



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

DIEGO JORGE MAIA DE SOUSA

**DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE ALÍVIO EM VÁLVULAS DE SEGURANÇA (PSV):  
UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO  
DE OPERAÇÃO**

Recife

2025

DIEGO JORGE MAIA DE SOUSA

**DETERMINAÇÃO DA PRESSÃO DE ALÍVIO EM VÁLVULAS DE SEGURANÇA (PSV):  
UMA ABORDAGEM ATRAVÉS DA ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA PRESSÃO  
DE OPERAÇÃO**

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

Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa

## FICHA CATALOGRÁFICA

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Sousa, Diego Jorge Maia de.

Determinação da pressão de alívio em válvulas de segurança (PSV): uma abordagem através da análise do comportamento da pressão de operação / Diego Jorge Maia de Sousa. - Recife, 2025. 104f.: il.

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

Orientação: José Ângelo Peixoto da Costa.

Inclui referências.

1. Válvula de segurança; 2. Vaso de pressão; 3. Capabilidade; 4. Análise de dados. I. Costa, José Ângelo Peixoto da. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 OBJETIVOS .....</b>	<b>9</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 VASOS DE PRESSÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 VÁLVULAS DE SEGURANÇA .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 ASPECTOS ESTATÍSTICOS E SOBRE A CIÊNCIA DE DADOS .....</b>	<b>23</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>32</b>
3.1 VÁLVULA DE SEGURANÇA .....	32
3.2 CAPABILIDADE DO PROCESSO - Cpk.....	35
3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS QUANTO AO PERFIL DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO .....	36
3.4 <i>OUTLIERS</i> .....	37
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>7. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>

## RESUMO

O alívio do fluido de processo industrial em casos de sobrepressão é de extrema importância para a garantia da integridade estrutural em equipamentos pressurizados. Este alívio é realizado por diversos tipos de dispositivos, sendo as válvulas de segurança as mais comuns. Um dos parâmetros fundamentais nesta proteção é a determinação da pressão de ajuste, que corresponde ao valor em que a válvula de segurança se abre, possibilitando com que o fluido, total ou parcialmente, escoe para fora do equipamento, evitando a sobrepressão. Caso o valor da pressão de ajuste seja elevado, mesmo estando abaixo da pressão máxima admissível, a sobrepressão poderá possibilitar que tensões mecânicas elevadas sejam aplicadas ao equipamento, o que pode resultar na propagação ou ativação de descontinuidades latentes existentes. Por outro lado, se a pressão de ajuste foi adotada como sendo um valor baixo, mas acima da pressão de operação, a perda de material significará prejuízo econômico, tanto pelo valor do material em si como pela energia nele aplicada ao longo do processo produtivo. Este trabalho apresenta um estudo de caso de um conjunto de vasos de pressão, para o qual o valor da pressão de operação, coletado ao longo de até 10 anos, a intervalos de uma hora, foi desenvolvida uma metodologia quantitativa para determinar através de *data analytics* o valor da pressão de ajuste da válvula de segurança, baseado nos conceitos de capacidade de processos (Cpk), resultando na definição do valor mais adequado à calibração da pressão de ajuste, sendo válida esta metodologia através da confrontação com dados reais da pressão de ajuste das PSV.

Palavras-chave: válvula de segurança, vaso de pressão, capacidade, Cpk

## ABSTRACT

The relief of industrial process fluid in cases of overpressure is of utmost importance to ensure the structural integrity of pressurized equipment. This relief is performed by various types of devices, with safety valves being the most common. One of the fundamental parameters in this protection is the determination of the set pressure, which corresponds to the value at which the safety valve opens, allowing the fluid, either partially or completely, to flow out of the equipment, preventing overpressure. If the set pressure value is high, even if it is below the maximum allowable pressure, the overpressure may subject the equipment to high mechanical stresses, which can result in the propagation or activation of latent discontinuities. On the other hand, if the set pressure is adopted as a lower value, albeit above the operating pressure, material loss could lead to economic losses, both due to the value of the material itself and the energy applied to it throughout the production process. This work presents a case study of a set of pressure vessels, for which the operating pressure value, collected over up to 10 years at hourly intervals, was used to develop a quantitative methodology to determine the set pressure value of the safety valve through data analytics, based on the concepts of process capability (Cpk). This resulted in defining the most appropriate set pressure calibration value, with the methodology validated by comparison with actual set pressure data of the PSVs.

Keywords: pressure safety valve, pressure vessel, capability, Cpk

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico de Pareto das causas raiz (valor total) .....	4
Figura 2 - Percentual das causas de acidentes, por tipo de equipamento, sem a consolidação dos eventos associados aos vasos de pressão.....	7
Figura 3 - Percentual das causas de acidentes, por equipamentos, após a consolidação dos eventos associados aos vasos de pressão.....	8
Figura 4 - Partes do corpo humano afetadas por acidentes em caldeiras ou.....	8
Figura 5 - Lesões resultantes de acidentes com caldeiras e vasos de pressão.....	9
Figura 6 - Vaso de pressão.....	11
Figura 7 – Custo estimado de vaso de pressão, em dólar, por volume (m3).....	12
Figura 8 - Camadas de proteção .....	15
Figura 9 - Dispositivos de proteção .....	16
Figura 10 - Denis Papin.....	17
Figura 11 - Dispositivo de proteção, com princípio de funcionamento por contrapeso .....	17
Figura 12 - Dispositivo de alívio, com princípio de funcionamento por mola .....	18
Figura 13 - Valores de pressão em relação ao percentual da pressão máxima de trabalho admissível .....	19
Figura 14 - Representação da distribuição de processo .....	36
Figura 15 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 01, unidade 01 .....	42
Figura 16 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 01 .....	42
Figura 17 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	43
Figura 18 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 02, unidade 01 .....	43
Figura 19 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 01 .....	44
Figura 20 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	44
Figura 21 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 03, unidade 01 .....	45

Figura 22 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 01 .....	45
Figura 23 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	46
Figura 24 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 04, unidade 01 .....	47
Figