceitos de probabilidade e simulações, Thamaraiselvi e Vishnuvardhan (2020) realizaram uma revisão bibliográfica abordando estudos e constataram que duas metodologias existem na análise dos vasos de pressão submetidos a choques térmicos pressurizados: (a) análise determinística; (b) análise probabilística. Golubović *et al.* (GOLUBOVIĆ *et al.*, 2018) propôs uma nova metodologia de avaliação da integridade de vasos de pressão baseada na análise de riscos.

Sob outra perspectiva, mas com a mesma finalidade de elaborar plano de inspeção em equipamentos industriais, pesquisas e implementações têm sido realizadas associadas à crescente presença da automação e capacidade de coleta de dados, processamento e atuação, em tempo real, dos parâmetros operacionais.

Azamfirei *et al.* (AZAMFIREI; PSAROMMATIS; LAGROSEN, 2023) descrevem a bem-sucedida utilização da inspeção *in-line* (ao longo do processo produtivo, em

---

<sup>38</sup> *Probability Of Detection*. (Probabilidade de Detecção, em tradução livre.)

tradução livre) na verificação da qualidade. Podem ser previstos resultados similares aos processos industriais e acompanhamento operacional dos equipamentos, principalmente as grandezas: pressão, temperatura, vazão e taxa de corrosão.

Em aplicações na determinação de estratégias para a manutenção de turbinas eólicas flutuantes offshore, Li *et al.* (2022) propõem a implementação de inspeção na condição real-time. Mohamed *et al.* destacam a importância da qualidade dos dados a serem utilizados na automação da inspeção.

Tendências mais atuais, correspondendo ao desenvolvimento de gêmeos digitais, foram também discutidas por VanDerHorn *et al.* (2022), considerando a variabilidade das condições operacionais dos vasos de pressão, tendo focado em termos da fadiga metalúrgica.

Ju e Wang (2022) destacam a importância da garantia de integridade estrutural dos vasos de pressão, indicando a necessidade de implementar metodologia adequada para: (a) coleta de dados operacionais; (b) registro e análise das informações das inspeções realizadas.

Uma matriz de risco proposta por Sedmak *et al.* (2016), aplicável aos vasos de pressão, considera os fatores: saúde (referente ao impacto negativo decorrente da liberação indesejada do fluido contido no equipamento), segurança (acidentes), meio ambiente, empresarial e implicações criminais (legais).

Zhang *et al.* ([s.d.]) indicam a importância da utilização dos dados históricos para a avaliação e acompanhamento do desempenho dos sistemas ou equipamentos, sob uma perspectiva de custo-benefício, associado a um planejamento baseado na RBI.

Por meio de uma revisão bibliográfica, Syan e Ramsoobag (2019) indicam que a otimização da manutenção envolve a decisão sobre problemas complexos, com eventuais critérios conflitantes, fato presente quando é considerada a elaboração do plano de manutenção ou inspeção, que apresenta impactos negativos no tocante à continuidade operacional e elevação dos custos industriais.

Em termos dos elementos sensores coletores dos transmissores de sinais, Wu (WU *et al.*, 2024) descreve a importância da adequada manutenção, para que falhas sejam evitadas, bem como, propõem metodologia para avaliar o desempenho dos citados instrumentos.

Alinhado às modernas técnicas de monitoramento, vários autores (Rachman, 2019) descrevem a aplicação da técnica *machine learning*<sup>39,40</sup>, indicando a tendência da utilização e avaliação contínua dos dados históricos dos equipamentos/sistemas (MENSAH; SRIRAMULA, 2023).

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DAS NORMAS DE CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO<sup>41</sup>

A determinação da periodicidade e tipo de inspeção dos vasos de pressão varia conforme a legislação específica de cada país, tendo como fatores usuais a serem considerados para a classificação dos equipamentos: pressão, volume e tipo de fluido.

Existem, todavia, países que possuem instrumentos legais com conceitos específicos quanto às exigências da periodicidade de inspeção.

### a) Legislação da Alemanha:

Conforme Dolan e Frangos (2008), a Legislação Alemã teve a primazia de, em 1974, através do *Unfallverhütungsvorschrift* (do alemão “Regulamento de prevenção de acidentes”, em tradução livre), implementar o termo  $p \times V$  (pressão versus Volume), quantificando a energia acumulada no vaso de pressão, com o objetivo de os classificar, buscando propiciar condições adequadas de segurança à operação dos equipamentos.

Destaca-se, conforme está registrado nos itens que se seguem, que vários países, bem como a Comunidade Europeia, passaram a utilizar o conceito do termo  $p \times V$  para fins de especificar os critérios de projeto ou requisitos quanto à elaboração e execução dos planos de inspeção dos vasos de pressão.

Considerando as características: (a)  $p$ , Pressão de projeto (bar); (b)  $V$ , Volume interno do vaso de pressão (litro); (c) Tipo do fluido; os vasos de pressão são categorizados, em uma matriz de riscos, definindo-se o tipo de inspeção exigida e respectivo intervalo máximo admissível entre inspeções (BETRICHV, 2015).

Esta metodologia de categorização ocorre para os vasos de pressão: (a) transportáveis; ou, (b) não transportáveis, com o termo  $p \times V$  menor que 10.000 bar x

<sup>39</sup> Aprendizado de máquina, em tradução livre.

<sup>40</sup> Parte da Inteligência Artificial (IA) que se ocupa no desenvolvimento de soluções computacionais que sejam capazes de possibilitar a evolução do desempenho de um equipamento/sistema, baseado em dados históricos do próprio equipamento/sistema, ou similar.

<sup>41</sup> Adaptado do artigo publicado pelo autor na *Revista Observatório de La Economia Latinoamericana* (SOUSA, R. A. F. DE *et al.*, 2024).



litro. Se o termo  $p \times V$  for maior que 10.000 bar x litro, o intervalo máximo permitido entre inspeções é fixo.

b) Legislação dos Estados Unidos:

Decorrente da estrutura nacional, cada estado americano possui autonomia para definir a sua própria legislação, limitada por requisitos constitucionais. Sendo assim, há diferenças entre os requisitos no tocante à inspeção dos equipamentos, tanto em termos da frequência, como do tipo de equipamento e tipo de serviço a ser realizado (INSPECTORS, 2013).

A maioria dos estados adota a norma API 510<sup>42</sup> (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2014), que define os seguintes intervalos entre inspeções: (a) exame externo: o menor valor entre cinco anos e o determinado para o exame interno; (b) exame interno: o menor valor entre 10 anos e a metade da vida útil residual.

c) Legislação da Austrália:

A norma australiana AS<sup>43</sup> 4343 (AUSTRALIA, 2014) também utiliza o conceito do produto  $p \times V$ , ao qual são acrescentados coeficientes que alteram este produto (aumentando ou diminuindo). Estes coeficientes são: (a) Fator de compressibilidade e massa ( $F_c$ ); (b) Fator decorrente do tipo de fluido ( $F_f$ ); (c) Fator de instalação ou serviço ( $F_s$ ).

Destaca-se que a pressão a ser considerada é a pressão de projeto e que o uso dos fatores, ao mesmo tempo em que objetiva retratar mais fielmente cada situação, torna mais desafiadora a interpretação e aplicação da norma.

d) Legislação do Brasil:

Desde 1978 o Brasil possui norma legal, denominada Norma Regulamentadora Número 13 (NR-13), que prescreve os requisitos mínimos quanto à segurança na operação dos vasos de pressão e, desde então, uma série de atualizações e revisões foram implementadas (EMPREGO, 2022), sendo a ocorrida em 1994 aquela na qual a metodologia atualmente em vigor foi adotada (BRASIL, 1994) e permanece até a presente data (BRASIL, 2022a).

Dentre todas as legislações pesquisadas e que utilizam o conceito do produto  $p \times V$ , a norma brasileira é a única que adota a Pressão Máxima de Operação como

---

<sup>42</sup> Código de inspeção, reparo e reparo em vasos de pressão e seus dispositivos de proteção contra sobrepressão.

<sup>43</sup> *Australian Standard* (Norma australiana, em tradução livre), que aborda o nível de risco em equipamentos pressurizados.

fator para o termo  $p$ . A NR-13 também considera o tipo de fluido e a estrutura disponível no empreendimento para a gestão e execução da inspeção, denominada de Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos (SPIE)<sup>44</sup>.

e) Legislação do Chile:

Foi localizada nas páginas oficiais da *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile* norma que regulamenta aspectos de segurança referentes a caldeiras, autoclaves e demais equipamentos que utilizam vapor de água (SALUD, 2013), não sendo identificada normativa aplicável aos vasos de pressão.

f) Legislação da Espanha:

O Real Decreto BOE<sup>45</sup> 809/2021 (MINISTERIO DE INDUSTRIA, 2021) é baseado nos mesmos parâmetros e critérios de classificação da norma alemã, salientando-se que, identicamente à sua congênere germânica, o fator  $p$  corresponde à pressão de projeto.

g) Legislação da Europa<sup>46</sup>:

A Comunidade Europeia adota na Diretiva 2014/68/EU<sup>47</sup> (DIRECTIVA 2014/68/UE - PED (PT), 2014) o termo  $p \times V$ , sendo  $p$  correspondendo à pressão de projeto. O aspecto desta regulamentação é que a sua aplicação é restrita às etapas de projeto e fabricação dos vasos de pressão, não abrangendo a operação e manutenção, não determinando as condições requeridas à definição do intervalo entre os exames externos ou entre os exames internos.

h) Legislação da Grã-Bretanha:

O Reino Unido define que é responsabilidade do proprietário dos vasos de pressão a elaboração de planejamento formal, por escrito, desenvolvido por profissional competente, definindo o intervalo entre as inspeções (HEALTH AND SAFETY COMMISSION, 2000), sendo o proprietário dos equipamentos a elaboração do plano de inspeção, competindo ao Estado a função de realizar a fiscalização.

---

<sup>44</sup> Órgão do empreendimento proprietário do(s) vaso(s) de pressão, possuindo recursos (humanos, instrumentos e equipamentos) necessários à realização da programação de inspeção, baseado em procedimentos escritos, certificado por Acreditada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Adaptado de (BRASIL, 2022a)

<sup>45</sup> *Boletín Oficial del Estado* (Boletim Oficial do Estado, em tradução livre), define os requisitos mínimos de segurança exigíveis em instalações industriais, no tocante a equipamentos que operam sob pressão.

<sup>46</sup> Como um aspecto histórico, a versão de 1992 deste Real Decreto (MINISTERIO DE INDUSTRIA, 1992) foi utilizada no Brasil, com adaptações, para a elaboração da revisão de 1994 da NR-13 (BRASIL, 1994), principalmente no tocante à adoção do conceito do produto  $p \times V$ .

<sup>47</sup> *European Union* (União europeia, em tradução livre), sendo o dispositivo normativo que estabelece os requisitos exigíveis à comercialização de equipamentos que operam sob pressão.

i) Legislação do México:

No México, a categorização dos vasos de pressão é realizada através do uso de tabelas, considerando os parâmetros: (a) tipo de fluido; (b) pressão de calibração do(s) dispositivo(s) de alívio de pressão; (c) volume do equipamento (SOCIAL, 2011).

O critério de usar a pressão de ajuste da PSV<sup>48</sup> representa um aspecto único entre as normas identificadas.

A utilização do termo  $p \times V$  na norma mexicana tem como finalidade categorizar os vasos de pressão em três classes: (a) Classe I: não há determinação quanto ao intervalo máximo entre os exames externos ou exames internos; (b) Classes II e III: há determinação para estes intervalos, definidas em tabelas presentes no documento.

Estão sintetizadas no Quadro 1 as principais características das legislações analisadas, sendo comparadas, para cada país ou grupo de países, as metodologias de categorização dos vasos de pressão e os aspectos específicos em termos da grandeza pressão (aliada ao volume interno do equipamento e tipo de fluido nele contido), que devem ser utilizados para a determinação das respectivas categorias de cada equipamento, sendo, assim, atendido ao objetivo específico 2.2 (ii).

Destaca-se por fim, que a utilização da pressão de projeto para fins da categorização dos vasos de pressão pode acarretar a desvantagem de que, se ao longo da vida operacional do equipamento a pressão de operação apresente valores muito diferentes (principalmente se os valores desta pressão de operação forem menores que a pressão de projeto), o equipamento poderá ser enquadrado indevidamente em uma categoria mais elevada que a correta, com potencial impacto negativo, principalmente em termos de disponibilidade e custos operacionais.

---

<sup>48</sup> *Pressure Safety Valve*. (Válvula de pressão de segurança, em tradução livre).

Quadro 1 - Resumo das características de classificação dos vasos de pressão, para fins da elaboração do plano de inspeção

| PAÍS <sup>49</sup> | NORMA                                                                        | METODOLOGIA PARA A CATEGORIZAÇÃO                                                                                                                       | GRANDEZA USADA NA CATEGORIZAÇÃO                                                       |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Alemanha           | BetrSichV (EMPREGO, 2022)                                                    | Matriz de risco, considerando o termo $p \times V$ e tipo de fluido <sup>50</sup>                                                                      | Pressão de projeto                                                                    |
| Estados Unidos     | Documento específico por estado                                              | Não aplicável                                                                                                                                          | Não aplicável                                                                         |
| Austrália          | AS 4343 (EMPREGO, 2022)                                                      | Tabelas, considerando $p$ , $V$ , fator de compressibilidade e massa, fator decorrente do tipo de fluido, fator de instalação/serviço e tipo de fluido | Pressão de projeto                                                                    |
| Brasil             | NR-13 (EMPREGO, 2022)                                                        | Matriz de risco, considerando o termo $p \times V$ e tipo de fluido                                                                                    | Pressão Máxima de Operação                                                            |
| Chile              | Não localizado ou inexistente                                                | Não localizado ou inexistente                                                                                                                          | Não localizado ou inexistente                                                         |
| Europa             | Inexiste                                                                     | Inexiste                                                                                                                                               | Inexiste                                                                              |
| Espanha            | Real Decreto 809/2021 (EMPREGO, 2022)                                        | Matriz de risco, considerando o termo $p \times V$ e tipo de fluido                                                                                    | Pressão de projeto <sup>51</sup>                                                      |
| Grã-Bretanha       | The Pressure Systems Safety Regulations (HEALTH AND SAFETY COMMISSION, 2000) | Inexiste                                                                                                                                               | Inexiste                                                                              |
| México             | NOM-020-STPS <sup>52</sup> -2011 (SOCIAL; CARUCCI, 2011)                     | Tabelas, considerando os termos $p$ , $V$ e tipo de fluido                                                                                             | Pressão de calibração do(s) dispositivo(s) de alívio de pressão (PPsv <sup>53</sup> ) |

Fonte: autor (2024)

<sup>49</sup> País ou conjunto de países.

<sup>50</sup> Na norma alemã também devem ser considerados os seguintes aspectos quanto à classificação do vaso de pressão: (a) se o vaso de pressão é transportável, ou não; (b) se há presença de processo corrosivo passível de ocorrer no costado ou tampo do equipamento, comprometendo a sua integridade estrutural.

<sup>51</sup> Na norma espanhola é utilizada a denominação “*Presión máxima admisible PS*”, que corresponde à pressão de projeto conforme definido no próprio documento.

<sup>52</sup> *Norma Oficial Mexicana, da Secretaría del Trabajo y Previsión Social*. (Norma Oficial Mexicana, da Secretaria do Trabalho e Previdência Social, em tradução livre).

<sup>53</sup> Pressão de ajuste da PSV.

### 2.3 A EVOLUÇÃO DA NR-13

A definição dos requisitos mínimos de segurança exigíveis ao ambiente de trabalho, no Brasil, remonta aos anos 1970, quando, por meio da Lei 6514, de 22/12/1977 (BRASIL, 1977b), que alterou vários artigos da CLT, incluindo, dentre outros aspectos, a seguinte determinação:

“(…)

Parágrafo único - O Ministério do Trabalho expedirá normas complementares quanto à segurança das caldeiras, fornos e recipientes sob pressão, especialmente quanto ao revestimento interno, à localização, à ventilação dos locais e outros meios de eliminação de gases ou vapores prejudiciais à saúde, e demais instalações ou equipamentos necessários à execução segura das tarefas de cada empregado.

(…)”

Consequentemente, portanto, o Ministério do Trabalho, através da Portaria 3214, de 08/07/1978 (TRABALHO, 1978), emite a primeira versão da NR-13 (TRABALHO, 1987), que nada tratava sobre vasos de pressão em termos da inspeção do equipamento, abordando os requisitos em termos do dispositivo de proteção contra sobrepressão.

Posteriormente, em 1983, a NR-13 foi revisada, (BRASIL, 1983), sendo adotada a denominação NR-13 – Caldeiras e Recipientes sob pressão e a sua estrutura passou a especificar, separadamente, as determinações sobre as caldeiras e os vasos de pressão. Nesta versão, em termos de inspeção, apenas os requisitos correspondentes ao teste de pressão hidrostática são determinados.

Em 1993 ocorreu um evento de grande impacto negativo em um complexo industrial no estado de São Paulo, tendo, como consequência, a realização de uma intensa revisão da NR-13, cujo histórico a seguir é apresentado, mesmo considerando que as fontes históricas da evolução da NR-13 são escassas, não sendo disponível registros formais, principalmente quanto à conjuntura que resultou na citada revisão da NR-13 em 1994.

Através de uma entrevista gravada, não estruturada<sup>54</sup>, realizada com um dos idealizadores da citada revisão, foram obtidas informações, inéditas em termos de registro formal, que a seguir estão descritas de forma resumida<sup>55</sup>.

O Ministério do trabalho implementou diversas normas regulamentadoras em 1977 (BRASIL, 1977a) com o objetivo de definir condições mínimas exigíveis para que as atividades laborais pudessem ser realizadas de forma a garantir condições adequadas de segurança aos trabalhadores. Uma destas normas foi a NR-13, cujo escopo original abrangia as caldeiras e vasos de pressão. (BRASIL, 1978).

A versão de 1978 foi elaborada basicamente sem a consulta nem participação da sociedade civil, principalmente o ramo empresarial e, também, os trabalhadores.

Decorrente da necessidade de atualização, em 1983 (BRASIL, 1983) a NR-13 foi objeto de uma revisão, todavia, conforme será descrito a seguir, as alterações não significaram efetivamente mudanças e melhorias significativas. Esta atualização correspondeu basicamente a novas exigências especificamente em termos às caldeiras. Destaca-se a exigência do treinamento ao operador de caldeira e o item referente ao risco grave e iminente.

No que tange aos vasos de pressão nada foi acrescentado nesta revisão de 1983 e as exigências em termos de inspeção correspondiam à realização de teste hidrostático mandatório a cada cinco anos e, na impossibilidade de tal teste, deveria ser realizada inspeção externa e interna anualmente. Ou seja, as exigências eram praticamente inexecutáveis, visto que, para poder planejar uma parada demanda-se um prazo de cerca de dois a três anos, logo, requerendo um prazo maior que o próprio intervalo de inspeção.

Todavia, em 1984 (BRASIL, 1984) implementaram-se mais exigências à operação e inspeção dos equipamentos.

Em 1992 havia no Brasil três principais centrais petroquímicas, sendo a mais antiga composta de empresas localizadas em Santo André e Mauá, SP. Estes complexos pertenciam a uma empresa de petróleo e gás, através de uma subsidiária do seu braço químico.

---

<sup>54</sup> Adaptação da entrevista gravada, não estruturada, realizada com um dos idealizadores da revisão de 1994 da NR-13. O entrevistado leu, concordou e assinou o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

<sup>55</sup> A transcrição da entrevista pode ser obtida através de solicitação formal ao autor.

O Brasil contemporâneo defrontava-se com o impeachment do Presidente da República, eleito em 1990, bem como, com o crescimento dos movimentos sociais e sindicais, sendo os municípios da Grande ABCD<sup>56</sup> e adjacentes (Mauá sendo um destes) a região mais politizada, principalmente decorrente da ação do presidente do sindicato dos metalúrgicos do ABC (este presidente do sindicato viria mais tarde ser presidente do Brasil).

Uma das ações do governo federal correspondia à implementação de um processo de privatização, e, neste processo, havia várias empresas do ramo petroquímico, inclusive aquela Central Petroquímica do ABCD citado. Tal diretriz teve como consequência a criação de um ambiente que resultou em prejudicar a relação das empresas com os sindicatos.

Ao longo de maio do corrente ano de 1992, a central petroquímica realizou uma parada geral planejada de toda a planta sendo que, após o encerramento das atividades e com a recolocação em operação ocorreram três acidentes distintos, no intervalo entre 30 a 60 dias após a parada.

O primeiro acidente correspondeu a um incêndio em um trocador de hidrogênio, resultando em danos estruturais. O segundo evento, que ocorreu em 15 de junho de 1992, correspondeu a uma explosão e posterior incêndio na área dos fornos da reforma<sup>57</sup>, no momento da partida de unidade de HDS, decorrente do rompimento do coletor de saída do forno. Cinco pessoas tiveram queimaduras e uma delas teve como resultado o óbito<sup>58</sup>.

O terceiro e último evento, que aconteceu cerca de 60 dias após a parada geral planejada, correspondeu a uma parada geral emergencial por nível baixo de vapor, decorrente da contaminação da água de alimentação das caldeiras. No momento da partida ocorreram explosões de algumas serpentinas de fornos, causando perdas materiais, mas nenhum dano em pessoas.

Estes eventos na Central Petroquímica foram os primeiros acidentes de grande monta que aconteceram no período pós ditadura militar, o que teve enorme impacto

---

<sup>56</sup> Zona sudeste da Grande São Paulo (capital), que abrange os municípios de (A) Santo André; (B) São Bernardo do Campo; (C) São Caetano do Sul; e, (D) Diadema.

<sup>57</sup> Processo que converte hidrocarbonetos com cadeias simples em hidrocarbonetos com cadeias ramificadas ou anéis

<sup>58</sup> Segundo (EUROPEIA, 2014) neste evento dez operários foram atingidos, sendo que um deles veio a óbito após três dias e dois outros sofreram queimaduras graves em todo o corpo.

nas empresas e na sociedade. Durante o período do regime militar a investigação dos acidentes ocorria por meio de equipes de militares, sendo que não eram divulgados adequadamente à sociedade os resultados da investigação, resultando pouca ou nenhuma consequência aos profissionais envolvidos nos acidentes.

Assim sendo, começou-se a cobrar a implementação das Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho, que haviam sido elaboradas anteriormente e postas em vigor praticamente sem consulta à sociedade. Estas normas apresentavam-se desatualizadas e eram impraticáveis.

À época dos acidentes o prefeito de Santo André passou a atuar de diversas formas. Pressionou a empresa, conjuntamente com a sociedade, para a não privatização da Central Petroquímica. Acionou o MTb, FUNDACENTRO, Ministério Público, que procederam a uma série de investigações dentro da Central Petroquímica.

No transcorrer daquele período os arquivos da inspeção foram violados, sendo que alguns relatórios de inspeção foram levados, à noite, por alguém que até hoje não se sabe quem foi. Posteriormente estes documentos foram localizados em poder do Ministério Público. Supõe-se que pessoas da própria empresa foram as responsáveis pela retirada indevida destes relatórios de inspeção que, posteriormente, começaram a surgir na imprensa.

Como estes documentos haviam sido redigidos para uso exclusivo interno à companhia, os mesmos foram elaborados sem um formalismo efetivo. Em alguns casos eram redigidos à lápis, outras vezes à caneta. A minoria era digitada ou escrita à máquina. Uma vez redigidos, a grande parcela destes relatórios era enviada à análise do engenheiro de inspeção, porém sem uma metodologia que garantisse que todos seguissem este fluxo e, mesmo alguns daqueles que eram submetidos à análise do engenheiro, não eram por este realmente assinados.

Um aspecto importante na forma de escrever utilizada nestes relatórios era a grande quantidade de adjetivos (conceitos qualitativos ao invés de quantitativos) ou expressões do jargão técnico da inspeção. Esta situação permitia interpretações diversas, o que causou problemas ou estava além do entendimento da população em geral, principalmente no tocante à conclusão do documento, que tinha a finalidade de apresentar se havia condição, ou não, de uso do equipamento.



A divulgação indevida e inesperada dos relatórios com este linguajar inadequado, portanto, causou enorme impacto negativo junto à sociedade como um todo, prejudicando ainda mais a situação da Central Petroquímica, tanto perante a população como, e principalmente, junto aos órgãos de fiscalização.

No decorrer desta situação foram convocados a depor no Ministério Público nove profissionais da inspeção. A gerência de inspeção de equipamentos foi, portanto, o único órgão da Central Petroquímica acionado judicialmente em função dos acidentes.

A versão corrente à época da NR-13 (BRASIL, 1984) não apresentava um critério para que o intervalo máximo entre inspeções fosse definido, sendo utilizado geralmente, e no caso particular da Central Petroquímica, a boa prática da inspeção, baseada, principalmente, no histórico das inspeções anteriores do respectivo equipamento.

Desta forma, os vasos mais críticos (entenda-se, neste contexto, a criticidade como a categorização do equipamento em função da sua integridade estrutural e não em decorrência da importância do mesmo ao processo produtivo) eram inspecionados a cada parada, que na Central Petroquímica ocorria a cada três anos. Já os vasos de criticidade média eram inspecionados a cada seis anos, ou duas paradas. Já os equipamentos que podiam ser inspecionados sem requerer a parada tinham a inspeção realizada a cada intervalo de três, quatro, cinco ou seis anos, a depender da sua criticidade.

No caso das caldeiras, a inspeção era, geralmente, realizada anualmente. Estes critérios utilizados na CENTRAL PETROQUÍMICA não destoavam em nada da realidade das demais empresas nacionais similares, principalmente devido aos fatos de que havia, à época, mesmo incipiente, um intercâmbio de profissionais da área e experiências sobre a inspeção de equipamentos.

Constata-se, portanto, que, em termos gerais, salvo casos em que a inspeção de equipamentos indicava uma elevada criticidade ao equipamento, a realização da inspeção era efetuada em decorrência da oportunidade criada pela parada da operação resultante principalmente da condição e/ou necessidade da própria operação, ou seja, era a operação que ditava o intervalo entre as inspeções.

No decorrer das análises, fiscalizações e investigações implementadas, percebeu-se que a versão contemporânea da NR-13 não apresentava

adequadamente as determinações que pudessem garantir aquilo para a qual havia sido idealizada, ou seja, a segurança dos trabalhadores.

Sendo assim, o Ministério do Trabalho instituiu uma comissão tripartite, composta de representantes do poder público, dos trabalhadores e das empresas, com o objetivo de propor uma versão da norma mais adequada.

Nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22 estão mostradas como o referido documento estrangeiro determina a categorização dos vasos de pressão.

Figura 20 - Trecho da norma espanhola que categoriza os vasos de pressão conforme o risco

(...)

5. *Inspeções e testes em dispositivos a pressão.*

(...)

5.1.1. Potencial de risco.

Os dispositivos a pressão se classificam nos cinco seguintes grupos, segundo seu potencial de risco, definido como o produto da pressão de projeto  $P_d$  em  $\text{kgf/cm}^2$  pelo volume em  $\text{m}^3$ .

| Grupo | Potencial de risco                     |
|-------|----------------------------------------|
| 1     | Maior ou igual a 1.000                 |
| 2     | Maior ou igual a 300 e menor que 1.000 |
| 3     | Maior ou igual a 25 e menor que 300    |
| 4     | Maior ou igual a 10 e menor que 25     |
| 5     | Menor que 10                           |

Fonte: Adaptado de (MINISTERIO DE INDUSTRIA, 1992)

Esta comissão, resultante de várias pesquisas, identificou uma norma espanhola, a ITC59 MIE60 AP61-6, cujo título é *Instrucción Técnica Complementaria sobre Refinerias de Petróleos y Plantas Petroquímicas*, (MINISTERIO DE INDUSTRIA, 1992) que se tornou a referência para a revisão da NR-13.

<sup>59</sup> *Instrucción Técnica Complementaria* (Instrução Técnica Complementar, em tradução livre).

<sup>60</sup> *Ministerio de Industria y Energia* (Ministério da Indústria e Energia, em tradução livre).

<sup>61</sup> *Aparatus a Presión*. (Equipamentos sob pressão, em tradução livre).

Figura 21 - Determinação do grupo dos fluidos

(...)

#### 5.1.2. Características dos fluidos.

Os dispositivos a pressão de classificam nos quatro seguintes grupos, segundo as características dos fluidos com que eles operaram:

| Grupo | Característica do fluido                                                                                                                                                                       |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A     | Fluidos inflamáveis em forma de vapores, líquidos, gases e suas misturas, a temperatura igual ou superior a 200°C; gases e líquidos de elevada toxicidade e hidrogênio a qualquer temperatura. |
| B     | Fluidos inflamáveis em forma de vapores, líquidos, gases e suas misturas, a temperatura igual ou inferior a 200°C; gases e líquidos tóxicos, ácidos ou cáusticos, a qualquer temperatura.      |
| C     | Vapor de água, sempre que suas correntes estejam integradas por este vapor na fase gasosa; gases inertes, inócuos e ar.                                                                        |
| D     | Água a temperatura igual ou superior a 85°C.                                                                                                                                                   |

Fonte: Adaptado de (MINISTERIO DE INDUSTRIA, 1992)

Figura 22 - Categorização dos vasos de pressão conforme norma espanhola

| POTENCIAL DE RISCO | CARACTERÍSTICAS DO FLUIDO |               |               |               |
|--------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | A                         | B             | C             | D             |
| 1                  | Categoria I               | Categoria I   | Categoria I   | Categoria II  |
| 2                  | Categoria I               | Categoria II  | Categoria II  | Categoria III |
| 3                  | Categoria II              | Categoria III | Categoria III | Categoria IV  |
| 4                  | Categoria III             | Categoria IV  | Categoria IV  | Categoria V   |
| 5                  | Categoria IV              | Categoria V   | Categoria V   | Categoria V   |

Fonte: Adaptado de MINISTERIO DE INDUSTRIA (1992)

Esta norma espanhola, dentre vários itens, apresentava um critério de categorização dos vasos de pressão que veio a ser a linha mestra adotada na NR-13, todavia utiliza a pressão de projeto, Pd62 (ao contrário da NR-13, que adotou a PMO).

<sup>62</sup> *Presión de diseño*. (Pressão de projeto, em tradução livre).

Ao ser encerrado o encontro, o entrevistado reconheceu a importância do registro dos eventos relatados para compor o acervo histórico da engenharia brasileira em termos da normalização e segurança na operação dos vasos de pressão.

Após esta versão de 1994 a NR-13 (BRASIL, 1994) passou por revisão em 2008 (BRASIL, 2008), 2014 (BRASIL, 2014), 2017 (BRASIL, 2017), 2018 (BRASIL, 2018), 2019 (BRASIL, 2019) e 2022 (BRASIL, 2022b), tendo ocorrido, nesta versão mais recente, em termos dos critérios de categorização dos vasos de pressão, a seguinte modificação no tocante ao detalhamento de aspectos dos fluidos:

- “(a) quando se tratar de mistura, deve ser considerado, para fins de classificação, o fluido que apresentar maior risco aos trabalhadores e às instalações, considerando-se a sua toxicidade, inflamabilidade e concentração;
- (b) Vasos de pressão que operem sob a condição de vácuo deverão enquadrar-se nas seguintes categorias: - categoria I: para fluidos inflamáveis ou combustíveis; - categoria V: para outros fluidos.”

Há de ser destacado que a partir de 2017, a NR-13 passou a abranger os equipamentos: caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques de armazenamento; tendo, portanto, o escopo ampliado quando comparado à sua versão original de 1978.

A presente apresentação dos aspectos históricos da evolução da NR-13, que atende ao objetivo específico 2.2 (i), indica como a NR-13 tem evoluído desde 1978, quando entrou em vigor, estando o presente trabalho disposto a contribuir com este crescimento.

## 2.4 A CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO CONFORME A NR-13

A NR-13 (BRASIL, 2022b) categoriza os vasos de pressão com bases em dois parâmetros:

- (i) classe do fluido;
- (ii) potencial de risco (produto entre o valor da pressão máxima de operação (PMO), em MPa e o volume interno geométrico do vaso (V), em m<sup>3</sup>).

Os fluidos contidos nos vasos de pressão devem ser classificados conforme descrito a seguir no Quadro 2.

Quadro 2 - Classe dos fluidos, conforme NR-13

| CLASSE | FLUIDO                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- fluidos inflamáveis;</li> <li>- fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a duzentos graus Celsius (200 °C);</li> <li>- fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a vinte partes por milhão (20 ppm);</li> </ul> hidrogênio; e,<br>acetileno. |
| B      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- fluidos combustíveis com temperatura inferior a duzentos graus Celsius (200 °C); e,</li> <li>- fluidos tóxicos com limite de tolerância superior a vinte partes por milhão (20 ppm).</li> </ul>                                                                             |
| C      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- vapor de água;</li> <li>- gases asfixiantes simples; e,</li> <li>- ar comprimido.</li> </ul>                                                                                                                                                                                |
| D      | - outros fluidos não enquadrados nas classes anteriores.                                                                                                                                                                                                                                                             |

Fonte: Adaptado de MTP (2022)

Quando se tratar de mistura, deve ser considerado, para fins de classificação, o fluido que apresentar maior risco aos trabalhadores e às instalações, considerando-se sua toxicidade, inflamabilidade e concentração.

No tocante ao grupo de potencial de risco do vaso de pressão deve ser estabelecida a partir do produto P.V, onde P é a pressão máxima de operação em MPa, em módulo, e V o seu volume em m<sup>3</sup> (Quadro 3).

Quadro 3 - Grupo dos vasos de pressão

| GRUPO | FAIXA DO PRODUTO P.V. |
|-------|-----------------------|
| 1     | $100 \leq P.V$        |
| 2     | $30 \leq P.V < 100$   |
| 3     | $2,5 \leq P.V < 30$   |
| 4     | $1 \leq P.V < 2,5$    |
| 5     | $P.V < 1$             |

Fonte: Adaptado de MTP (2022)

Evoluindo na análise da importância do parâmetro P.V, podemos constatar que ele corresponde à grandeza física energia, sendo, no caso da NR-13, na unidade joule (J).

Ainda em relação à escala P.V, há uma correlação apresentada por (AUSTRALIA, 2005), que indica que 1 MJ equivale a 1 kg de TNT, ou seja, o

Quadro 3 indica o que seria a “explosividade equivalente”.

Associando, finalmente, com as consequências ao corpo humano da explosão de TNT, fica evidente, mais uma vez, a importância da adequada gestão da integridade estrutural dos vasos de pressão, pois, conforme Kokkinakis e Drikakis (2023), os traumas (sistema auditivo, sistema respiratório, crânio-cérebro) e fatalidades resultantes da liberação inadequada da energia contida no vaso de pressão podem causar lesões às pessoas expostas ao evento da liberação abrupta da energia (explosão).

Então, a NR-13, alinhada à norma espanhola que a originou, adotou a categorização dos vasos de pressão, de acordo como indicado na Figura 23

Figura 23 - Categorização dos vasos de pressão conforme NR-13

| Classe do Fluido | Grupo de Potencial de Risco |     |     |     |     |
|------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | 1                           | 2   | 3   | 4   | 5   |
| A                | I                           | I   | II  | III | III |
| B                | I                           | II  | III | IV  | IV  |
| C                | I                           | II  | III | IV  | V   |
| D                | II                          | III | IV  | V   | V   |

Fonte: MTP (2022)

Entretanto para os vasos de pressão do Grupo de Potencial de Risco 5, e classes de fluido A e B, para os quais a norma brasileira adotou uma categorização mais elevada, quando comparada com a sua congênere espanhola, o que pode ser constado na Figura 24.

Figura 24 - Comparação da NR-13 e da norma espanhola congênere, em relação à categorização dos vasos de pressão

| Classe do Fluido | Grupo de Potencial de Risco |     |     |     |     |
|------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | 1                           | 2   | 3   | 4   | 5   |
| A                | I                           | I   | II  | III | III |
| B                | I                           | II  | III | IV  | IV  |
| C                | I                           | II  | III | IV  | V   |
| D                | II                          | III | IV  | V   | V   |

| POTENCIAL DE RISCO | CARACTERÍSTICAS DO FL |               |               |               |
|--------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|
|                    | A                     | B             | C             | D             |
| 1                  | Categoria I           | Categoria I   | Categoria I   | Categoria II  |
| 2                  | Categoria I           | Categoria II  | Categoria II  | Categoria III |
| 3                  | Categoria II          | Categoria III | Categoria III | Categoria IV  |
| 4                  | Categoria III         | Categoria IV  | Categoria IV  | Categoria V   |
| 5                  | Categoria IV          | Categoria V   | Categoria V   | Categoria V   |



Fonte: Adaptado de MTP (2022) e MINISTERIO DE INDUSTRIA (1992)

É digno de nota que na entrevista descrita, foi indagado ao entrevistado qual o motivo desta diferença, tendo sido relatado por ele que tinha recordação do fato, porém indicou que, provavelmente, decorria da intenção de elevar as exigências às empresas brasileiras, principalmente àquelas situações em que o usuário poderia não adotar as ações de inspeção necessárias à integridade do equipamento, notadamente caso o fluido contido nos equipamentos fosse potencialmente de maior risco.

Quando da revisão de 1994 (BRASIL, 1994), momento em que o conceito da PMO foi introduzido, não foi apresentada pela norma a definição da PMO, parâmetro fundamental à categorização dos vasos de pressão. Durante a interlocução, este autor perguntou ao entrevistado o motivo da ausência da definição da PMO, o que o surpreendeu, pois, até aquela data, não havia sido constatada a falta desta definição no documento.

Na versão da norma que se seguiu (BRASIL, 2017), foi introduzido o conceito da PMO:

Pressão máxima de operação: para fins de enquadramento e definição da categoria de vasos de pressão considera-se pressão máxima de operação a maior pressão que o equipamento pode operar em condições normais de

processo, previstas no prontuário. Caso não exista esta definição no prontuário, deve ser considerada a PMTA. (BRASIL, 2017)

Em continuidade, a edição da NR-13 de 2022 (EMPREGO, 2022), nova redação foi apresentada à PMO:

Pressão máxima de operação: máxima pressão manométrica esperada durante a operação normal do sistema ou equipamento. (EMPREGO, 2022).

Verifica-se, então, que a PMO apresenta uma definição que pode ser aperfeiçoada por meio da descrição de metodologia que possibilite o cálculo adequado.

## 2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A PRESSÃO DE OPERAÇÃO, PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO E PRESSÃO DE PROJETO

A pressão de projeto é um aspecto fundamental quando da elaboração do projeto mecânico do equipamento, sendo a sua determinação, conjuntamente com a temperatura de projeto, informações de entrada imprescindíveis ao projetista.

A determinação destes valores da pressão de projeto e temperatura de projeto deve ser realizada com a máxima atenção, envolvendo principalmente os profissionais de processo e operação, que conhecem as características do processo produtivo, e os projetistas, que irão manusear estas informações, buscando, a todo momento, a melhor solução em termos de integridade estrutural, fabricação, operação, segurança, manutenção, inspeção e custos.

Em Telles (TELLES, 1996), temos a seguinte definição para a pressão de projeto:

No caso dos vasos de pressão projetados para a pressão interna, é usual adotar-se para a pressão de projeto o maior valor dos dois seguintes valores:

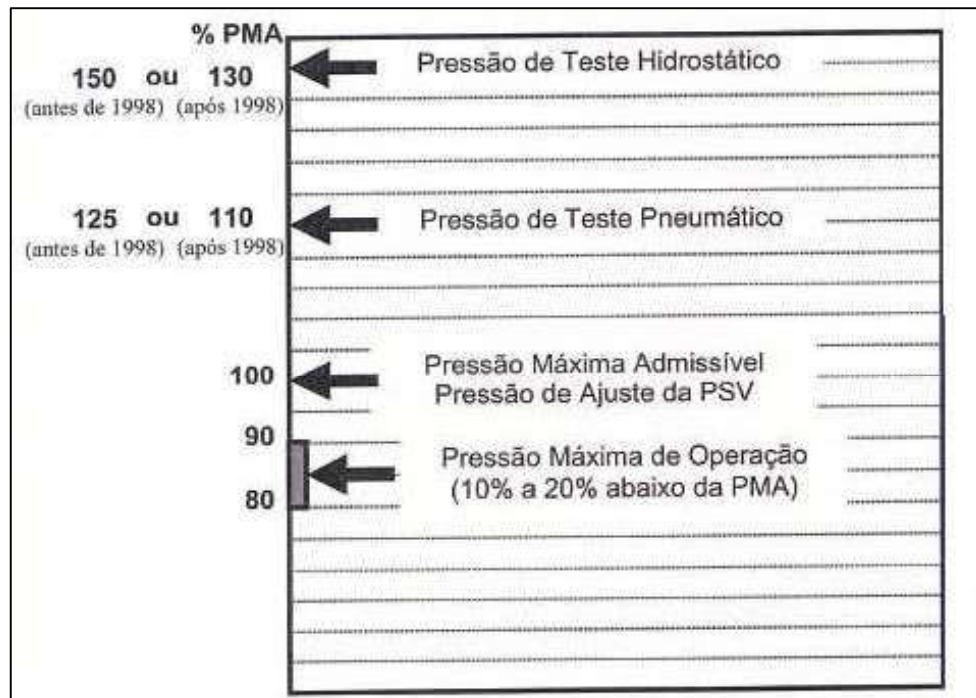
- Pressão máxima de operação, acrescida de 5%, quando o dispositivo de alívio de pressão (válvula de segurança) foi operado por válvula piloto e, acrescida de 10% nos demais casos;
- 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, manométricos.

Percebe-se, então, que, para Telles (TELLES, 1996) há diferença entre a pressão de projeto e a pressão máxima de operação, sendo aquela uma função desta.

Donato (DONATO, 2012) tem entendimento similar a Telles (TELLES, 1996), o que pode ser verificado por meio da Figura 25, onde PMA corresponde a Pressão Máxima Admissível, igual a PMTA.



Figura 25 - Relação entre as pressões em um vaso de pressão



Fonte: (DONATO, 2012)

Verifica-se, portanto, que para estes dois autores, o valor PMO é diferente do valor da Pressão de Projeto ou da PMTA (ou PMA).

No ASME<sup>63</sup>, Secção VIII, Divisão I (ASME, 2015), não há definição quanto à PMO, nem termo similar, todavia, apresenta, no item UG-21, a seguinte definição para pressão de projeto:

*Each element of a pressure vessel shall be designed for at least the most severe condition of coincident pressure (including coincident static head in the operating position) and temperature expected in normal operation. For this condition, the maximum difference in pressure between the inside and outside of a vessel, or between any two chambers of a combination unit, shall be considered [see UG-98 and 3-2]. See also U-2(a).*

Que, em tradução livre, temos: “Cada elemento de um recipiente sob pressão deve ser concebido para, pelo menos, a condição mais grave de pressão coincidente (incluindo o *head*<sup>64</sup> estático que ocorre na posição de funcionamento) e a temperatura esperada em funcionamento normal. Para esta condição, deve considerar-se a diferença máxima de pressão entre o interior e o exterior de um vaso de pressão, ou

<sup>63</sup> Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos, em tradução livre.

<sup>64</sup> A carga hidráulica ou cabeça piezométrica é uma medição específica da pressão do líquido acima de um referencial vertical.

entre quaisquer duas câmaras de uma unidade de combinação [ver UG-98 e 3-2]. Ver também U-2 (a).”

Ainda neste mesmo item do ASME (2015), há uma nota de rodapé, associada ao termo *Design Pressure*, que apresenta o seguinte texto:

*It is recommended that a suitable margin be provided above the pressure at which the vessel will be normally operated to allow for probable pressure surges in the vessel up to the setting of the pressure relieving devices (see UG-134).*

Este trecho, em tradução livre, corresponde a: recomenda-se que seja proporcionada uma margem adequada acima da pressão a que o recipiente será normalmente operado para permitir prováveis surtos de pressão no recipiente até o ajuste da pressão do dispositivo de alívio.

Há, sendo assim, uma convergência de Telles (TELLES, 1996) e Donato (DONATO, 2012) com o que preconiza o ASME (ASME, 2015), permitindo-se, portanto, concluir-se que a PMO é um parâmetro operacional que está abaixo da Pressão de Projeto ou, *Presión de diseño*, no caso da expressão em espanhol.

Em termos da NR-13 (BRASIL, 2022b) a PMO é definida:

*Máxima pressão manométrica esperada durante a operação normal de um sistema ou equipamento.*

Destacamos que a introdução da primeira versão da definição da PMO, que ocorreu em 2017 (BRASIL, 2017), decorreu da identificação por parte deste autor quanto à inexistência desta informação na NR-13 (BRASIL, 2008), assim como também, a atual redação (BRASIL, 2022b) foi elaborada após novo questionamento deste autor quanto à inexatidão da definição de 2017 (BRASIL, 2017).

De todo modo, nenhum documento foi identificado no qual seja apresentada uma metodologia para a determinação desta PMO, sendo este trabalho destinado a atender a esta lacuna.

## 2.6 FUNDAMENTOS ESTATÍSTICOS APLICÁVEIS AO PRESENTE ESTUDO

### 2.6.1 O controle estatístico de processo

Uma dada população é definida como normalmente distribuída caso a sua função densidade de probabilidade seja definida como:

$$f(x) = (1/(\sqrt{2\pi} \sigma)) e^{((-1/2)((x-\mu)/\sigma)^2)} \quad (\text{Equação 1})$$

$$-\infty < x < \infty; -\infty < \mu < \infty; \sigma > 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:  $\mu$  é a média e  $\sigma$  é o desvio padrão da população.

Montgomery (2009) descreve que Walter Shewhart foi o precursor da utilização do controle estatístico de processos (CEP), fazendo uso de gráficos, que são amplamente utilizados na avaliação das atividades em cadeias ou etapas produtivas, permitindo observar se o processo se apresenta estável, ou não, bem como, possibilita identificar se um dado evento decorreu da natural aleatoriedade ou deveu-se a alguma causa especial, permitindo a determinação da origem e a implementação de ações corretivas e/ou preventivas.

A partir de procedimentos adequados de amostragem de um processo podem ser obtidas informações sobre a média e o desvio padrão de uma dada variável deste processo e, a partir destas informações, podem ser determinados o limite superior de controle e o limite inferior de controle, valores estes que delimitam entre si o comportamento normal esperado do processo.

Conforme Montgomery (2009), regras foram elaboradas, algumas pelo próprio Walter Shewhart, para serem utilizadas na análise e interpretação do comportamento do processo, a partir dos valores plotados nos gráficos de controle estatístico, entretanto, dentre as 10 regras mais usuais, destacamos aquela que estabelece como sendo motivada por causa especial a ocorrência de um ou mais pontos exteriores aos limites de controle. Na Figura 26 observa-se que o valor correspondente a amostra 7 ultrapassou o limite superior de controle, indicando a ocorrência de evento com causa especial.

Figura 26 - Gráfico de controle de processo

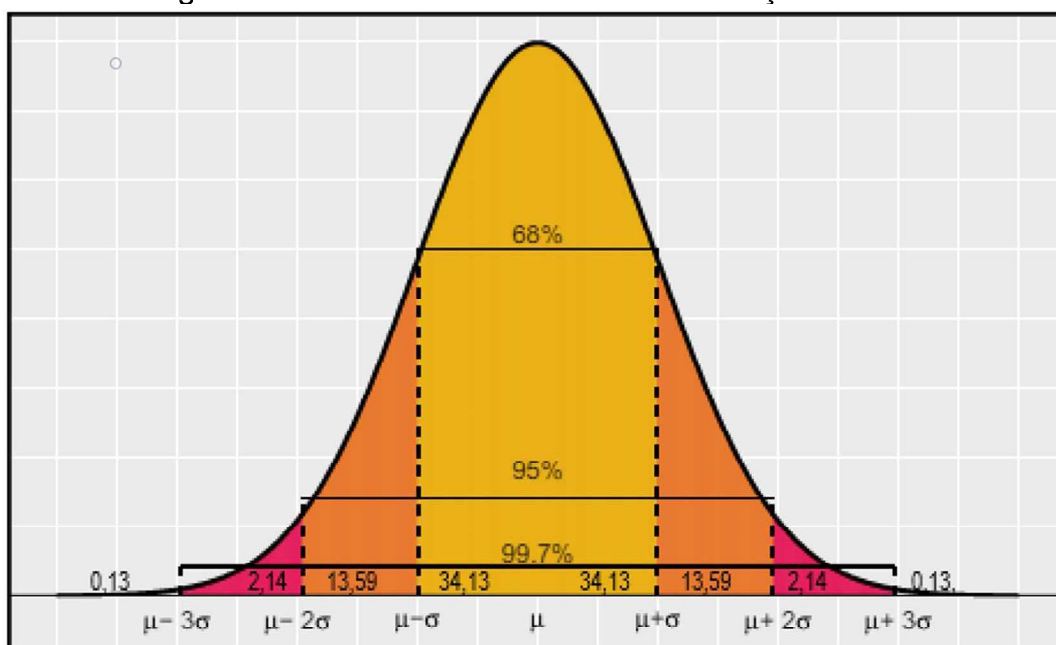


Fonte: autor (2024)

Louzada *et al.* ([s.d.]) indicam que o controle e demais ações correlatas, a partir dos princípios propostos por Shewhart pressupõem que a variável objeto do controle/acompanhamento possua uma distribuição normal, sendo, portanto, extremamente recomendável que esta condição seja verificada, por meio de ferramentas apropriadas, como gráficos (histograma ou gráfico normal probabilístico (MIRANDA, 2005)) ou teste de hipóteses.

Para uma distribuição normal, segundo Douglas *et al.* (2009), possui seguinte densidade de probabilidade, em função do desvio-padrão, conforme indicada na Figura 27.

Figura 27 - Probabilidades de uma distribuição normal



Fonte: Adaptado de SOUZA(SOUZA, J. S. Et Al., [s.d.])

A distribuição normal, apresentada na Figura 27 contém uma quantidade de dados proporcional ao desvio-padrão ( $\sigma$ ), podendo ser observado que no intervalo  $[-3\sigma; +3\sigma]$  estão presentes 99,7%, tidos como aqueles resultantes de variações normais (sem causa especial), sendo esta característica utilizada em sistemas de controle estatístico de processo (CEP), Seis Sigma<sup>65</sup>, dentre outros.

## 2.6.2 Avaliação da normalidade de dados

<sup>65</sup> Sistema de gestão que objetiva elevar a qualidade e eficácia de um processo, operação ou sistema.

Os dados dos eventos naturais podem apresentar comportamentos específicos, sendo que alguns comportam-se com uma distribuição normal, conforme definido em 3.6.1.

A verificação da conformidade de uma dada população à curva normal é uma etapa importante na análise de comportamento do fenômeno/processo sob análise, sendo disponíveis diversas ferramentas e modelos estatísticos aplicáveis, bem como, *softwares* específicos.

D'Agostino (1990) propõe uma avaliação (utilizando os valores de  $\sqrt{\beta_1}$  e  $\beta_2$ ) para verificar o grau de normalidade de distribuições populacionais, cujas amostras  $n$  amostras,  $X_1, \dots, X_n$ , logo:

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{m_3}{m_2^{3/2}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\beta_2 = \frac{m_4}{m_2^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$m_k = \sum (X_i - \bar{X})^k / n \quad (\text{Equação 5})$$

$$\bar{X} = \sum X_i / n \quad (\text{Equação 6})$$

Sendo:

|                  |       |                                                    |
|------------------|-------|----------------------------------------------------|
| $\sqrt{\beta_1}$ | ..... | <i>Skewness</i> <sup>66,67</sup>                   |
| $\beta_2$        | ..... | <i>Kurtosis</i> <sup>68,69</sup>                   |
| $m_2$            | ..... | Momento estatístico de segunda ordem <sup>70</sup> |

<sup>66</sup> Assimetria, em tradução livre.

<sup>67</sup> Corresponde à falta de simetria observada quando os dados estão concentrados em um dos lados de uma dada distribuição de probabilidades.

<sup>68</sup> Curtose, em tradução livre.

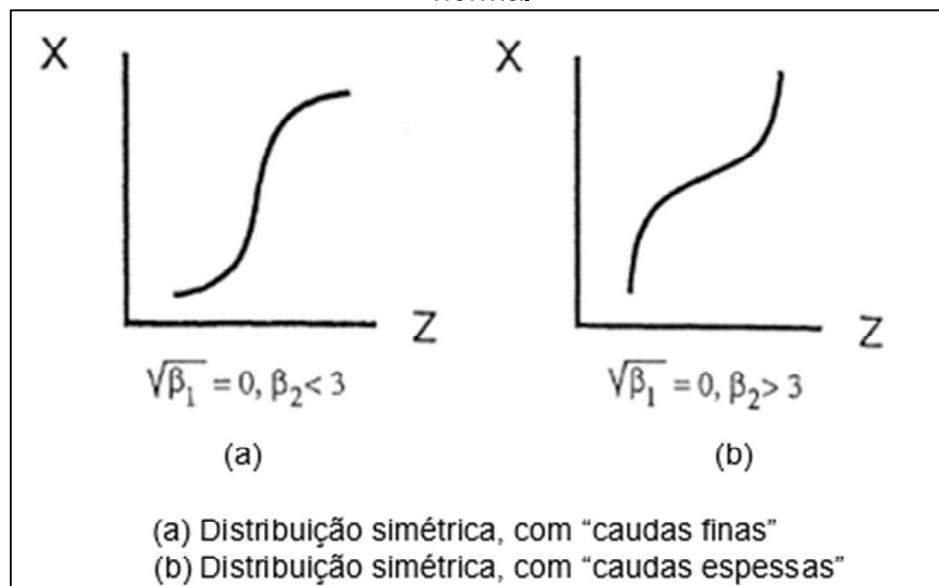
<sup>69</sup> Representa o grau de achatamento da curva de uma dada distribuição de probabilidades.

<sup>70</sup> Momento que caracteriza a dispersão de uma dada distribuição de probabilidades. A distribuição normal é caracterizada apenas pelo primeiro e segundo momentos.

|           |                                                            |
|-----------|------------------------------------------------------------|
| $m_3$     | .....Momento estatístico de terceira ordem <sup>71</sup>   |
| $m_4$     | .....Momento estatístico de quarta ordem <sup>72</sup>     |
| $X_i$     | ..... $X_{iésimo}$ termo de uma dada população ou amostra  |
| $\bar{X}$ | .....média de uma população ou amostra                     |
| $n$       | .....quantidade de termos de uma dada população ou amostra |
| $k$       | .....índice da ordem do momento estatístico                |

Ainda no mesmo artigo, D'Agostino apresenta as curvas indicadas na Figura 28, nas quais pode ser percebido o comportamento da distribuição dos dados sob análise em relação à variável aleatória normal padronizada ( $Z$ ).

Figura 28 - Indicação do desvio da normalidade, plotado em relação à probabilidade normal



Fonte: adaptado de (D'AGOSTINO, 1990)

## 2.7 EVENTOS RAROS

Os eventos raros são aqueles que apresentam baixa ocorrência (conforme Morio (2015), a frequência de ocorrência é menor que  $10^{-4}$ ), podendo, dependendo da magnitude, resultar em condições que causem danos às estruturas, ao mesmo tempo

<sup>71</sup> Momento que caracteriza a assimetria de uma dada distribuição de probabilidades.

<sup>72</sup> Momento que caracteriza a curtose de uma dada distribuição de probabilidades.

que são de razoável dificuldade de serem identificados, quando presentes em um conjunto de dados históricos.

Geralmente estes eventos raros possuem causa especial e estão razoavelmente deslocados da região próxima à média da população ou amostra sob análise.

Song *et al.* (2024), para identificar eventos raros, propõem uma solução que consiste de um algoritmo que efetua uma seleção direcional dos dados, conjuntamente com uma ação de aprendizagem (IA). Através de dois estudos de caso, os autores descrevem a aplicação da proposta e os resultados obtidos.

Também associado à ocorrência de eventos raros, só que decorrentes de falhas nos sensores, Rodrigues e Zárate (2024) trabalharam em uma metodologia para identificar a presença de *outliers* originados do sistema e elementos da instrumentação. Destacam os autores que a utilização do conceito de *machine learning* requer elevada confiabilidade nos dados e informações processadas e, portanto, a qualidade do sistema de aquisição como um todo.

Por meio de quatro exemplos numéricos, Dang *et al.* (2023) descrevem um procedimento para melhorar a amostragem de linha, introduzindo recursos de aprendizagem, o que possibilita a evolução do desempenho para a análise de confiabilidade estrutural, principalmente para avaliar pequenas probabilidades de falha.

Com o mesmo objetivo de melhorar o desempenho da amostragem de linha Papaioannou e Straub (2020) também propõem uma revisão, através de uma combinação alternativa de valores estimativos iniciais. São apresentados três exemplos numéricos que demonstram a solução sugerida.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento das atividades de elaboração da presente tese foi realizado em duas etapas: (a) pesquisa em base de dados científica (*Science Direct*), técnica (Associações nacionais e internacionais de normas técnicas) e Órgãos Regulamentadores. Os documentos obtidos foram identificados, classificados, selecionados, lidos e analisados quais versavam sobre a definição dos parâmetros que definem a periodicidade da inspeção nos vasos de pressão; (b) análise estatística de dados reais da pressão de operação em vasos de pressão, seguindo a metodologia proposta e detalhada no item 2.

#### 3.1 PESQUISA NA BASE DE DADOS CIENTÍFICOS<sup>73</sup>

Consistiu de uma pesquisa exploratória por meio de uma ampla revisão bibliográfica, realizada em conceituadas plataformas internacionais de publicação de artigos científicos. Utilizaram-se as palavras-chave: “*inspection*” AND “*pressure vessel*”, e foram identificados 6.405 artigos (Quadro 4).

Limitando-se ao período de 2019-2023, resultaram 1.526 documentos, tendo sido todos estes analisados pelo título.

Foram, então, selecionados 255, cujo *abstract* foi lido, sendo, por fim, obtidos 85 documentos, que foram lidos na integridade, e, por fim, 12 foram citados na revisão bibliográfica desta tese.

Destaca-se que, decorrente da leitura dos 12 artigos selecionados, outros artigos estavam referenciados e estes foram também lidos e citados na revisão bibliográfica.

No Quadro 4 está apresentada a sequência das atividades da seleção dos artigos a serem utilizados na revisão da literatura, item 2.

---

<sup>73</sup> Adaptado do artigo publicado pelo autor na *Revista Observatório de La Economía Latinoamericana* (SOUSA, R. A. F. DE et al., 2024).



Quadro 4 - Etapas da seleção dos artigos a serem utilizados na revisão bibliográfica

| ATIVIDADE                                                                                                                                        | QUANTIDADE DE ARTIGOS |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Realização de pesquisa utilizando as palavras-chave: “ <i>inspection</i> ” AND “ <i>pressure vessel</i> ”.                                       | 6.405                 |
| Realização de pesquisa utilizando as palavras-chave: “ <i>inspection</i> ” AND “ <i>pressure vessel</i> ”, limitando-se ao período de 2019-2023. | 1.526                 |
| Seleção dos artigos conforme análise do título de cada um.                                                                                       | 255                   |
| Seleção dos artigos conforme análise do <i>abstract</i> de cada um.                                                                              | 85                    |
| Artigos utilizados na revisão bibliográfica, originados da pesquisa nas plataformas internacionais de publicação de artigos científicos.         | 12                    |
| Artigos acrescentados à revisão bibliográfica, originados da leitura daqueles decorrentes da pesquisa.                                           | 10                    |

Fonte: autor (2024)

### 3.2 PESQUISA NAS LEGISLAÇÕES APLICÁVEIS À CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO

Uma pesquisa exploratória e explicativa desenvolveu-se tendo a finalidade de identificar as características específicas referentes aos vasos de pressão, tendo sido considerados oito países, economicamente e tecnicamente significativos na temática, além da união europeia<sup>74</sup>. Para cada um dos países e a comunidade europeia, foram realizadas pesquisas nos sites dos órgãos responsáveis pela publicidade oficial (Lei, Norma, Decreto etc.).

Buscou-se identificar nas páginas consultadas qual documento legal, em cada país, tratava da categorização e definição dos critérios aplicáveis à elaboração do plano de inspeção dos vasos de pressão. Foi analisada a metodologia definida em

<sup>74</sup> Composta de 27 países-membros. (EUROPEAN-UNION.EUROPA.EU, 2024)

cada instrumento legal, a abrangência e limitação, identificando os principais fatores técnicos que determinaram as modificações.

### 3.3 METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DOS DADOS DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO

Conciliando aspectos quantitativos e de campo, os valores da pressão de operação dos vasos de pressão foram obtidos junto a uma empresa petrolífera e, por questões de sigilo industrial e propriedade industrial, a empresa não será nominada.

Neste trabalho, os valores da pressão de operação foram normalizados, em relação à média dos mesmos, garantindo-se, por um lado, a confidencialidade e, por outro lado, a qualidade necessária ao processamento, análise e conclusão.

Buscou-se identificar nas páginas consultadas qual documento legal, em cada país, tratava da categorização e definição dos critérios aplicáveis à elaboração do plano de inspeção dos vasos de pressão. Analisaram-se a metodologia definida em cada instrumento legal, a abrangência e limitação, identificando os principais fatores técnicos que determinaram as modificações.

O conjunto de dados objeto deste trabalho é originado dos valores efetivos da pressão de operação dos vasos de pressão, obtidos através do sistema instrumentalizado e automático, composto de sensor, conversor, transmissor e sistema de registro e armazenamento digital das grandezas medidas, sendo a taxa de aquisição dos dados<sup>75</sup> de processo realizada a intervalos regulares e constantes, menores que 5 segundos<sup>76</sup>.

O empreendimento industrial onde os vasos de pressão estão instalados opera há mais de 20 anos, continuamente (realizando paradas periódicas com a finalidade de executar as inspeções e manutenções), 24 horas/dia, 7 dias/semana.

Trata-se de planta com capacidade da ordem de 300 mil barris de petróleo por dia, contemplando as operações de recebimento e armazenamento de matérias-primas,

---

<sup>75</sup> Corresponde à velocidade com que a(s) grandeza(s) de interesse é(são) medida(s) pelo sistema de aquisição e disponibilizadas (para indicação, armazenamento, transmissão, controle, dentre outras funções). Indicada em amostras por unidade de tempo (usualmente segundo).

<sup>76</sup> Considerando as características dinâmicas do processo operacional do qual os dados foram obtidos, bem como da necessidade de possibilitar uma quantidade e qualidade adequada às eventuais análises e controles, o sistema de aquisição de dados apresenta uma taxa de aquisição elevada, e, portanto, tal situação demanda um sistema de armazenamento de dados de grande porte.

processamento, estocagem de produtos acabados e geração de utilidades, possuindo sistema de gestão integrada ao longo de todas as etapas industriais e administrativas.

No Quadro 5 estão indicadas possíveis limitações da metodologia e também estão apresentadas contramedidas sugeridas para suplantar estas restrições.

Quadro 5 - Limitações e contramedidas

| LIMITAÇÃO À APLICAÇÃO DA METODOLOGIA                             | CONTRAMEDIDA SUGERIDA PARA SUPLANTAR                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Vaso de pressão recém instalado ou com pouco tempo de operação   | Considerar a PMO como sendo a PMTA, até que seja realizada o primeiro exame interno, registrando a pressão de operação com valores horários durante este período de operação.<br>Após este exame, implementar a metodologia, definindo a PMO baseado nos valores reais da operação. |
| Pouca quantidade de registros confiáveis da pressão de operação. | Implementar sistemática robusta para a coleta e registro da pressão de operação, com período mínimo de três anos, ou até o próximo exame internos, destes o maior.                                                                                                                  |

Fonte: autor (2024)

Em termos da avaliação da metodologia sob a ótica econômica, o que é um aspecto relevante, este trabalho não pode assim proceder, decorrente da indisponibilização de dados de natureza econômico-financeira, visto estes serem protegidos quanto ao sigilo empresarial.

As atividades e respectiva sequência, que compõem esta etapa da metodologia estão indicadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Etapas da metodologia de processamento dos dados

| ETAPA | ATIVIDADE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 01    | Identificar que o perfil da pressão de operação do equipamento corresponde à classe A, conforme Quadro 7 - Classe do vaso de pressão conforme o perfil de pressão.                                                                                                                                                                                                                      |
| 02    | Avaliar a qualidade dos dados, excluindo aqueles que apresentam inconsistências na medição, conforme classificação proposta no item 5.3.                                                                                                                                                                                                                                                |
| 03    | Calcular a média aritmética (obtendo $\bar{x}_0$ ) e o desvio padrão (obtendo $\sigma_0$ ) da pressão de operação.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 04    | Padronizar cada valor da pressão de operação, através de divisão do valor da mesma pela média aritmética ( $\bar{x}_0$ )                                                                                                                                                                                                                                                                |
| 05    | Excluir os valores da pressão de operação que sejam menores que 50% da média aritmética calculada (menores que 50% de $\bar{x}_0$ ).                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 06    | Calcular a média aritmética (obtendo $\bar{x}_1$ ) e o desvio padrão (obtendo $\sigma_1$ ), dos valores da pressão de operação.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 07    | Padronizar cada valor da pressão de operação, através de divisão do valor da mesma pela média aritmética ( $\bar{x}_1$ ).                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 08    | Excluir os valores da pressão de operação que sejam maiores que a soma da pressão média ( $\bar{x}_1$ ) mais três desvios padrão ( $\sigma_1$ ), ou seja, que sejam maiores que $\bar{x}_1 + 3 \cdot \sigma_1$ .                                                                                                                                                                        |
| 09    | Calcular a média aritmética (obtendo $\bar{x}_2$ ) e o desvio padrão (obtendo $\sigma_2$ ), dos valores da pressão de operação.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 10    | Padronizar cada valor da pressão de operação, através de divisão do valor da mesma pela média aritmética ( $\bar{x}_2$ ).                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 11    | Adotar o valor correspondente a soma da média aritmética ( $\bar{x}_2$ ) mais três vezes o desvio padrão ( $\sigma_2$ ), ou seja, $\bar{x}_2 + 3 \cdot \sigma_2$ , como a Pressão Máxima de Operação (PMO) do equipamento, para fins da categorização do vaso de pressão em termos da NR-13.                                                                                            |
| 12    | Analisar os valores da pressão de operação que sejam maiores que a soma da pressão média mais três desvios padrão (maiores que $\bar{x}_2 + 3 \cdot \sigma_1$ ), excluídos na etapa 08, identificando, por meio dos registros operacionais, a causa da ocorrência em termos de ser uma variação comum (aleatória ou inevitáveis) ou variação especial (que possui causa identificável). |
| 13    | Determinar, quantitativamente e qualitativamente, a convergência entre a distribuição dos valores da pressão de operação,                                                                                                                                                                                                                                                               |

Fonte: autor (2024)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 PERFIL OPERACIONAL DOS VASOS DE PRESSÃO

Os vasos de pressão são projetados visando a realização de determinadas operações, podendo estas apresentarem comportamentos variados em termos dos parâmetros operacionais, dentre os quais destacam-se: (a) pressão, (b) temperatura, (c) volume do fluido contido, (d) concentração do fluido contido, (e) estado(s) físico(s).

Sendo assim, conforme proposto no Quadro 7, decorrente destas condições, para possibilitar a análise estatisticamente coerente da pressão de operação dos equipamentos, objeto deste trabalho, é proposta a classificação dos vasos de pressão em cinco tipos de perfil operacional da pressão de operação, visando agrupar aqueles que possuem, ao longo do tempo de operação, características similares, em termos:

- a) da condição operacional de aplicação da pressão de operação;
- b) dos esforços mecânicos, decorrentes da pressão de operação;
- c) da distribuição estatística da pressão de operação.

Neste trabalho, alinhado à metodologia adotada, os vasos de pressão que apresentam o perfil de pressão de operação compatíveis à classe A serão considerados (etapa 01 da metodologia). As demais classes serão propostas como trabalhos futuros.

Em termos quantitativos, foi estimado, baseado na experiência profissional e natureza da maioria dos processos industriais (pois estes operam, usualmente, em valores razoavelmente estáveis em termos da pressão e temperatura, com flutuações decorrentes de causas normais), que mais de 75% das ocorrências nas aplicações industriais, correspondem aos equipamentos cujo perfil de operação é da classe A, o que significa a amplitude de potencial utilização do presente estudo.

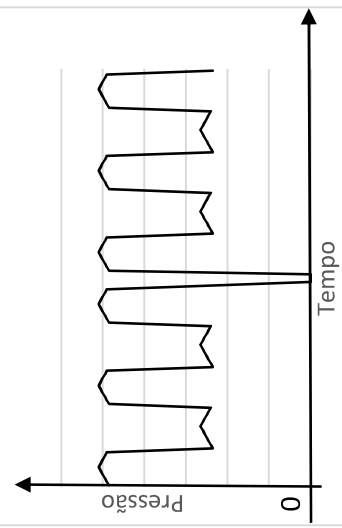
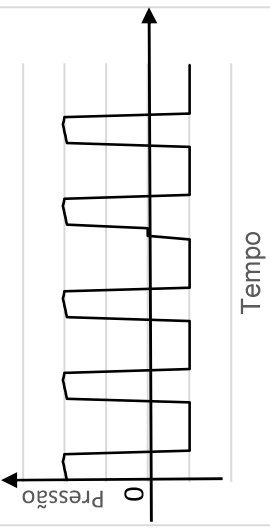
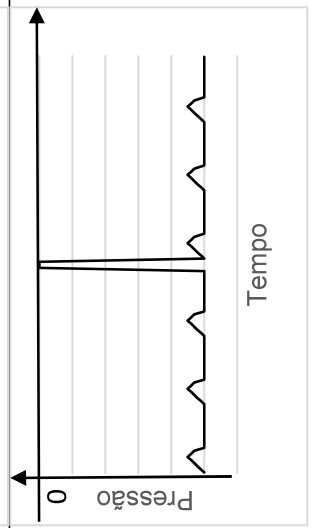
Quadro 7 - Classe do vaso de pressão conforme o perfil de pressão

| CLASSE | PERFIL DE PRESSÃO | CARACTERÍSTICA                                                                                                                                                   |                                                                                                           |                                                                                                                                 | ESTATÍSTICA |
|--------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
|        |                   | OPERACIONAL                                                                                                                                                      | MECÂNICA                                                                                                  |                                                                                                                                 |             |
| A      |                   | Operação em regime contínuo, com pressão de operação positiva e aproximadamente constante, presente em longos períodos de tempo.                                 | Tensões mecânicas aproximadamente constantes.<br><br>Temperaturas de operação aproximadamente constantes. | Distribuição similar a normal, com única média.<br><br>Baixa dispersão dos dados.                                               |             |
|        |                   | Curtos intervalos sem aplicação de pressão, decorrente de paradas para manutenção planejada.                                                                     | Fadiga de baixo ciclo ou não ocorrência de tal fenômeno.                                                  |                                                                                                                                 |             |
| B      |                   | Operação em batelada, com aplicação periódica de pressão positiva de operação e paradas para carregamento e descarregamento                                      | Tensões mecânicas cíclicas, positivas ou nulas;<br><br>Temperaturas de operação cíclicas.                 | Distribuição similar a normal, com duas médias.<br><br>Dois valores de desvio padrão, sendo um para cada perfil de normalidade. |             |
|        |                   | Intervalos aproximadamente similares de aplicação e retirada de pressão, decorrente de requisitos de processo, bem como, para paradas para manutenção planejada. | Fadiga de baixo ciclo ou não ocorrência de tal fenômeno.                                                  | Razoável dispersão dos valores.                                                                                                 |             |

Fonte: autor (2024)

(continua)

Quadro 7 – Classe do vaso de pressão conforme o perfil de pressão

| CLASSE | PERFIL DE PRESSÃO                                                                     | CARACTERÍSTICA                                                                                                                 |                                                                                                                      | ESTATÍSTICA                                     | (conclusão)                                                                                                     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        |                                                                                       | OPERACIONAL                                                                                                                    | MECÂNICA                                                                                                             |                                                 |                                                                                                                 |
| C      |    | Operação cíclica, em dois perfis de pressão positiva de operação.                                                              | Tensões mecânicas cíclicas, positivas ou nulas.                                                                      | Distribuição similar a normal, com duas médias. | Dois valores de desvio padrão, sendo um para cada perfil de normalidade.<br><br>Razoável dispersão dos valores. |
|        |                                                                                       | Curtos intervalos sem aplicação de pressão, decorrente de paradas para manutenção planejada.                                   | Temperaturas de operação cíclicas.<br><br>Fadiga de médio ciclo ou não ocorrência de tal fenômeno.                   |                                                 |                                                                                                                 |
| D      |   | Operação cíclica, em dois perfis de pressão de operação, sendo um positivo e outro negativo.                                   | Tensões mecânicas cíclicas, positivas ou negativas.                                                                  | Distribuição similar a normal, com duas médias. | Dois valores de desvio padrão, sendo um para cada perfil de normalidade.<br><br>Razoável dispersão dos valores. |
|        |                                                                                       | Curtos intervalos sem aplicação de pressão, decorrente de paradas para manutenção planejada.                                   | Temperaturas de operação cíclicas.<br><br>Fadiga de alto ciclo.                                                      |                                                 |                                                                                                                 |
| E      |  | Operação em regime contínuo, com pressão negativa de operação aproximadamente constante, presente em longos períodos de tempo. | Tensões mecânicas aproximadamente constantes.                                                                        | Distribuição similar a normal, com única média. | Baixa dispersão dos dados.                                                                                      |
|        |                                                                                       | Curtos intervalos sem aplicação de pressão, decorrente de paradas para manutenção planejada.                                   | Temperaturas de operação aproximadamente constantes.<br><br>Fadiga de baixo ciclo ou não ocorrência de tal fenômeno. |                                                 |                                                                                                                 |

Fonte: autor (2024)

## 4.2 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA APLICAÇÃO DAS NORMAS INTERNACIONAIS NA CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO<sup>77</sup>

Mesmo considerando que cada país tem autonomia para determinar a sua estrutura legal e normativa, a comparação das diferentes características existentes entre os documentos nacionais pode apresentar a oportunidade de avaliação, identificação e indicação de potenciais evoluções aplicáveis, principalmente se considerarmos os aspectos de globalização e implementação colaborativa de melhores práticas.

O estudo de caso apresentado neste capítulo trata de uma situação operacional de um vaso de pressão e a respectiva categorização (termo  $p \times V$ ), conforme as diversas normas nacionais. Em cada país, esta categorização dos vasos de pressão é utilizada para determinar a periodicidade de inspeção dos equipamentos, tendo influência direta nos custos operacionais.

Considerando o Quadro 1, os países Alemanha, Austrália, Brasil, Espanha e México utilizam o termo  $p \times V$  e, portanto, serão aqueles para os quais a análise será realizada.

As principais características do vaso de pressão objeto da análise são apresentadas na Tabela 1.

Em termos qualitativos e relacionais, as pressões atuantes nos vasos de pressão têm a seguinte relação (AMERICAN PETROLUUM INSTITUTE (API), 2020):

$$PO \leq PMO < PPSV^{78} \leq PPROJ^{79} \leq PMTA^{80}$$

Realizando a devida utilização das normas, considerando as características indicadas nos Quadro 1 e na Tabela 1, tem-se no Quadro 8 os seguintes resultados quanto aos intervalos máximos entre os exames externos e exames internos, por país.

<sup>77</sup> Adaptado do artigo publicado pelo autor na *Revista Observatório de La Economia Latinoamericana* (SOUSA, R. A. F. DE *et al.*, 2024).

<sup>78</sup> Pressão de ajuste (abertura) da PSV (válvula de pressão de segurança).

<sup>79</sup> Pressão de projeto do equipamento.

<sup>80</sup> Pressão máxima de trabalho admissível.



Tabela 1 - Características do vaso de pressão

| CARACTERÍSTICA                                                                  | SÍMBOLO           | ESPECIFICAÇÃO/VALOR                  | UNIDADE        |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|----------------|
| Fluido                                                                          | Não aplicável     | Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)     | Não aplicável  |
| Volume                                                                          | V                 | 5                                    | m <sup>3</sup> |
| Pressão de Operação <sup>81</sup>                                               | PO                | 10.000                               | kPa            |
| Pressão Máxima de Operação <sup>82</sup>                                        | PMO               | 13.000                               | kPa            |
| Pressão de atuação do dispositivo de proteção contra sobrepressão <sup>83</sup> | P <sub>PSV</sub>  | 14.000                               | kPa            |
| Pressão de projeto <sup>84</sup>                                                | P <sub>PROJ</sub> | 15.000                               | kPa            |
| Geometria e posição                                                             | Não aplicável     | Cilíndrico, horizontal <sup>85</sup> | Não aplicável  |
| Material construtivo                                                            | Não aplicável     | Aço carbono <sup>86</sup>            | Não aplicável  |

Fonte: autor (2024)

Constata-se que para uma mesma condição operacional, as normas nacionais determinam diferentes intervalos máximos entre os exames externos e exames internos.

Em princípio, esta situação não representa uma inconsistência, visto a supremacia de cada país na determinação dos seus requisitos nacionais

<sup>81</sup> Pressão manométrica em que o vaso de pressão opera em condição normal.

<sup>82</sup> Máxima pressão manométrica esperada durante a operação normal do sistema ou equipamento, (BRASIL, 2022a) sendo o maior valor da PO.

<sup>83</sup> Pressão em que o dispositivo de proteção contra sobrepressão atua, possibilitando o escoamento, total ou parcial, do fluido contido no vaso de pressão (usualmente corresponde a válvula de segurança, válvula de alívio, disco de ruptura, ou item com função similar, atuando independentemente da ação do operador (BRASIL, 2022a)).

<sup>84</sup> Pressão definida quando da elaboração do projeto do vaso de pressão, baseada na expectativa do comportamento do processo. Usualmente definida, na etapa de projeto, como um percentual acima da estimada PMO (Pressão Máxima de Operação).

<sup>85</sup> Vaso de pressão é adotado como fixado no local de operação (não é um equipamento transportável).

<sup>86</sup> Por conservadorismo, adotada a possibilidade de ocorrência de processo corrosivo, baixa intensidade, no costado e tampos do vaso de pressão.

Quadro 8 - Fator  $p \times V$  e intervalo máximo entre exames externos e exames internos, por país

| PAÍS      | Fator $p \times V$       | EXAME EXTERNO <sup>87</sup>                    | EXAME INTERNO <sup>88</sup>                    |
|-----------|--------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Alemanha  | 750.000 bar x litro      | 2 anos                                         | 5 anos                                         |
| Austrália | 75.000.000 kPa x litro   | 2 anos                                         | 4 anos                                         |
| Brasil    | 65 MPa.m <sup>3</sup>    | 1 ano (sem SPIE)<br>3 anos (com SPIE)          | 3 ano (sem SPIE)<br>6 anos (com SPIE)          |
| Espanha   | 750 bar x m <sup>3</sup> | 4 anos                                         | 6 anos                                         |
| México    | 70 MPa x m <sup>3</sup>  | Primeira: até 10 anos<br>Seguintes: até 5 anos | Primeira: até 10 anos<br>Seguintes: até 5 anos |

Fonte: autor (2024)

Por outro lado, destaca-se que, no estudo de caso (que corresponde à operação dos vasos de pressão sob uma dada condição de matriz de risco), seria esperado que os intervalos fossem razoavelmente similares, qualquer que seja o país, o que não é observado, como, por exemplo, temos as situações em que são determinados os seguintes intervalos máximos entre:

- (a) exames externos: um ano, no caso do Brasil; até dez anos, para o México;
- (b) exames internos: um ano, no caso do Brasil; cinco anos, para a Alemanha; dez anos, México.

Os vasos de pressão, como os demais equipamentos, apresentam um ciclo de vida. Na etapa de projeto, são definidas as condições operacionais esperadas, sendo a pressão de projeto um fator determinante no dimensionamento mecânico do equipamento.

<sup>87</sup> Exame da superfície e de componentes externos de um equipamento, podendo ser realizado em operação, visando avaliar a sua integridade estrutural. (BRASIL, 2022a)

<sup>88</sup> Exame da superfície interna e de componentes internos de um equipamento. Requer que o equipamento esteja fora de operação (não sendo usado quando da realização do exame). (BRASIL, 2022a)

Ocorre que, às vezes, ao longo da utilização de um vaso de pressão, os requisitos de processo podem variar, aumentando ou reduzindo, quando comparados àqueles originalmente adotados no projeto, o que indica ser recomendável que o plano de inspeção também seja revisto para adequar-se a estas eventuais alterações.

Considerando as normas que utilizam o termo  $p \times V$  para fins de categorização dos vasos de pressão, observa-se uma predominância nas legislações da adoção da pressão de projeto como sendo o fator  $p$ , o que pode resultar em uma divergência da categoria ao longo da vida útil do equipamento, caso a pressão de operação apresente-se diferente daquela definida no projeto, principalmente se esta pressão de operação apresentar-se menor que aquela definida quando da elaboração do projeto mecânico do equipamento.

Portanto, em vez de adotar a pressão de projeto em termos do parâmetro pressão, uma metodologia que classificasse os vasos de pressão considerando a alteração das condições operacionais poderia representar um avanço significativo.

Esta proposta de manter o plano de inspeção continuamente alinhado à realidade operacional representaria, no mínimo, as seguintes vantagens:

- (a) aumento da confiabilidade operacional;
- (b) redução potencial dos custos operacionais.

Propõe-se, então, em atendimento ao objetivo específico 2.2 (iii), que a categorização dos vasos de pressão pode ser realizada aplicando-se os seguintes parâmetros, conforme indicado no Quadro 9.

O processamento e análise dos dados requer que estes efetivamente representem o processo/fenômeno em estudo, sendo, assim, é essencial que uma avaliação qualitativa dos dados preceda os serviços, seja, também, realizada continuamente ao longo das atividades e implementada sobre os resultados.

Quadro 9 - Parâmetros a serem utilizados para a classificação dos vasos de pressão

| PARÂMETRO                                                              | COMENTÁRIO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Termo $p \times V$                                                     | O termo $p \times V$ possibilita representar adequadamente a energia armazenada no equipamento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Fator $p$ seria a pressão máxima de operação                           | A pressão máxima de operação, determinada estatisticamente a partir da coleta dos dados reais de operação, garante uma representatividade efetiva da energia armazenada no equipamento e da condição de risco associada. Com a disponibilização da automação dos processos esta opção apresenta viabilidade de implementação.                                                                                                                                                                                                                     |
| Fc, Ff e Fs, descritos na norma australiana AS 4343 (AUSTRALIA, 2005)  | Estes fatores, aplicados como coeficientes ao termo $p \times V$ , permite uma adequada classificação dos vasos de pressão, pois representará as condições operacionais às quais os equipamentos estão submetidos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Classificação dos fluidos considerando a norma ONU <sup>89</sup>       | A utilização da norma de <i>Transport of Dangerous Goods</i> <sup>90</sup> possibilita uma identificação mais adequada e padronizada das características do fluido contido no vaso de pressão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Intervalos máximos entre os exames externos e entre os exames internos | <p>O intervalo máximo entre os exames externos será o menor valor entre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquele definido pela norma australiana/neozelandesa AS/NZC<sup>91</sup> 3788; (AUSTRALIA, 2006)</li> <li>- Aquele determinado para o exame interno.</li> </ul> <p>O intervalo máximo entre os exames internos será o menor valor entre:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aquele definido pela norma australiana/neozelandesa AS/NZC 3788; (AUSTRALIA, 2006)</li> <li>- Metade da vida útil residual.</li> </ul> |

Fonte: autor (2024)

<sup>89</sup> Organização das Nações Unidas.

<sup>90</sup> Também denominado *ONU – Orange Book*.

<sup>91</sup> Austrália/Nova Zelândia.

#### 4.3 ASPECTOS QUALITATIVOS DOS DADOS E PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO

A garantia da precisão e exatidão dos resultados é iniciada pela qualidade dos dados a serem processados, sendo, portanto, fundamental que estes apresentem-se representativos e fidedignos ao processo de onde foram originados.

Por meio da revisão bibliográfica na literatura específica do tema, não foi identificado critério de categorização dos *outliers*, o que representa a oportunidade, por meio deste trabalho, de ser apresentada uma sugestão para suprir esta lacuna.

O dado ou observação que se diferencia muito, quer seja pequeníssimo ou, enorme, em relação aos demais dados ou observações é definido como *outliers* (COUSINEAU; CHARTIER, 2010), sendo necessário que, para fins de análise da distribuição de uma dada população ou amostra, estes dados/observações discrepantes sejam avaliados para, eventualmente, serem eliminados daqueles que serão tratados no estudo em questão.

Destaca-se, todavia, que a remoção destas informações não representa o descarte em si, mas, principalmente, a oportunidade de serem analisados quanto a sua causa, consequência e, caso necessário, determinação de contramedidas para evitar a ocorrência ou para a implementação de ações mitigadoras.

Para tanto, é proposta a categorização dos dados, conforme as características que possuem, de acordo com o Quadro 10, no qual, a formulação indicada, alinhada à metodologia proposta, possibilita a qualidade necessária.

Utilizando-se as categorias apresentadas no Quadro 10, os outliers podem ser adequadamente classificados, excluídos (se necessário) e analisados, elevando a qualidade e confiabilidade das estatísticas, bem como, uniformizando e padronizando a qualificação dos dados.

Quadro 10 - Categoria dos dados

| CATEGORIA                                                 | TIPO                  | CARACTERÍSTICA                                                                                                                                                                                                            | AÇÃO                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Outlier</i>                                            | <i>Outlier</i> tipo 0 | Valor apresenta inconsistência decorrente da medição, transmissão, processamento ou armazenamento, devendo ser descartado antes do tratamento estatístico.                                                                | Podem ser implementadas ações corretivas para que as causas da inconsistência sejam eliminadas, evitando-se problemas similares em medições futuras.                                                                                                 |
| <i>Outlier</i>                                            | <i>Outlier</i> tipo 1 | Valor apresenta inconsistência pois representa medição efetivamente realizada, entretanto decorrente do processo estar:<br>(a) fora de operação;<br>(b) em transição, sendo colocado ou retirado da condição de operação. | Dados devem ser descartados da análise.                                                                                                                                                                                                              |
| <i>Outlier</i>                                            | <i>Outlier</i> tipo 2 | Valor apresenta inconsistência pois representa valor efetivamente medido, porém em condição anormal de operação.                                                                                                          | Dados devem:<br>(a) ser identificados;<br>(b) ser verificados se a ocorrência se deve a causa especial;<br>(c) ser descartados da análise, caso sejam originados de causa especial;<br>(d) ter a causa determinada, tratada e eliminada ou mitigada. |
| Estatisticamente aplicável e de interesse para a análise. | Dado de interesse.    | Dado efetivo do processo sob análise, representando grandeza qualitativamente e quantitativamente significativa.                                                                                                          | Dados a serem utilizados na análise estatística.                                                                                                                                                                                                     |

Fonte: autor (2024)

#### 4.4 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DA CONVERGÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS REAIS À DISTRIBUIÇÃO NORMAL GAUSSIANA.

A ferramenta desenvolvida por D'Agostino (1990) permite a comparação gráfica e matemática do perfil de normalidade dos dados sob análise, quando comparados à representação linearizada do comportamento esperado dos dados, se normais fossem, etapa esta que foi proposta neste trabalho.

Através de representação gráfica são apresentados aspectos quanto à distribuição dos dados reais (dados de processo), comparando-se estes em relação à distribuição normal, sendo esta linearizada. As expressões definidas em 5.4.1 e 5.4.2 indicam como foram geradas as curvas:

##### 4.4.1 Determinação da “Curva da pressão de operação padronizada”

Com o objetivo de possibilitar a análise da convergência entre os dados reais e a curva normal gaussiana, uma curva é definida (indicada pela cor vermelha), Figura 29, Figura 30 e Figura 31, a partir dos dados reais, de forma que os pontos da curva correspondam aos dados reais, por meio das equações:

$$d_i = \frac{i-a}{n+1-2a} \quad (\text{Equação 7})$$

$$Z_i = \text{Inverso-normal}(d_i) \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

$d_i$  = probabilidade do  $i$ ésimo elemento (pressão de operação, padronizada)

$n$  = quantidade de elementos

$a = 3/8$ , se  $n \leq 10$

$= 1/2$ , se  $n > 10$

$Z_i$  = Inverso do valor normal, correspondente a  $d_i$

##### 4.4.2 Determinação da “reta de referência da curva normal”, associada à pressão de operação

A reta referente aos dados reais da pressão de operação (indicada pela cor preta na Figura 29 a

Figura 31) é obtida através da seguinte equação:

$$r_i = Z_i \times \sigma + x \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

$r_i$  = valor da probabilidade da pressão de operação, padronizada

$\sigma$  = desvio – padrão da população

$x$  = média aritmética da população

#### 4.4.3 Determinação do erro absoluto médio, entre a “Curva da pressão de operação padronizada” e a “reta de referência da curva normal”.

Para possibilitar a determinação quantitativa da metodologia proposta, o erro absoluto médio foi calculado conforme a seguir indicado:

$$erro_{absoluto-m\u00e9dio} = \frac{\sum_{i=1}^n (|Z_i - r_i|)}{n} \quad (\text{Equação 10})$$

#### 4.4.4 Determinação do erro entre cada valor da “Curva da pressão de operação padronizada” e valor respectivo da “reta de referência da curva normal”.

Outra métrica para a quantificação da metodologia é a determinação do erro entre cada valor da “Curva da pressão de operação padronizada” e valor respectivo da “reta de referência da curva normal”, que é calculado da seguinte forma:

$$erro_{espec\u00edfico} = Z_i - r_i \quad (\text{Equação 11})$$

O resultado deste erro é apresentado em figuras, para cada equipamento analisado, possibilitando uma avaliação qualitativa da diferença entre cada valor da “Curva da pressão de operação padronizada” e valor respectivo da “reta de referência da curva normal”.



#### 4.4.5 Aspectos qualitativos da curva referente aos dados reais e da reta referente à pressão de operação.

Quando apresentadas nos gráficos aspectos característicos em termos de parâmetros estatísticos a curva da “Pressão de operação padronizada” e da curva referente à pressão de operação, que estão descritos no Quadro 11, bem como indicados na Figura 29, Figura 30 e Figura 31.

Quadro 11 - Aspectos qualitativos da curva da “Pressão de operação padronizada” e da curva referente à pressão de operação

(continua)

| FIGURA    | POSIÇÃO | DESCRIÇÃO                                                                        | CARACTERÍSTICA                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|---------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 29 | 01      | Agrupamento horizontal de valores da “curva da pressão de operação padronizada”. | Existência de valor de pressão de operação em elevada frequência de ocorrência, indicando que o equipamento opera geralmente neste valor de pressão. Podem existir mais de um agrupamento (usualmente dois), indicando distribuições com mais de uma moda (usualmente bimodal) e elevada dispersão dos dados. |
| Figura 30 | 02      | Agrupamento vertical de valores da “curva da pressão de operação padronizada”.   | Baixa ocorrência de operação do equipamento na respectiva faixa da pressão.                                                                                                                                                                                                                                   |

Fonte: autor (2024)

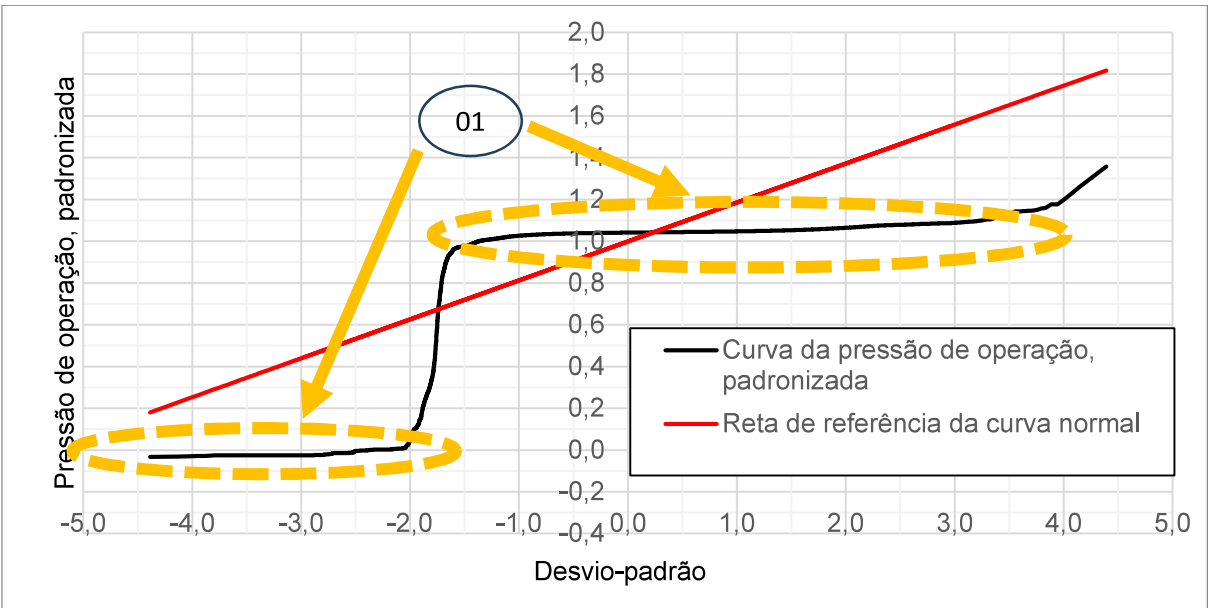
Quadro 12 - Aspectos qualitativos da curva da “Pressão de operação padronizada” e da curva referente à pressão de operação

(continuação)

| FIGURA    | POSIÇÃO | DESCRIÇÃO                                                                         | CARACTERÍSTICA                                                                                                          |
|-----------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Figura 31 | 03      | Inclinação da “curva da pressão de operação padronizada”.                         | Quanto maior foi a inclinação, maior a diferença entre a distribuição dos dados reais em relação à distribuição normal. |
|           | 04      | Intersecção da “curva da pressão de operação padronizada” e o eixo das ordenadas. | Valor corresponde à média aritmética dos valores de pressão de operação.                                                |
|           | 05      | Intersecção da reta referente aos dados reais e o eixo das ordenadas.             | Valor corresponde à média aritmética dos valores de pressão de operação, caso a distribuição fosse normal.              |

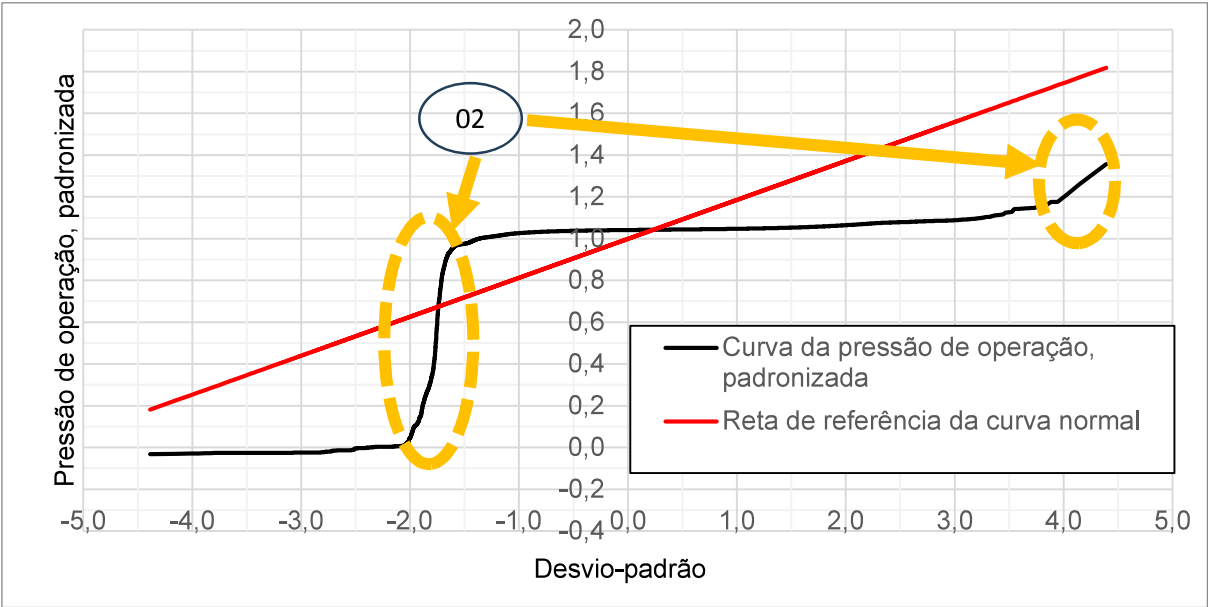
Fonte: autor (2024)

Figura 29 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando a posição 01



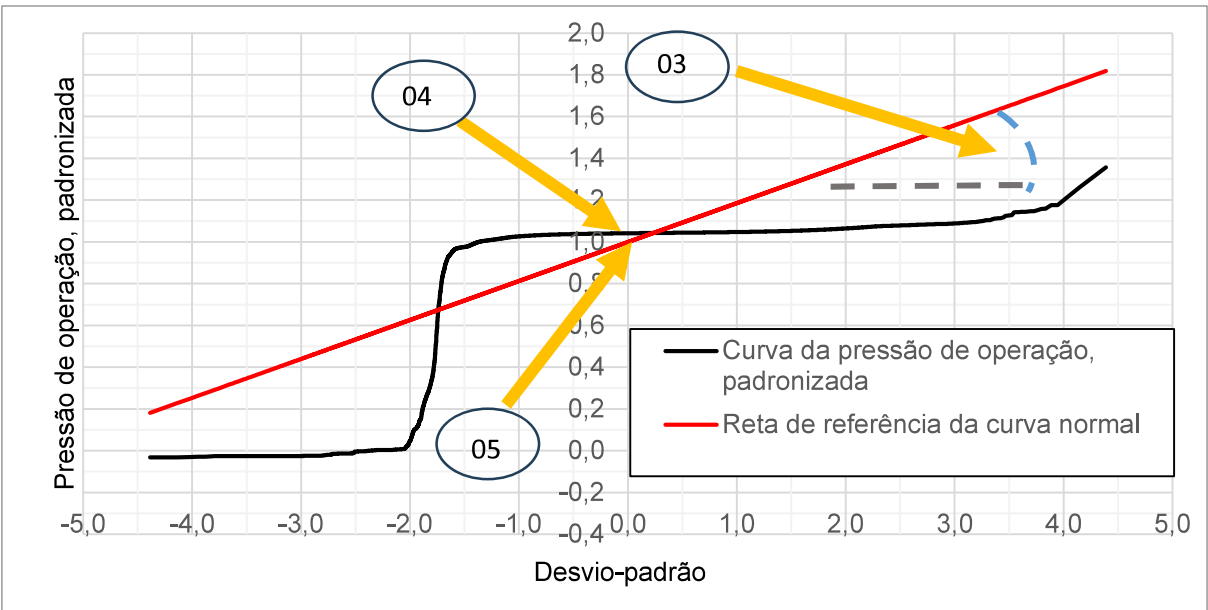
Fonte: autor (2024)

Figura 30 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando a posição 02



Fonte: autor (2024)

Figura 31 - Aspectos qualitativos da curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, destacando as posições 03, 04 e 05



Fonte: autor (2024)

#### 4.5 PROCESSAMENTO DOS VALORES DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO

Considerando a metodologia aplicada e a sequência das atividades conforme indicado no Quadro 6, os valores da pressão de operação, obtidos de registros reais de uma planta de óleo e gás, foram analisados e estão apresentados nesta seção.

Como foram analisadas a condição operacional de 10 equipamentos (vasos de pressão), sendo coletada a pressão de operação a intervalos de uma hora, ao longo de 10 anos, conforme detalhado na

Tabela 2.

Os resultados obtidos, por equipamento, estão apresentados a seguir, sendo utilizados figuras e quadros, para possibilitar a avaliação e evolução da metodologia proposta.

A pressão de operação padronizada, correspondendo à razão entre o valor da pressão de operação e o valor da pressão média (média aritmética, calculada considerando os valores da pressão de operação). Assim procedendo, mantém-se a condição do sigilo industrial, bem como, possibilita a comparação dos valores entre os diversos equipamentos, pois os valores estão em base padronizada.

Tabela 2 - Quantidade de dados utilizados

| PARÂMETRO                                                   | QUANTIDADE |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| Quantidade de equipamentos                                  | 10         |
| Quantidade de anos de coleta de dados                       | 10         |
| Intervalo entre a coleta dos dados (por hora) <sup>92</sup> | 1          |
| Quantidade de dados                                         | 876.000    |

Fonte: autor (2024)

Para cada um dos dez equipamentos analisados, são apresentados quatro conjuntos de figuras, sendo cada um deste conjuntos, composto de três figuras [(a),

<sup>92</sup> Mesmo considerando que o sistema de aquisição de dados possui uma taxa de 5 amostras por segundo (5 medições da pressão de operação por segundo), a presente metodologia adotou a taxa de uma medição da pressão de operação por hora, pois é razoável ser considerado que a grandeza pressão de operação [para o perfil de operação classe A (vide Quadro 7)] não apresente variações muito rápidas.

(b) e (c)], possibilitando a verificação da aplicação da metodologia sobre os dados da pressão de operação.. As informações contidas em cada figura estão detalhadas no Quadro 13.

Quadro 13 - Informações contidas em cada figura de cada equipamento

| TÍTULO DA FIGURA                                                                                                              | INFORMAÇÃO CONTIDA EM CADA FIGURA                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos                                                     | Pressão de operação, padronizada pela média, medida a intervalo horário, no período de dez anos.                                                                                                                                              |
| Quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica | Histograma do logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, agrupada por intervalo de desvio-padrão.                                                                                                                         |
| Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal.                                                | Possibilita avaliar qualitativamente a posição da curva da pressão de operação padronizada em relação à reta de referência da curva normal, sendo um indicador da normalidade dos dados.                                                      |
| Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal.                     | Indica o erro (diferença) entre cada valor da pressão de operação padronizada e o valor correspondente, caso a pressão apresentasse a distribuição normal. Permite qualificar e quantificar a normalidade dos valores da pressão de operação. |

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.1 Resultados do equipamento 01

Na Tabela 3 percebe-se que a metodologia aplicada sobre os valores da pressão de operação acarretou que o desvio-padrão fosse significativamente reduzindo, ao mesmo tempo que erro absoluto médio diminuiu de 14,37% para 1,84%, indicando uma convergência do resultado com a curva normal (Figura 33 e Figura 34).

A Tabela 4 apresenta a quantidade e o percentual (em relação à quantidade inicial) dos dados em cada etapa da aplicação da metodologia, tendo resultado que 96,02% dos dados originais são considerados válidos, o que indica que a análise representa efetivamente o comportamento operacional do equipamento.

Tabela 3 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                           | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|------------------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                          |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                        | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO                | Adimensional | 0,19                                 | 0,03        | 0,03            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL         | %            | 18,65                                | 3,25        | 3,24            |
| MODA                                     | Adimensional | 1,04                                 | 1,00        | 1,00            |
| MEDIANA                                  | Adimensional | 1,04                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO <sup>93</sup> | Adimensional | 1,56                                 | 1,10        | 1,10            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS             | Quantidade   | 87602                                | 84136       | 84118           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS              | Quantidade   | 87522                                | 84136       | 84118           |
| OUTLIERS TIPO 0                          | Quantidade   | 80                                   | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                          | Quantidade   | -                                    | 3386        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                          | Quantidade   | -                                    | -           | 18              |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO                      | %            | 14,37                                | 1,84        | 1,84            |

Fonte: autor (2024)

A Figura 32 indica que a pressão de operação tem valores condizentes com o perfil de operação classe A (conforme proposto no Quadro 7), sendo a metodologia

<sup>93</sup>A pressão de operação é apresentada adimensional (pois foi padronizada pela média), em todas as tabelas similares, que a esta sucedem.

aplicável a este equipamento. Os valores de pressão são agrupados em duas faixas, sendo uma próxima do valor zero (indicando que o equipamento não está sob pressão, logo está fora de operação); e, a maioria dos valores da pressão, está ocorrendo com elevada quantidade, na faixa próxima do valor unitário (pois os valores foram padronizados pela média).

Esta distribuição com característica bi-normal está indicada na Figura 33 (a) e na Figura 34 (a). À medida que os dados são tratados e chega-se ao final da metodologia, a Figura 33 (c) e na Figura 34 (c) apresentam os dados com um perfil próximo ao da normalidade.

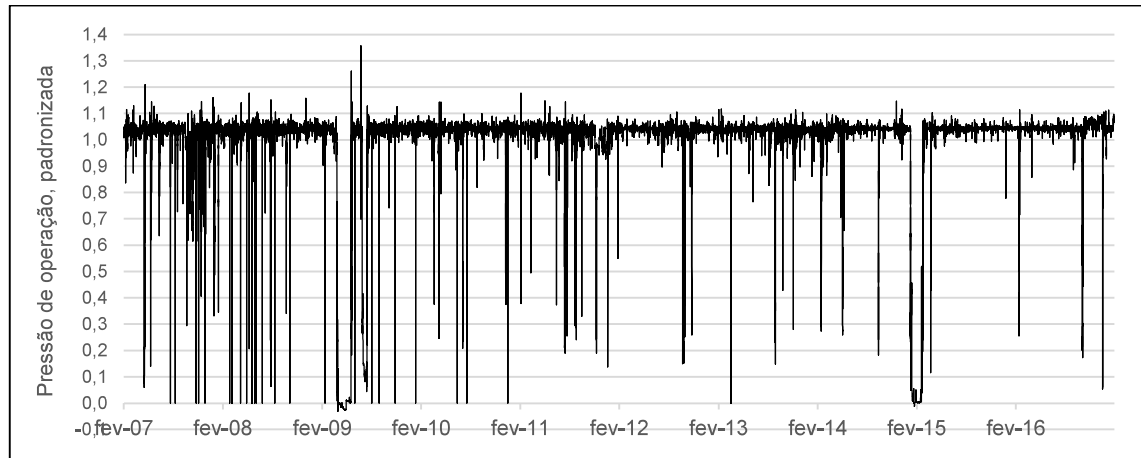
Através da Figura 34, que representa curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, bem como, pela diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, apresentada na Figura 35, fica indicado que este estudo resultou em erro desprezível, principalmente no intervalo  $[-2\sigma, 3\sigma]$ , estando os dados obtidos com uma distribuição elevadamente normal.

Tabela 4 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

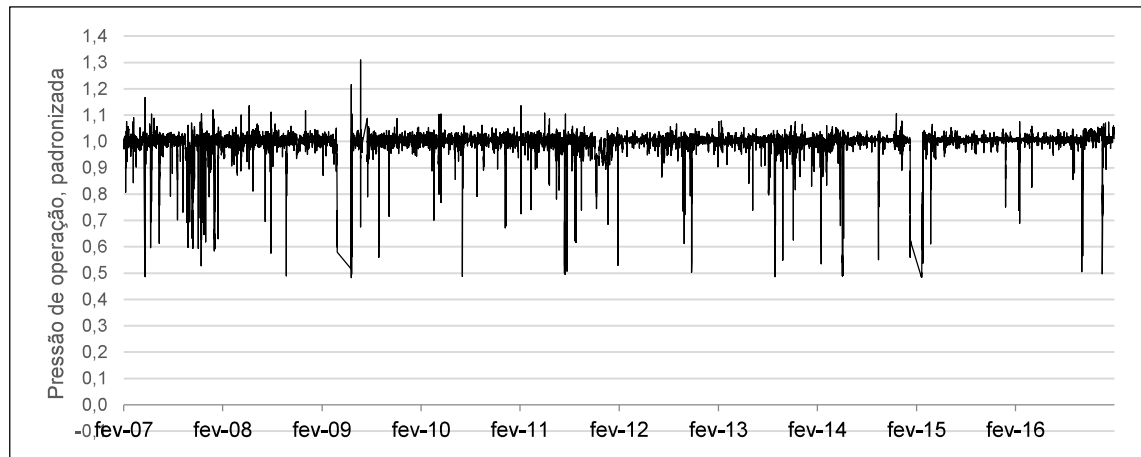
| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 80         | 0,09       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.522     | 99,91      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.386      | 3,87       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 84.136     | 96,04      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 18         | 0,02       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 84.118     | 96,02      |

Fonte: autor (2024)

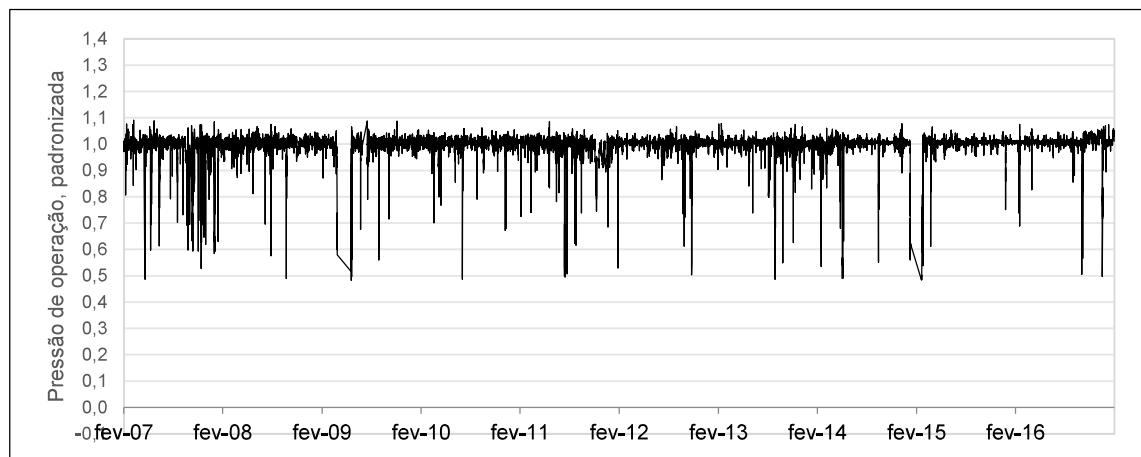
Figura 32 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)

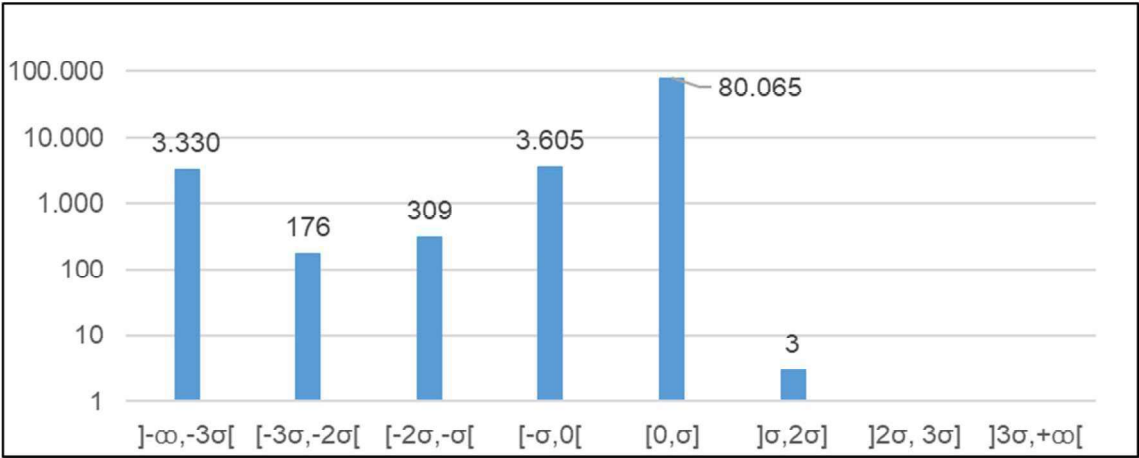


(c)

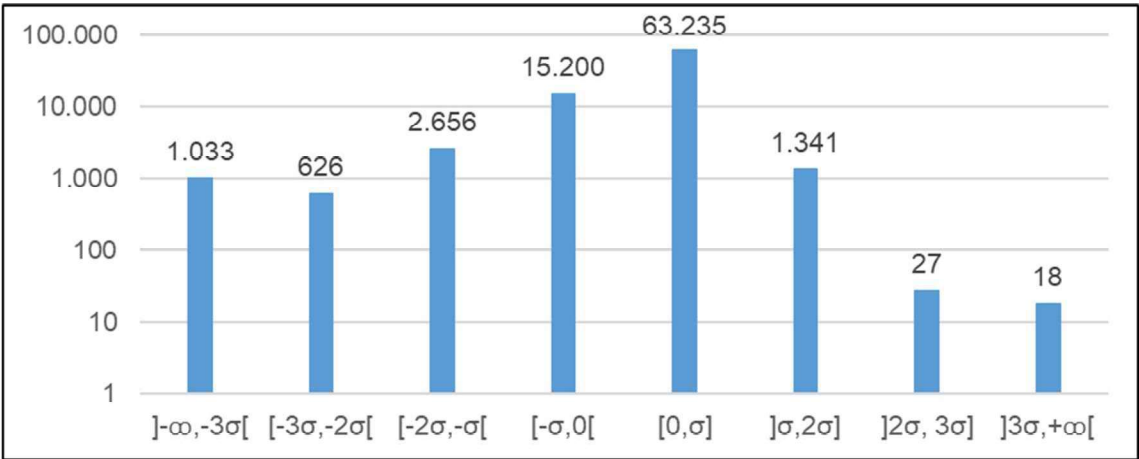
Fonte: autor (2024)



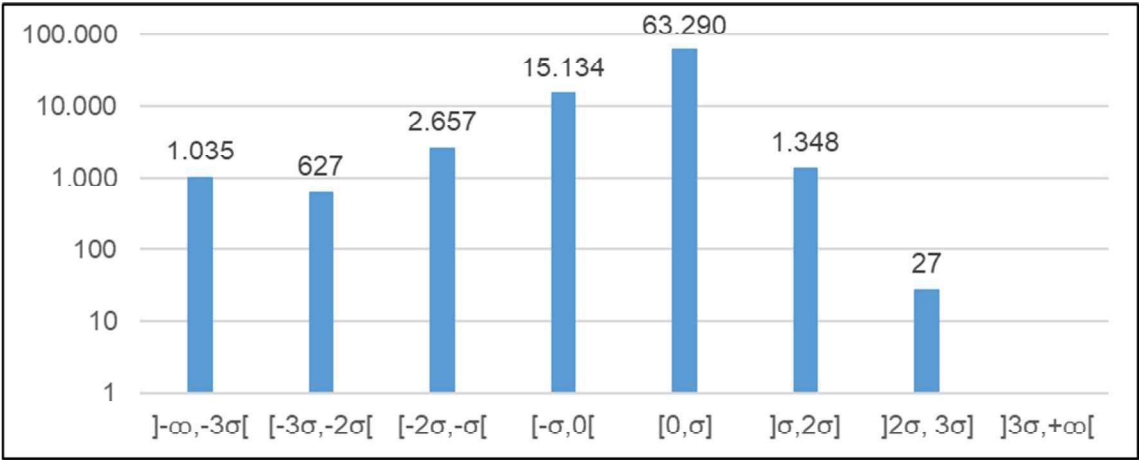
Figura 33 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 34 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



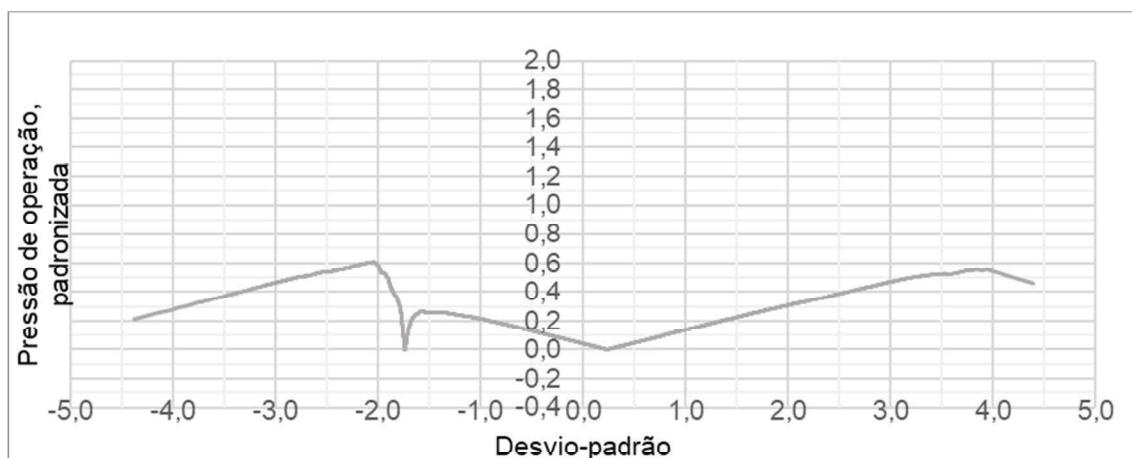
(b)



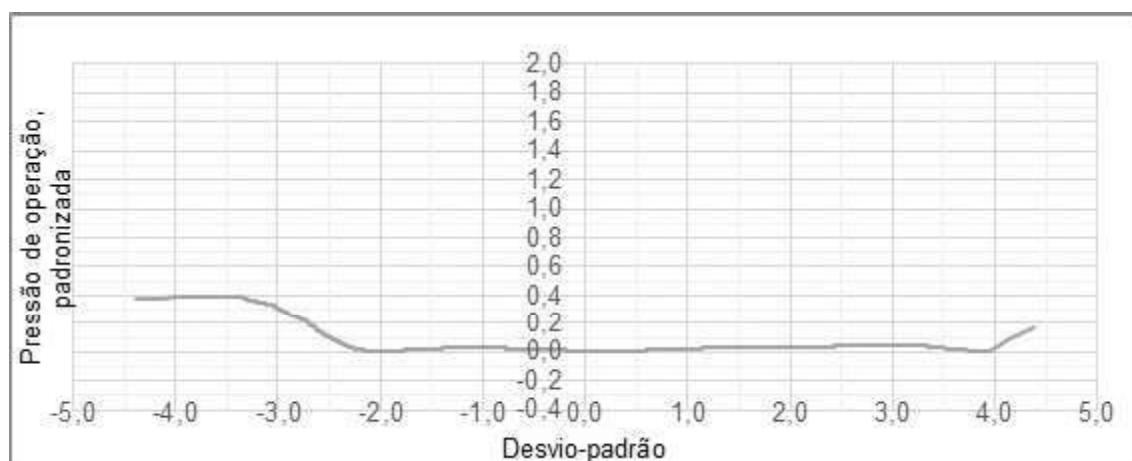
(c)

Fonte: autor (2024)

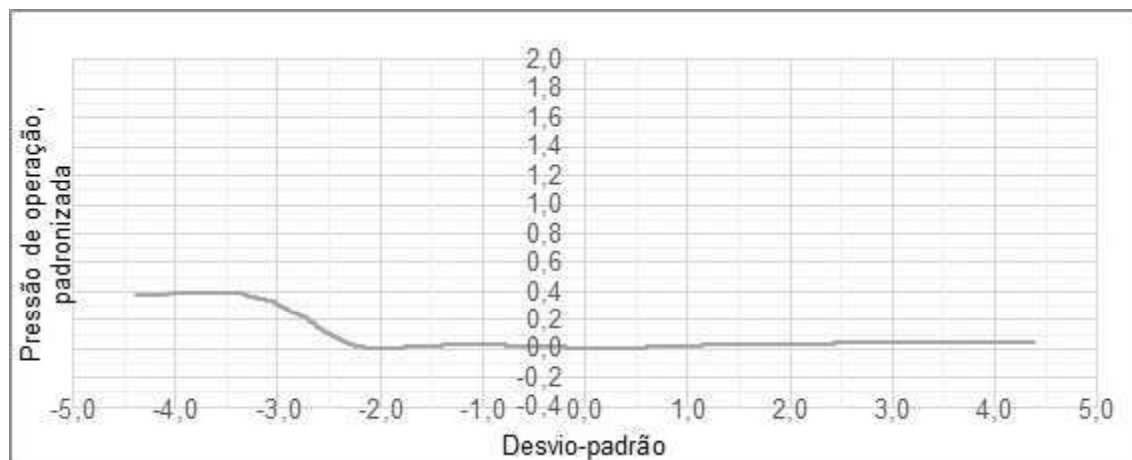
Figura 35 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### **4.5.2 Resultados dos equipamentos 02, 03 e 04**

Decorrente da característica operacional dos equipamentos 02, 03 e 04 ser semelhante ao equipamento 01, constata-se, por meio da comparação das respectivas tabelas e figuras, que a análise, interpretação e resultados são praticamente idênticos, tornando desnecessária a discussão.

Todavia, há de ser destacar que a metodologia aplicada possibilitou resultados com elevada consistência.

A visualização das tabelas e figuras dos equipamentos 02, 03 e 04 está disponível no apêndice.

#### **4.5.3 Resultados do equipamento 05**

O perfil da pressão de operação do equipamento 05 apresentou considerável variação ao longo do período observado, ocorrendo valores maiores que três vezes a média em fevereiro/12 e fevereiro/17, vide Figura 36 (a) e Figura 38 (a). A causa destes eventos não foram disponibilizada para análise.

Mesmo com estes eventos potencialmente originados de causas especiais, o erro absoluto médio corresponde a 6,18% e, após a metodologia aplicada, passou a 3,91% (Tabela 5), o que pode também ser constatado pelo valor do coeficiente de variação amostral (passou de 35,90% para 24,82), significando um processo operacional com dispersão razoável (Tabela 6). A metodologia, portanto, indica a oportunidade de melhoria no controle operacional, com potenciais ganhos.

Na Figura 37 constata-se a alteração da distribuição da ocorrência da pressão de operação, ao passo que a Figura 38 e Figura 39 indicam a convergência dos dados à distribuição normal, porém com a reta de referência ainda apresentando uma inclinação, o que pode representar a necessidade de serem analisados os valores maiores que  $+3\sigma$  (quantidade 05, Figura 37 (c)).

A condição operacional deste equipamento indica a possibilidade de ser vantajosa a utilização de média móvel para a avaliação, sendo usado o intervalo de 1 ano ou seis meses, a depender das informações de processo. A utilização de média móvel não é objeto deste trabalho e está apresentada no item 6 RECOMENDAÇÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.

Tabela 5 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,36                                 | 0,25        | 0,25            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 35,90                                | 25,17       | 24,82           |
| MODA                             | Adimensional | 1,34                                 | 1,24        | 1,24            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,09                                 | 1,01        | 1,02            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 2,08                                 | 1,76        | 1,74            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 79082       | 78939           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87362                                | 79082       | 78939           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 240                                  | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 8280        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 143             |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 6,18                                 | 3,78        | 3,91            |

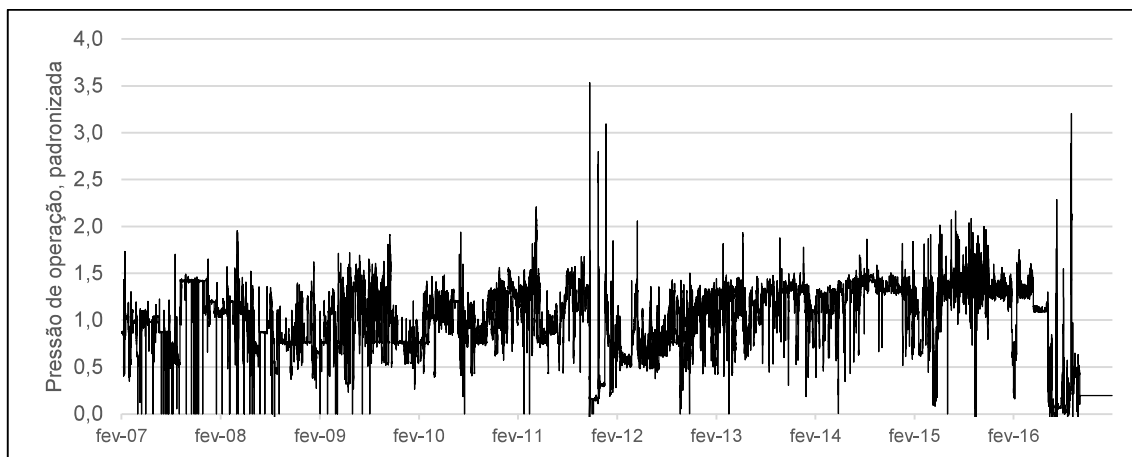
Fonte: autor (2024)

Tabela 6 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

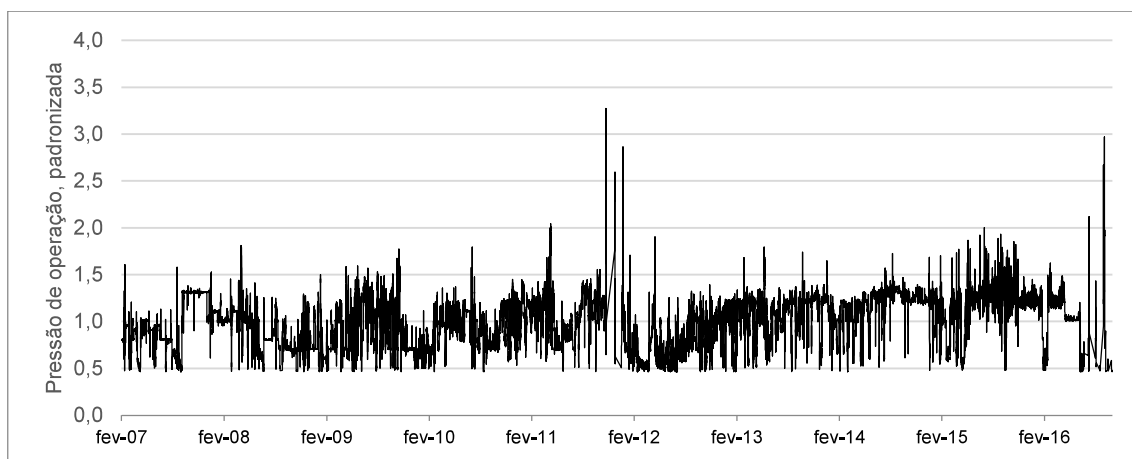
| CARACTERÍSTICA                                                           | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                             | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS (OUTLIERS TIPO 0)                        | Quantidade | 240        | 0,27       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                      | Quantidade | 87.362     | 99,73      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS (OUTLIERS TIPO 1) | Quantidade | 8.280      | 9,45       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                  | Quantidade | 79.082     | 90,27      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS (OUTLIERS TIPO 2) | Quantidade | 143        | 0,16       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11              | Quantidade | 78.939     | 90,11      |

Fonte: autor (2024)

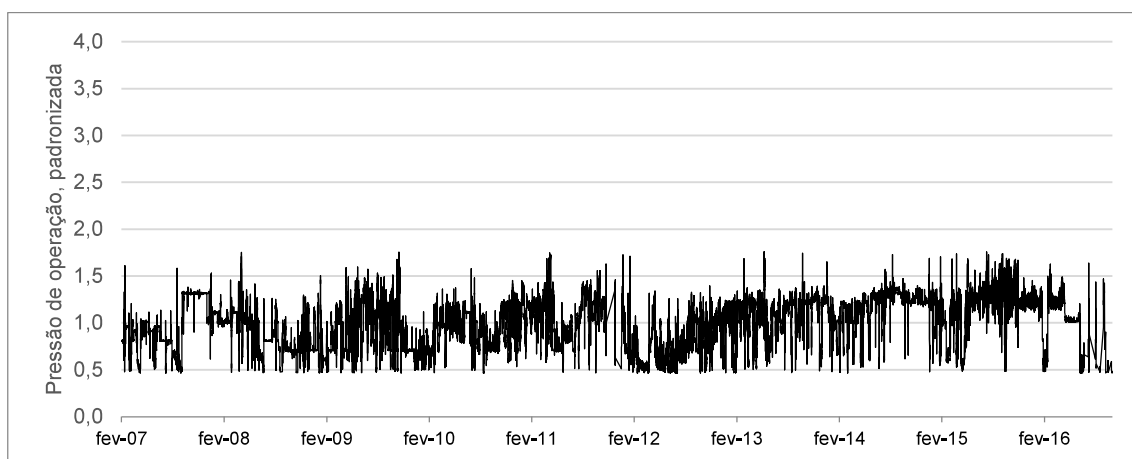
Figura 36 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



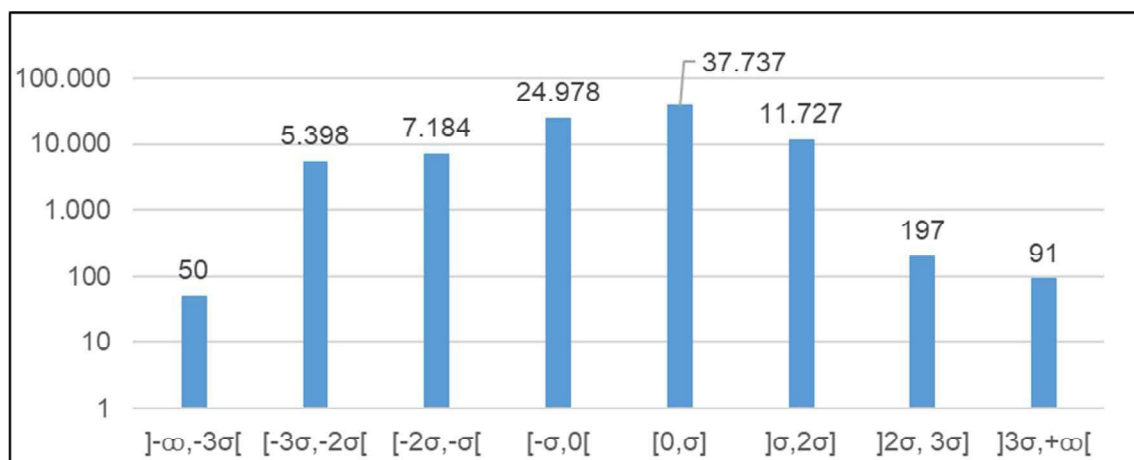
(b)



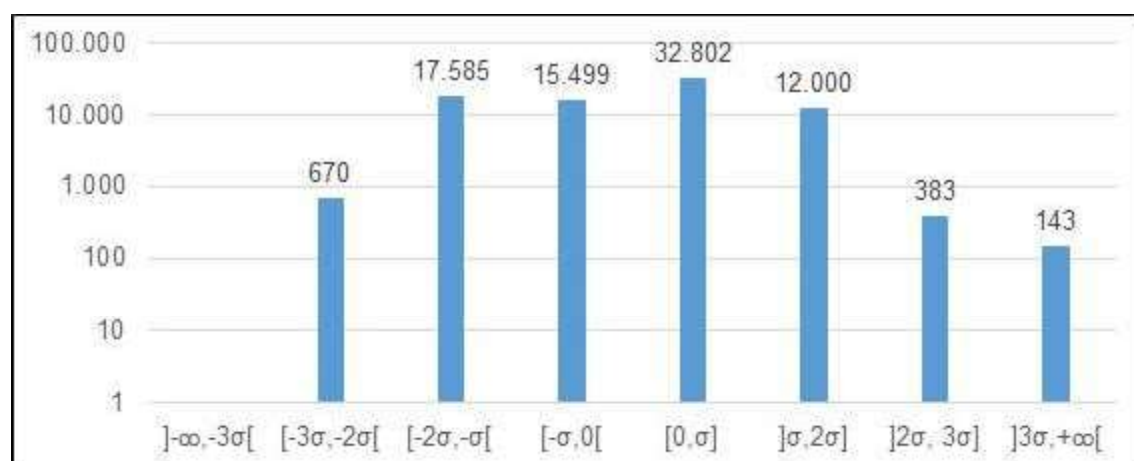
(c)

Fonte: autor (2024)

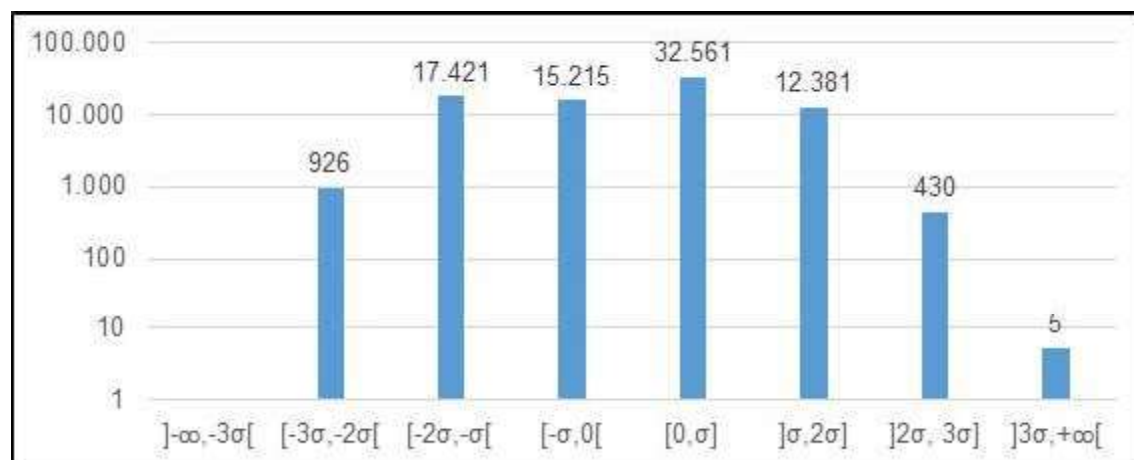
Figura 37 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



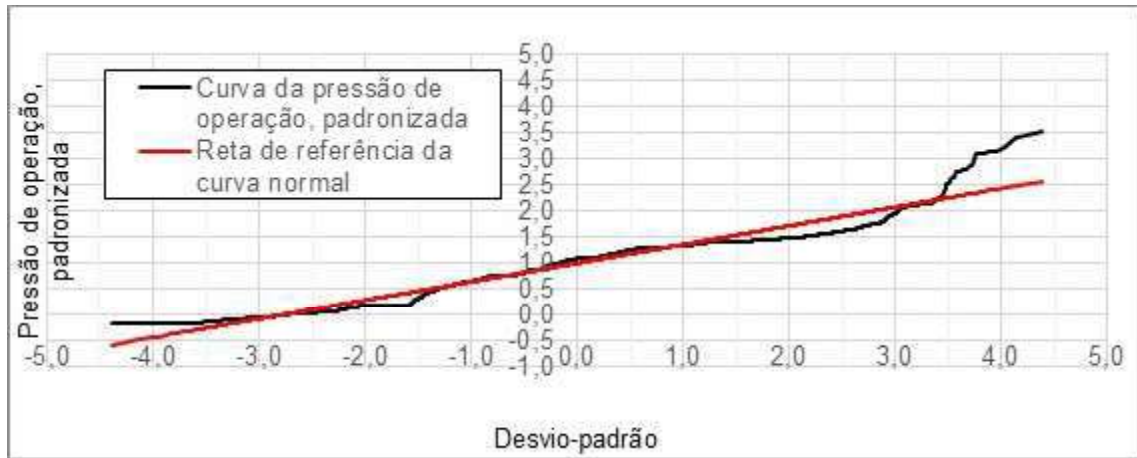
(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 38 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)



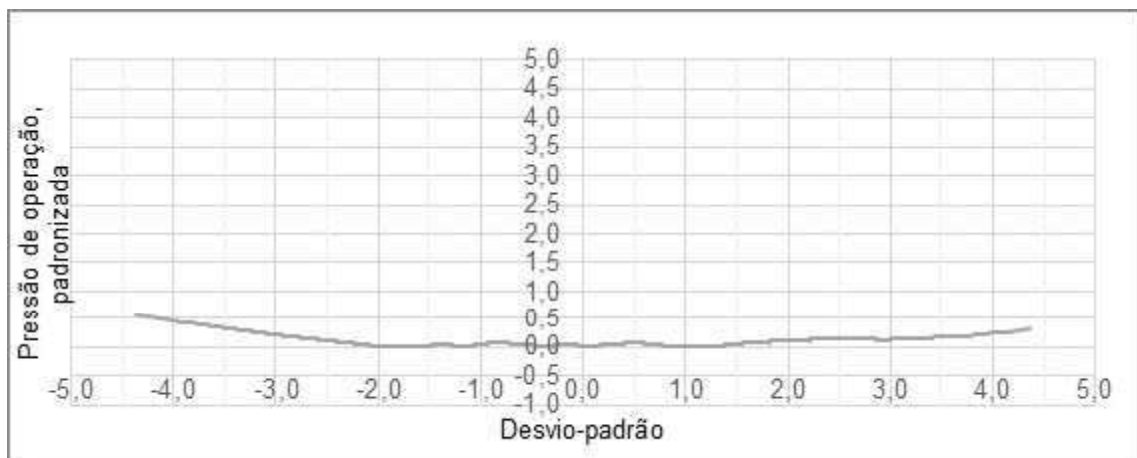
Figura 39 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.4 Resultados do equipamento 06

A elevada variação da pressão de operação observada ao longo dos dez anos de registros da Figura 40 é um aspecto importante a ser considerado quanto à análise dos dados do equipamento 06 (semelhante situação é observada no equipamento 10, que é discutido também neste trabalho). O coeficiente de variação amostral, mesmo tendo sido reduzido pela aplicação da metodologia, passando de 83,69% para 43,84% (Tabela 7), é elevado, sendo recomendável que, nesta condição, análises sejam implementadas para ser identificada a causa destes valores tão elevados de pressão, de forma que possam ser tomadas as ações pertinentes, em termos da estabilização do processo.

A Figura 41 mostra uma distribuição dos dados à direita da média, decorrente da contribuição dos valores elevados da pressão de operação, o que também é constatado pelo valor da diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e a reta de referência da curva normal (Figura 43).

As Tabela 7 e Tabela 8 indicam a elevada quantidade de outliers tipo 1 excluídos, resultante da presença de eventos com pressão elevada, o que acarretou o aumento da pressão média de operação.

No tocante aos outliers tipo 2, (Tabela 7 e Tabela 8) foram identificados 1.352 valores da pressão de operação, sendo, também, um indicativo da ocorrência de instabilidades do processo, as quais se concentram nos períodos: (i) maio/2007; (ii) dezembro/2007; (iii) janeiro/2008; (iv) novembro/2009 até dezembro/2009; não estando disponíveis informações da empresa sobre estas causas.

Ocorrências pontuais, de mesma magnitude, também foram observadas em quatro outros eventos (agosto/2011; setembro/2012; agosto/2014; setembro/2015); podendo ser um indicador da presença de eventos operacionais periódicos (aproximadamente anuais, como parada para manutenção programada), porém não foram disponibilizados registros para esta verificação.

Tabela 7 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,84                                 | 0,55        | 0,44            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 83,69                                | 54,91       | 43,84           |
| MODA                             | Adimensional | 1,27                                 | 0,98        | 1,03            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 0,89                                 | 0,89        | 0,92            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 3,51                                 | 2,65        | 2,32            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 64260       | 62908           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 83967                                | 64260       | 62908           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 3635                                 | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 19707       | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 1352            |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 13,60                                | 16,40       | 9,32            |

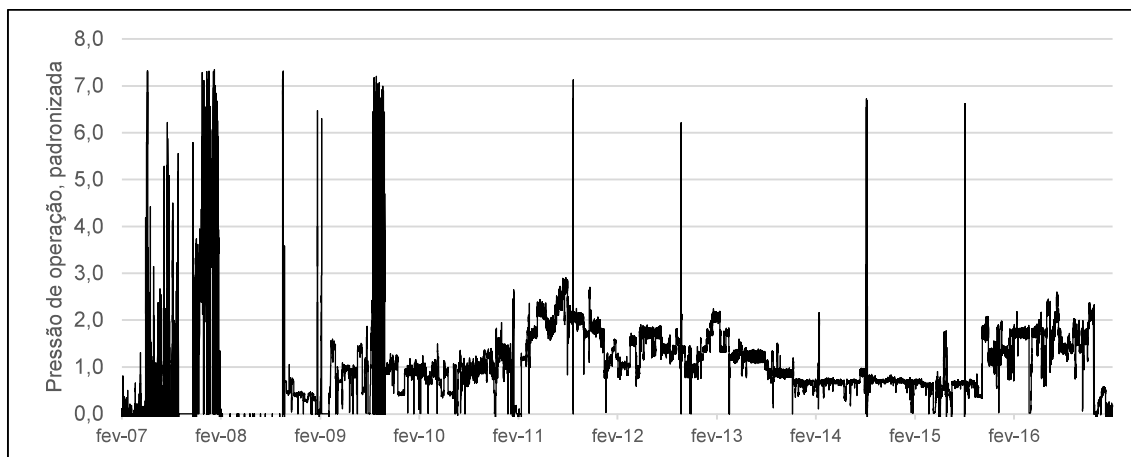
Fonte: autor (2024)

Tabela 8 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

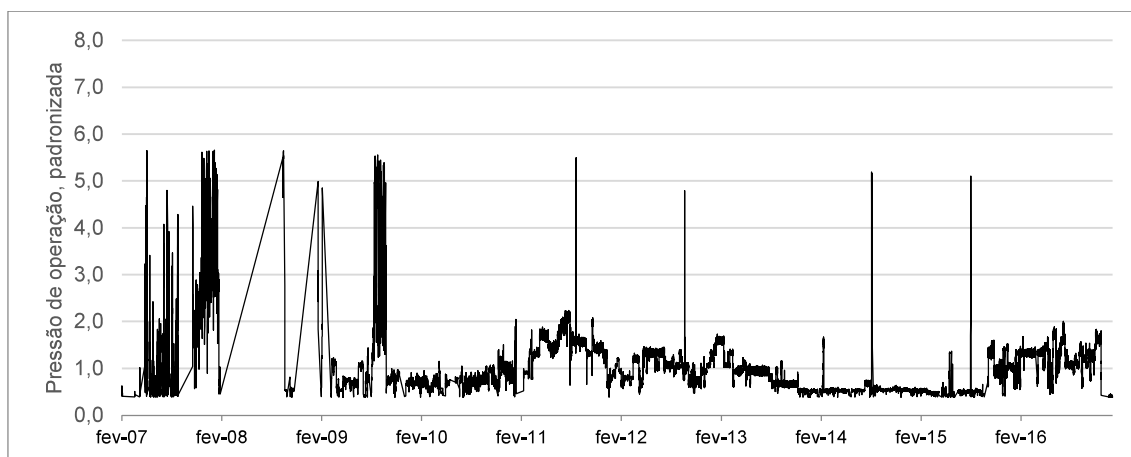
| CARACTERÍSTICA                                                           | UNIDADE      | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                             | Quantidade   | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS (OUTLIERS TIPO 0)                        | Quantidade   | 3.635      | 4,15       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                      | Quantidade   | 83.967     | 95,85      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS (OUTLIERS TIPO 1) | Quantidade   | 19.707     | 22,50      |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                  | Quantidade   | 64.260     | 73,35      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS (OUTLIERS TIPO 2) | Quantidade   | 1.352      | 1,54       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11              | Adimensional | 62.908     | 71,81      |

Fonte: autor (2024)

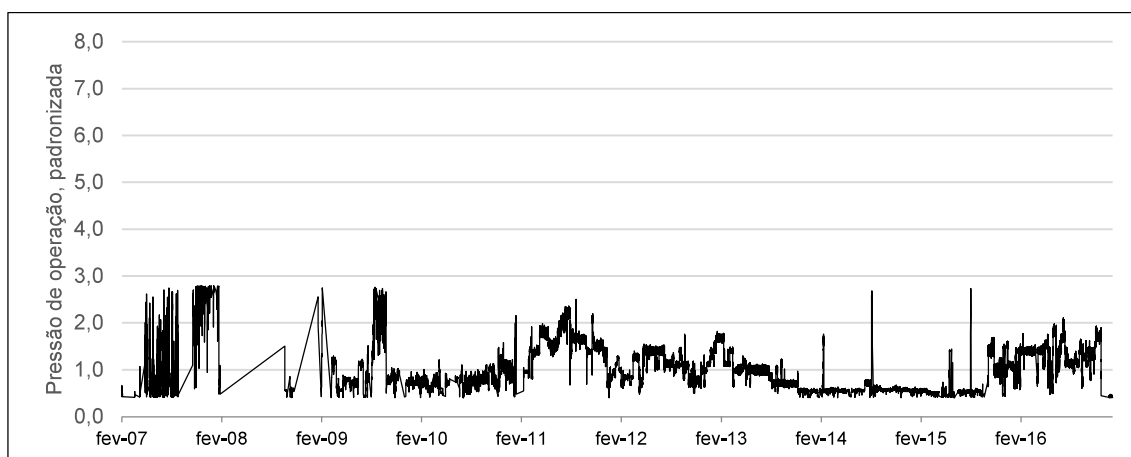
Figura 40 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



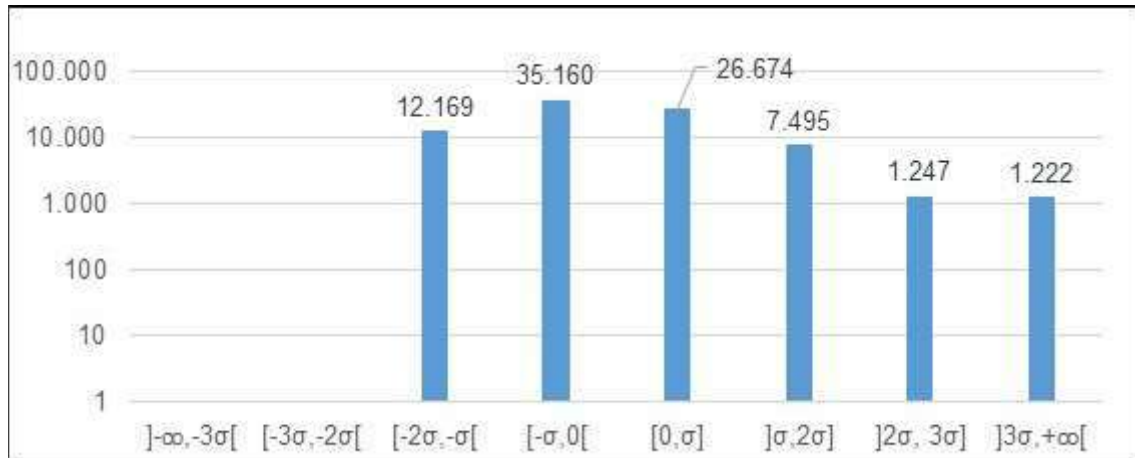
(b)



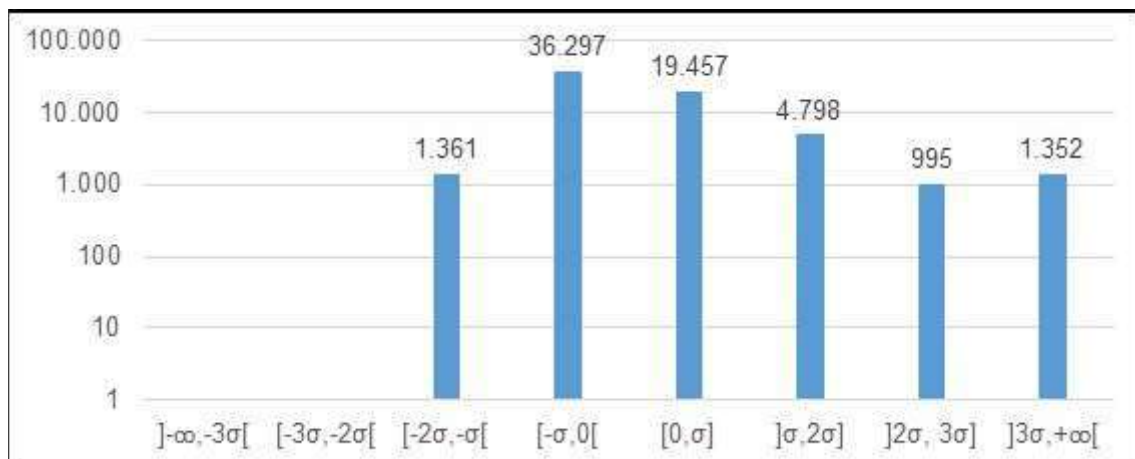
(c)

Fonte: autor (2024)

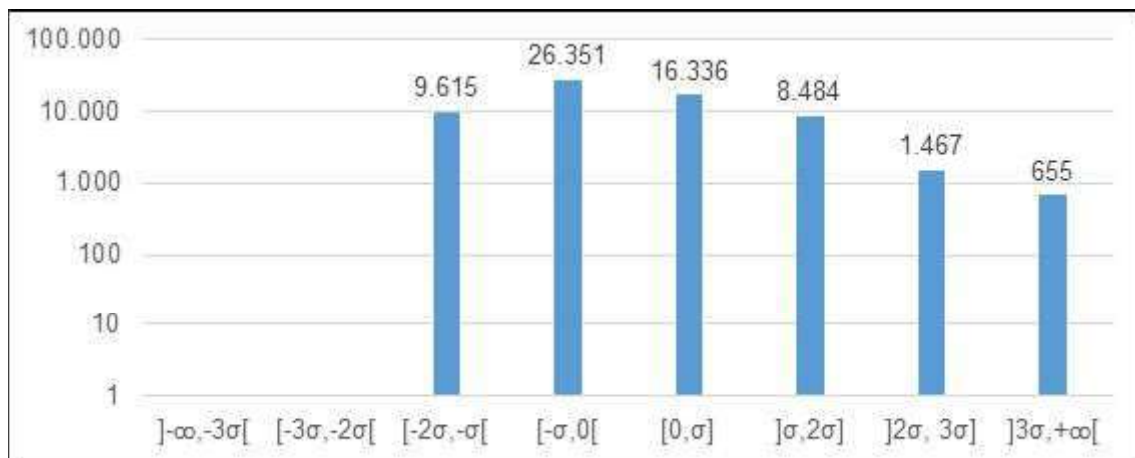
Figura 41 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 42 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

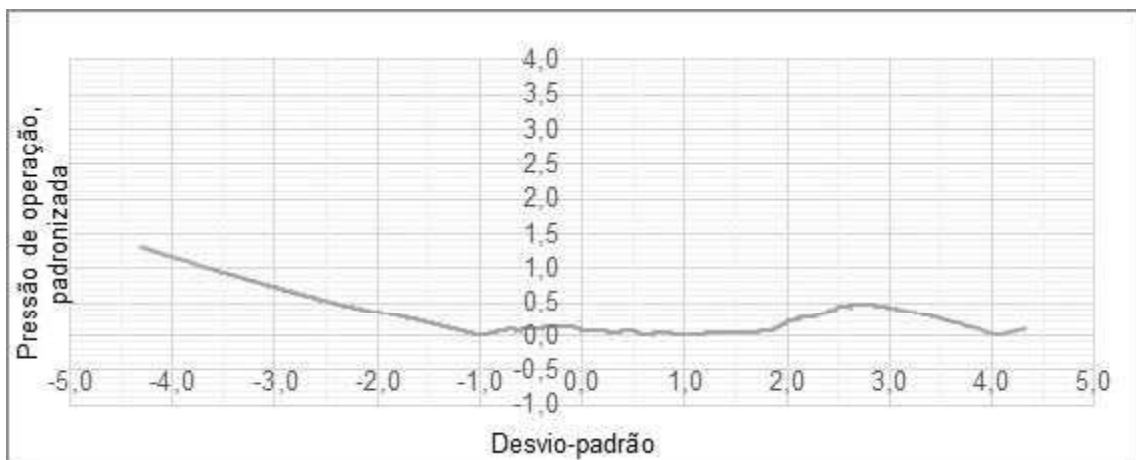
Figura 43 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.5 Resultados do equipamento 07

Os resultados obtidos em relação ao equipamento 07, cuja pressão de operação apresentou vários eventos no qual o equipamento esteve fora de operação (pressão próxima ou igual a zero) (Figura 44) indicam que ocorreu elevada convergência com a distribuição normal, pois o erro absoluto médio foi reduzido de 7,99% para 1,24% (Tabela 9).

Foram identificados, conforme Tabela 10, 1.736 valores do outliers tipo 1, e 07 valores correspondentes aos outliers tipo 2, sendo um indicador da estabilidade operacional do processo em que o equipamento está inserido.

Tabela 9 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,14                                 | 0,05        | 0,05            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 13,64                                | 4,99        | 4,98            |
| MODA                             | Adimensional | 1,01                                 | 0,99        | 0,99            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,03                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,41                                 | 1,15        | 1,15            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 85659       | 85652           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87395                                | 85659       | 85652           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 207                                  | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 1736        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 7               |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 7,99                                 | 1,24        | 1,24            |

Fonte: autor (2024)

Na Figura 45 percebe-se que a metodologia possibilitou a identificação e eliminação dos valores potencialmente inadequados, tendo a distribuição dos dados adquirido o formato gaussiano, o que também é verificado na Figura 46.



Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, indicada na Figura 47, foi reduzido significativamente, principalmente no intervalo  $[-2 \sigma; +4 \sigma]$ , sendo praticamente zero, resultando na convergência com a normalidade estatística.

A reta de referência da curva normal teve a inclinação reduzida, o que pode ser identificado pela Figura 46 (a) e (c).

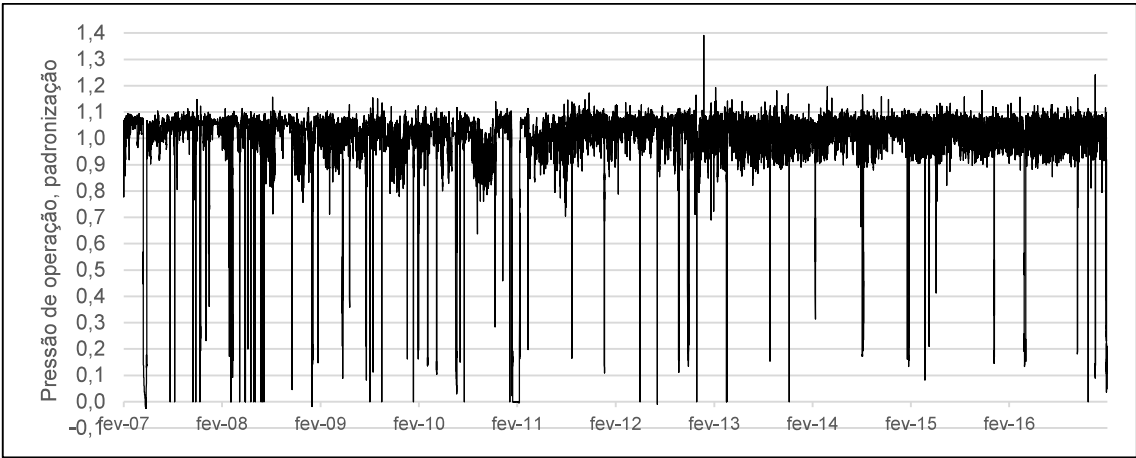
Um aspecto importante que a Tabela 10 indica é que mais de 97% dos valores originais da pressão de operação estão sendo utilizados para a determinação da PMO, o que significa elevada qualidade do sistema de controle, em termos da estabilidade operacional.

Tabela 10 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

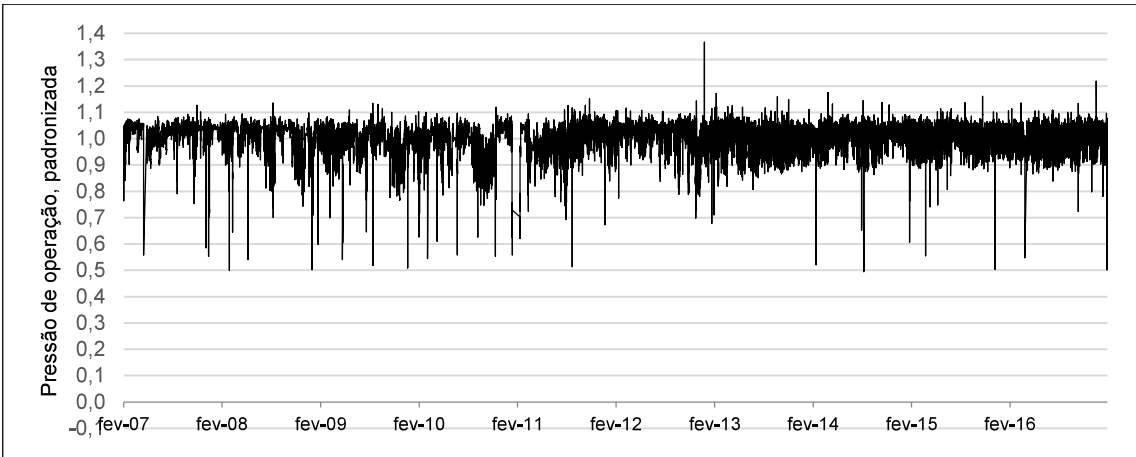
| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 207        | 0,24       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.395     | 99,76      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 1.736      | 1,98       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 85.659     | 97,78      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 7          | 0,01       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 85.652     | 97,77      |

Fonte: autor (2024)

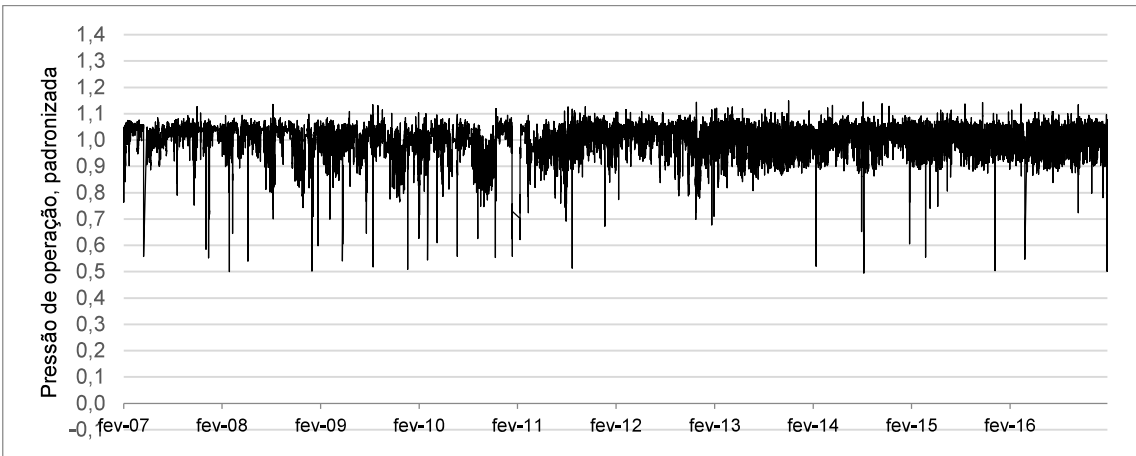
Figura 44 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



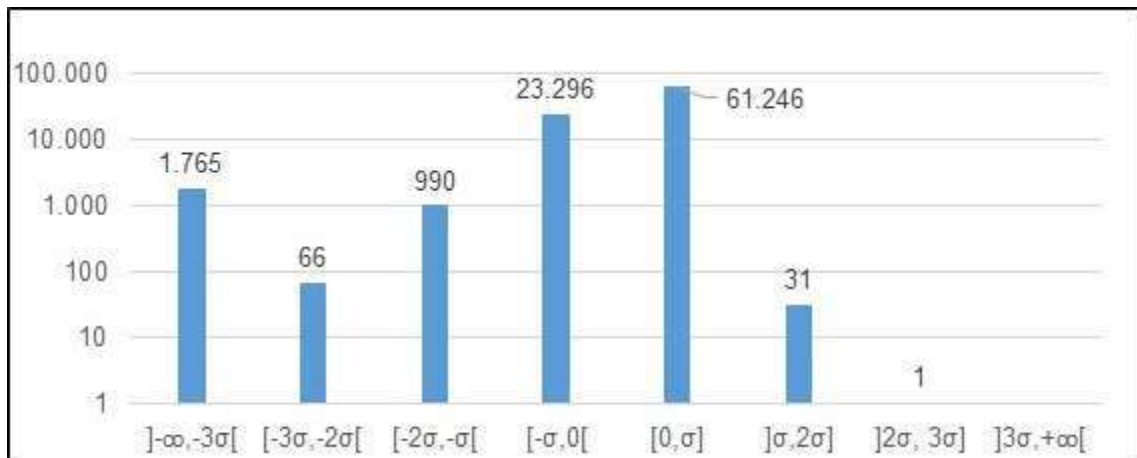
(b)



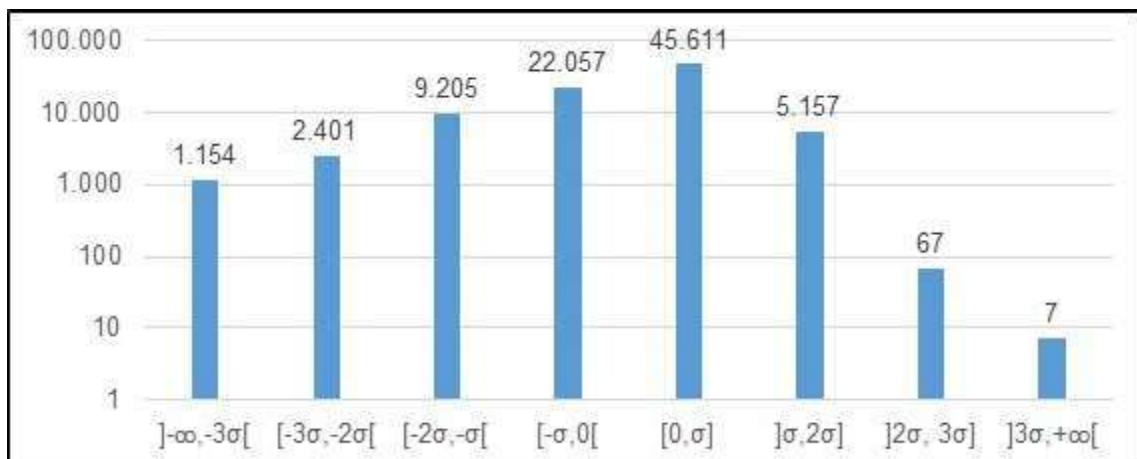
(c)

Fonte: autor (2024)

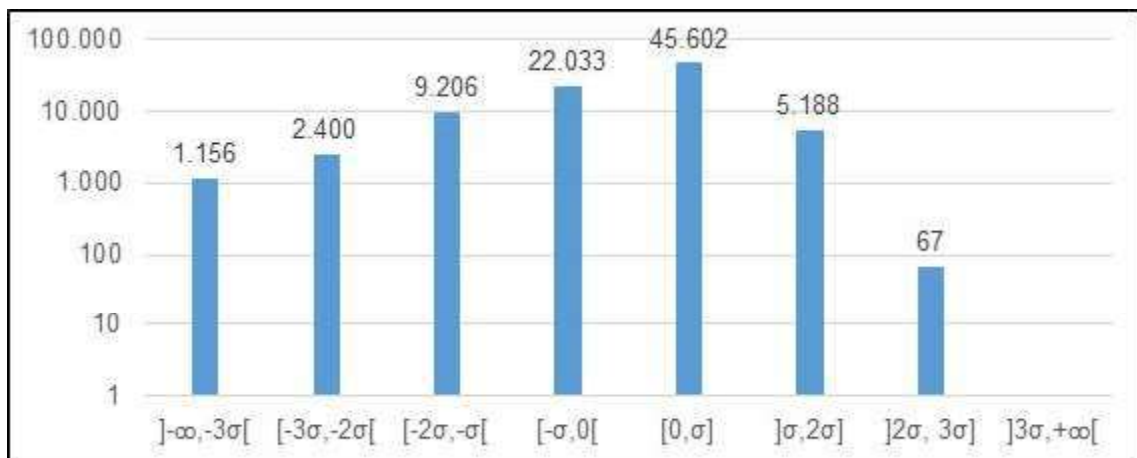
Figura 45 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 46 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



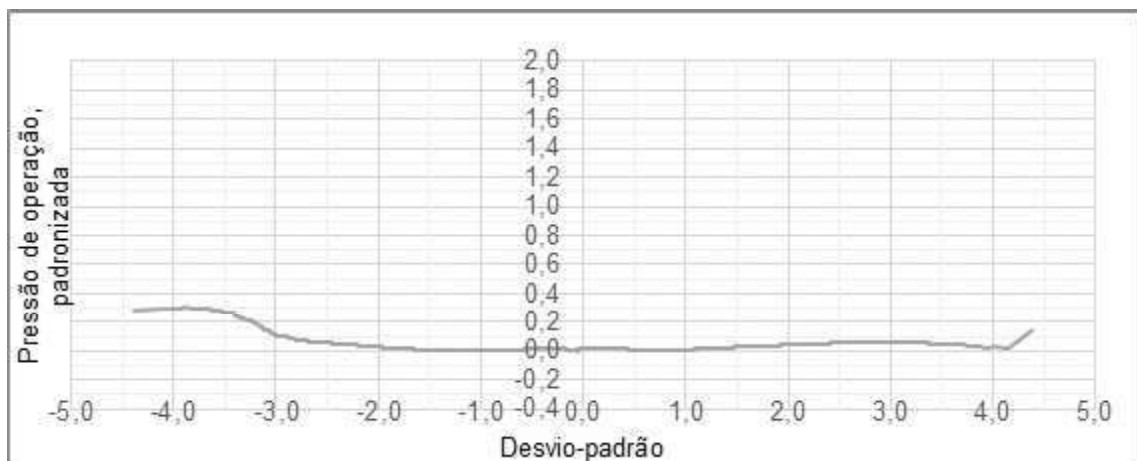
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 47 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.6 Resultados do equipamento 08

Verifica-se na Figura 48 que o equipamento em questão apresenta um perfil de pressão razoavelmente constante, destacando-se a ausência de eventos de sobrepressão, o que também fica evidenciado pela inexistência de *outliers* tipo 2 (Tabela 12). A aplicação da metodologia permitiu que o erro absoluto médio fosse reduzido de 8,36% para 1,57% (Tabela 11).

A distribuição das ocorrências, apresentada na Figura 49(a) e (c), indica a obtenção de um perfil similar a normalidade, sendo eliminados cerca de 75% dos eventos compreendidos no intervalo  $]-\infty, -3\sigma]$ . Pode também ser constatado o deslocamento da distribuição à direita da média, o que resultou na convergência dos valores da média, moda e mediana (Tabela 11).

Tabela 11 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,21                                 | 0,11        | 0,11            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 20,78                                | 10,88       | 10,88           |
| MODA                             | Adimensional | 0,82                                 | 0,79        | 1,01            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,03                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,62                                 | 1,33        | 1,33            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 84245       | 84245           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87466                                | 84245       | 84245           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 136                                  | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 3221        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 0               |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 8,38                                 | 1,57        | 1,57            |

Fonte: autor (2024)

Por meio da Figura 50, verifica-se que a curva da pressão de operação padronizada aproxima-se da reta de referência da curva normal, ao passo que esta tem a sua inclinação reduzida, indicando um processo estável.

A diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal, visualizada na Figura 51, é reduzida para valores próximos a zero no intervalo  $[-2\sigma, +2\sigma]$ , representando compatibilidade da distribuição dos dados da pressão de operação com a curva normal.

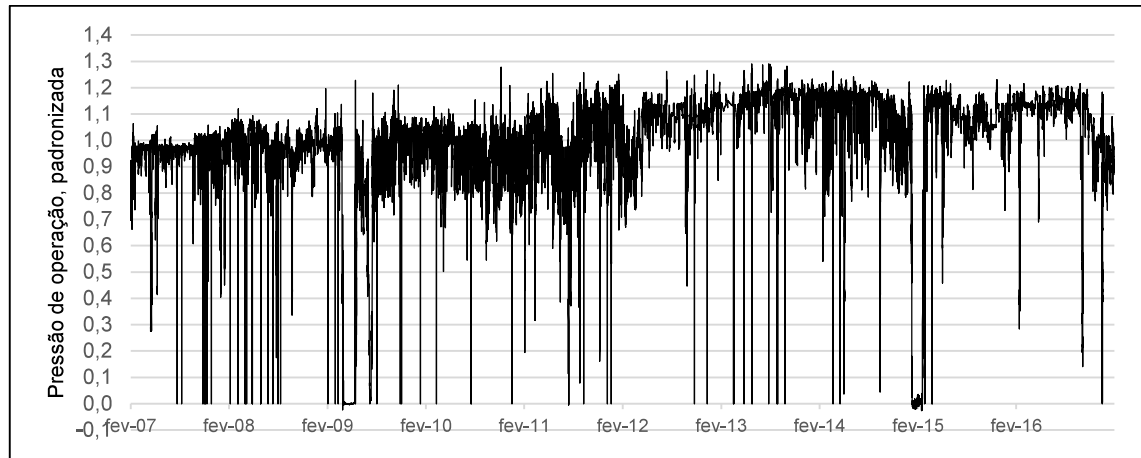
Verifica-se na Figura 48 (a) que a pressão de operação aparenta um perfil com valores médios em valores razoavelmente distintos em dados períodos: (i) fevereiro/2007 até fevereiro/2011; (ii) fevereiro/2012 até fevereiro/2014; (iii) fevereiro/2016 até fevereiro/2017. O empreendimento operacional não disponibilizou registros operacionais que indicassem as razões destas situações.

Tabela 12 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

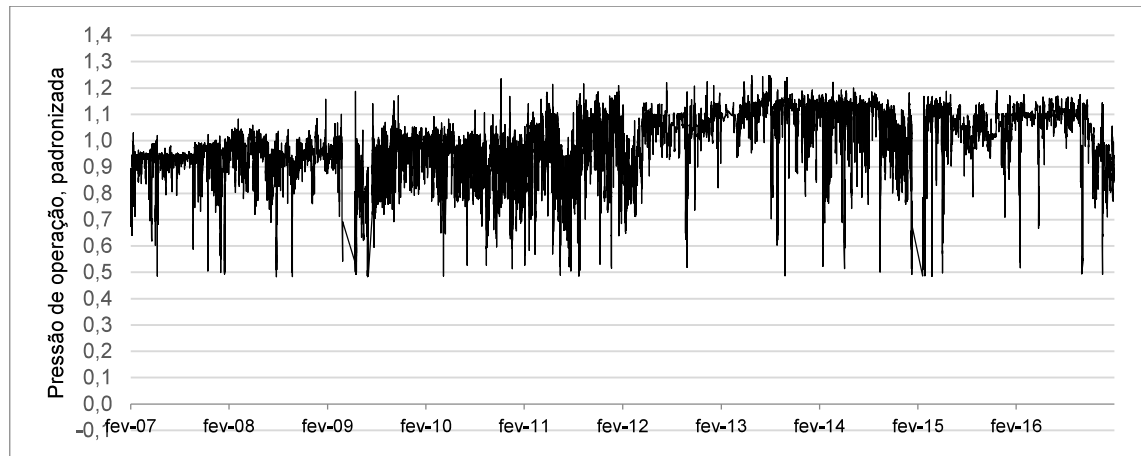
| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 136        | 0,16       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.466     | 99,84      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.221      | 3,68       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 84.245     | 96,17      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | -          | 0,00       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 84.245     | 96,17      |

Fonte: autor (2024)

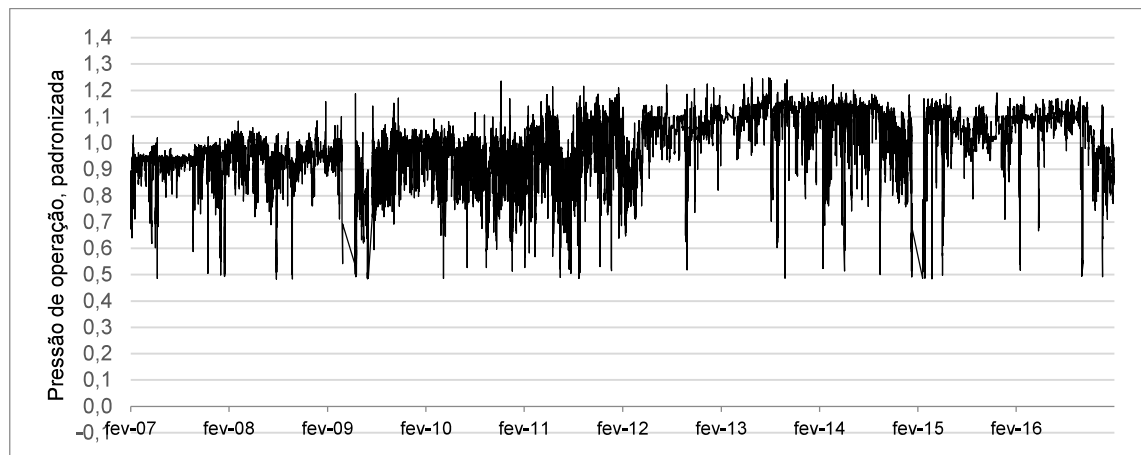
Figura 48 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

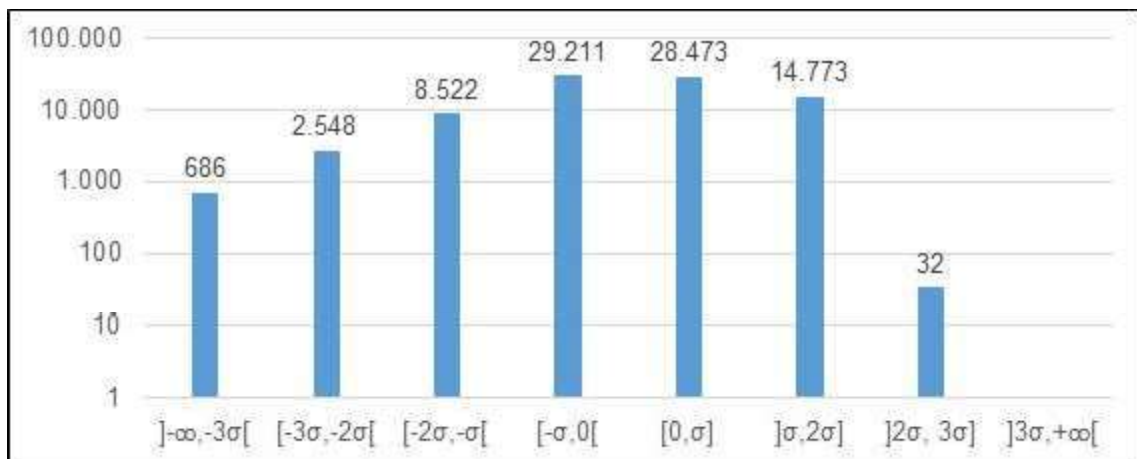
Fonte: autor (2024)



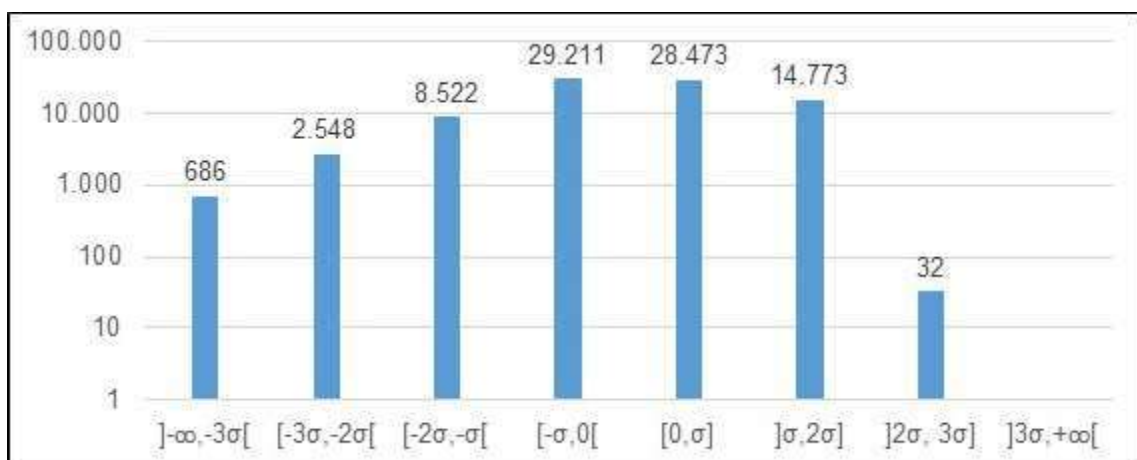
Figura 49 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



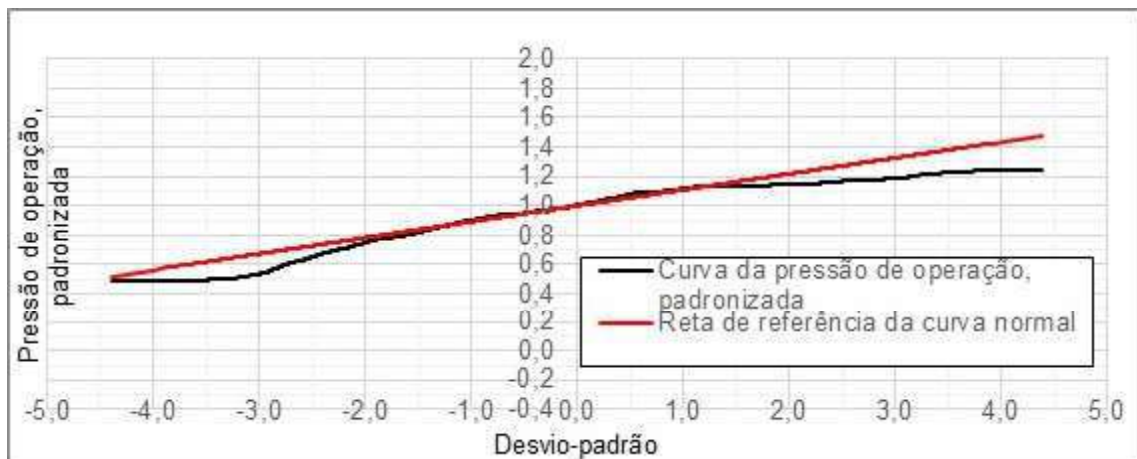
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 50 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



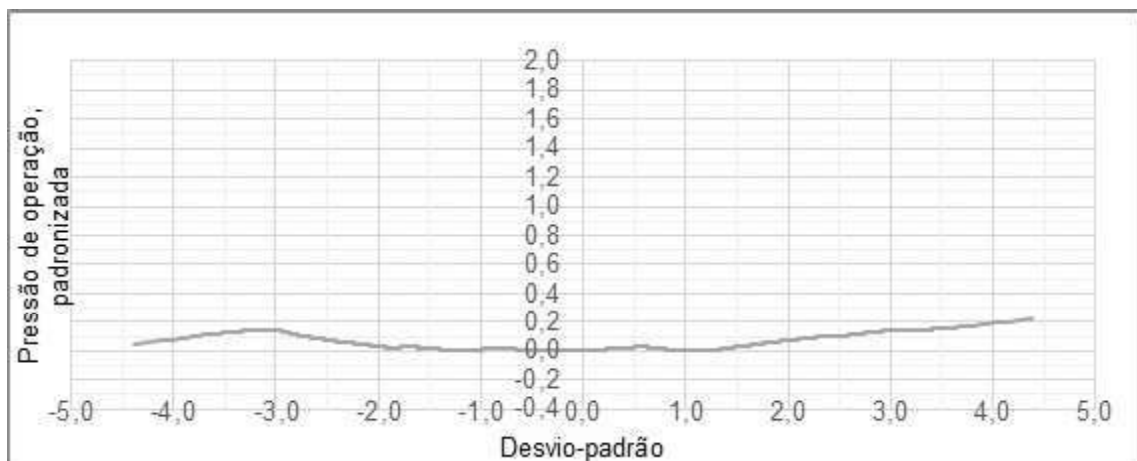
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 51 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.7 Resultados do equipamento 09

Verifica-se que a metodologia permitiu que o erro absoluto médio tenha sido reduzido de 7,21% para 0,57% (Tabela 13), tendo sido considerados mais de 95,8% dos valores da pressão de operação (Tabela 14).

A Figura 52 (c) indica os seguintes perfis de operação, por períodos:

entre dezembro/2008 até março/2009.....aproximadamente 0,85;  
março/2011 até julho/2011.....aproximadamente 1,20;  
dezembro/2015 até fevereiro/2017.....aproximadamente 1,10.

Tabela 13 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,22                                 | 0,13        | 0,13            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 22,41                                | 13,24       | 13,20           |
| MODA                             | Adimensional | 1,01                                 | 0,97        | 0,97            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,03                                 | 1,00        | 1,00            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,67                                 | 1,40        | 1,40            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 83992       | 83934           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87515                                | 83992       | 83934           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 87                                   | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 3523        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 58              |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 7,21                                 | 0,56        | 0,57            |

Fonte: autor (2024)

Estas ocorrências podem ser indicativos de patamares distintos de pressão de operação, decorrentes de condições específicas de processo. A aplicação da metodologia por meio de médias móveis, que é uma das propostas de trabalhos futuros, trata vantagens à sistemática proposta, pois representará mais adequadamente a situação operacional.

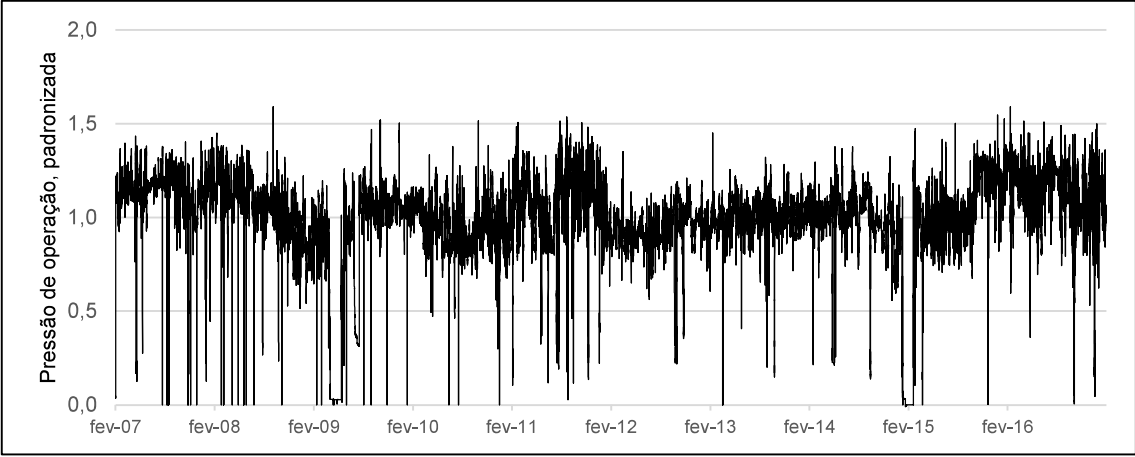
Observa-se que a distribuição normal é obtida à medida que a metodologia é aplicada (Figura 53), ao mesmo tempo em que a curva da pressão de operação padronizada converge para a reta de referência da curva normal (Figura 54) e que a diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal é eliminada (próximo de zero), em todo o intervalo do desvio-padrão (Figura 55)

Tabela 14 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

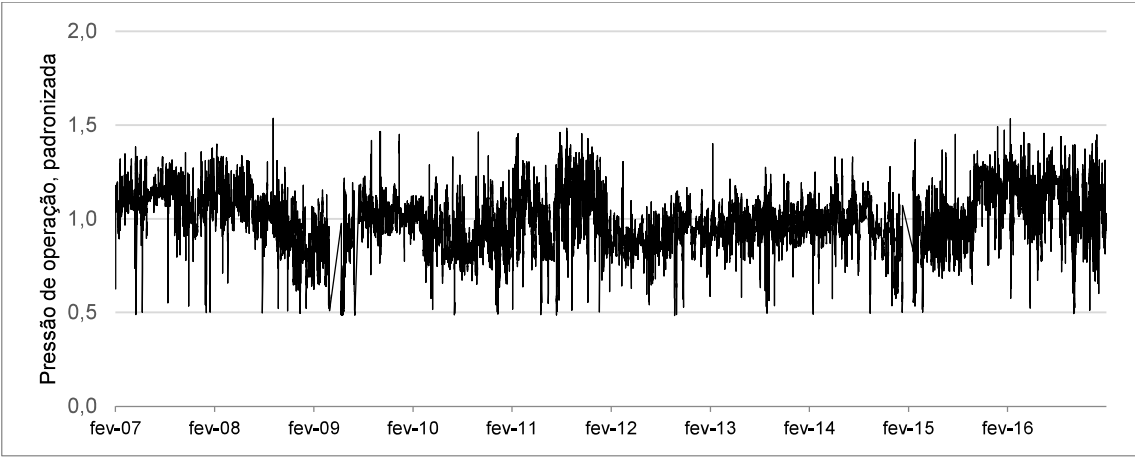
| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 87         | 0,10       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.515     | 99,90      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.523      | 4,02       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 83.992     | 95,88      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 58         | 0,07       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 83.934     | 95,81      |

Fonte: autor (2024)

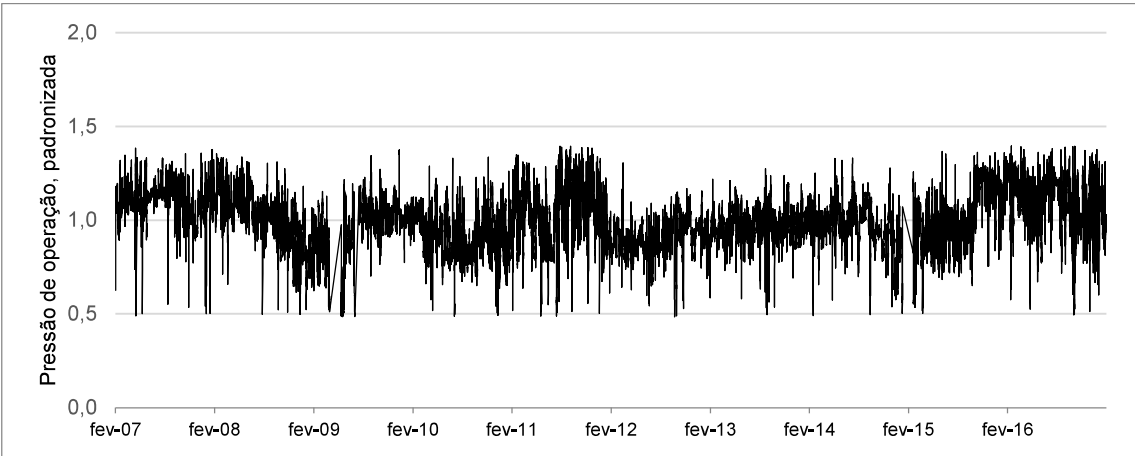
Figura 52 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



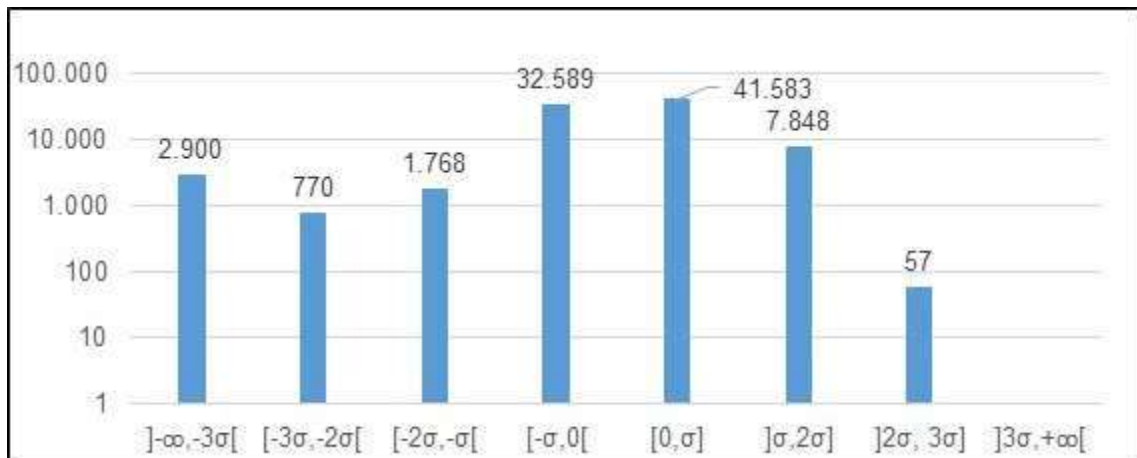
(b)



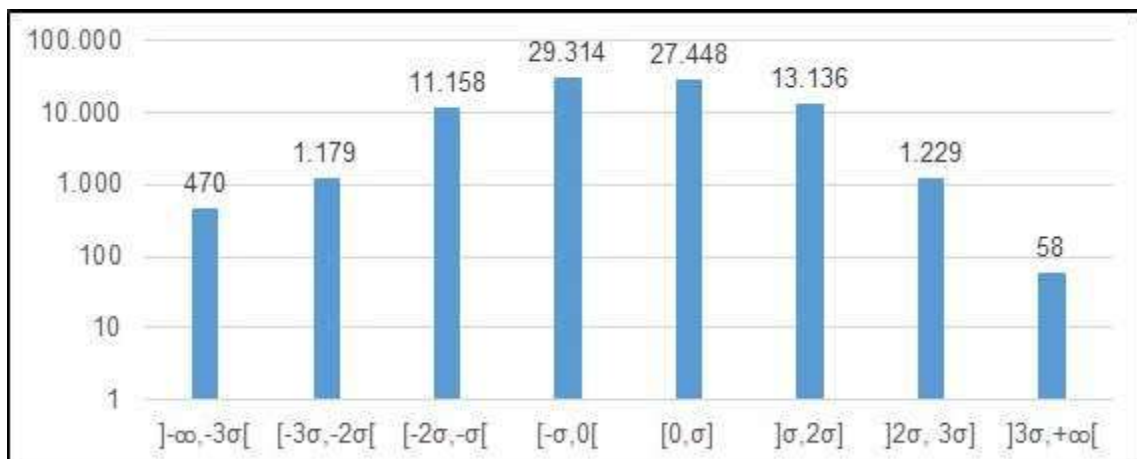
(c)

Fonte: autor (2024)

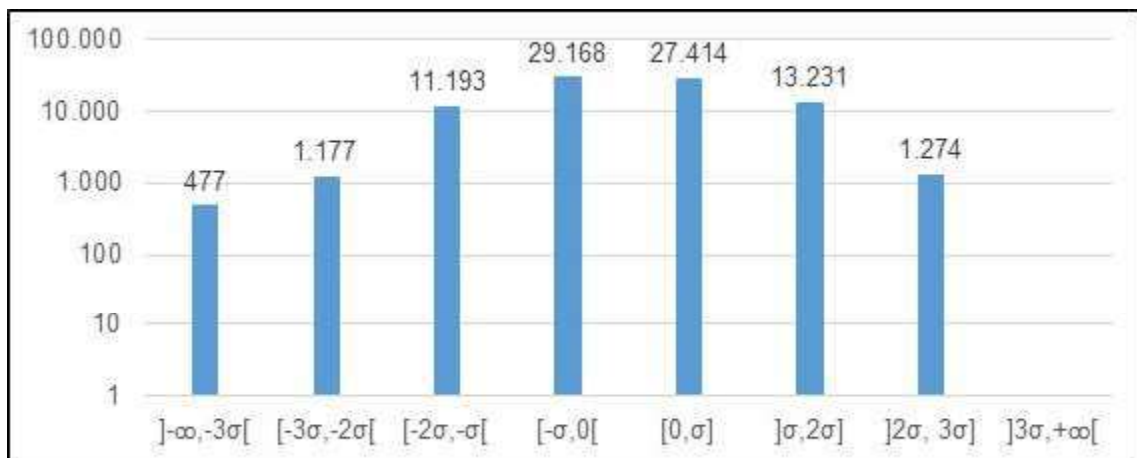
Figura 53 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) tapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



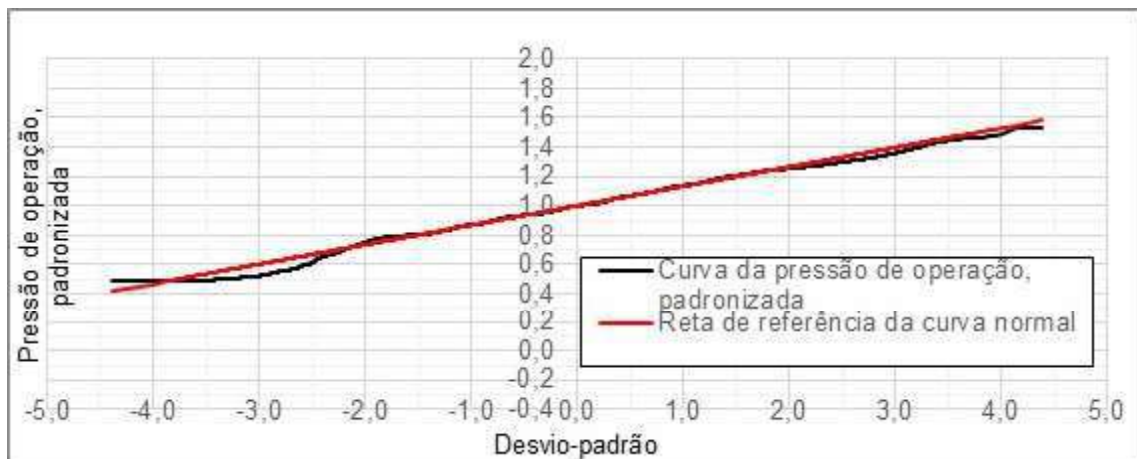
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 54 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)

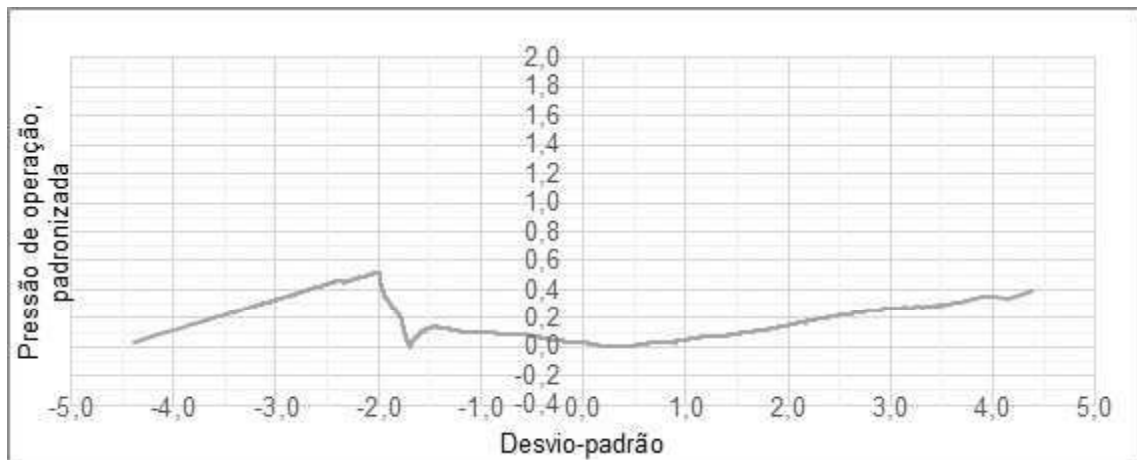


(c)

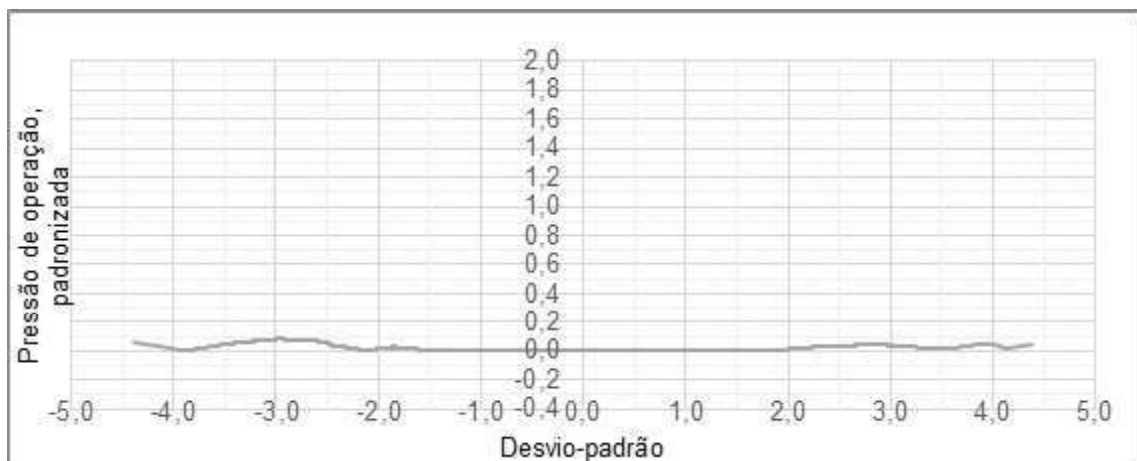
Fonte: autor (2024)



Figura 55 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

#### 4.5.8 Resultados do equipamento 10

O comportamento da pressão de operação (Figura 56) do equipamento 10 indica um processo com elevada variação, existindo eventos de sobrepressão que, em alguns casos, ultrapassa dez vezes a pressão média (há um evento que atinge mais de 20 vezes a pressão média) (figura 68 (a)). Constata-se, portanto, um processo com elevada instabilidade. Entretanto dados que possam indicar a razão desta instabilidade não foram disponibilizados para análise.

Decorrente desta instabilidade, foram considerados pela metodologia 55,5% dos dados originais (Tabela 15 e Tabela 16), ao mesmo tempo em que foram identificados 291 eventos de sobrepressão, possibilitando que a causa destes eventos especiais (não normais) venha a ser eliminada, obtendo-se, portanto, um processo mais estável, com ganhos empresariais.

Tabela 15 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 1,08                                 | 0,59        | 0,53            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 107,93                               | 59,50       | 53,41           |
| MODA                             | Adimensional | 1,25                                 | 0,75        | 0,77            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 0,64                                 | 0,88        | 0,89            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 4,24                                 | 2,78        | 2,60            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 48904       | 48613           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87469                                | 48904       | 48613           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 133                                  | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 38565       | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 291             |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 25,75                                | 10,96       | 9,98            |

Fonte: autor (2024)

A Figura 57 indica um deslocamento das ocorrências da pressão de operação à direita de média (influenciado pelos eventos de sobrepressão), o que pode, também, ser verificado na Figura 58(a) e (b). Por outro lado, a eliminação destes eventos de pressão elevada permitiu a convergência dos valores de pressão à distribuição normal (Figura 58(c)).

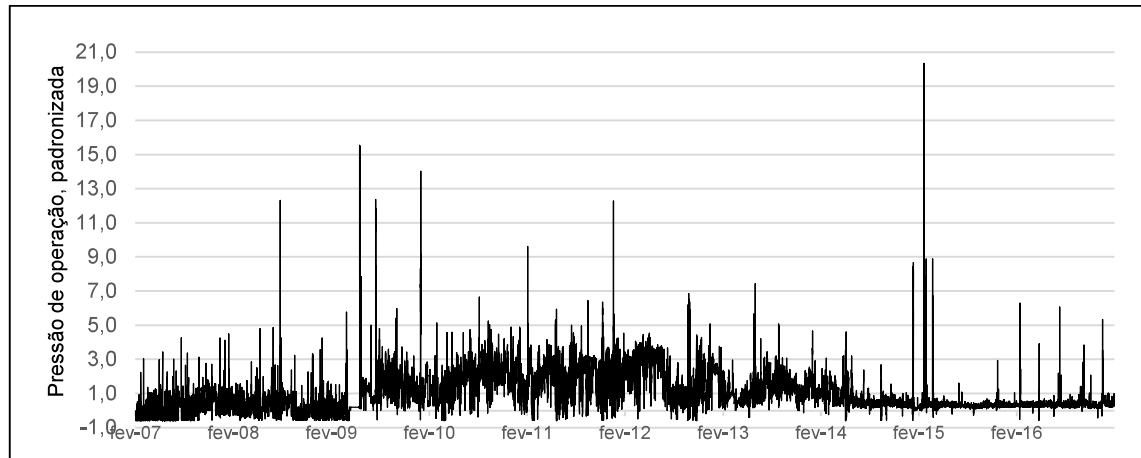
A diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal é razoavelmente reduzida, como pode ser verificado na Figura 59.

Tabela 16 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

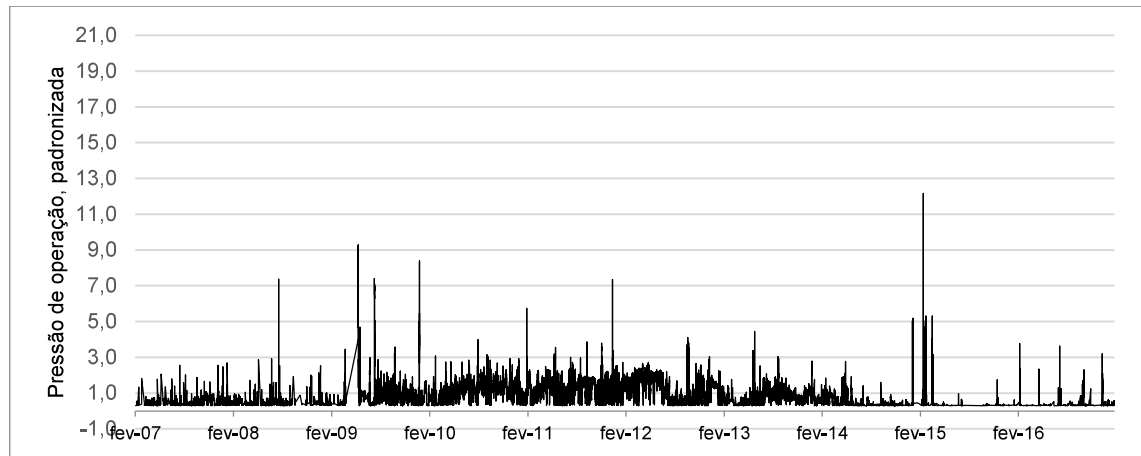
| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 133        | 0,15       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.469     | 99,85      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 38.565     | 44,02      |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 48.904     | 55,83      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 291        | 0,33       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 48.613     | 55,49      |

Fonte: autor (2024)

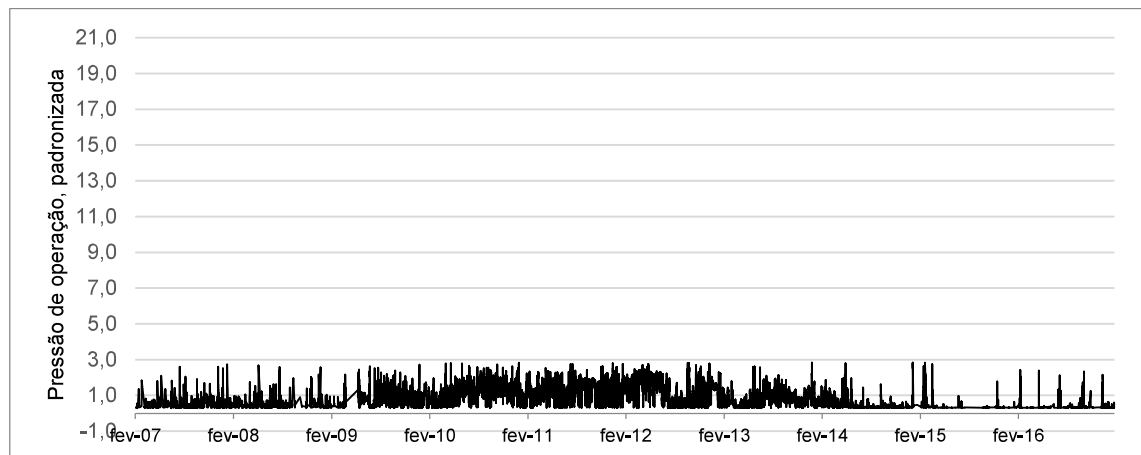
Figura 56 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



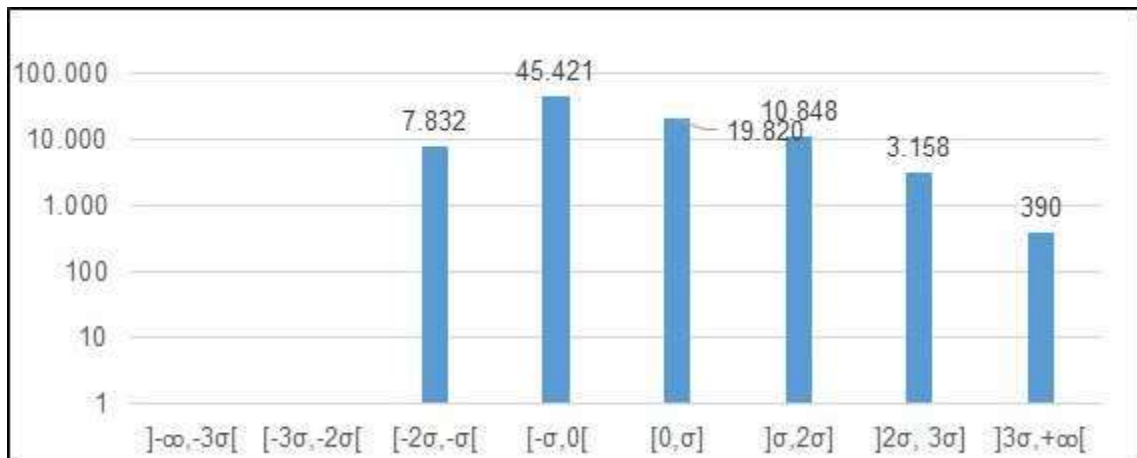
(b)



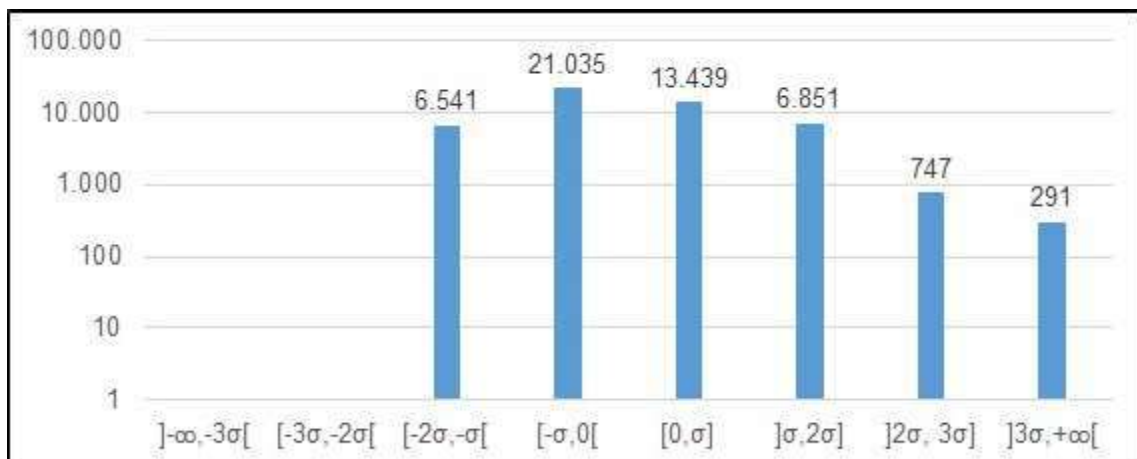
(c)

Fonte: autor (2024)

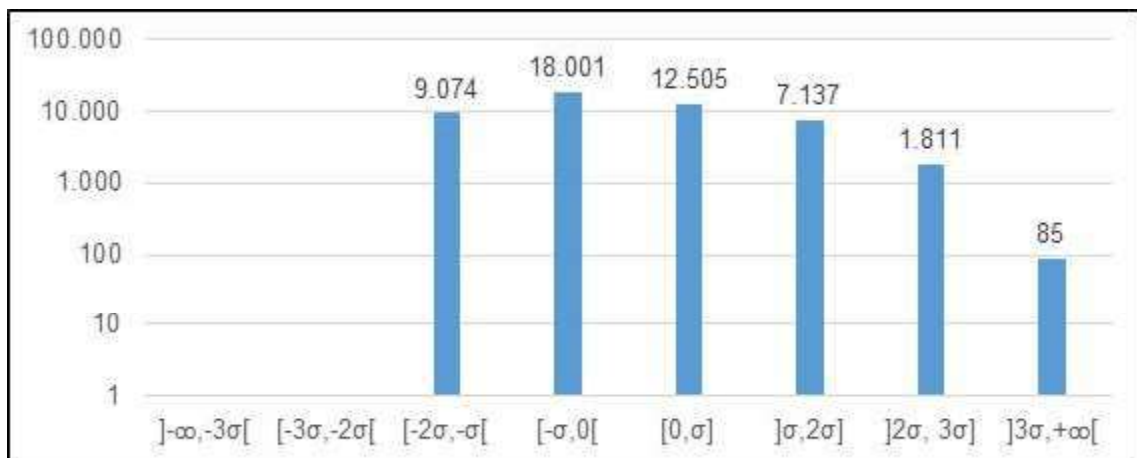
Figura 57 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 58 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

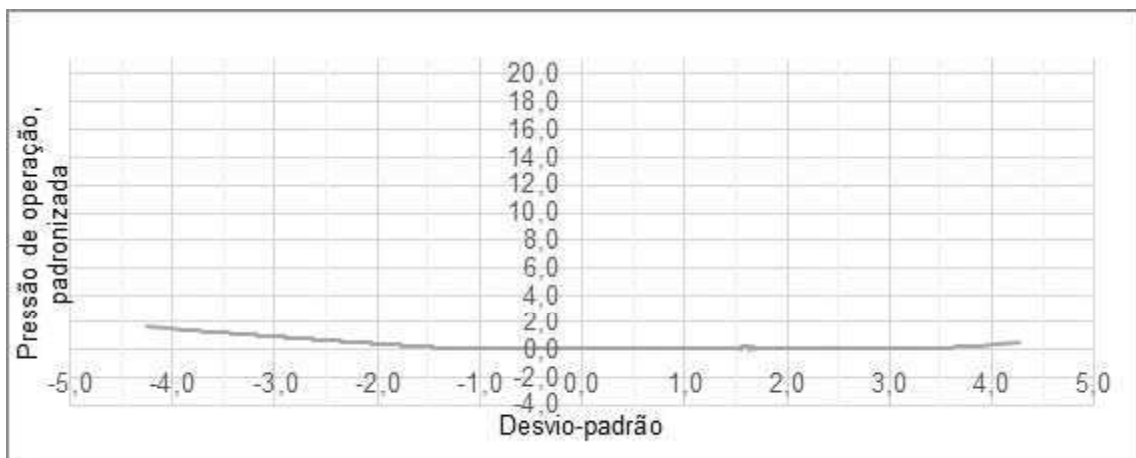
Figura 59 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Atende-se, então, com as análises destes equipamentos, o objetivo específico 2.2 (iv).

#### 4.5.9 Comparação entre os resultados dos dez equipamentos

Neste item estão apresentados na Tabela 17 os resultados da metodologia aplicada nos dez equipamentos, possibilitando uma avaliação quantitativa entre as características obtidas pela metodologia proposta.

Constata-se que em oito dos dez equipamentos foi possível identificar mais de 90% dos valores como sendo com distribuição normal, sendo sete deles com mais de 95%, o que representa um indicativo da acuidade do resultado, além de mostrar o controle operacional em bom nível.

A moda e mediada, indicadores de tendência central, também convergiram para o valor da média, o que, associado à redução observada no coeficiente de variação amostral (vide os quadros respectivos de cada equipamento), indicam um perfil condizente com a distribuição normal.

Tabela 17 - Resumo dos resultados dos dez equipamentos analisados

| EQUIPAMENTO | CARACTERÍSTICA<br>[%] |                                  |                                        |      |         |                                           |                           |                                              |
|-------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------------|------|---------|-------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
|             | MÉDIA<br>PADRONIZADA  | DESVIO-<br>PADRÃO<br>PADRONIZADO | COEFICIENTE<br>DE VARIAÇÃO<br>AMOSTRAL | MODA | MEDIANA | PRESSÃO<br>MÁXIMA DE<br>OPERAÇÃO<br>(PMO) | ERRO<br>ABSOLUTO<br>MÉDIO | AMOSTRAS<br>RESULTANTES<br>DA<br>METODOLOGIA |
| <b>01</b>   | 1,00                  | 0,03                             | 3,24                                   | 1,00 | 1,01    | 1,10                                      | 1,84                      | 96,02                                        |
| <b>02</b>   | 1,00                  | 0,03                             | 3,22                                   | 1,00 | 1,01    | 1,10                                      | 1,83                      | 96,02                                        |
| <b>03</b>   | 1,00                  | 0,03                             | 3,24                                   | 1,00 | 1,01    | 1,10                                      | 1,84                      | 96,02                                        |
| <b>04</b>   | 1,00                  | 0,03                             | 3,49                                   | 1,01 | 1,01    | 1,10                                      | 1,87                      | 96,05                                        |
| <b>05</b>   | 1,00                  | 0,25                             | 24,82                                  | 1,24 | 1,02    | 1,74                                      | 3,91                      | 90,11                                        |
| <b>06</b>   | 1,00                  | 0,44                             | 43,84                                  | 1,03 | 0,92    | 2,32                                      | 9,32                      | 71,81                                        |
| <b>07</b>   | 1,00                  | 0,05                             | 4,98                                   | 0,99 | 1,01    | 1,15                                      | 1,24                      | 97,77                                        |
| <b>07</b>   | 1,00                  | 0,11                             | 10,88                                  | 1,01 | 1,01    | 1,33                                      | 1,57                      | 96,17                                        |
| <b>09</b>   | 1,00                  | 0,13                             | 13,20                                  | 0,97 | 1,00    | 1,40                                      | 0,57                      | 95,81                                        |
| <b>10</b>   | 1,00                  | 0,53                             | 53,41                                  | 0,77 | 0,89    | 2,60                                      | 9,98                      | 55,49                                        |

Fonte: autor (2024)



A pressão máxima de operação (PMO) obtida para cada equipamento por meio da metodologia proposta, apresentou valores correspondentes a um acréscimo de 10% do valor da pressão média (equipamentos 01, 02, 03, 04 e 07).

Por outro lado, a PMO resultou em valores razoavelmente elevados (superiores a 50% da pressão média) para aqueles equipamentos (05, 06 e 10) cujo perfil de pressão de operação indicou elevada instabilidade no controle do processo e/ou, ocorrência de eventos com sobrepressão (causas especiais, não normais). Este item atende ao objetivo específico 2.2 (v).

## 5.6 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS DADOS IDENTIFICADOS COMO SENDO ORIGINADOS DE CAUSA ESPECIAL.

A metodologia aqui proposta, para além de permitir a determinação da PMO, possibilitou a identificação de eventos raros, correspondentes a causas especiais em termos do processo, o que se descortina uma excelente ferramenta de gestão e estudos, pois disponibiliza ao usuário informações importantes sobre anormalidades do processo.

As empresas usualmente não possuem um robusto sistema de registro dos eventos operacionais, no qual constem as informações com a qualidade necessária à avaliação da origem dos eventos raros, e, quando possuem, não permitem a divulgação externa, por questões de propriedade e segredo industrial, ou segurança operacional.

Todavia, após garantir que o sigilo da empresa e das informações seria preservado, foi-nos fornecido os registros operacionais<sup>94</sup> para os dias<sup>95</sup> em que, conforme a metodologia indicou, ocorreram eventos anômalos, de forma que se tornou possível a verificação quanto à eficácia. Destaca-se que os dados foram originados de um sistema de medição, transmissão, processamento e armazenamento, sendo o citado sistema de nível internacional, frequentemente auditado, validado e suportado por excelente programa de manutenção.

---

<sup>94</sup> O registro operacional, denominado de Diário Operacional, abrangeu apenas as datas em que a metodologia indicou a ocorrência de evento com causa especial. Os documentos possuíam boa qualidade no conteúdo do registro das ocorrências, permitindo a compreensão das atividades, do desempenho dos equipamentos/sistemas e dos parâmetros operacionais.

<sup>95</sup> A metodologia identificou 18 dias em que ocorrem eventos raros, com causas especiais. A empresa disponibilizou o registro operacional de 16 dias.

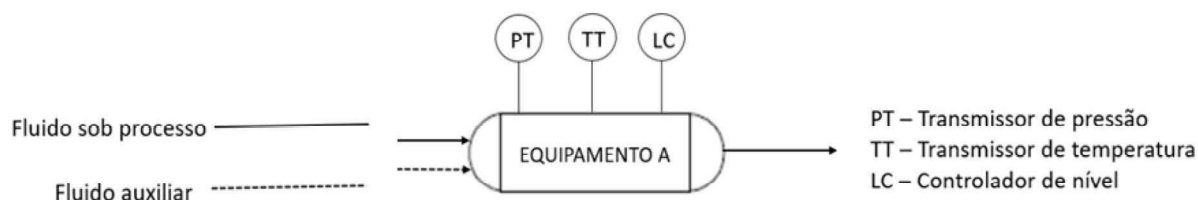
O equipamento objeto deste estudo é um vaso de pressão, cilíndrico, horizontal, construído em aço carbono e que opera inserido em um processo industrial, existindo outros equipamentos, associados em série ou em paralelo, tendo suas específicas características construtivas (dimensões matéricas, formatos, etc.), operacionais (pressão, fluido, temperatura, vazão, etc.), malhas de controle operacional, instrumentos e válvulas, etc.

O vaso de pressão objeto da presente análise possui o seu próprio conjunto de instrumentos para a medição, transmissão e controle das variáveis: (a) pressão; (b) temperatura; (c) nível; e, através de tubulações específicas e individuais, o vaso de pressão: (a) recebe o fluido a ser processado; (b) recebe o fluido auxiliar; (c) disponibiliza o fluido processado.

Pode ser afirmado que a incerteza nas medições é desprezível, para fins da operação, quer seja pela função de controle das operações, bem como, e principalmente, pelo aspecto da segurança de processo e garantia da integridade operacional, decorrente da presença de robusto sistema de gestão, instrumentação, automação e controle, concebido, instalado, operado e mantido sob as melhores práticas disponíveis a nível mundial. Sendo assim, os dados que foram utilizados neste estudo de caso indicam, com elevada confiabilidade, a real condição de operação do equipamento.

A Figura 60 apresenta o fluxograma simplificado da disposição operacional do equipamento sob análise, identificado como Equipamento 1. Também estão apresentados os demais equipamentos instalados, bem como, as correntes de processo e os instrumentos instalados nos vasos de pressão.

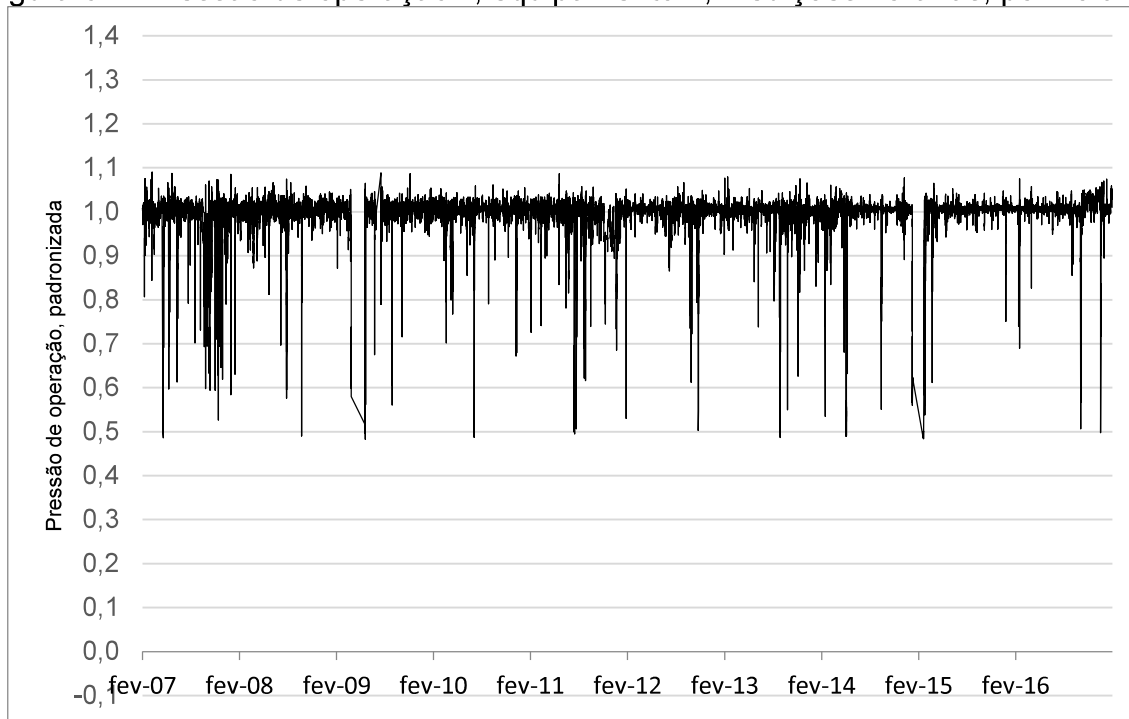
Figura 60 - Fluxograma simplificado da disposição operacional do equipamento sob análise



Fonte: autor (2024)

A análise correspondeu a um período de 10 anos<sup>96</sup>, com medições<sup>97</sup> horárias da pressão de operação, totalizando de mais de 87.000 medições, sendo estes valores apresentados na Figura 61.

Figura 61 - Pressão de operação<sup>98</sup>, equipamento 1, medições horárias, por 10 anos



Fonte: autor (2024)

Efetuada-se a análise dos valores da pressão de operação do equipamento 1, segundo a metodologia sugerida, foram obtidos os resultados indicados na Tabela 18.

A descrição das ocorrências operacionais nos 18 eventos, conforme pode ser verificado no Quadro 14 - Descrição da ocorrência operacional que resultou no evento de causa especial, classificados como outliers tipo 2, no equipamento 1<sup>99</sup>, indicam que, de fato, a pressão de operação no instante de cada evento CORRESPONDIA a uma CONDIÇÃO ESPECIAL (NÃO NORMAL) de operação e, portanto, deveriam ser desconsideradas (*outliers* tipo 2) para efeito do cálculo da PMO.

<sup>96</sup> Fevereiro/2007 até fevereiro/2017.

<sup>97</sup> Medição, transmissão, armazenamento, preservação e integridade.

<sup>98</sup> Pressão de operação apresentada normalizada/padronizada pela média.

<sup>99</sup> Destaca-se que a ocorrência de evento com causa especial nos demais equipamentos (B, C ou D), tubulações associadas aos equipamentos, instrumentos ou a falta de energia ou insumo, são, também, fatores que comprometem as condições do equipamento A (que foi o objeto analisado), e vice-versa.

Os eventos relacionados no Quadro 14 foram classificados, em termos do equipamento/sistema que os originaram, no Quadro 15 sendo constatado que a metodologia permitiu identificar cenários de causas especiais para além do equipamento 1, objeto da análise, possibilitando uma abordagem individualizada (equipamento 1 propriamente dito) e, ao mesmo tempo, sistêmica.

Tabela 18 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

| DESCRIÇÃO                                                                                                                     | QUANTIDADE DE DADOS | PERCENTUAL <sup>100</sup> [%] | PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO <sup>101</sup> | DESVIO PADRÃO <sup>102</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| Valores da pressão de operação obtidos do sistema de controle operacional da planta para o equipamento de perfil de pressão A | 87602               | 100                           | -                                         | -                            |
| <i>Outliers</i> tipo 0, excluídos da análise                                                                                  | 80                  | 0,09                          | -                                         | -                            |
| Dados valores da pressão de operação obtidos do sistema de controle operacional da planta                                     | 87522               | 99,91                         | 1,00                                      | 0,19                         |
| <i>Outliers</i> tipo 1 excluídos da análise                                                                                   | 3386                | 3,87                          | -                                         | -                            |
| Dados valores da pressão de operação obtidos do sistema de controle operacional da planta                                     | 84136               | 96,04                         | 1,00                                      | 0,03                         |
| <i>Outliers</i> tipo 2 excluídos da análise                                                                                   | 18                  | 0,02                          | -                                         | -                            |
| Dados valores da pressão de operação obtidos do sistema de controle operacional da planta                                     | 84118               | 96,02                         | 1,00                                      | 0,03                         |

Fonte: autor (2024)

<sup>100</sup> Em relação à quantidade total original de dados.

<sup>101</sup> Adimensional, decorrente da normalização(padronização) pela média.

<sup>102</sup> Adimensional, decorrente da normalização(padronização) pela média.

Quadro 14 - Descrição da ocorrência operacional que resultou no evento de causa especial, classificados como outliers tipo 2

| EVENTO | PRESSÃO <sup>103</sup> | DESCRIÇÃO DA OCORRÊNCIA OPERACIONAL QUE RESULTOU NO EVENTO DE CAUSA ESPECIAL (OUTLIERS TIPO 2)                                                                                                                                        |
|--------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 01     | 1,16                   | a) Bloqueio e despressurização de outro equipamento, com potencial de elevação da carga para o equipamento em análise.                                                                                                                |
| 02     | 1,10                   | a) Válvulas de processo obstruídas.                                                                                                                                                                                                   |
| 03     | 1,11                   | a) Unidade encontrava-se em fase de aquecimento e elevação de carga;<br>b) Ausência de água para o equipamento 1.                                                                                                                     |
| 04     | 1,11                   | a) Tubulação de outro equipamento, associado ao processo do equipamento 1, apresentou-se bloqueada.                                                                                                                                   |
| 05     | 1,10                   | a) Um equipamento, associado ao processo do equipamento 1, foi retirado da operação, sendo realizado desvio da linha de pressão.                                                                                                      |
| 06     | 1,14                   | a) Distúrbios provocados pelo elevado volume de produto na carga, sendo necessário desligar momentaneamente o controle de temperatura;<br>b) Tubulação de um equipamento associado ao processo do equipamento , apresentou vazamento. |
| 07     | 1,11                   | a) Processo apresentando instabilidade;<br>b) Tubulação de um equipamento associado ao processo do equipamento 1 foi bloqueada devido a ocorrência de vazamento.                                                                      |
| 08     | 1,11                   | a) Processo apresentando instabilidade;<br>b) Equipamento 1 apresentou problema no sistema de controle de nível.                                                                                                                      |
| 09     | 1,11                   | a) Vazamento na bomba do sistema, acarretando parada e desvio da carga de produção.                                                                                                                                                   |
| 10     | 1,22                   | <u>Relatório operacional indisponível.</u>                                                                                                                                                                                            |
| 11     | 1,10                   | a) Alteração da configuração do alinhamento dos equipamentos que abrangem o equipamento sob análise, sendo alterado da configuração série paralelo.                                                                                   |
| 12     | 1,31                   | a) Sem injeção de insumo no equipamento 1;<br>b) Registro de instabilidade operacional no sistema que abrange o equipamento sob análise e elevação de carga da unidade.<br>c) Atuação de manutenção em barramento elétrico.           |
| 13     | 1,10                   | a) Equipamento associado ao processo do equipamento 1 foi retirado de operação.                                                                                                                                                       |
| 14     | 1,10                   | a) Ocorreu desligamento inesperado na unidade, com parada de operação.                                                                                                                                                                |
| 15     | 1,14                   | a) Ocorrência de falta de energia elétrica geral, em toda a planta;<br>b) Equipamento 1 apresentou inúmeros desarmes, decorrente de problema no sistema de controle de nível.                                                         |
| 16     | 1,11                   | a) Equipamento 1 apresentou problema no sistema de controle de nível.                                                                                                                                                                 |
| 17     | 1,11                   | a) Fechado o distribuidor do sistema de controle de nível do equipamento 1.                                                                                                                                                           |
| 18     | 1,11                   | <u>Relatório operacional indisponível.</u>                                                                                                                                                                                            |

Fonte: autor (2024)

<sup>103</sup> A pressão de operação corresponde àquela observada no momento identificado como sendo “causa especial”

Quadro 15 - Classificação dos eventos raros (causas especiais)

| Origem do evento                                                                         | Número do evento           | Quantidade de eventos | Participação <sup>104</sup> [%] |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Equipamento 1 e itens associados <sup>105</sup> .                                        | 03, 08, 12, 15, 16, 17     | 06                    | 33,3                            |
| Equipamentos associados ao processo do equipamento 1 e itens associados <sup>106</sup> . | 01, 04, 05, 06, 07, 13     | 06                    | 33,3                            |
| Falta de utilidade <sup>107</sup> no empreendimento como um todo.                        | 12, 14, 15                 | 03                    | 16,7                            |
| Instabilidade operacional da planta.                                                     | 03, 06, 07, 08, 09, 11, 12 | 07                    | 38,8                            |
| Não há registro operacional disponível.                                                  | 10, 18                     | 02                    | 22,2                            |

Fonte: autor (2024)

Ou seja, os acontecimentos anormais foram plenamente identificados, mostrando a consistência da proposta do presente trabalho, ao mesmo tempo em que é atendido o objetivo específico 2.2 (vi).

Ainda tendo os dados do equipamento 1 sob investigação, o valor da mediana<sup>108</sup> foi determinado, para fins de verificação da qualidade da proposta, estando os resultados indicados no Quadro 16.

<sup>104</sup> Como um mesmo evento pode apresentar mais de uma origem, a soma da coluna “Participação” pode ultrapassar 100%.

<sup>105</sup> Tubulação, válvulas, instrumentos, etc.

<sup>106</sup> Tubulação, válvulas, instrumentos, etc.

<sup>107</sup> Energia elétrica

<sup>108</sup> Parâmetro estatístico que indica o valor central de um conjunto de dados, crescentemente ordenados.

Quadro 16 - Características de convergência entre a média e a mediana

| PARÂMETRO ESTATÍSTICO                                       | SÍMBOLO OU EXPRESSÃO MATEMÁTICA | DADOS ORIGINAIS | DADOS APÓS A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------------------------|
| Média <sup>109</sup>                                        | $\mu$                           | 1,04            | 1,00                                           |
| Mediana <sup>110</sup>                                      | $M_d$                           | 1,47            | 1,01                                           |
| Relação média/mediana [%]                                   | $(\mu * 100) / M_d$             | 70,7            | 99,0                                           |
| Diferença absoluta entre a média e a mediana <sup>111</sup> | $Módulo(\mu - M_d)$             | 0,49            | 0,01                                           |
| Desvio padrão <sup>112</sup>                                | $\sigma$                        | 0,26            | 0,03                                           |
| Relação entre o desvio padrão e a média [%]                 | $(\sigma * 100) / \mu$          | 25,0            | 3,0                                            |
| Relação entre o desvio padrão e a mediana [%]               | $(\sigma * 100) / M_d$          | 17,7            | 2,9                                            |

Fonte: autor (2024)

<sup>109</sup> Adimensional, decorrente da normalização/padronização pela média.

<sup>110</sup> Adimensional, decorrente da normalização/padronização pela média.

<sup>111</sup> Adimensional, decorrente da normalização/padronização pela média.

<sup>112</sup> Adimensional, decorrente da normalização/padronização pela média.

## 5. CONCLUSÃO

A metodologia<sup>113</sup> aqui proposta mostrou-se plenamente aplicável, possibilitando a adequada identificação e segregação dos valores da pressão de operação que não devem ser considerados para a determinação da pressão máxima de operação (PMO), garantindo que a categorização dos vasos de pressão esteja retratando a real condição operacional.

Espera-se que a aplicação desta metodologia permita uma melhor identificação do risco<sup>114</sup> de cada vaso de pressão, resultando na adequada caracterização conforme a NR-13 e, portanto, com impactos potenciais:

- a) na redução dos custos operacionais (custo de manutenção)
- b) no aumento da disponibilidade operacional
- c) na redução da geração de resíduos;
- d) na redução das ocorrências originadas da inadequada realização das atividades de manutenção (pois, à medida que o intervalo entre inspeções aumenta, reduz-se a atuação da equipe de manutenção);
- e) possibilidade de investimentos em sistemas de monitoramento contínuo da integridade do equipamento (visto a redução dos custos de manutenção).

Também pode ser constatado que a distribuição gaussiana está presente nos equipamentos analisados, sendo um indicador importante para a fundamentação estatística que suporta este trabalho. Para aqueles equipamentos que, eventualmente apresentem valores com razoável distribuição não normal, vislumbra-se a oportunidade de, analisando-se as causas destes *outliers*, serem implementadas as contramedidas pertinentes.

A inovação apresentada no tocante à classificação dos vasos de pressão em termos do perfil da pressão de operação, permite a visão transversal das condições

---

<sup>113</sup> A metodologia proposta será submetida ao INPI com a finalidade de obtenção de patente, na modalidade PROCESSO INDUSTRIAL.

<sup>114</sup> Risco decorrente da consideração dos parâmetros pressão máxima de operação, volume interno e tipo do fluido, como definido pela NR-13.



nos quais o equipamento está submetido, em termos operacionais, mecânicos e estatísticos.

Sendo uma contribuição original, a categorização aqui proposta, dos *outliers* é outro ponto de destaque, pois possibilita a formalização de critério qualitativo e quantitativo para a análise e exclusão dos valores inadequados, em termos de atividades estatísticas.

A validação do estudo pode ser realizada por meio da análise dos resultados para um dos equipamentos, concluindo-se que a metodologia proposta conseguiu identificar eficientemente os eventos originados de causas especiais (não normais), tornando-se ferramenta robusta para ser utilizada também pela equipe de operação, processo e engenharia das empresas.

Em termos do escopo da norma internacional de categorização dos vasos de pressão, além dos ganhos econômicos e tecnológicos, o documento proposto permitirá que os fabricantes e empresas tenham um critério padrão, em termos internacionais, que poderá ser implementado nos diversos documentos, tanto aqueles de natureza legal, como aqueles de cunho normativo técnico, dentre os quais podemos destacar o Código ASME, as normas API, ABNT, dentre outras.

## 6. RECOMENDAÇÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho descortina a pesquisa para a determinação da PMO para os equipamentos cuja perfil da pressão de operação corresponda aos grupos B, C, D e E. Nestas condições, os aspectos da fadiga mecânica deverão ser considerados, associados às características construtivas (em termos de fatores concentradores de tensão) e dos materiais.

No tocante ao período amostral, poderá haver a evolução da metodologia em intervalos de tempo de 10 anos, 5 anos e 1 ano, móveis, de forma a possibilitar a comparação do comportamento do equipamento ao longo da sua vida útil.

Em termos empresariais, vislumbra-se o desenvolvimento de aplicativo que realize a avaliação conforme a metodologia proposta, com potencial de comercialização<sup>115</sup>.

---

<sup>115</sup> No início da pesquisa, uma empresa multinacional estrangeira contratou a implementação da metodologia para uma de suas filiais.

## REFERÊNCIAS

- ALIMENTAÇÃO, F. Da. Explosão em caldeira na cervejaria Heineken faz 4 vítimas fatais. 2016. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=j4j4QA40TZI>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 510 - Pressure Vessel Inspection Code : Maintenance Inspection , Rating , Repair , and Alteration. 2014. v. 5, n. May.
- AMERICAN PETROLUUM INSTITUTE (API). **Sizing , Selection , and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries Part I — Sizing and Selection**. Washington, DC: [s.n.], 2020.
- AMIN, M. T.; KHAN, F.; ZUO, M. J. A bibliometric analysis of process system failure and reliability literature. **Engineering Failure Analysis**, 2019. v. 106, n. April, p. 104152. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104152>>.
- ASME, A. S. Of M. E. **Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, DIV 1, 2015**. 2016. ed. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- AUSTRALIA, C. Of S. Australian Standard <sup>TM</sup> Pressure equipment — Hazard levels. 2005. \_\_\_\_\_ . **Pressure equipment-Harzard levels**.
- AUSTRALIA, S. **Pressure equipament - In-service inspection**. Australia: [s.n.], 2006.
- AZAMFIREI, V.; PSAROMMATIS, F.; LAGROSEN, Y. Application of automation for in-line quality inspection, a zero-defect manufacturing approach. **Journal of Manufacturing Systems**, 2023. v. 67, n. November 2022, p. 1–22. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.010>>.
- BBC.COM. Explodiu no meu rosto - os acidentes que ainda acontecem com painéis de pressão, e como evitá-los.pdf. 2023. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/crg4k82e7z6o>>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- BETRICHV. Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln. 2015. v. 2015, n. 4, p. 1–51.
- BRASIL. **LEI Nº 6.514, DE 22 DE DEZEMBRO DE 1977**.  
 \_\_\_\_\_. Ministério do Trabalho -Portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978. 1978. v. 1978, p. 1978.  
 \_\_\_\_\_. Ministério Do Trabalho Secretaria De Segurança E Saúde No Trabalho Portaria N.º 12, de 06 de Junho de 1983. 1983.  
 \_\_\_\_\_. Ministério do trabalho e emprego secretaria de segurança e medicina do trabalho portaria n.º 02, de 08 de maio de 1984. 1984. v. 1984, p. 2–7.  
 \_\_\_\_\_. Ministério do trabalho e emprego secretaria de segurança e saúde no trabalho portaria n.º 23, de 27 de dezembro de 1994. 1994. v. 1994.  
 \_\_\_\_\_. Ministério do trabalho e emprego secretaria de segurança e saúde no trabalho portaria n.º 57, de 19 de junho de 2008. 2008. n. 13.  
 \_\_\_\_\_. **Ministério do trabalho e emprego secretaria de segurança e saúde no trabalho**

**portaria n.º 594, de 28 de abril de 2014.**

\_\_\_\_\_. Ministério do trabalho, Portaria n.º 1084, de 27 de Setembro de 2017. 2017. v. 5, p. 94–99.

\_\_\_\_\_. **Ministério do Trabalho portaria n.º 1082, de 18 de dezembro de 2018.**

**BRASIL. Ministério da Economia, Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, Portaria n.º 915, de 30 de julho de 2019.**

BRASIL. Norma Regulamentadora N°13 - Caldeiras, Vasos de Pressão, Tubulações e Tanques Metálicos de Armazenamento. 2022a. n. 13.

\_\_\_\_\_. **Ministério do Trabalho e Previdência, Portaria 1846, de 01 de julho de 2022.**

Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-13-atualizada-2022-retificada.pdf>>.

**BRASIL, C. N. Da R. F. Do. LEI Nº 6.514, DE 22 DE DEZEMBRO DE 1977.**

**CALTEC. Relatório de acidente.**

CHEN, C. *et al.* Resilience assessment and management: A review on contributions on process safety and environmental protection. **Process Safety and Environmental Protection**, 2023. v. 170, n. December 2022, p. 1039–1051. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.12.072>>.

CNNBRASIL.COM.BR. Explosão em caldeira de metalúrgica deixa ao menos três mortos em Cabreúva (SP). 2023. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/explosao-caldeira-metalurgica-cabreuva-sao-paulo-sp/>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

COMMISSION, E.; ENTERPRISE, D. G.; FIF, C. N. Summary “Comparative Study on Pressure Equipment Standards”. **Assessment**, 2004. v. 1, n. 1.

CORREIA, P. R. L; ASSUNÇÃO, A. Á. Subnotificação de mortes por acidentes de trabalho: estudo de três bancos de dados. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, 2003. v. 12, p. 203–212.

COUSINEAU, D.; CHARTIER, S. Outliers detection and treatment: a review. **International Journal of Psychological Research**, 2010. v. 3, n. 1, p. 58–67.

D'AGOSTINO, R. B. Et Al. A Suggestion for Using Powerful and Informative Tests of Normality. **The American Statistician**, nov. 1990. v. 44, n. 4, p. 316. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2684359?origin=crossref>>.

DABAGH, S. *et al.* Self-Adaptive Risk-Based Inspection Planning in Petrochemical industry by evolutionary algorithms. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2022. v. 77, n. August 2021, p. 104762. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104762>>.

DIRECTIVA 2014/68/UE - PED (PT). Directiva 2014/68/UE - Equipamentos Sob Pressão (ESP ou PED). 2014. v. 93, p. 164–259.

DONATO, G. V. P. Et Al. **Vados de pressão - teoria e projeto.**

EMPREGO, M. Do T. E. **Norma Regulamentadora No. 13 (NR-13).** Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-13-nr-13>>.

EUROPEAN-UNION.EUROPA.EU. European Union. 2024. Disponível em: <[https://european-union.europa.eu/index\\_en](https://european-union.europa.eu/index_en)>. Acesso em: 28 jun. 2024.

EUROPEIA, U. **Diretiva 97/23/CE do Parlamento Europeu relativa à harmonização da legislação dos Estados-Membros respeitante à disponibilização de equipamentos sob pressão no mercado.**

FIGUEREDO, A. K. M. *et al.* How does subsea processing safety policy impact safety? Lessons learned from the Brazilian experience. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2022. v. 74, n. October 2021.

G1.COM. Explosão seguida de desabamento mata 3 em fábrica de Andradina, SP. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sao-paulo/sao-jose-do-rio-preto-aracatuba/noticia/explosao-seguida-de-desabamento-mata-3-em-fabrica-de-andradina-sp.ghml>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

\_\_\_\_\_. Painel de pressão explode, causa queimaduras em voluntário de igreja e abre buraco no teto de cozinha; vídeo.pdf. 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/go/noticia/2023/12/12/painel-de-pressao-explode-causa-queimaduras-em-voluntario-de-igreja-e-abre-buraco-no-teto-de-cozinha-video.ghml>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

GOLUBOVIĆ, T. *et al.* Novel risk based assessment of pressure vessels integrity. **Tehnicki Vjesnik**, 2018. v. 25, n. 3, p. 803–807.

HEALTH AND SAFETY COMMISSION. **The Pressure Systems Safety Regulations.**

IMF.ORG. Download World Economic Outlook database: April 2024. 2014. Disponível em: <<https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2024/April/weo-report?c=512,914,612,171,614,311,213,911,314,193,122,912,313,419,513,316,913,124,339,638,514,218,963,616,223,516,918,748,618,624,522,622,156,626,628,228,924,233,632,636,634,238,662,960,42>>. Acesso em: 2 jul. 2024.

INSPECTORS, T. N. B. Of B. And P. V. **Synopsis Laws, Rules and Regulations.**

\_\_\_\_\_. The National Board Incident Report. 2015. p. 1.

KHALEEL, M. A.; SIMONEN, F. A. Model for predicting vessel failure probabilities including the effects of service inspection and flaw sizing errors. **Nuclear Engineering and Design**, 2000. v. 200, n. 3, p. 353–369.

LEE, J.; CAMERON, I.; HASSALL, M. Dynamic simulation for process hazard analysis: Affordances and limitations in the application to complex process systems. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2024. v. 87, n. May 2022, p. 105232. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105232>>.

LIAO, K. *et al.* Improvement of integrity management for pressure vessels based on risk assessment - A natural gas separator case study. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2023. v. 83, n. December 2022, p. 105087. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105087>>.

LU, Y. J.; LEE, W. C.; WANG, C. H. Using data mining technology to explore causes of inaccurate reliability data and suggestions for maintenance management. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2023. v. 83, n. February, p. 105063. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105063>>.

MENSAH, A.; SRIRAMULA, S. Estimation of burst pressure of pipelines with interacting corrosion clusters based on machine learning models. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2023. v. 85, n. July 2022, p. 105176. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105176>>.

MINISTERIO DE INDUSTRIA, C. Y. T. **Instrucción Técnica Complementaria sobre Refinerías de Petróleos y Plantas Petroquímicas.**

\_\_\_\_\_. **Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas.** Madrid: [s.n.], 2021.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA. Análise de impacto regulatório. 2021.

MIRANDA, R. G. **Um Modelo para Análise de Capacidade de Processos com Ênfase na Transformação de Dados.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

NDTV. Pressure Cooker Explodes In Punjab House. 2023. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=xZ710BRMdXc>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

NFNOTICIAS.COM.BR. Explosão de vaso de pressão deixa dois homens gravemente feridos no Complexo Portuário do Açú. 2018. Disponível em: <[https://www.nfnoticias.com.br/noticia-10837/explosao-de-vaso-de-pressao-deixa-dois-homens-gravemente-feridos-no-complexo-portuario-do-acu#:~:text=Dois homens ficaram gravemente feridos,uma companhia instalada no local.>](https://www.nfnoticias.com.br/noticia-10837/explosao-de-vaso-de-pressao-deixa-dois-homens-gravemente-feridos-no-complexo-portuario-do-acu#:~:text=Dois%20homens%20ficaram%20gravemente%20feridos,uma%20companhia%20instalada%20no%20local.>)>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ONIZAWA, K.; NISHIKAWA, H.; ITOH, H. Development of probabilistic fracture mechanics analysis codes for reactor pressure vessels and piping considering welding residual stress. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2010. v. 87, n. 1, p. 2–10. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.11.011>>.

PU, W. *et al.* Inherent safety concept based proactive risk reduction strategies: A review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2023. v. 84, n. June, p. 105133. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105133>>.

SALUD, M. De. **Decreto 10 - Aprueba Reglamento de Calderas, Autoclaves y Equipos que utilizan vapor de agua.**

SAMPI.NET.BR. Barulho da explosão que matou empresário foi ouvido na vizinhança a 300 metros.pdf. 2023. Disponível em: <<https://sampi.net.br/franca/noticias/2766062/franca-e-regiao/2023/06/barulho-da-explosao-que-matou-empresario-foi-ouvido-na-vizinhanca-a-300-metros>>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SOCIAL, S. Del T. Y P. **NORMA Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad.** Disponível em: <[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011#gsc.tab=0)>.

\_\_\_\_\_; CARUCCI, V. A. **NORMA Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad.**

SONG, J. S. *et al.* Quantitative risk-based inspection approach for high-energy piping using a probability distribution function and modification factor. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, 2021. v. 189, n. April 2020, p. 104281. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104281>>.

SOUSA, R. A. F. DE *et al.* Análise qualitativa-quantitativa comparativa de normas internacionais quanto à categorização dos vasos de pressão. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, 20 fev. 2024. v. 22, n. 2, p. e3339. Disponível em: <<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/3339>>.

SOUZA, J. S. Et Al. **Livro de Probabilidade e Estatística.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [s.d.].

STABILITY, R.; PATTERNS, D. Integrated Shoulder and Hip Training s f s f s f s f f f s f f f s f f s f s f s f. 2014. v. 97, n. March 1995, p. 2–5.

TELLES, P. C. S. **Vasos de pressão**. LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A.

TRABALHO, M. DO. **PORTARIA N.º 3.214, 08 DE JUNHO DE 1978**.

\_\_\_\_\_. **NR-13 - Vasos sob pressão**.

VANDERHORN, E.; WANG, Z.; MAHADEVAN, S. Towards a digital twin approach for vessel-specific fatigue damage monitoring and prognosis. **Reliability Engineering and System Safety**, 2022. v. 219, n. September 2020, p. 108222. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108222>>.

WILSON, P. T. Managing the mechanical integrity of pressure equipment using a layers of protection framework and incorporating integrity operating windows. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2022. v. 79, n. June, p. 104821. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104821>>.

WU, W. *et al.* A general approach to assessing SHM reliability considering sensor failures based on information theory. **Reliability Engineering and System Safety**, 2024. v. 250, n. December 2023, p. 110267. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110267>>.

YEN-JU, L.; WANG, C. H. Effects of thickness profile and inner/outer of localized thin area defects on the remaining strength of pressure equipment. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2023. v. 84, n. June 2022, p. 105132. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105132>>.

ZHANG, X.-P. N. S.-P. Z. J.-C. H. Y. A. K. S. L. **Fatigue reliability design and assessment of reactor pressure vessel.pdf**.

ZHONG, W. *et al.* Risk evolution of crude oil pipeline under periodic maintenance based on dynamic bayesian network. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2024. v. 87, n. December 2023, p. 105229. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2023.105229>>.

APÊNDICES

Resultados do equipamento 02

Tabela 19 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,19                                 | 0,03        | 0,03            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 18,65                                | 3,23        | 3,22            |
| MODA                             | Adimensional | 1,04                                 | 1,00        | 1,00            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,04                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,56                                 | 1,10        | 1,10            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 84137       | 84117           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87525                                | 84137       | 84117           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 77                                   | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 3388        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 20              |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 14,37                                | 1,84        | 1,83            |

Fonte: autor (2024)



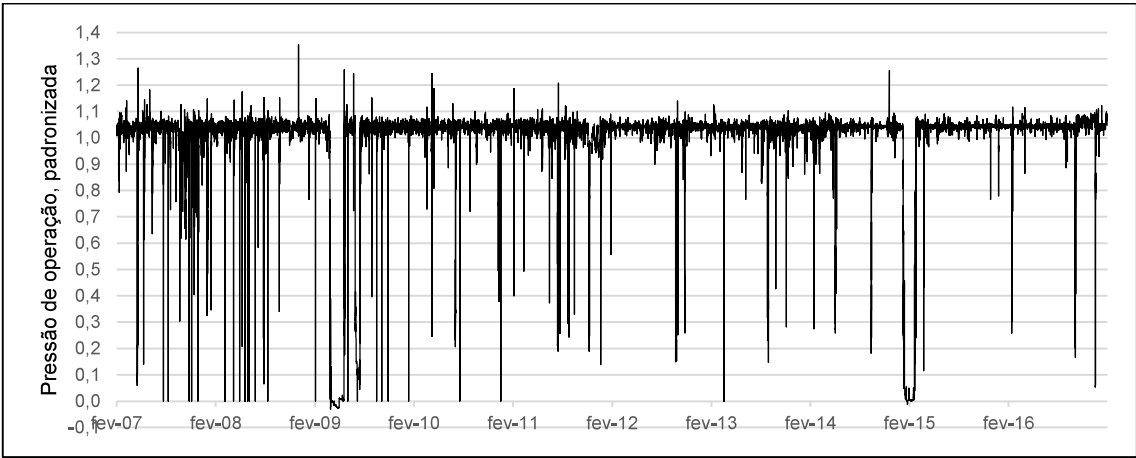
Tabela 20 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 77         | 0,09       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.525     | 99,91      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.388      | 3,87       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 84.137     | 96,04      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 20         | 0,02       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 84.117     | 96,02      |

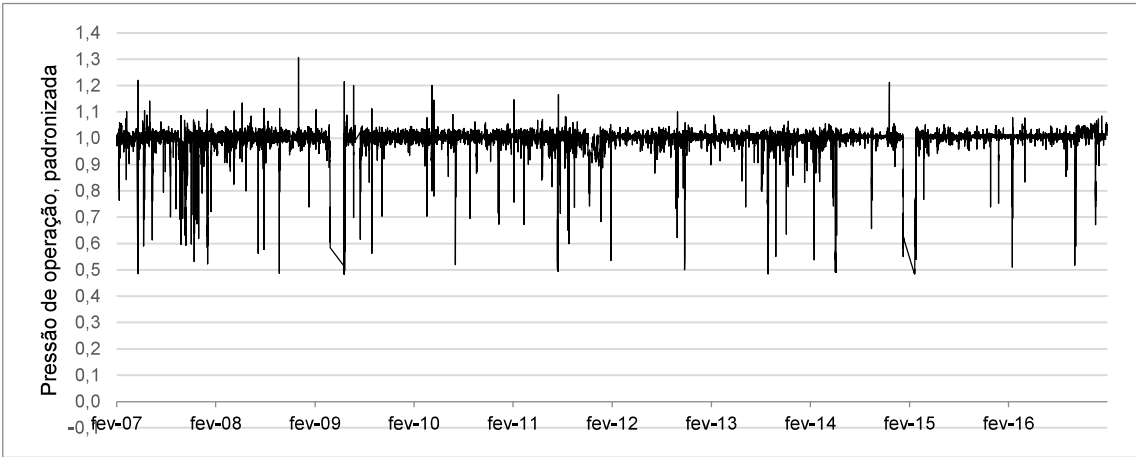
---

 Fonte: autor (2024)

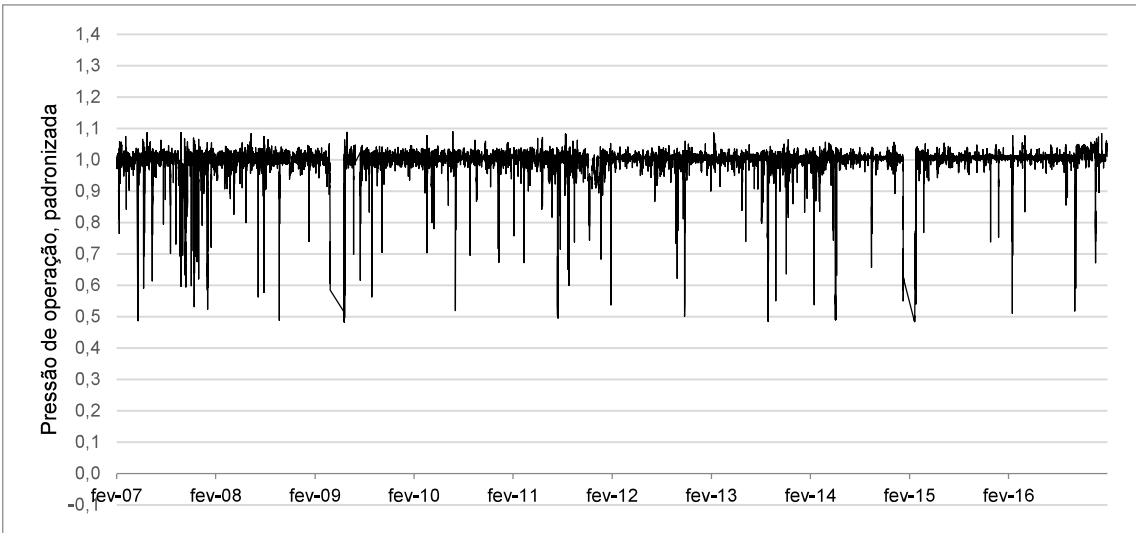
Figura 62 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



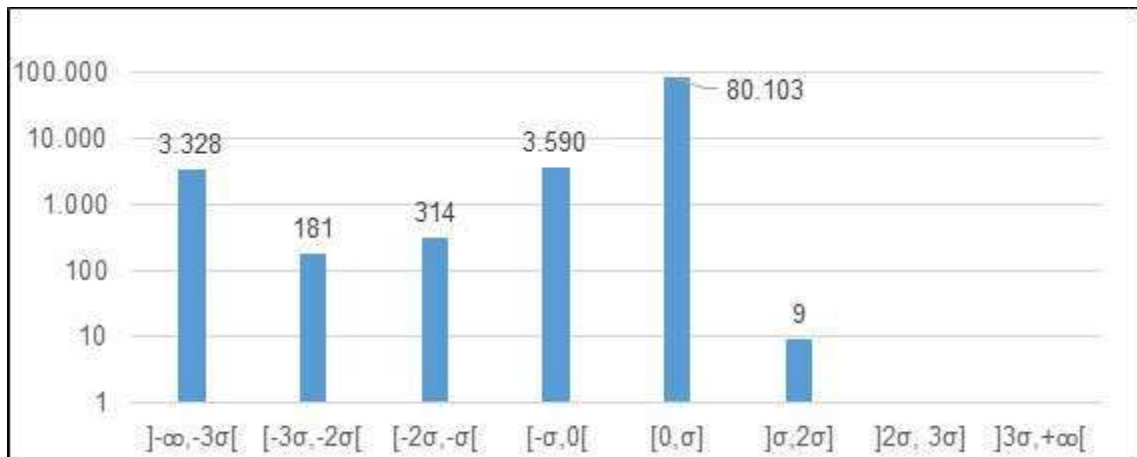
(b)



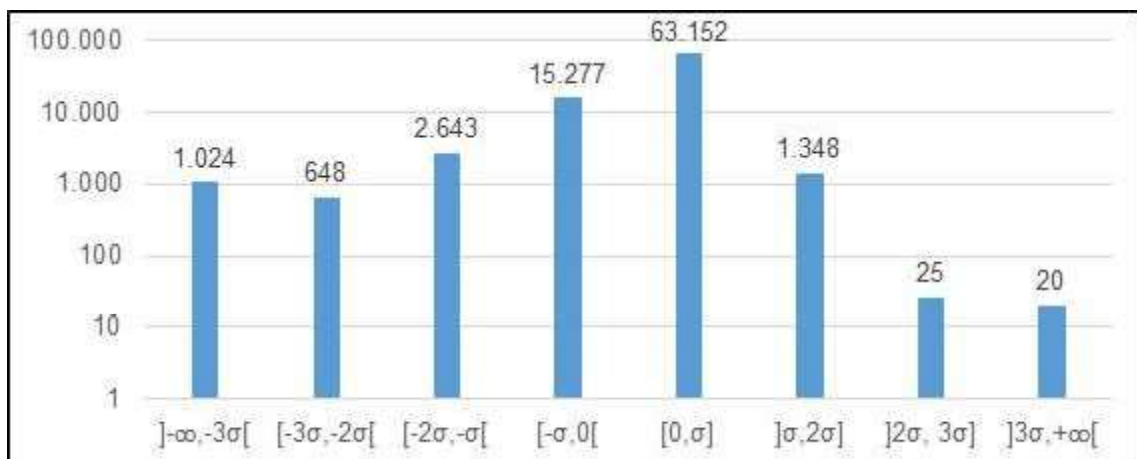
(c)

Fonte: autor (2024)

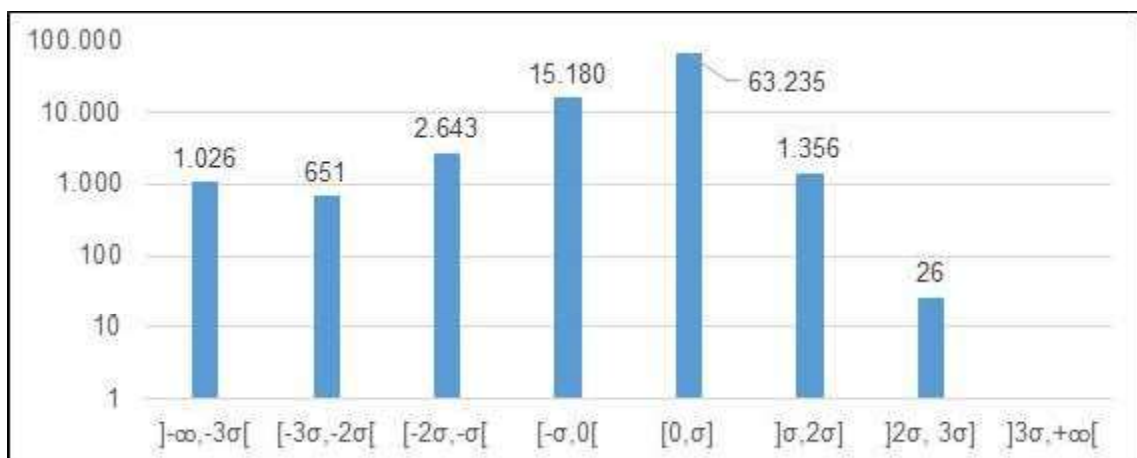
Figura 63 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 64 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



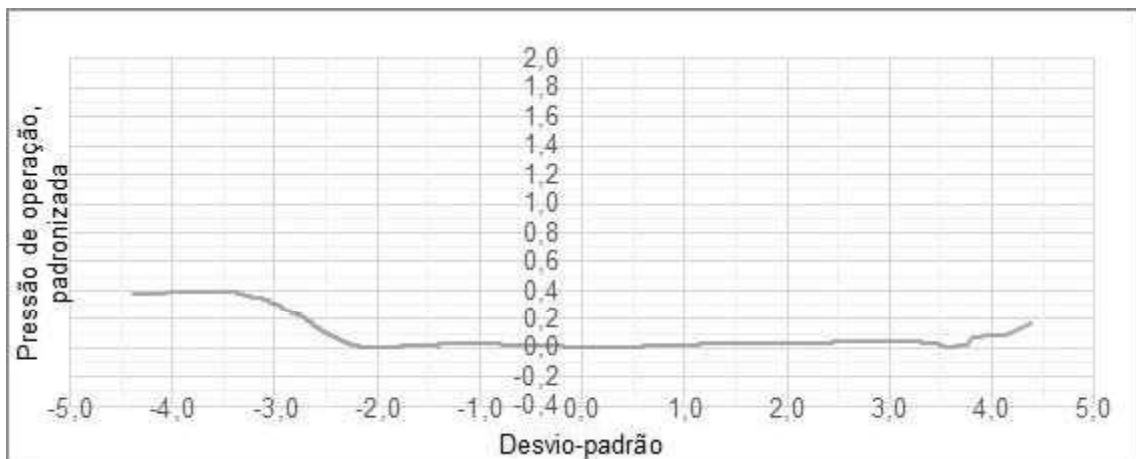
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 65 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

## Resultados do equipamento 03

Tabela 21 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,19                                 | 0,03        | 0,03            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 18,65                                | 3,25        | 3,24            |
| MODA                             | Adimensional | 1,04                                 | 1,00        | 1,00            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,04                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,56                                 | 1,10        | 1,10            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 84134       | 84116           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87521                                | 84134       | 84116           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 81                                   | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 3387        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 18              |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 14,36                                | 1,84        | 1,84            |

Fonte: autor (2024)

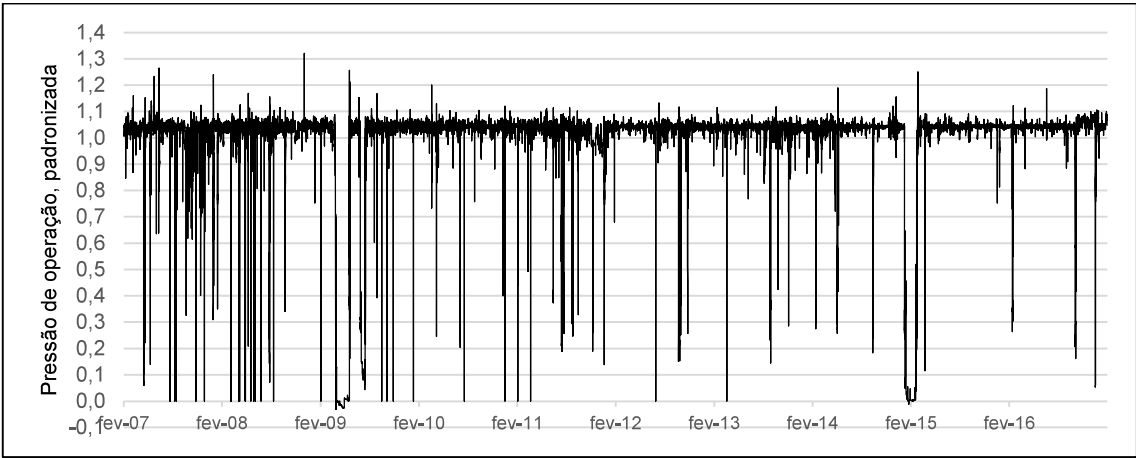
Tabela 22 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 81         | 0,09       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.521     | 99,91      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.387      | 3,87       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 84.134     | 96,04      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 18         | 0,02       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 84.116     | 96,02      |

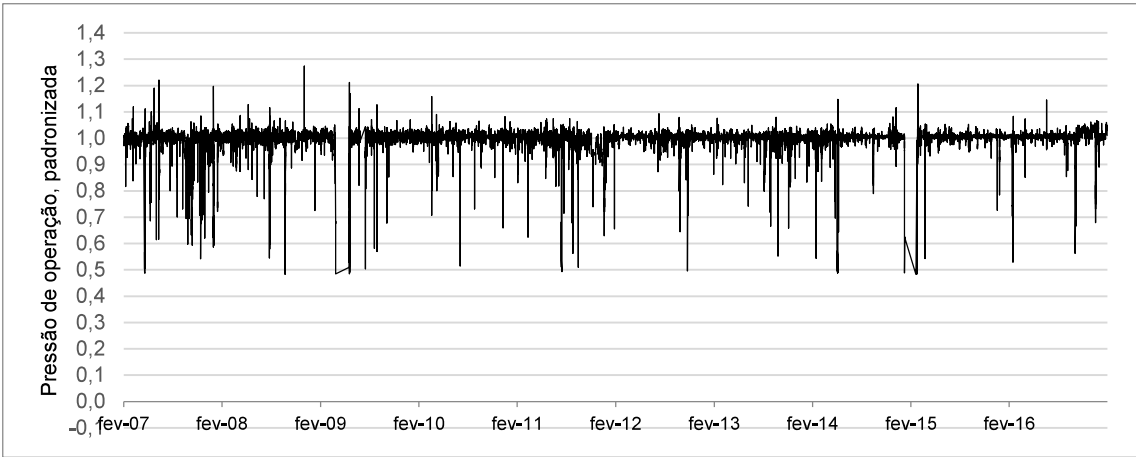
---

Fonte: autor (2024)

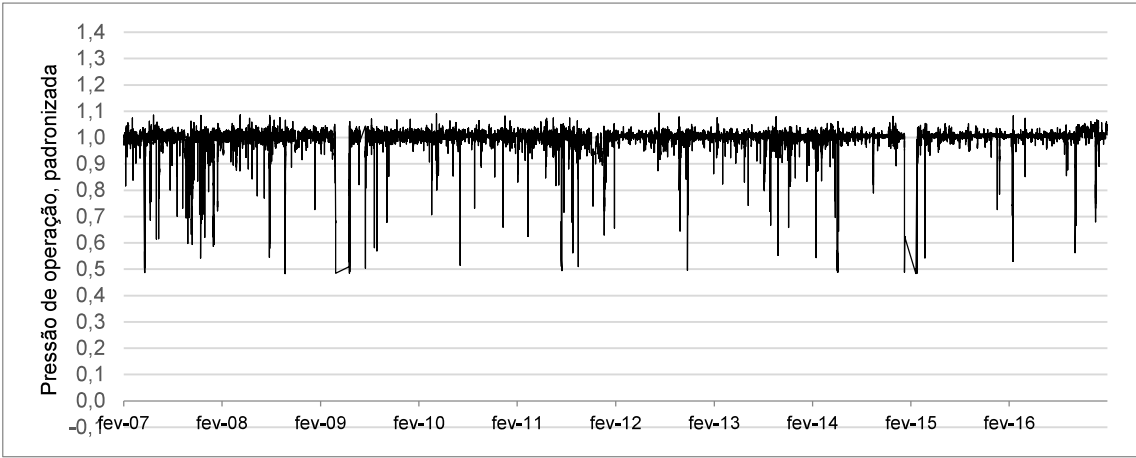
Figura 66 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)

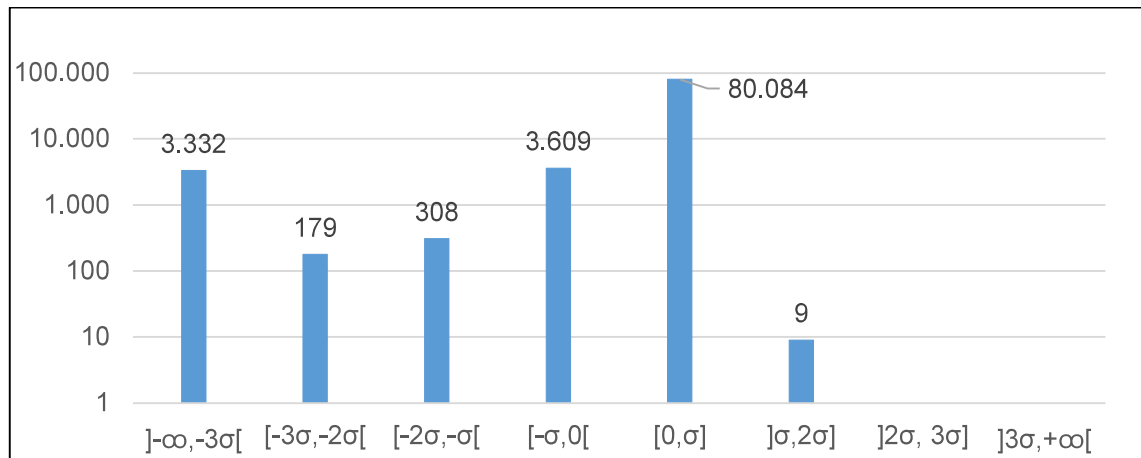


(c)

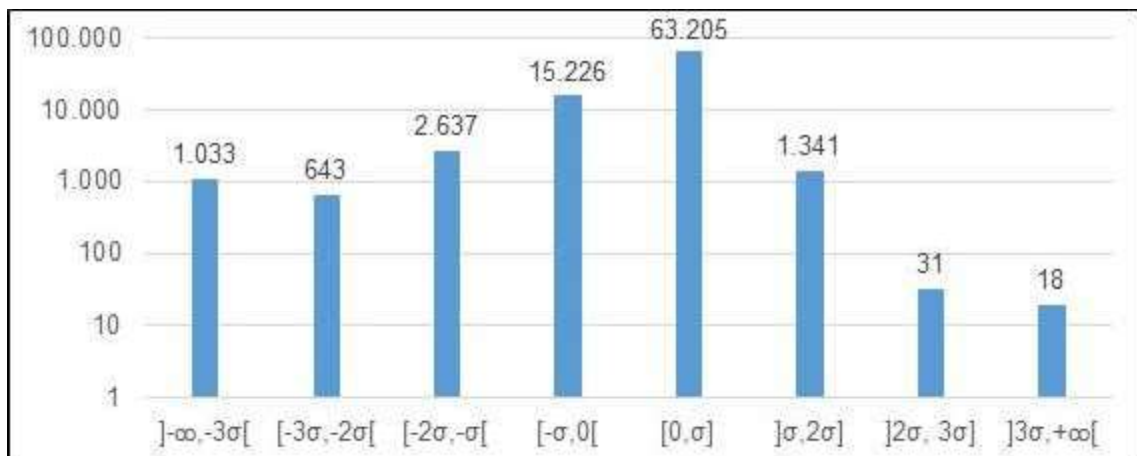
Fonte: autor (2024)



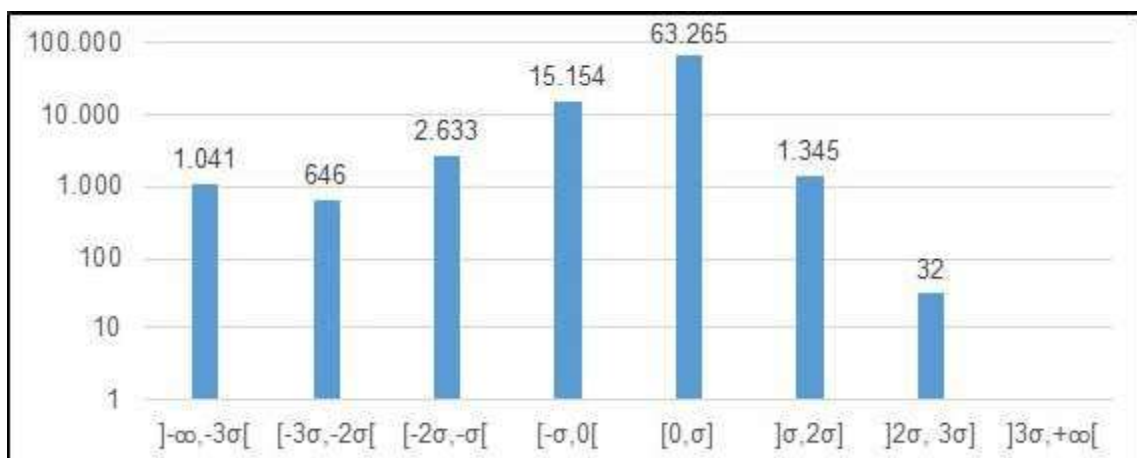
Figura 67 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 68 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



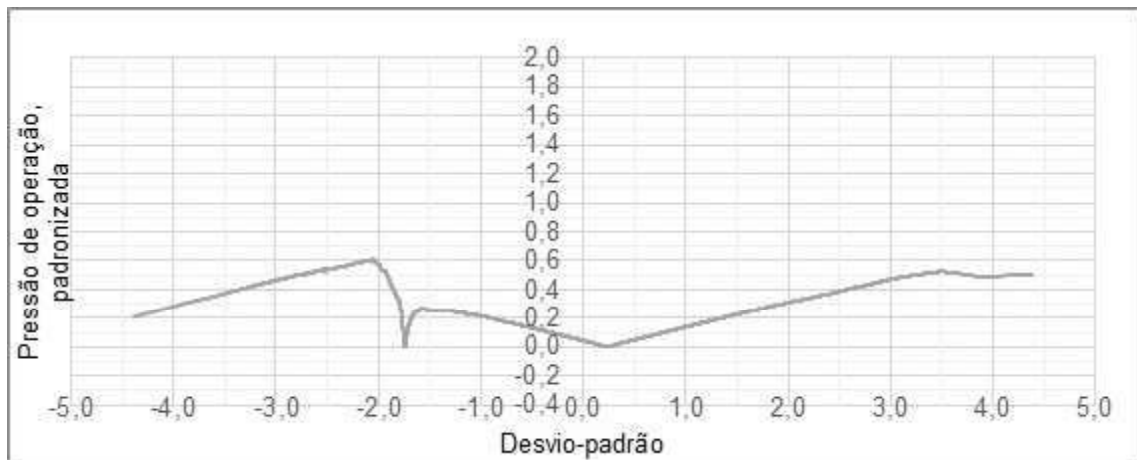
(b)



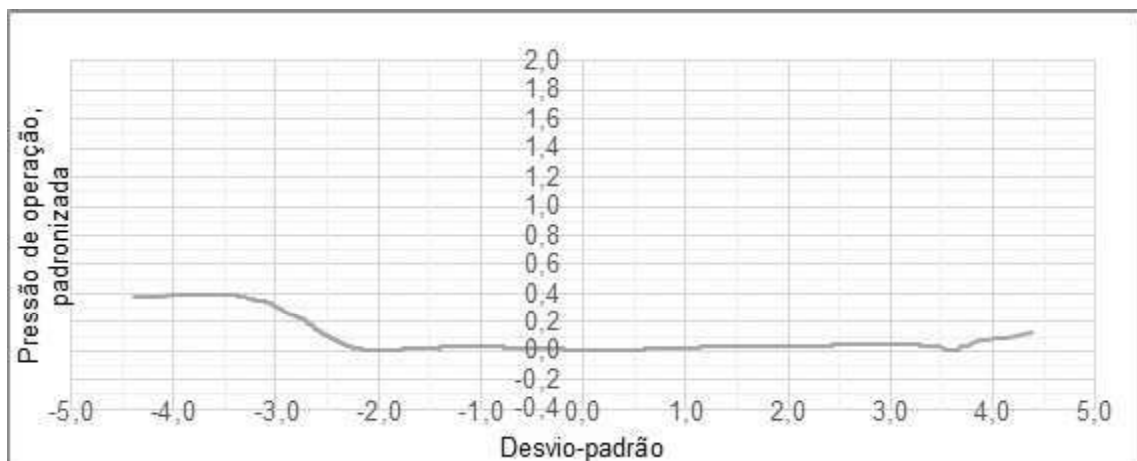
(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 69 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

## Resultados do equipamento 04

Tabela 23 - Valores estatísticos obtidos em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                   | Unidade      | Número da etapa conforme metodologia |             |                 |
|----------------------------------|--------------|--------------------------------------|-------------|-----------------|
|                                  |              | 03 e 04                              | 05, 06 e 07 | 08, 09, 10 e 11 |
| MÉDIA PADRONIZADA                | Adimensional | 1,00                                 | 1,00        | 1,00            |
| DESVIO-PADRÃO PADRONIZADO        | Adimensional | 0,18                                 | 0,04        | 0,03            |
| COEFICIENTE DE VARIAÇÃO AMOSTRAL | %            | 18,39                                | 3,51        | 3,49            |
| MODA                             | Adimensional | 1,05                                 | 1,01        | 1,01            |
| MEDIANA                          | Adimensional | 1,04                                 | 1,01        | 1,01            |
| PRESSÃO MÁXIMA DE OPERAÇÃO       | Adimensional | 1,55                                 | 1,11        | 1,10            |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS     | Quantidade   | 87602                                | 84172       | 84145           |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÚMEROS      | Quantidade   | 87530                                | 84172       | 84145           |
| OUTLIERS TIPO 0                  | Quantidade   | 72                                   | -           | -               |
| OUTLIERS TIPO 1                  | Quantidade   | -                                    | 3358        | -               |
| OUTLIERS TIPO 2                  | Quantidade   | -                                    | -           | 27              |
| ERRO ABSOLUTO MÉDIO              | %            | 13,95                                | 1,88        | 1,87            |

Fonte: autor (2024)

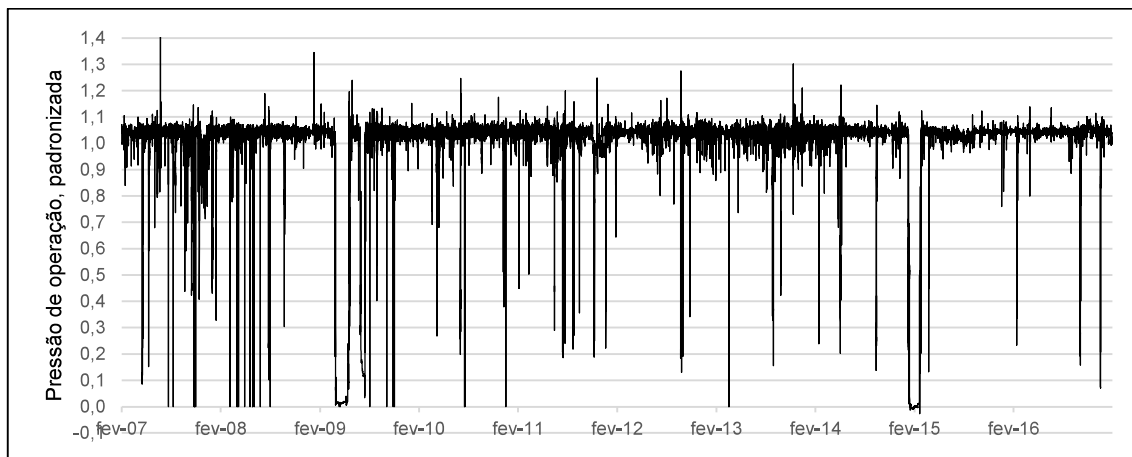
Tabela 24 - Quantidade e percentual de dados em cada etapa da metodologia

| CARACTERÍSTICA                                                                   | UNIDADE    | QUANTIDADE | PERCENTUAL |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS                                                     | Quantidade | 87.602     | 100,00     |
| QUANTIDADE TOTAL DE NÃO NÚMEROS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 0)                        | Quantidade | 72         | 0,08       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 03 E 04                              | Quantidade | 87.530     | 99,92      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 1) | Quantidade | 3.358      | 3,83       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 05, 06 E 07                          | Quantidade | 84.172     | 96,08      |
| QUANTIDADE DE AMOSTRAS COM VALORES NÃO REPRESENTATIVOS ( <i>OUTLIERS</i> TIPO 2) | Quantidade | 27         | 0,03       |
| QUANTIDADE TOTAL DE AMOSTRAS PARA AS ETAPAS 08, 09, 10 E 11                      | Quantidade | 84.145     | 96,05      |

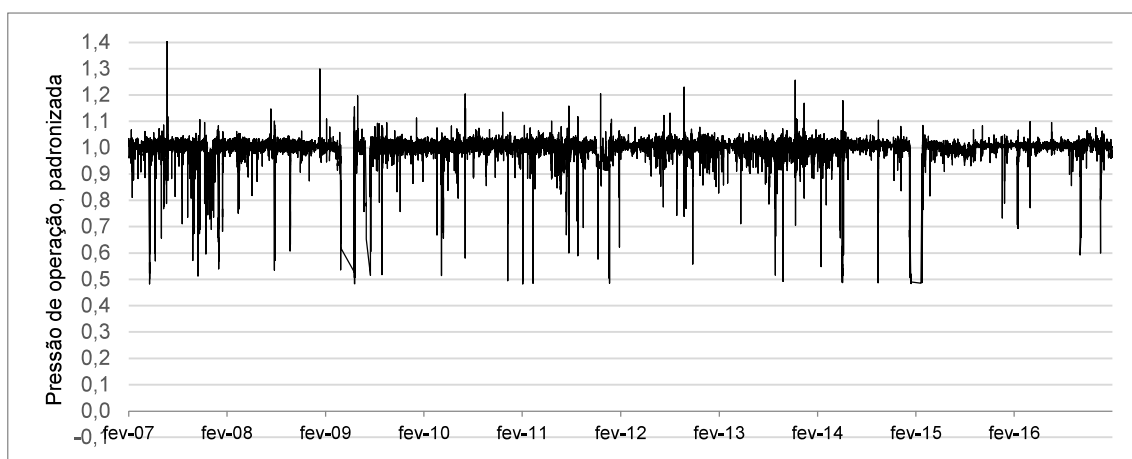
---

Fonte: autor (2024)

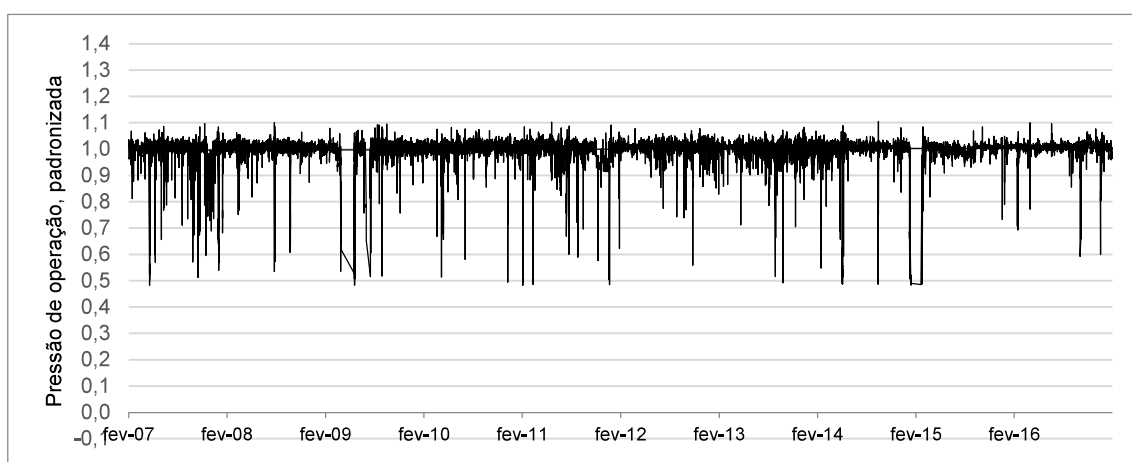
Figura 70 - Valor horário da pressão de operação, padronizada pela média, em dez anos. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



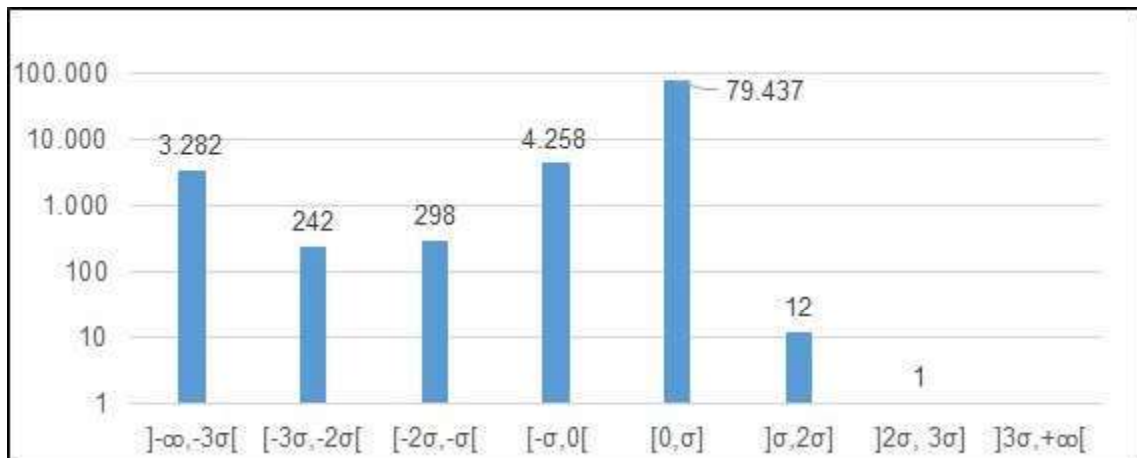
(b)



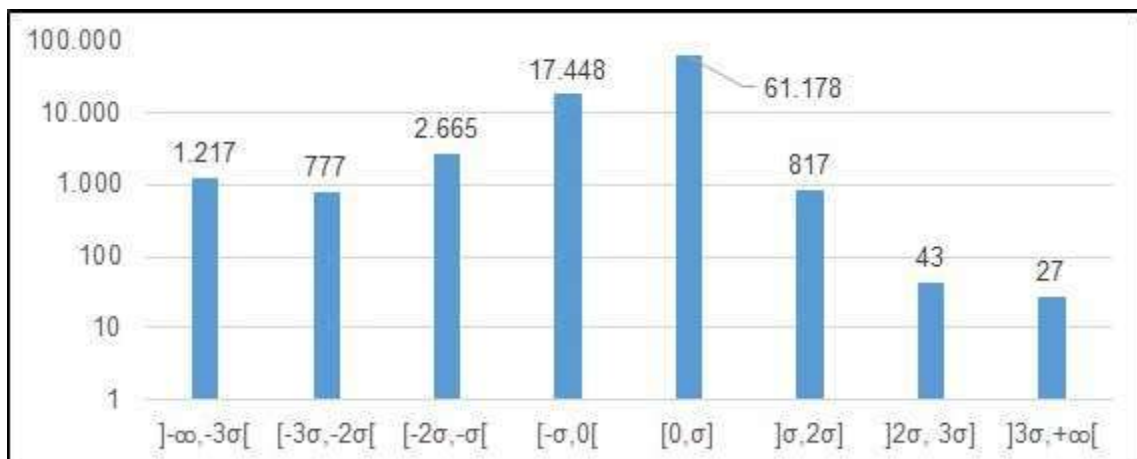
(c)

Fonte: autor (2024)

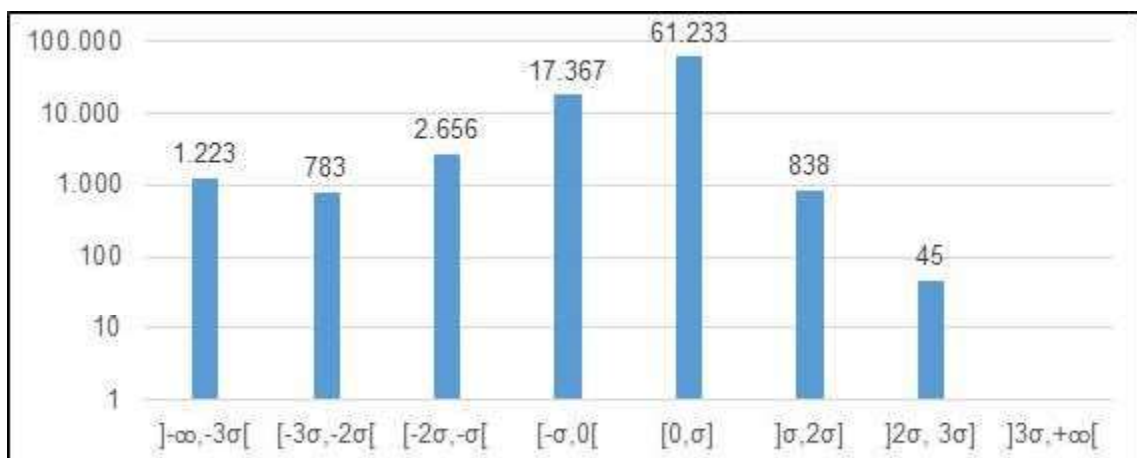
Figura 71 - Logaritmo da quantidade de ocorrências da pressão de operação, padronizada pela média, em oito classes de intervalo, em escala logarítmica. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

Figura 72 - Curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

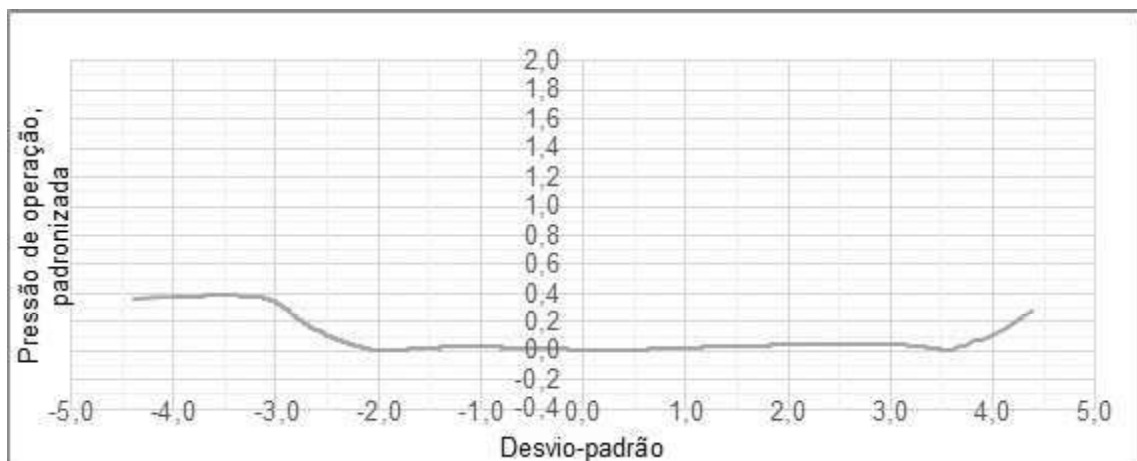
Fonte: autor (2024)



Figura 73 - Diferença absoluta entre a curva da pressão de operação padronizada e reta de referência da curva normal. (a) Etapas 03 e 04; (b) Etapas 05, 06 e 07; (c) Etapas 08, 09, 10 e 11



(a)



(b)



(c)

Fonte: autor (2024)

### Tradução dos termos da figura 16

| TERMO EM INGLÊS                    | TRADUÇÃO LIVRE PARA O PORTUGUÊS      |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Availability analysis</i>       | Análise da disponibilidade           |
| <i>Chemical industries</i>         | Indústrias química                   |
| <i>Common cause failure</i>        | Falha de causa comum                 |
| <i>Complex system</i>              | Sistema complexo                     |
| <i>Condition monitoring</i>        | Monitoramento da condição            |
| <i>Condition-based maintenance</i> | Manutenção baseada na condição       |
| <i>Corrective maintenance</i>      | Manutenção corretiva                 |
| <i>Corrosion failure</i>           | Falha devido a corrosão              |
| <i>Deteriorating system</i>        | Sistema (processo) de deterioração   |
| <i>Failure analysis</i>            | Análise de falha                     |
| <i>Human factors</i>               | Fatores humanos                      |
| <i>Human reliability analysis</i>  | Análise da confiabilidade humana     |
| <i>Inspection</i>                  | Inspeção                             |
| <i>Integrity management</i>        | Gerenciamento da integridade         |
| <i>Maintenance scheduling</i>      | Planejamento da manutenção           |
| <i>Minimal repair</i>              | Reparo mínimo                        |
| <i>MTBF</i>                        | Tempo médio entre falhas             |
| <i>MTTF</i>                        | Tempo médio para ocorrência de falha |
| <i>Opportunistic maintenance</i>   | Manutenção por oportunidade          |
| <i>Periodic inspection</i>         | Inspeção periódica                   |
| <i>Prediction</i>                  | Predição                             |
| <i>Predictive maintenance</i>      | Manutenção preditiva                 |
| <i>Preventive maintenance</i>      | Manutenção preventiva                |
| <i>Process industries</i>          | Indústrias de processos              |
| <i>RBI (Risk-based Inspection)</i> | Inspeção baseada em risco            |
| <i>Redundancy</i>                  | Redundância                          |
| <i>Redundancy allocation</i>       | Alocação de redundância              |
| <i>Reliability analysis</i>        | Análise da confiabilidade            |
| <i>Reliability growth</i>          | Crescimento da confiabilidade        |
| <i>Reliability optimization</i>    | Otimização da confiabilidade         |
| <i>Reliability prediction</i>      | Predição da confiabilidade           |
| <i>Selective maintenance</i>       | Manutenção seletiva                  |
| <i>Sensitivity analysis</i>        | Análise de sensibilidade             |
| <i>Series-parallel system</i>      | Sistema série-paralelo               |
| <i>Unavailability analysis</i>     | Análise da indisponibilidade         |

Fonte: autor (2024)

## ANEXO

## NR 13 - CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO

| <b>Publicação</b>                                                       | <b>D.O.U.</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <a href="#"><u>Portaria MTb nº 3.214, de 08 de junho de 1978</u></a>    | 06/07/78      |
| <b>Alterações/Atualizações</b>                                          | <b>D.O.U.</b> |
| <a href="#"><u>Portaria SSMT nº 12, de 06 de junho de 1983</u></a>      | 14/06/83      |
| <a href="#"><u>Portaria SSMT nº 02, de 08 de maio de 1984</u></a>       | 07/06/84      |
| <a href="#"><u>Portaria SSST nº 23, de 27 de dezembro de 1994</u></a>   | Rep.:26/04/95 |
| <a href="#"><u>Portaria SIT nº 57, de 19 de junho de 2008</u></a>       | 24/06/08      |
| <a href="#"><u>Portaria MTE nº 594, de 28 de abril de 2014</u></a>      | 02/05/14      |
| <a href="#"><u>Portaria MTb nº 1.084, de 28 de setembro de 2017</u></a> | 29/09/17      |
| <a href="#"><u>Portaria MTb nº 1.082, de 18 de dezembro de 2018</u></a> | 20/12/18      |
| <a href="#"><u>Portaria MTP nº 1.846, de 01 de julho de 2022</u></a>    | 04/07/22      |
| <a href="#"><u>Portaria MTP nº 4.219, de 20 de dezembro de 2022</u></a> | 22/12/22      |

*(Redação dada pela Portaria MTb nº 1.846, de 01 de julho de 2022)*

**13.1 Objetivo**

**13.1.1** O objetivo desta Norma Regulamentadora - NR é estabelecer requisitos mínimos para a gestão da integridade estrutural de caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando a segurança e saúde dos trabalhadores.

**13.1.2** O empregador é o responsável pela adoção das medidas determinadas nesta NR.

**13.1.3** O disposto no item anterior aplica-se também aos equipamentos pertencentes a terceiros, circunscritos ao estabelecimento do empregador.

**13.1.3.1** A responsabilidade do empregador não elide o dever do proprietário dos equipamentos de cumprir as disposições legais e regulamentares acerca do tema.

**13.1.4** Considera-se estabelecimento com Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos - SPIE aquele cujo empregador obtém, de forma voluntária, a certificação prevista no Anexo II desta NR.

**13.2 Campo de aplicação**

**13.2.1** Esta NR deve ser aplicada aos seguintes equipamentos:

- caldeiras com pressão de operação superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm<sup>2</sup>);
- vasos de pressão cujo produto P.V seja superior a 8 (oito), onde P é o módulo da pressão máxima de operação em kPa e V o seu volume interno em m<sup>3</sup>;
- vasos de pressão que contenham fluidos da classe A, especificados na alínea "a" do subitem 13.5.1.1.1, independente do produto P.V;

- d) recipientes móveis com P.V superior a oito, onde P é o módulo da pressão máxima de operação em kPa, ou com fluidos da classe A, especificados na alínea “a” do subitem 13.5.1.1.1;
- e) tubulações que contenham fluidos de classe A ou B, conforme as alíneas “a” e “b” do subitem 13.5.1.1.1, ligadas a caldeiras ou vasos de pressão abrangidos por esta NR; e
- f) tanques metálicos de armazenamento, com diâmetro externo maior do que três metros, capacidade nominal acima de vinte mil litros, e que contenham fluidos de classe A ou B, conforme as alíneas “a” e “b” do subitem 13.5.1.1.1 desta NR. *(entra em vigor em 04 de julho de 2026 - art. 3º da Portaria MTP nº 1.846/22)*

**13.2.2** Esta NR não se aplica aos seguintes equipamentos:

- a) recipientes transportáveis, vasos de pressão destinados ao transporte de produtos, reservatórios portáteis de fluido comprimido e extintores de incêndio;
- b) vasos de pressão destinados à ocupação humana;
- c) vasos de pressão integrantes de sistemas auxiliares de pacote de máquinas;
- d) dutos e seus componentes;
- e) fornos, serpentinas para troca térmica e aquecedores de fluido térmico;
- f) vasos de pressão com diâmetro interno inferior a cento e cinquenta milímetros independentemente da classe do fluido;
- g) geradores de vapor não enquadrados em códigos de vasos de pressão ou caldeira;
- h) tubos de sistemas de instrumentação;
- i) tubulações de redes públicas de distribuição de gás;
- j) vasos de pressão fabricados em Plástico Reforçado de Fibra de Vidro - PRFV, inclusive aqueles sujeitos à condição de vácuo;
- k) caldeiras com volume inferior a cem litros;
- l) tanques estruturais de embarcações, navios e plataformas marítimas de exploração e produção de petróleo;
- m) vasos e acumuladores de equipamentos submarinos destinados à produção e exploração de petróleo;
- n) tanques enterrados ou apoiados sobre pernas, sapatas, pedestais ou selas;
- o) painéis de cocção;
- p) acumuladores e blocos hidráulicos; *(retificada em 20/10/2022)*
- q) tubulações que operam com vapor, observado o disposto no subitem 13.6.2.6 desta NR;
- r) trocador de calor de placas corrugadas gaxetadas e brasadas; e
- s) vasos de pressão sujeitos exclusivamente a condições de vácuo menor ou igual a 5 kPa, que não contenham fluidos de classe A.

**13.2.3** O disposto no item 13.2.2 não exime o empregador do dever de inspecionar e executar a manutenção dos referidos equipamentos e de outros sistemas pressurizados que ofereçam riscos aos trabalhadores, acompanhadas ou executadas por um

responsável técnico, e observadas as recomendações do fabricante, bem como o disposto em códigos ou normas aplicáveis. *(retificado em 20/10/2022)*

### **13.3 Disposições gerais**

**13.3.1** As seguintes situações constituem condição de grave e iminente risco:

- a) operação de equipamentos abrangidos por esta NR sem os dispositivos de segurança previstos nos subitens 13.4.1.2 “a”, 13.5.1.2 “a”, 13.6.1.2 e 13.7.2.1;
- b) atraso na inspeção de segurança periódica de caldeiras;
- c) ausência ou bloqueio de dispositivos de segurança, sem a devida justificativa técnica, baseada em códigos, normas ou procedimentos formais de operação do equipamento;
- d) ausência ou indisponibilidade operacional de dispositivo de controle do nível de água na caldeira;
- e) operação de equipamento enquadrado nesta NR, cujo relatório de inspeção ateste a sua inaptidão operacional; ou
- f) operação de caldeira em desacordo com o disposto no item 13.4.3.3 desta NR.

**13.3.1.1** Por motivo de força maior e com justificativa formal do empregador, acompanhada por análise técnica e respectivas medidas de contingência para mitigação dos riscos, elaborada por Profissional Legalmente Habilitado - PLH ou por grupo multidisciplinar por ele coordenado, pode ocorrer postergação de até seis meses do prazo previsto para a inspeção de segurança periódica dos equipamentos abrangidos por esta NR.

**13.3.1.1.1** O empregador deve comunicar ao sindicato dos trabalhadores da categoria predominante do estabelecimento a justificativa formal para postergação da inspeção de segurança periódica dos equipamentos abrangidos por esta NR.

**13.3.2** Para efeito desta NR, considera-se PLH aquele que tem competência legal para o exercício da profissão de engenheiro nas atividades referentes a projeto de construção, acompanhamento da operação e da manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, em conformidade com a regulamentação profissional vigente no País.

**13.3.2.1** O PLH pode obter voluntariamente a certificação de suas competências profissionais por intermédio de um Organismo de Certificação de Pessoas - OPC acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Cgcre/INMETRO, conforme estabelece o Anexo III desta NR.

**13.3.3** A inspeção de segurança dos equipamentos abrangidos por esta NR deve ser executada sob a responsabilidade técnica de PLH.

**13.3.4** A inspeção de segurança dos equipamentos abrangidos por esta NR deve ser respaldada por exames e testes, a critério técnico do PLH, observado o disposto em códigos ou normas aplicáveis.

**13.3.4.1** Deve ser observado o histórico dos equipamentos quando existente.

**13.3.4.2** Os exames e testes devem ser realizados em condições de segurança para os executantes e demais trabalhadores envolvidos.

**13.3.4.3** A execução de testes pneumáticos ou hidropneumáticos, quando indispensável, deve ser realizada sob responsabilidade técnica de PLH, com aprovação prévia dos procedimentos a serem aplicados. *(retificado em 20/10/2022)*

**13.3.5** É proibida a inibição dos instrumentos, controles e sistemas de segurança, exceto quando prevista, de forma provisória, em procedimentos formais de operação e manutenção ou mediante justificativa formalmente documentada elaborada por responsável técnico, com prévia análise de risco e anuência do empregador ou de preposto por ele designado, desde que mantida a segurança operacional.

**13.3.6** Os instrumentos e sistemas de controle e segurança dos equipamentos abrangidos por esta NR devem ser mantidos em condições adequadas de uso e devidamente inspecionados e testados ou, quando aplicável, calibrados.

**13.3.7** Todos os reparos ou alterações em equipamentos abrangidos nesta NR devem respeitar os respectivos códigos de construção e as prescrições do fabricante no que se refere a:

- a) materiais;
- b) procedimentos de execução;
- c) procedimentos de controle de qualidade; e
- d) qualificação e certificação de pessoal.

**13.3.7.1** Quando não for conhecido o código de construção, deve ser respeitada a concepção original da caldeira, vaso de pressão, tubulação ou tanque metálico de armazenamento, empregando-se os procedimentos de controle prescritos pelos códigos aplicáveis a esses equipamentos.

**13.3.7.2** A critério técnico do PLH, podem ser utilizadas tecnologias de cálculo ou procedimentos mais avançados, em substituição aos previstos pelos códigos de construção.

**13.3.7.3** Projetos de alteração ou reparo devem ser concebidos previamente nas seguintes situações:

- a) sempre que as condições de projeto forem modificadas; ou
- b) sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança.

**13.3.7.4** Os projetos de alteração e os projetos de reparo devem:

- a) ser concebidos ou aprovados por PLH;
- b) determinar materiais, procedimentos de execução, controle de qualidade e qualificação de pessoal; e

c) ser divulgados para os empregados do estabelecimento que estão envolvidos com o equipamento.

**13.3.7.5** Todas as intervenções que exijam mandrilamento ou soldagem em partes que operem sob pressão devem ser objeto de exames ou testes para controle da qualidade com parâmetros definidos por PLH, de acordo com códigos ou normas aplicáveis.

**13.3.8** Os relatórios de inspeção de segurança dos equipamentos abrangidos por esta NR devem ser elaborados em até 60 (sessenta) dias ou, no caso de parada geral de manutenção, em até 90 (noventa) dias.

**13.3.8.1** Imediatamente após a inspeção de segurança de caldeira, vaso de pressão ou tanque metálico de armazenamento, deve ser anotada, no respectivo registro de segurança, previsto nos subitens 13.4.1.8, 13.5.1.7 e 13.7.1.3 desta NR, a condição operacional e de segurança.

**13.3.8.2** As recomendações decorrentes das inspeções de segurança devem ser registradas e implementadas pelo empregador, com a determinação de prazos e responsáveis pela execução.

**13.3.9** Os relatórios, projetos, certificados e demais documentos previstos nesta NR podem ser elaborados e armazenados em sistemas informatizados, com segurança da informação, ou mantidos em mídia eletrônica com assinatura validada por uma Autoridade Certificadora - AC, assegurados os requisitos de autenticidade, integridade, disponibilidade, rastreabilidade e irretratabilidade das informações.

**13.3.9.1** No caso de versão impressa de relatórios de inspeção de segurança, as páginas devem ser numeradas.

**13.3.10** A documentação dos equipamentos abrangidos por esta NR deve permanecer à disposição para consulta dos operadores, do pessoal de manutenção, de inspeção e das representações dos trabalhadores e do empregador na Comissão Interna de Prevenção de Acidentes e de Assédio - CIPA, devendo o empregador assegurar pleno acesso a essa documentação, inclusive à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento, quando formalmente solicitado.

**13.3.11** O empregador deve comunicar à autoridade regional competente em matéria de trabalho e ao sindicato da categoria profissional predominante do estabelecimento a ocorrência de vazamento, incêndio ou explosão envolvendo equipamentos abrangidos por esta NR que tenha como consequência uma das situações a seguir:

- a) morte de trabalhador(es);
- b) internação hospitalar de trabalhador(es); ou
- c) eventos de grande proporção.

**13.3.11.1** A comunicação deve ser encaminhada até o segundo dia útil após a ocorrência e deve conter:

- a) razão social do empregador, endereço, local, data e hora da ocorrência;
- b) descrição da ocorrência;

- c) nome e função da(s) vítima(s);
- d) procedimentos de investigação adotados;
- e) cópia do último relatório de inspeção de segurança do equipamento envolvido; e
- f) cópia da Comunicação de Acidente de Trabalho - CAT.

**13.3.11.2** Na ocorrência de acidentes previstos no subitem 13.3.11, o empregador deve comunicar formalmente a representação sindical dos trabalhadores predominante do estabelecimento para participar da respectiva investigação.

**13.3.12** As caldeiras e vasos de pressão comprovadamente fabricados em série devem ser certificados no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação de Conformidade, quando aplicável. *(retificado em 20/10/2022)*

**13.3.13** É proibida a construção, importação, comercialização, leilão, locação, cessão a qualquer título, exposição e utilização de caldeiras e vasos de pressão sem a indicação do respectivo código de construção no prontuário e na placa de identificação. *(para equipamentos fabricados a partir de 20 de março de 2018 - vide art. 4º da Portaria MTP nº 1.846/22)*

## **13.4 Caldeiras**

### **13.4.1 Disposições Gerais**

**13.4.1.1** Para os propósitos desta NR, as caldeiras devem ser categorizadas da seguinte forma:

- a) caldeiras da categoria A são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm<sup>2</sup>); ou
- b) caldeiras da categoria B são aquelas cuja pressão de operação seja superior a 60 kPa (0,61 kgf/cm<sup>2</sup>) e inferior a 1.960 kPa (19,98 kgf/cm<sup>2</sup>).

**13.4.1.2** As caldeiras devem ser dotadas dos seguintes itens:

- a) válvula de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior à Pressão Máxima de Trabalho Admissível - PMTA, respeitados os requisitos do código de construção relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de pressão de ajuste;
- b) instrumento que indique a pressão do vapor acumulado;
- c) injetor ou sistema de alimentação de água independente do principal, nas caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão;
- d) sistema dedicado de drenagem rápida de água em caldeiras de recuperação de álcalis, com ações automáticas após acionamento pelo operador; e
- e) sistema automático de controle do nível de água com intertravamento que evite o superaquecimento por alimentação deficiente.

**13.4.1.3** Toda caldeira deve ter afixada em seu corpo, em local de fácil acesso e visível, placa de identificação indelével com, no mínimo, as seguintes informações:

- a) nome do fabricante;
- b) número de ordem dado pelo fabricante da caldeira;



- c) ano de fabricação;
- d) pressão máxima de trabalho admissível;
- e) capacidade de produção de vapor;
- f) área de superfície de aquecimento; e
- g) código de construção e ano de edição.

**13.4.1.4** Além da placa de identificação, deve constar, em local visível, a categoria da caldeira e seu número ou código de identificação.

**13.4.1.5** Toda caldeira deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalada, a seguinte documentação devidamente atualizada:

a) prontuário da caldeira, fornecido por seu fabricante, contendo as seguintes informações:

I - código de construção e ano de edição;

II - especificação dos materiais;

III - procedimentos utilizados na fabricação, montagem e inspeção final;

IV - metodologia para estabelecimento da PMTA;

V - registros da execução do teste hidrostático de fabricação;

VI - conjunto de desenhos e demais dados necessários ao monitoramento da vida útil da caldeira;

VII - características funcionais;

VIII - dados dos dispositivos de segurança;

IX - ano de fabricação; e

X - categoria da caldeira;

b) registro de segurança;

c) projeto de instalação;

d) projeto de alteração ou reparo;

e) relatórios de inspeção de segurança; e

f) certificados de inspeção e teste dos dispositivos de segurança.

**13.4.1.6** Quando inexistente ou extraviado, o prontuário da caldeira deve ser reconstituído pelo empregador, com responsabilidade técnica do fabricante ou de PLH, sendo imprescindível a reconstituição das características funcionais, dos dados dos dispositivos de segurança e da memória de cálculo da PMTA.

**13.4.1.7** Quando a caldeira for vendida ou transferida de estabelecimento, os documentos mencionados nas alíneas "a", "d", e "e" do subitem 13.4.1.5 devem acompanhá-la.

**13.4.1.8** O registro de segurança deve ser constituído por livro de páginas numeradas, pastas ou sistema informatizado onde serão registradas:

- a) todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança da caldeira, inclusive alterações nos prazos de inspeção; e
- b) as ocorrências de inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, devendo constar a condição operacional da caldeira, o nome legível e assinatura de PLH e do operador de caldeira presente na ocasião da inspeção.

**13.4.1.9** Caso a caldeira venha a ser considerada inadequada para uso, o registro de segurança deve conter tal informação e receber encerramento formal.

#### **13.4.2** Instalação de caldeiras

**13.4.2.1** A autoria do projeto de instalação de caldeiras é de responsabilidade de PLH, e deve obedecer aos aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas normas regulamentadoras, convenções e disposições legais aplicáveis.

**13.4.2.2** As caldeiras de qualquer estabelecimento devem ser instaladas em local específico para tal fim, denominado casa de caldeiras ou área de caldeiras.

**13.4.2.3** Quando a caldeira for instalada em ambiente aberto, a área de caldeiras deve satisfazer os seguintes requisitos:

- a) estar afastada, no mínimo, três metros de outras instalações do estabelecimento, dos depósitos de combustíveis, excetuando-se reservatórios para partida com até dois mil litros de capacidade, do limite de propriedade de terceiros e do limite com as vias públicas;
- b) dispor de pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas, sinalizadas e dispostas em direções distintas;
- c) dispor de acesso fácil e seguro, necessário à operação e à manutenção da caldeira, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;
- d) ter sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, provenientes da combustão, para fora da área de operação, atendendo às normas ambientais vigentes;
- e) dispor de iluminação conforme normas oficiais vigentes; e
- f) ter sistema de iluminação de emergência caso opere à noite.

**13.4.2.4** Quando a caldeira estiver instalada em ambiente fechado, a casa de caldeiras deve satisfazer os seguintes requisitos:

- a) constituir prédio separado, construído de material resistente ao fogo, podendo ter apenas uma parede adjacente a outras instalações do estabelecimento, porém com as outras paredes afastadas de, no mínimo, três metros de outras instalações, do limite de propriedade de terceiros, do limite com as vias públicas e de depósitos de combustíveis, excetuando-se reservatórios para partida com até dois mil litros de capacidade;
- b) dispor de pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas, sinalizadas e dispostas em direções distintas;

- c) dispor de ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas;
- d) dispor de sensor para detecção de vazamento de gás, quando se tratar de caldeira a combustível gasoso;
- e) não ser utilizada para qualquer outra finalidade;
- f) dispor de acesso fácil e seguro, necessário à operação e à manutenção da caldeira, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;
- g) ter sistema de captação e lançamento dos gases e material particulado, provenientes da combustão, para fora da área de operação, atendendo às normas ambientais vigentes; e
- h) dispor de iluminação conforme normas oficiais vigentes e ter sistema de iluminação de emergência.

**13.4.2.5** Quando o estabelecimento não puder atender ao disposto nos subitens 13.4.2.3 e 13.4.2.4, deve ser elaborado projeto alternativo de instalação, com medidas complementares de segurança que permitam a atenuação dos riscos, comunicando previamente à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento.

**13.4.2.6** As caldeiras classificadas na categoria A devem possuir painel de instrumentos instalados em sala de controle, construída segundo o que estabelecem as normas regulamentadoras aplicáveis.

### **13.4.3 Segurança na operação de caldeiras**

**13.4.3.1** Toda caldeira deve possuir manual de operação atualizado, em língua portuguesa, em local de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo:

- a) procedimentos de partidas e paradas;
- b) procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;
- c) procedimentos para situações de emergência; e
- d) procedimentos gerais de segurança, de saúde e de preservação do meio ambiente.

**13.4.3.2** A qualidade da água deve ser controlada e tratamentos devem ser implementados, quando necessários, para compatibilizar suas propriedades físico- químicas com os parâmetros de operação da caldeira definidos pelo fabricante.

**13.4.3.3** Toda caldeira deve estar, obrigatoriamente, sob operação e controle de operador de caldeira.

**13.4.3.4** É considerado operador de caldeira aquele que cumprir o disposto no item 1.1 do Anexo I desta NR.

### **13.4.4 Inspeção de segurança de caldeiras**

**13.4.4.1** As caldeiras devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária.

**13.4.4.2** A inspeção de segurança inicial deve ser feita em caldeiras novas, antes da entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo compreender exame interno, externo e teste de pressão.

**13.4.4.3** As caldeiras devem, obrigatoriamente, ser submetidas a Teste Hidrostático - TH em sua fase de fabricação, com comprovação por meio de laudo assinado por PLH.

**13.4.4.3.1** Na falta de comprovação documental de que o TH tenha sido realizado na fase de fabricação, se aplicará o disposto a seguir:

- a) para as caldeiras fabricadas ou importadas a partir de 2 de maio de 2014, o TH correspondente ao da fase de fabricação deve ser feito durante a inspeção de segurança inicial; ou
- b) para as caldeiras em operação antes de 2 de maio de 2014, a execução do TH correspondente ao da fase de fabricação fica a critério técnico do PLH e, caso este julgue necessário, deve ser executado até a próxima inspeção de segurança periódica interna.

**13.4.4.4** A inspeção de segurança periódica, constituída por exames interno e externo, deve ser executada nos seguintes prazos máximos:

- a) doze meses para caldeiras das categorias A e B;
- b) dezoito meses para caldeiras de recuperação de álcalis de qualquer categoria;
- c) vinte e quatro meses para caldeiras da categoria A, desde que aos doze meses sejam testadas as pressões de abertura das válvulas de segurança; ou
- d) trinta meses para caldeiras de categoria B com sistema de gerenciamento de combustão - SGC que atendam ao disposto no Anexo IV desta NR.

**13.4.4.5** Estabelecimentos que possuam SPIE, conforme estabelecido no Anexo II, podem estender os períodos entre inspeções de segurança, respeitando os seguintes prazos máximos:

- a) vinte e quatro meses para as caldeiras de recuperação de álcalis;
- b) vinte e quatro meses para as caldeiras da categoria B;
- c) trinta meses para caldeiras da categoria A; ou
- d) quarenta e oito meses para caldeiras de categoria A com Sistema Instrumentado de Segurança - SIS, que atendam ao disposto no Anexo IV desta NR.

**13.4.4.6** No máximo, ao completar vinte e cinco anos de uso, na sua inspeção subsequente, as caldeiras devem ser submetidas a uma avaliação de integridade com maior abrangência, de acordo com códigos ou normas aplicáveis, para determinar a sua vida remanescente e novos prazos máximos para inspeção, caso ainda estejam em condições de uso.

**13.4.4.7** As válvulas de segurança de caldeiras devem ser desmontadas, inspecionadas e testadas com prazo adequado à sua manutenção, porém, não superior ao previsto

para a inspeção de segurança periódica das caldeiras por elas protegidas, de acordo com os subitens 13.4.4.4 e 13.4.4.5.

**13.4.4.7.1** Em situações excepcionais, devidamente justificadas por PLH, as válvulas de segurança que não atendam ao disposto no subitem 13.4.4.7 podem ser testadas no campo, com uma frequência compatível com o histórico operacional destes dispositivos.

**13.4.4.8** Além do disposto no subitem 13.4.4.7, as válvulas de segurança instaladas em caldeiras de categoria B devem ser testadas periodicamente conforme segue:

- a) pelo menos uma vez por mês, mediante acionamento manual da alavanca durante a operação de caldeiras sem tratamento de água, exceto para aquelas que vaporizem fluido térmico; ou
- b) as caldeiras que operem com água tratada devem ter a alavanca acionada manualmente, de acordo com as prescrições do fabricante.

**13.4.4.9** Adicionalmente aos testes prescritos nos subitens 13.4.4.7 e 13.4.4.8, as válvulas de segurança instaladas em caldeiras podem ser submetidas a testes de acumulação, a critério técnico do PLH.

**13.4.4.10** A inspeção de segurança extraordinária deve ser feita nas seguintes oportunidades:

- a) sempre que a caldeira for danificada por acidente ou outra ocorrência capaz de comprometer sua segurança;
- b) quando a caldeira for submetida a alteração ou reparo importante capaz de alterar suas condições de segurança;
- c) antes de a caldeira ser recolocada em funcionamento, quando permanecer inativa por mais de seis meses; ou
- d) quando houver mudança de local de instalação da caldeira.

**13.4.4.11** O empregador deve informar à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento, quando demandado formalmente, num prazo máximo de 30 (trinta) dias após o término da inspeção de segurança periódica, a condição operacional da caldeira.

**13.4.4.11.1** Mediante o recebimento de requisição formal, o empregador deve encaminhar à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento, no prazo máximo de 10 (dez) dias após a sua elaboração, a cópia do relatório de inspeção.

**13.4.4.11.2** A representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento pode solicitar ao empregador que seja enviada, de maneira regular, cópia do relatório de inspeção de segurança da caldeira, no prazo de trinta dias após a sua elaboração, ficando o empregador desobrigado de atender ao contido nos subitens 13.4.4.11 e 13.4.4.11.1.

**13.4.4.12** O relatório de inspeção de segurança, mencionado na alínea “e” do subitem 13.4.1.5, deve conter no mínimo:

- a) dados constantes na placa de identificação da caldeira;
- b) categoria da caldeira;
- c) tipo da caldeira;
- d) tipo de inspeção executada;
- e) data de início e término da inspeção;
- f) descrição das inspeções, exames e testes executados;
- g) registros fotográficos do exame interno da caldeira;
- h) resultado das inspeções e intervenções executadas;
- i) relação dos itens desta NR, relativos a caldeiras, que não estão sendo atendidos;
- j) recomendações e providências necessárias;
- k) parecer conclusivo quanto à integridade da caldeira até a próxima inspeção;
- l) data prevista para a próxima inspeção de segurança da caldeira;
- m) nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PLH e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção; e
- n) número do certificado de inspeção e teste da válvula de segurança.

**13.4.4.13** Sempre que os resultados da inspeção determinarem alterações dos dados de projeto, a placa de identificação e a documentação do prontuário devem ser atualizadas.

### **13.5 Vasos de pressão**

#### **13.5.1 Disposições Gerais**

**13.5.1.1** Para os efeitos desta NR, os vasos de pressão devem ser categorizados, com base na classe do fluido e no grupo de potencial de risco, mediante a aplicação da Tabela 1.

**13.5.1.1.1** Os fluidos contidos nos vasos de pressão devem ser classificados conforme descrito a seguir:

a) classe A:

I - fluidos inflamáveis;

II - fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a duzentos graus Celsius (200 °C);

III - fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a vinte partes por milhão (20 ppm);

IV - hidrogênio; e

V - acetileno.

b) classe B:

I - fluidos combustíveis com temperatura inferior a duzentos graus Celsius (200 °C); e

II - fluidos tóxicos com limite de tolerância superior a vinte partes por milhão (20 ppm).

c) classe C:

I - vapor de água;

II - gases asfixiantes simples; e

III - ar comprimido.

d) classe D:

I - outros fluidos não enquadrados nas classes anteriores.

**13.5.1.1.2** Quando se tratar de mistura, deve ser considerado, para fins de classificação, o fluido que apresentar maior risco aos trabalhadores e às instalações, considerando-se sua toxicidade, inflamabilidade e concentração.

**13.5.1.1.3** O grupo de potencial de risco do vaso de pressão deve ser estabelecido a partir do produto P.V, onde P é a pressão máxima de operação em MPa, em módulo, e V o seu volume em m³ (metro cúbico), conforme segue:

a) Grupo 1 - P.V > 100; *(retificado em 20/10/2022)*

b) Grupo 2 - P.V < 100 e P.V > 30; *(retificado em 20/10/2022)*

c) Grupo 3 - P.V < 30 e P.V > 2,5; *(retificado em 20/10/2022)*

d) Grupo 4 - P.V < 2,5 e P.V > 1; ou *(retificado em 20/10/2022)*

e) Grupo 5 - P.V < 1.

**Tabela 1 - Categorização de vasos de pressão**

| Classe do Fluido | Grupo de Potencial de Risco |     |     |     |     |
|------------------|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                  | 1                           | 2   | 3   | 4   | 5   |
| A                | I                           | I   | II  | III | III |
| B                | I                           | II  | III | IV  | IV  |
| C                | I                           | II  | III | IV  | V   |
| D                | II                          | III | IV  | V   | V   |

**13.5.1.2** Os vasos de pressão devem ser dotados dos seguintes itens:

a) válvula de segurança ou outro dispositivo de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior à PMTA, instalado diretamente no vaso ou no sistema que o inclui, considerados os requisitos do código de construção relativos a aberturas escalonadas e tolerâncias de pressão de ajuste; *(retificado em 20/10/2022)*

b) vasos de pressão submetidos a vácuo devem ser dotados de dispositivos de segurança ou outros meios previstos no projeto;

c) medidas para evitar o bloqueio inadvertido de dispositivos de segurança, incluindo controles administrativos ou, quando inexistentes, utilização de Dispositivo Contra Bloqueio Inadvertido - DCBI associado à sinalização de advertência; e

d) instrumento que indique a pressão de operação, instalado diretamente no vaso ou no sistema que o contenha.

**13.5.1.2.1** Os sistemas intrinsecamente protegidos, concebidos e mantidos em conformidade com o respectivo código de construção, podem prescindir do disposto no subitem 13.5.1.2, alínea “a” ou “b”, mediante parecer técnico emitido por PLH.

**13.5.1.3** Todo vaso de pressão deve ter afixado em seu corpo, em local de fácil acesso e visível, placa de identificação indelével com, no mínimo, as seguintes informações:

- a) fabricante;
- b) número de identificação;
- c) ano de fabricação;
- d) pressão máxima de trabalho admissível; e
- e) código de construção e ano de edição.

**13.5.1.4** Além da placa de identificação, devem constar, em local visível, a categoria do vaso e seu número ou código de identificação.

**13.5.1.5** Todo vaso de pressão deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalado, a seguinte documentação devidamente atualizada:

- a) prontuário do vaso de pressão, fornecido pelo fabricante, contendo as seguintes informações:
  - I - código de construção e ano de edição;
  - II - especificação dos materiais;
  - III - procedimentos utilizados na fabricação, montagem e inspeção final;
  - IV - metodologia para estabelecimento da PMTA;
  - V - conjunto de desenhos e demais dados necessários ao monitoramento da sua vida útil;
  - VI - pressão máxima de operação;
  - VII - registros da execução do teste hidrostático de fabricação;
  - VIII - características funcionais;
  - IX - dados dos dispositivos de segurança;
  - X - ano de fabricação; e
  - XI - categoria do vaso; *(retificado em 20/10/2022)*
- b) registro de segurança;
- c) projeto de alteração ou reparo;
- d) relatórios de inspeção de segurança; e
- e) certificados de inspeção e teste dos dispositivos de segurança.

**13.5.1.6** Quando inexistente ou extraviado, o prontuário do vaso de pressão deve ser reconstituído pelo empregador, com responsabilidade técnica do fabricante ou de PLH, sendo imprescindível a reconstituição das premissas de projeto, dos dados dos dispositivos de segurança e da memória de cálculo da PMTA.



**13.5.1.6.1** Vasos de pressão construídos sem códigos de construção, instalados antes da publicação da Portaria MTb nº 1.082, de 18 de dezembro de 2018, D.O.U de 20/12/2018, para os quais não seja possível a reconstituição da memória de cálculo por códigos reconhecidos, devem ter PMTA atribuída por PLH, a partir dos dados operacionais e serem submetidos a inspeções periódicas, conforme os prazos abaixo:

- a) um ano, para inspeção de segurança periódica externa; e
- b) três anos, para inspeção de segurança periódica interna.

**13.5.1.6.2** A empresa deve elaborar um plano de ação para realização de inspeção extraordinária especial de todos os vasos relacionados no subitem 13.5.1.6.1.

**13.5.1.6.3** O prazo para implementação do projeto de alteração ou de reparo não deve ser superior à vida remanescente calculada quando da execução da inspeção extraordinária especial. *(entra em vigor em 20 de dezembro de 2028 - Art. 5º da Portaria MTP nº 1.846/22)*

**13.5.1.7** O registro de segurança deve ser constituído por livro de páginas numeradas, pastas ou sistema informatizado onde serão registradas:

- a) todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança dos vasos de pressão, inclusive alterações nos prazos de inspeção; e
- b) as ocorrências de inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, devendo constar a condição operacional do vaso, o nome legível e assinatura do PLH.

**13.5.1.7.1** O empregador deve fornecer cópias impressas ou em mídia eletrônica das páginas dos registros de segurança selecionadas pela representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento, quando formalmente solicitadas.

## **13.5.2** Instalação de vasos de pressão.

**13.5.2.1** Todo vaso de pressão deve ser instalado de modo que todos os drenos, respiros, bocas de visita e indicadores de nível, pressão e temperatura, quando existentes, sejam acessados por meio seguros.

**13.5.2.2** Quando os vasos de pressão forem instalados em ambientes fechados, a instalação deve satisfazer os seguintes requisitos:

- a) pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas, sinalizadas e dispostas em direções distintas;
- b) acesso fácil e seguro para as atividades de manutenção, operação e inspeção, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas;
- c) ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas;
- d) iluminação nos termos da legislação vigente; e
- e) sistema de iluminação de emergência, exceto para vasos de pressão móveis que não exijam a presença de um operador para seu funcionamento.

**13.5.2.3** Quando o vaso de pressão for instalado em ambiente aberto, a instalação deve satisfazer os requisitos contidos nas alíneas “a”, “b”, “d” e “e” do subitem 13.5.2.2.

**13.5.2.4** A instalação de vasos de pressão deve obedecer aos aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas normas regulamentadoras, convenções e disposições legais aplicáveis.

**13.5.2.5** Quando o estabelecimento não puder atender ao disposto no subitem 13.5.2.2 ou 13.5.2.3, o empregador deve adotar medidas complementares de segurança, constantes em relatório elaborado por responsável técnico, que permitam a atenuação dos riscos.

### **13.5.3** Segurança na operação de vasos de pressão

**13.5.3.1** Todo vaso de pressão enquadrado nas categorias I ou II deve possuir manual de operação próprio, manual de operação da unidade ou instruções de operação, em língua portuguesa, em local de fácil acesso aos operadores, contendo no mínimo:

- a) procedimentos de partidas e paradas;
- b) procedimentos e parâmetros operacionais de rotina;
- c) procedimentos para situações de emergência; e
- d) procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

**13.5.3.2** A operação de unidade(s) de processo que possuam vasos de pressão de categorias I ou II deve ser efetuada por profissional capacitado, conforme item 2.1 do Anexo I desta NR.

### **13.5.4** Inspeção de segurança de vasos de pressão.

**13.5.4.1** Os vasos de pressão devem ser submetidos a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária.

**13.5.4.2** A inspeção de segurança inicial deve ser feita em vasos de pressão novos, antes de sua entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo compreender exames externo e interno.

**13.5.4.3** Os vasos de pressão devem, obrigatoriamente, ser submetidos a TH em sua fase de fabricação, com comprovação por meio de laudo assinado por responsável técnico designado pelo fabricante ou importador.

**13.5.4.3.1** Na falta de comprovação documental de que o TH tenha sido realizado na fase de fabricação, se aplicará o disposto a seguir:

- a) para os vasos de pressão fabricados ou importados a partir de 2 de maio de 2014, o TH deve ser feito durante a inspeção inicial; ou
- b) para os vasos de pressão em operação antes de 02 de maio de 2014, a execução do TH correspondente ao da fase de fabricação fica a critério técnico do PLH e, caso este julgue necessário, deve ser executado até a próxima inspeção de segurança periódica interna.

**13.5.4.4** Os vasos de pressão categorias IV ou V de produção seriada, certificados por Organismo de Certificação de Produto - OCP, acreditado pelo INMETRO, ficam dispensados da inspeção inicial, desde que instalados de acordo com as recomendações do fabricante.

**13.5.4.4.1** Deve ser anotada no registro de segurança a data da instalação do vaso de pressão, a partir da qual se inicia a contagem do prazo para a inspeção de segurança periódica.

**13.5.4.5** A inspeção de segurança periódica, constituída por exames externo e interno, deve obedecer aos prazos máximos indicados na Tabela 2, com base na categoria do vaso:

**Tabela 2 - Prazos máximos para as inspeções de segurança periódicas**

| Categoria | Estabelecimento sem SPIE |               | Estabelecimento com SPIE |               |
|-----------|--------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
|           | Exame Externo            | Exame Interno | Exame Externo            | Exame Interno |
| I         | 1 ano                    | 3 anos        | 3 anos                   | 6 anos        |
| II        | 2 anos                   | 4 anos        | 4 anos                   | 8 anos        |
| III       | 3 anos                   | 6 anos        | 5 anos                   | 10 anos       |
| IV        | 4 anos                   | 8 anos        | 6 anos                   | 12 anos       |
| V         | 5 anos                   | 10 anos       | 7 anos                   | a critério    |

*(retificada em 20/10/2022)*

**13.5.4.5.1** Os estabelecimentos que possuam SPIE certificado poderão ampliar os prazos disciplinados na Tabela 2, nos casos de implementação de metodologia documentada de inspeção baseada em risco, observado o limite máximo de 10 (dez) anos para o exame interno de vasos categoria I.

**13.5.4.5.2** A metodologia a que alude o item anterior deve ser integrada ao Programa de Gerenciamento de Riscos - PGR, nos termos da NR-01, com a definição dos critérios, das normas de referência e dos responsáveis pela sua implementação e aprovação.

**13.5.4.5.3** A inspeção periódica interna dos vasos de pressão poderá ser postergada, pela metade do prazo fixado na Tabela 2, mediante o atendimento dos seguintes requisitos:

- empresas que possuam SPIE, conforme Anexo II desta NR; *(retificado em 20/10/2022)*
- avaliação de risco aprovada por PLH, assegurada a participação dos responsáveis pela operação do equipamento; *(retificado em 20/10/2022)*
- definição dos parâmetros operacionais e dos instrumentos de controle essenciais ao monitoramento do equipamento;
- implementação de metodologia documentada de Inspeção Não Intrusiva - INI, observado o disposto na ABNT NBR 16455 ou alteração posterior;
- emissão de relatório de inspeção, com a definição da data improrrogável da próxima inspeção periódica interna; e
- anuência do empregador ou de preposto por ele designado.

**13.5.4.5.4** O empregador deve comunicar à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento, quando formalmente solicitado, a implementação dos novos prazos de inspeção de segurança em face da aplicação das metodologias definidas nos subitens 13.5.4.5.1 e 13.5.4.5.3.

**13.5.4.6** Vasos de pressão que não permitam acesso visual para o exame interno ou externo por impossibilidade física devem ser submetidos a exames não destrutivos ou a outras metodologias de avaliação de integridade definidas por PLH, considerados os mecanismos de danos previsíveis.

**13.5.4.7** Vasos de pressão com enchimento interno ou com catalisador podem ter a periodicidade de exame interno ampliada, de forma a coincidir com a época da substituição de enchimentos ou de catalisador, desde que esta ampliação seja precedida de estudos conduzidos por PLH ou por grupo multidisciplinar por ele coordenado, baseados em códigos ou normas aplicáveis, onde sejam implementadas tecnologias alternativas para a avaliação da sua integridade estrutural.

**13.5.4.8** Vasos de pressão com temperatura de operação inferior a zero grau Celsius (0 °C) e que operem em condições nas quais a experiência mostre que não ocorre deterioração devem ser submetidos a exame externo a cada 2 (dois) anos e a exame interno, quando exigido pelo código de construção ou a critério do PLH.

**13.5.4.9** As válvulas de segurança dos vasos de pressão devem ser desmontadas, inspecionadas e testadas com prazo adequado à sua manutenção, porém não superior ao previsto para a inspeção de segurança periódica interna dos vasos de pressão por elas protegidos, de acordo com o subitem 13.5.4.5.

**13.5.4.10** A inspeção de segurança extraordinária deve ser feita nas seguintes oportunidades:

- a) sempre que o vaso de pressão for danificado por acidente ou outra ocorrência que comprometa sua segurança;
- b) quando o vaso de pressão for submetido a reparo ou alterações importantes, capazes de alterar sua condição de segurança;
- c) antes de o vaso de pressão ser recolocado em funcionamento, quando permanecer inativo por mais de 12 (doze) meses; ou
- d) quando houver alteração do local de instalação do vaso de pressão, exceto para vasos móveis.

**13.5.4.11** O relatório de inspeção de segurança, mencionado na alínea "d" do subitem 13.5.1.5, deve conter no mínimo: *(Retificado em 20/10/2022)*

- a) identificação do vaso de pressão;
- b) categoria do vaso de pressão;
- c) fluidos de serviço;
- d) tipo do vaso de pressão;
- e) tipo de inspeção executada;
- f) data de início e término da inspeção;

- g) descrição das inspeções, exames e testes executados;
- h) registro fotográfico das anomalias detectadas no exame interno e externo do vaso de pressão;
- i) resultado das inspeções e intervenções executadas;
- j) recomendações e providências necessárias;
- k) parecer conclusivo quanto à integridade do vaso de pressão até a próxima inspeção;
- l) data prevista para a próxima inspeção de segurança;
- m) nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PLH e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção; e
- n) número do certificado de inspeção e teste da(s) válvula(s) de segurança.

**13.5.4.12** Sempre que os resultados da inspeção determinarem alterações das condições de projeto, a placa de identificação e a documentação do prontuário devem ser atualizadas.

## **13.6 Tubulações**

### **13.6.1 Disposições Gerais**

**13.6.1.1** As empresas que possuam tubulações enquadradas nesta NR devem elaborar um programa e um plano de inspeção que considere, no mínimo, as variáveis, condições e premissas descritas abaixo:

- a) os fluidos transportados;
- b) a pressão de trabalho;
- c) a temperatura de trabalho;
- d) os mecanismos de danos previsíveis; e
- e) as consequências para os trabalhadores, instalações e meio ambiente trazidas por possíveis falhas das tubulações.

**13.6.1.2** As tubulações devem possuir dispositivos de segurança em conformidade com o respectivo código de construção, observado, quanto à frequência de inspeção e teste, o prazo máximo previsto no item 13.6.2.2 desta NR.

**13.6.1.3** As tubulações devem possuir indicador de pressão, conforme previsto em projeto ou diagramas de engenharia, processos e instrumentação.

**13.6.1.4** Todo estabelecimento que possua tubulações deve ter a seguinte documentação devidamente atualizada:

- a) especificações aplicáveis às tubulações ou sistemas, necessárias ao planejamento e à execução da inspeção;
- b) fluxograma de engenharia com a identificação da linha e dos seus acessórios;
- c) projeto de alteração ou reparo;
- d) relatórios de inspeção de segurança; e

e) certificados de inspeção e teste dos dispositivos de segurança, se aplicável.

**13.6.1.5** Os documentos referidos no subitem 13.6.1.4, alíneas “a” e “b”, quando inexistentes ou extraviados, devem ser reconstituídos pelo empregador, sob a responsabilidade técnica de PLH.

### **13.6.2** Inspeção de segurança de tubulações

**13.6.2.1** As tubulações devem ser submetidas a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. *(para tubulações instaladas a partir de 20 de março de 2018 - vide art. 6º da Portaria MTP nº 1.846/22)*

**13.6.2.1.1** Devem ser executados testes hidrostáticos de fabricação, antes da operação inicial, em conformidade com o respectivo código de construção.

**13.6.2.1.2** A critério técnico do PLH, observado o disposto no respectivo código de construção, poderão ser adotadas outras técnicas em substituição ao teste hidrostático.

**13.6.2.2** Os intervalos de inspeção das tubulações devem atender aos prazos máximos da inspeção interna do vaso ou caldeira mais crítica a elas ligados.

**13.6.2.2.1** Desde que fundamentado tecnicamente, os prazos de inspeção podem ser duplicados, a critério do PLH, observado o limite máximo de 10 (dez) anos.

**13.6.2.3** O programa de inspeção pode ser elaborado por tubulação, por linha ou por sistema.

**13.6.2.3.1** No caso de constatação de risco à saúde e à integridade física dos trabalhadores envolvidos na execução da inspeção, a tubulação deve ser retirada de operação.

**13.6.2.4** Deve ser executada inspeção extraordinária nas seguintes situações:

- a) sempre que a tubulação for danificada por acidente ou outra ocorrência que comprometa a segurança dos trabalhadores;
- b) quando a tubulação for submetida a reparo provisório ou alterações significativas, capazes de alterar sua capacidade de contenção de fluido; ou
- c) antes de a tubulação ser recolocada em funcionamento, quando permanecer inativa por mais de doze meses ou, para sistemas com comprovação de hibernação, vinte e quatro meses.

**13.6.2.5** O relatório de inspeção de segurança, mencionado na alínea “d” do subitem 13.6.1.4, deve conter, no mínimo:

- a) identificação da(s) linha(s) ou sistema de tubulação;
- b) fluidos de serviço da tubulação, e respectivas temperatura e pressão de operação;
- c) tipo de inspeção executada;
- d) data de início e de término da inspeção;
- e) descrição das inspeções, exames e testes executados;

- f) registro fotográfico ou registro da localização das anomalias significativas detectadas no exame externo da tubulação;
- g) resultado das inspeções e intervenções executadas;
- h) recomendações e providências necessárias;
- i) parecer conclusivo quanto à integridade da tubulação, do sistema de tubulação ou da linha até a próxima inspeção;
- j) data prevista para a próxima inspeção de segurança; e
- k) nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PLH e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

**13.6.2.6** As tubulações de vapor de água devem ser mantidas em boas condições operacionais, de acordo com um plano de manutenção.

**13.6.2.7** As tubulações devem ser identificadas conforme padronização formalmente instituída pelo estabelecimento.

### **13.7 Tanques metálicos de armazenamento**

#### **13.7.1 Disposições gerais**

**13.7.1.1** As empresas que possuam tanques enquadrados nesta NR devem elaborar um programa e um plano de inspeção que considere, no mínimo, as seguintes variáveis, condições e premissas:

- a) os fluidos armazenados;
- b) condições operacionais;
- c) os mecanismos de danos previsíveis; e
- d) as consequências para os trabalhadores, instalações e meio ambiente decorrentes de possíveis falhas dos tanques.

**13.7.1.2** Todo estabelecimento que possua tanques enquadrados nesta NR deve ter a seguinte documentação devidamente atualizada:

- a) folhas de dados com as especificações dos tanques necessárias ao planejamento e execução da sua inspeção;
- b) projeto de alteração ou reparo;
- c) relatórios de inspeção de segurança;
- d) registro de segurança; e
- e) certificados de inspeção e teste dos dispositivos de segurança, se aplicável.

**13.7.1.3** O registro de segurança deve ser constituído por livro de páginas numeradas, pastas ou sistema informatizado, onde serão registradas:

- a) todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança dos tanques; e

- b) as ocorrências de inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária, devendo constar a condição operacional do tanque, o nome legível e assinatura de responsável técnico formalmente designado pelo empregador.

**13.7.1.4** Os documentos referidos no subitem 13.7.1.2, alínea “a”, quando inexistentes ou extraviados, devem ser reconstituídos pelo empregador.

### **13.7.2** Segurança na operação de tanques metálicos de armazenamento

**13.7.2.1** Os tanques devem possuir dispositivos de segurança contra sobrepressão e vácuo, conforme os critérios do código de construção utilizado, ou em atendimento às recomendações de estudo de análises de cenários de falhas.

**13.7.2.2** Os dispositivos contra sobrepressão, vácuo e as válvulas corta-chamas, quando aplicáveis, devem ser mantidos e inspecionados em conformidade com um plano de manutenção.

**13.7.2.3** Os tanques devem ser identificados conforme padronização instituída pelo empregador.

### **13.7.3** Inspeção de segurança de tanques metálicos de armazenamento

**13.7.3.1** Os tanques devem ser submetidos a inspeções de segurança inicial, periódica e extraordinária. *(para tanques instalados a partir de 20 de dezembro de 2022 - vide art. 6º da Portaria MTP nº 1.846/22)*

**13.7.3.2** Os intervalos de inspeção de segurança periódica dos tanques devem atender aos prazos estabelecidos no programa de inspeção elaborado por responsável técnico, de acordo com códigos ou normas aplicáveis.

**13.7.3.3** Deve ser executada inspeção extraordinária nas seguintes situações:

- a) sempre que o tanque for danificado por acidente ou outra ocorrência que comprometa a segurança dos trabalhadores;
- b) quando o tanque for submetido a reparos ou alterações significativas, capazes de alterar sua capacidade de contenção de fluido;
- c) antes de o tanque ser recolocado em funcionamento, quando permanecer inativo por mais de vinte e quatro meses; ou
- d) quando houver alteração do local de instalação.

**13.7.3.4** O relatório de inspeção de segurança, mencionado na alínea “c” do subitem 13.7.1.2 deve conter no mínimo:

- a) identificação do tanque;
- b) fluidos armazenados no tanque, e respectiva temperatura de operação;
- c) tipo de inspeção executada;
- d) data de início e de término da inspeção;
- e) descrição das inspeções, exames e testes executados;



- f) registro fotográfico ou registro da localização das anomalias significativas detectadas nos exames internos e externos do tanque;
- g) resultado das inspeções e intervenções executadas;
- h) recomendações e providências necessárias;
- i) parecer conclusivo quanto à integridade do tanque até a próxima inspeção;
- j) data prevista para a próxima inspeção de segurança;
- k) nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional de responsável técnico e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção; e
- l) certificados de inspeção e teste dos dispositivos de sobrepressão e vácuo.

## **ANEXO I DA NR-13 CAPACITAÇÃO E TREINAMENTO**

### **1. Caldeiras**

**1.1** Para efeito da NR-13, é considerado operador de caldeira aquele que cumprir uma das seguintes condições:

- a) possuir certificado de treinamento de segurança na operação de caldeiras expedido por instituição competente e comprovação de prática profissional supervisionada, conforme item 1.5 deste Anexo; ou
- b) possuir certificado de treinamento de segurança na operação de caldeiras previsto na NR-13 aprovada pela Portaria SSMT nº 02, de 08 de maio de 1984 ou na Portaria SSST nº 23, de 27 de dezembro de 1994.

**1.2** O pré-requisito mínimo para participação como aluno, no treinamento de segurança na operação de caldeiras, é o atestado de conclusão do ensino médio.

**1.3** O treinamento de segurança na operação de caldeiras deve, obrigatoriamente:

- a) ser supervisionado tecnicamente por PLH;
- b) ser ministrado por instrutores com proficiência no assunto;
- c) obedecer, no mínimo, ao currículo proposto no item 1.9 deste Anexo;
- d) ser integrado com a prática profissional supervisionada, conforme item 1.5 deste Anexo;
- e) ter carga horária mínima de quarenta horas; e
- f) estabelecer formas de avaliação de aprendizagem.

**1.3.1** O treinamento de segurança na operação de caldeiras pode ser realizado sob a forma de Ensino a Distância - EaD.

**1.3.2** A adoção do EaD não elide o disposto no item 1.3, alínea “d” deste Anexo.

**1.4** Os responsáveis pelo treinamento de segurança na operação de caldeiras estão sujeitos ao impedimento de ministrar novos cursos, bem como a outras sanções legais cabíveis, no caso de inobservância do disposto no item 1.3 deste Anexo.

**1.5** Todo operador de caldeira deve ser submetido à prática profissional supervisionada na operação da própria caldeira que irá operar, a qual deve ser documentada e possuir duração mínima de:

- a) caldeiras de categoria A - oitenta horas; ou
- b) caldeiras de categoria B - sessenta horas.

**1.6** O estabelecimento onde for realizada a prática profissional supervisionada prevista nesta NR deve informar, quando requerido pela representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento:

- a) período de realização da prática profissional supervisionada;
- b) entidade, empregador ou profissional responsável pelo treinamento de segurança na operação de caldeira; e
- c) relação dos participantes desta prática profissional supervisionada.

**1.7** Deve ser realizada a atualização dos conhecimentos dos operadores de caldeiras quando:

- a) ocorrer modificação na caldeira;
- b) ocorrer acidentes e/ou incidentes de alto potencial, que envolvam a operação da caldeira; ou
- c) houver recorrência de incidentes.

**1.8** A prática profissional supervisionada obrigatória deve ser realizada após a conclusão de todo o conteúdo programático previsto no item 1.9 deste Anexo, inclusive nos casos de aproveitamento de treinamentos entre organizações.

**1.9** Currículo mínimo para treinamento de segurança na operação de Caldeiras: Noções de física aplicada. Pressão. Pressão atmosférica. Pressão manométrica e pressão absoluta. Pressão interna em caldeiras. Unidades de pressão. Transferência de calor. Noções gerais: o que é calor, o que é temperatura. Modos de transferência de calor. Calor específico e calor sensível. Transferência de calor a temperatura constante. Termodinâmica. Conceitos Vapor saturado e vapor superaquecido. Mecânica dos Fluidos. Conceitos fundamentais. Pressão em escoamento. Escoamento de gases. Noções de química aplicada. Densidade. Solubilidade. Difusão de gases e vapores. Caracterização de ácido e base (Álcalis) - Definição de pH. Fundamentos básicos sobre corrosão. Considerações gerais sobre caldeiras. Tipos de caldeiras e suas utilizações. Caldeiras flamotubulares. Caldeiras aquatubulares. Caldeiras elétricas. Caldeiras a combustíveis sólidos. Caldeiras a combustíveis líquidos. Caldeiras a gás. Acessórios de caldeiras. Instrumentos e dispositivos de controle de caldeiras. Dispositivo de alimentação. Visor de nível. Sistema de controle de nível. Indicadores de pressão. Dispositivos de segurança. Dispositivos auxiliares. Válvulas e tubulações. Tiragem de fumaça. Sistema instrumentado de segurança. Operação de caldeiras. Partida e parada. Regulagem e controle: de temperatura, de pressão, de fornecimento de energia, do

nível de água, de poluentes e de combustão. Falhas de operação, causas e providências. Roteiro de vistoria diária. Operação de um sistema de várias caldeiras. Procedimentos para situações de emergência. Tratamento de água de caldeiras. Impurezas da água e suas consequências. Tratamento de água de alimentação. Controle de água de caldeira. Prevenção contra explosões e outros riscos. Riscos gerais de acidentes e riscos à saúde. Riscos de explosão. Estudos de caso. Legislação e normalização. Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13). Categoria de caldeiras B. Tópicos de inspeção e manutenção de equipamentos e registros. *(Retificado em 20/10/2022)*

## **2. Vasos de Pressão**

**2.1** A operação de unidades de processo que possuam vasos de pressão de categorias I ou II deve ser feita por profissional com treinamento de segurança na operação de unidades de processos.

**2.2** Para efeito desta NR é considerado profissional com treinamento de segurança na operação de unidades de processo aquele que satisfizer uma das seguintes condições:

- a) possuir certificado de treinamento de segurança na operação de unidades de processo expedido por instituição competente para o treinamento e comprovação de prática profissional supervisionada, conforme item 2.6 deste Anexo; ou
- b) possuir experiência comprovada na operação de vasos de pressão das categorias I ou II de pelo menos dois anos antes da vigência da NR-13, aprovada pela Portaria SSST nº 23, de 27 de dezembro de 1994.

**2.3** O pré-requisito mínimo para participação, como aluno, no treinamento de segurança na operação de unidades de processo é o atestado de conclusão do ensino médio.

**2.4** O treinamento de segurança na operação de unidades de processo deve, obrigatoriamente:

- a) ser supervisionado tecnicamente por PLH;
- b) ser ministrado por instrutores com proficiência no assunto;
- c) obedecer, no mínimo, ao currículo proposto no item 2.10 deste Anexo; *(Retificada em 20/10/2022)*
- d) ser integrado com a prática profissional supervisionada, conforme item 2.6;
- e) ter carga horária mínima de quarenta horas; e
- f) estabelecer formas de avaliação de aprendizagem.

**2.4.1** O treinamento de segurança na operação de unidades de processo pode ser realizado sob a forma de EaD.

**2.4.2** A adoção do EaD não elide o disposto no item 2.4, alínea “d” deste Anexo.

**2.5** Os responsáveis pelo treinamento de segurança na operação de unidades de processo estão sujeitos ao impedimento de ministrar novos cursos, bem como a outras sanções legais cabíveis, no caso de inobservância do disposto no item 2.4.

**2.6** Todo profissional com treinamento de segurança na operação de unidades de processo deve ser submetido à prática profissional supervisionada com duração de trezentas horas na operação de unidade de processo que possuam vasos de pressão de categorias I ou II.

**2.7** O estabelecimento onde for realizada a prática profissional supervisionada prevista nesta NR deve informar, quando requerido pela representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento:

- a) período de realização da prática profissional supervisionada;
- b) entidade, empregador ou profissional responsável pelo treinamento de segurança na operação de unidades de processo; e
- c) relação dos participantes desta prática profissional supervisionada.

**2.8** Deve ser realizada a atualização dos conhecimentos dos operadores de unidades de processo quando:

- a) ocorrer modificação na unidade de processo;
- b) ocorrer acidentes e/ou incidentes de alto potencial, que envolvam a operação de vasos de pressão; ou
- c) houver recorrência de incidentes.

**2.9** A prática profissional supervisionada obrigatória deve ser realizada após a conclusão de todo o conteúdo programático previsto no item 2.10, inclusive nos casos de aproveitamento de treinamentos entre organizações, com carga horária definida pelo empregador.

**2.10** Currículo mínimo para treinamento de segurança na operação de unidades de processo: Noções de física aplicada. Pressão. Pressão atmosférica. Pressão manométrica e pressão absoluta. Pressão interna, pressão externa e vácuo. Unidades de pressão. Transferência de calor. Noções gerais: o que é calor, o que é temperatura. Modos de transferência de calor. Calor específico e calor sensível. Transferência de calor a temperatura constante. Termodinâmica. Conceitos. Vapor saturado e vapor superaquecido. Mecânica dos fluidos. Conceitos fundamentais. Pressão em escoamento. Tipos de escoamento: laminar e turbulento. Escoamento de líquidos: transferência por gravidade, diferença de pressão, sifão. Perda de carga: conceito, rugosidade, acidentes. Princípio de bombeamento de fluidos. Noções de química aplicada. Densidade. Solubilidade. Difusão de gases e vapores. Caracterização de ácido e base (Álcalis) - Definição de pH. Fundamentos básicos sobre corrosão. Equipamentos de processo (carga horária estabelecida de acordo com a complexidade da unidade, onde aplicável). Acessórios de tubulações. Acessórios elétricos e outros itens. Aquecedores de água. Bombas. Caldeiras (conhecimento básico). Compressores. Condensador. Desmineralizador. Esferas. Evaporadores. Filtros. Lavador de gases. Reatores. Resfriador. Secadores. Silos. Tanques de armazenamento. Torres. Trocadores calor. Tubulações industriais. Turbinas a vapor. Injetores e ejetores. Dispositivos de segurança. Outros. Instrumentação. Operação da unidade. Descrição do processo. Partida e parada. Procedimentos de emergência. Descarte de produtos químicos e preservação do meio ambiente. Avaliação e controle de riscos inerentes ao processo. Prevenção contra deterioração, explosão e outros riscos. Legislação e normalização.

Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13). Categorias de vasos de pressão. Tópicos de inspeção e manutenção de equipamentos e registros. *(Retificada em 20/10/2022)*

## **ANEXO II DA NR-13**

### **REQUISITOS PARA CERTIFICAÇÃO DE SERVIÇO PRÓPRIO DE INSPEÇÃO DE EQUIPAMENTOS - SPIE**

1. O SPIE da empresa, organizado na forma de setor, seção, departamento, divisão, ou equivalente, deve ser certificado por OCP acreditado pelo INMETRO, que irá verificar, por meio de auditorias programadas, o atendimento aos seguintes requisitos:

- a) existência de pessoal próprio da empresa onde estão instaladas caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques, com dedicação exclusiva a atividades de inspeção, avaliação de integridade e vida remanescente, com formação, qualificação e treinamento compatíveis com a atividade proposta de preservação da segurança; *(Retificada em 20/10/2022)*
- b) mão de obra contratada para ensaios não destrutivos certificada segundo regulamentação vigente e, para outros serviços de caráter eventual, selecionada e avaliada segundo critérios semelhantes ao utilizado para a mão de obra própria;
- c) serviço de inspeção de equipamentos proposto com um responsável pelo seu gerenciamento formalmente designado para esta função;
- d) existência de pelo menos um PLH;
- e) existência de condições para manutenção de arquivo técnico atualizado, necessário ao atendimento da NR-13, assim como mecanismos para distribuição de informações quando requeridas;
- f) existência de procedimentos escritos para as principais atividades executadas;
- g) existência de aparelhagem condizente com a execução das atividades propostas; e
- h) cumprimento mínimo da programação de inspeção.

2. A certificação de SPIE e a sua manutenção estão sujeitas a regulamento específico do INMETRO.

## **ANEXO III DA NR-13**

### **CERTIFICAÇÃO VOLUNTÁRIA DE COMPETÊNCIAS DO PROFISSIONAL LEGALMENTE HABILITADO - PLH**

1. O PLH pode, através de certificação voluntária no âmbito do Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade - SBAC, obter o reconhecimento de sua competência profissional como PLH Certificado da NR-13 para o exercício das atividades referentes a acompanhamento da operação e da manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras, de vasos de pressão, de tubulações e de tanques metálicos de armazenamento.

2. Esta certificação voluntária deve ser feita por um Organismo de Certificação de Pessoas – OPC, acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Cgcre/INMETRO.

3. O esquema de certificação a ser desenvolvido pelo OPC deve considerar, como pré-requisito, que o candidato à certificação voluntária possua graduação de nível superior em Engenharia, com reconhecimento pelo respectivo conselho para as atribuições de PLH.

4. O Programa de certificação voluntária de PLH, executado pelo OPC, deverá ter, no mínimo, as seguintes fases:

- a) avaliação - comprovação de formação acadêmica, cursos complementares, experiência profissional e realização de exames teóricos e práticos;
- b) análise e decisão - realização por pessoa(s) ou comitê formalmente designados para este fim, não envolvidos nos processos (a);
- c) formalização - emissão de certificado;
- d) supervisão - manutenção da certificação, com reavaliação periódica; e
- e) recertificação - realização a cada sessenta meses.

5. Os profissionais que obtiverem o reconhecimento de suas competências profissionais através desta certificação voluntária devem ter esta informação divulgada pela autoridade competente em matéria de segurança e saúde no trabalho.

#### **ANEXO IV DA NR-13**

##### **REQUISITOS PARA AMPLIAÇÃO DE PRAZO DE INSPEÇÃO DE CALDEIRAS CATEGORIA A COM SISTEMA INSTRUMENTADO DE SEGURANÇA (SIS) E DE CALDEIRAS CATEGORIA B COM SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE COMBUSTÃO - SGC**

#### **1. Caldeiras de categoria A dotadas de Sistema Instrumentado de Segurança - SIS**

**1.1** A ampliação dos prazos de inspeções de segurança das caldeiras de categoria A que operam de forma contínua fica condicionada ao cumprimento integral das seguintes exigências:

- a) instalação da caldeira em estabelecimentos que possuam certificação de SPIE, conforme Anexo II desta NR;
- b) plano e programa de inspeção aprovados por PLH, observado o limite máximo de quarenta e oito meses entre inspeções internas;
- c) sistema instrumentado de segurança, em conformidade com normas técnicas aplicáveis, atestado por responsável técnico;
- d) controle da deterioração dos materiais que compõem as principais partes da caldeira;
- e) análise e controle periódico da qualidade da água;
- f) testes da pressão de abertura das válvulas de segurança a cada doze meses; *(Retificada em 20/10/2022)*
- g) acompanhamento periódico dos parâmetros operacionais que influenciam a integridade da caldeira;
- h) parecer técnico de PLH fundamentando a decisão de extensão de prazo; e

i) registro formal do cumprimento das alíneas anteriores.

## **1.2 O SIS deve:**

- a) ser baseado em estudo de confiabilidade que garanta execução segura da sequência de acendimento e o bloqueio automático dos combustíveis em casos de perda do controle de combustão ou da geração de vapor, assim como possuir análise de risco conduzida por equipe multidisciplinar, com participação dos responsáveis pela operação da caldeira;
- b) ser projetado, instalado e testado, sob a responsabilidade de responsável técnico; e
- c) ser mantido de acordo com procedimentos específicos definidos pelo fabricante ou por responsável técnico.

**1.2.1** Os procedimentos de inspeção, testes e manutenção devem ser executados e aprovados por responsável técnico.

**1.3** As alterações nas funções instrumentadas de segurança do SIS, bem como em outros componentes da malha de controle, provisórias ou definitivas, devem ser registradas e aprovadas por responsável técnico, com anuência do empregador ou de preposto por ele designado.

**1.4** O empregador deve comunicar formalmente à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento a implementação dos novos prazos de inspeção de segurança das caldeiras.

## **2 Caldeiras de categoria B com Sistema de Gerenciamento de Combustão - SGC**

**2.1** A ampliação dos prazos de inspeções de segurança das caldeiras de categoria B que operam de forma contínua fica condicionada ao cumprimento integral das seguintes exigências:

- a) plano e programa de inspeção aprovados por PLH, observado o limite máximo de trinta meses entre inspeções internas;
- b) SGC com projeto de funções instrumentadas de segurança em conformidade com normas técnicas aplicáveis, atestado por responsável técnico;
- c) controle da deterioração dos materiais que compõem as partes importantes para integridade da caldeira;
- d) análise e controle periódico da qualidade da água, conforme prescrições do fabricante da caldeira;
- e) testes da pressão de abertura das válvulas de segurança a cada 12 meses;
- f) acompanhamento periódico dos parâmetros operacionais que influenciam a integridade da caldeira;
- g) parecer técnico de PLH fundamentando a decisão de extensão de prazo; e
- h) registro formal do cumprimento das alíneas anteriores.

## **2.2 O SGC deve:**

- a) ter estudos de confiabilidade e análise de risco conduzidos por equipe multidisciplinar, com participação dos responsáveis pela operação da caldeira;
- b) ser projetado, instalado e testado sob a responsabilidade de responsável técnico; e  
(Retificada em 20/10/2022)
- c) ser mantido de acordo com procedimentos específicos definidos pelo fabricante ou por responsável técnico.

**2.2.1** Os procedimentos de inspeção, testes e manutenção devem ser executados e/ou aprovados por responsável técnico.

**2.3** As alterações nas funções instrumentadas de segurança, bem como em outros componentes da malha de controle, provisórias ou definitivas, devem ser registradas e aprovadas por responsável técnico, com anuência do empregador ou de preposto por ele designado.

**2.4** O empregador deve comunicar formalmente à representação sindical da categoria profissional predominante do estabelecimento a implementação dos novos prazos de inspeção de segurança.

## GLOSSÁRIO

**Abertura escalonada de válvulas de segurança:** condição diferenciada de ajuste da pressão de abertura de múltiplas válvulas de segurança, prevista no código de construção do equipamento por elas protegido, onde podem ser estabelecidos valores de abertura acima da PMTA, consideradas as vazões necessárias para o alívio da sobrepressão em cenários distintos.

**Alteração:** mudança nas condições de projeto ou nos parâmetros operacionais, com impactos na integridade estrutural dos equipamentos abrangidos por esta NR, ou que possam afetar a segurança dos trabalhadores e de terceiros.

**Caldeiras:** equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refratários e similares.

**Caldeiras de recuperação de álcalis:** caldeiras que utilizam como combustível principal o licor negro oriundo do processo de fabricação de celulose, realizando a recuperação de químicos e geração de energia.

**Códigos de construção:** publicações normativas desenvolvidas por associações técnicas ou por sociedades de normalização, dotadas de um conjunto coerente de regras, exigências, procedimentos, fórmulas e parâmetros, oriundas de entidades nacionais, internacionais ou estrangeiras e utilizadas na construção dos equipamentos abrangidos por esta NR. Exemplos: ASME Boiler and Pressure Vessel Code, British Standards Institution, AD 2000 Merkblatt, SNCTTI, ABNT, entre outros.

**Dispositivo Contra Bloqueio Inadvertido - DCBI:** dispositivo utilizado para evitar o fechamento inadvertido de válvulas instaladas à montante e à jusante de dispositivos de segurança.

**Dispositivos de segurança:** dispositivos ou componentes que protegem um equipamento contra sobrepressão manométrica, independente da ação do operador e de acionamento por fonte externa de energia. O dispositivo também pode ser projetado



para evitar vácuo interno excessivo. Exemplos: válvulas de segurança, válvulas de alívio, válvulas de segurança e alívio, válvulas piloto operadas, discos de ruptura, quebra - vácuo.

Enchimento interno: materiais inseridos no interior dos vasos de pressão com finalidades específicas e período de vida útil determinado, tipo catalisador, recheio, peneira molecular, e carvão ativado. Bandejas e acessórios internos não configuram enchimento interno.

Equipamentos de terceiros: equipamentos abrangidos por esta NR, pertencentes a terceiros, e instalados no estabelecimento do empregador.

Eventos de grande proporção: ocorrências de grande magnitude (emanações, vazamentos, contaminações, incêndios ou explosões), classificadas como acidentes maiores ou ampliados, nos termos da Convenção nº 174, da Organização Internacional do Trabalho - OIT.

Exame: atividade conduzida por PLH ou técnicos qualificados ou certificados, quando exigido por códigos ou normas, para avaliar se determinados produtos, processos ou serviços estão em conformidade com critérios especificados.

Exame externo: exame da superfície e de componentes externos de um equipamento, podendo ser realizado em operação, visando avaliar a sua integridade estrutural.

Exame interno: exame da superfície interna e de componentes internos de um equipamento, executado visualmente, para detecção de defeitos com relação a pontos de corrosão, trincas, incrustações e depósitos ou qualquer descontinuidade nas regiões das soldas, com o emprego de ensaios e testes apropriados para avaliar sua integridade estrutural.

Fluidos inflamáveis: líquidos que possuem ponto de fulgor menor ou igual a sessenta graus Celsius (60 °C) ou gases que inflamam com o ar a vinte graus Celsius (20 °C) e a uma pressão padrão de cento e um vírgula três quilopascal (101,3 kPa).

Fluidos combustíveis: fluidos com ponto de fulgor maior que 60°C e menor ou igual a 93°C. *(Retificada em 20/10/2022)*

Fluidos tóxicos: fluidos nocivos à saúde dos trabalhadores, observado, quanto ao limite de tolerância, o disposto na NR-15.

Fluxograma de engenharia (P&ID): diagrama mostrando o fluxo do processo com os equipamentos, as tubulações e seus acessórios, e as malhas de controle de instrumentação.

Força maior: todo acontecimento inevitável, em relação à vontade do empregador, e para a realização do qual este não concorreu, direta ou indiretamente. A imprevidência do empregador exclui a razão de força maior.

Gerador de vapor: equipamento destinado a produzir vapor sob pressão superior à atmosférica, sem acumulação e não enquadrados em códigos de vasos de pressão ou caldeira. *(Retificada em 20/10/2022)*

Hibernação: desativação temporária de máquina, equipamento, sistema ou unidade industrial, já em funcionamento ou em construção, por longa duração e com previsão de retorno operacional, preservando suas características.

Inspeção de segurança extraordinária: inspeção executada devido a ocorrências que possam afetar a condição física do equipamento, tais como hibernação prolongada,

mudança de locação, surgimento de deformações inesperadas, choques mecânicos de grande impacto ou vazamentos, entre outros, envolvendo caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques, com abrangência definida por PLH.

**Inspeção de segurança inicial:** inspeção executada no equipamento novo, montado no local definitivo de instalação e antes de sua entrada em operação.

**Inspeção de segurança periódica:** inspeção executada durante a vida útil de um equipamento, com critérios e periodicidades determinados por PLH, respeitados os intervalos máximos estabelecidos nesta Norma.

**Inspeção extraordinária especial:** inspeção executada em vaso de pressão construído sem código de construção com a finalidade de coletar dados que permitam ao PLH definir com maior precisão os valores de PMTA e outras informações importantes para o acompanhamento da vida remanescente do vaso, como os tipos de materiais utilizados nas suas diferentes partes, suas dimensões, especialmente espessura, e respectivas resistências mecânicas, a eficiência de junta a ser considerada para as juntas soldadas, os detalhes de conexões e reforços e a reconstituição dos principais desenhos. Caso necessário, devem ser implementadas alterações ou reparos que permitam a operação segura do vaso de pressão.

**Instrumentos e sistemas de controle e segurança:** dispositivos utilizados para monitorar e controlar o comportamento de variáveis operacionais, compreendendo elementos primários, sensores, visores, indicadores, transdutores, controladores, elementos finais, sistemas supervisórios, entre outros, com atuação local ou remota, em malha aberta ou fechada, com funções de indicação, controle e/ou segurança.

**Integridade estrutural:** conjunto de propriedades e características físicas necessárias para que um equipamento ou item desempenhe com segurança e eficiência as funções para as quais foi projetado.

**Linha:** trecho de tubulação individualizado entre dois pontos definidos e que obedece a uma única especificação de materiais, produtos transportados, pressão e temperatura de projeto.

**Número/código de identificação:** designação distintiva, normalmente alfanumérica, também conhecida como “tag” ou “posição”, por meio da qual os equipamentos abrangidos por esta NR são identificados em documentos técnicos, relatórios, registros, sistemas informatizados, bem como nas instalações.

**Operação contínua:** operação da caldeira por mais de 95% do tempo correspondente aos prazos estipulados no subitem 13.4.4.4 desta NR.

**Pacote de Máquinas:** conjunto formado por equipamentos e acessórios periféricos de máquinas de fluido (bombas, compressores, turbinas, etc.), máquinas operatrizes e demais equipamentos dinâmicos, normalmente agrupados em sistemas de selagem, lubrificação e arrefecimento.

**Plano de inspeção:** descrição das atividades, incluindo os exames e testes a serem realizados, necessários para avaliar as condições físicas dos equipamentos abrangidos por esta NR, considerando o histórico e os mecanismos de danos previsíveis.

**Prática profissional supervisionada:** momento em que o trabalhador desenvolve atividades profissionais vinculadas com os conteúdos teóricos recebidos em treinamento, com o acompanhamento e supervisão de outro profissional ou instrutor com domínio das atividades desenvolvidas.

**Pressão máxima de operação:** máxima pressão manométrica esperada durante a operação normal do sistema ou equipamento.

**Pressão Máxima de Trabalho Admissível - PMTA:** maior valor de pressão a que um equipamento pode ser submetido continuamente, de acordo com o código de construção, a resistência dos materiais utilizados, as dimensões do equipamento e seus parâmetros operacionais.

**Proficiência:** competência, aptidão, capacitação e habilidade aliadas à experiência. Para avaliação da proficiência, pode ser verificado o currículo do profissional, a partir do conteúdo programático que ele ministrará. O conhecimento teórico pode ser comprovado através de diplomas, certificados e material didático elaborado pelo profissional. A experiência pode ser avaliada pelo tempo em que o profissional atua na área e serviços prestados.

**Programa de inspeção:** cronograma contendo, entre outros dados, as datas das inspeções de segurança periódicas a serem executadas.

**Projeto de alteração:** projeto elaborado por ocasião de alteração que implique em intervenção estrutural ou mudança de processo significativa nos equipamentos abrangidos por esta NR.

**Projeto de reparo:** projeto estabelecendo os procedimentos de execução e controle de reparos que possam comprometer a segurança dos equipamentos abrangidos por esta NR.

**Projeto alternativo de instalação:** projeto concebido para minimizar os impactos de segurança para o trabalhador quando as instalações não estiverem atendendo os critérios estabelecidos nesta NR.

**Projeto de instalação de caldeiras:** plantas de arranjo ou de locação, correspondendo a desenhos em escala que mostram, em projeção horizontal, a disposição geral dos equipamentos, representados em um ou mais documentos.

**Recipientes móveis:** vasos de pressão que podem ser movidos dentro de uma instalação ou entre instalações e que não podem ser enquadrados como transportáveis.

**Recipientes transportáveis:** recipientes projetados e construídos para serem transportados pressurizados e em conformidade com normas e regulamentações específicas de recipientes transportáveis, incluindo recipientes para GLP com capacidade volumétrica de 5,5 a 500 L (ABNT NBR 8460), cilindros recarregáveis para gases comprimidos, liquefeitos ou dissolvidos (ABNT NBR ISO 9809), entre outros.

**Responsável técnico:** considera-se responsável técnico aquele que tem competência legal para o exercício das demais atribuições de cunho técnico preconizadas nesta NR, na respectiva modalidade profissional, em conformidade com a regulamentação vigente no país.

**Sistema de gerenciamento de combustão:** sistema automático de controle do processo de combustão, compreendendo a purga da fornalha, a ignição, a alimentação e o corte de combustíveis, bem como o monitoramento da chama, de modo a assessorar o operador e conferir mais segurança em etapas críticas de acendimento e desligamento da caldeira, inclusive nos cenários de intertravamento.

**Sistema de tubulação:** agrupamento de tubulações sujeitas a condições operacionais e a mecanismos de deterioração semelhantes, vinculadas a um mesmo plano de inspeção, com a discriminação expressa dos respectivos códigos de identificação (tag), visando a

otimizar a alocação de recursos e aumentar a efetividade das inspeções de segurança, sem prejuízo da rastreabilidade das informações pertinentes a cada tubulação integrante do sistema.

Sistemas intrinsecamente protegidos: vasos isolados ou interligados cuja pressão se mantenha inferior à PMTA em todos os cenários possíveis, bem como aqueles dotados de instrumentos de segurança concebidos em substituição ou em complemento aos dispositivos de segurança preconizados nesta NR, observadas as premissas e os requisitos técnicos e documentais previstos nos respectivos códigos de construção.

Sistema instrumentado de segurança: sistema que reúne uma ou mais funções instrumentadas de segurança, normalmente dissociado da malha básica de controle, cujo propósito é conduzir o equipamento/processo a um estado seguro nas ocorrências de violações a parâmetros operacionais pré-estabelecidos, abarcando, entre outros, sensores, executores lógicos e elementos finais, especificados considerando-se um nível de integridade de segurança desejável, estimado em análise de risco.

Tanques metálicos de armazenamento: equipamentos estáticos, metálicos, não enterrados, sujeitos à pressão atmosférica ou a pressões menores que 103kPa, cujo costado se desenvolve, em regra, a partir de um eixo vertical de revolução, com preponderância para as construções cilíndricas.

Tecnologias de cálculo/procedimentos avançados: métodos analíticos, numéricos ou computacionais destinados à avaliação da integridade estrutural dos equipamentos abrangidos por esta NR, normalmente conhecidos como “métodos de adequação ao uso” (Fitness-For-Service), bem como técnicas de reparo, permanente ou provisório, amparadas em publicações técnicas destinadas a equipamentos em serviço (post- construction code). Exemplos de referências técnicas: API 579, BS 7910, API 510, API 570, API 653, ASME PCC-2, entre outros, a critério do PLH.

Teste de pressão: termo genérico que compreende as diversas técnicas de pressurização de equipamentos novos ou em serviço, incluindo testes hidrostáticos, pneumáticos, hidropneumáticos e hidrodinâmicos, normalmente executados com água ou ar, com a finalidade de detectar vazamentos, atestar a resistência estrutural, bem como verificar a estanqueidade de juntas e de outros elementos de vedação.

Teste hidrostático de fabricação: aquele baseado em código de construção, executado na etapa de fabricação ou no campo, antes do início da operação, observadas as disposições complementares previstas nesta NR.

Tubulações: conjunto formado por tubos e seus respectivos acessórios, projetados por códigos específicos, destinado ao transporte de fluidos.

Unidade(s) de processo: conjunto de equipamentos e interligações de unidade(s) destinados ao processamento, transformação ou armazenamento de materiais/substâncias.

Vasos de pressão: recipientes estanques, de quaisquer tipos, formato ou finalidade, capazes de conter fluidos sob pressões manométricas positivas ou negativas, diferentes da atmosférica, observados os critérios de enquadramento desta NR.

Vida remanescente (ou vida residual): estimativa de tempo restante de vida de um equipamento ou acessório, a partir de dados coletados em ensaios e testes destinados a monitorar os efeitos dos mecanismos de danos atuantes.

Volume: para fins desta NR é o volume interno do vaso de pressão, excluindo o volume dos acessórios, de enchimentos ou de catalisadores.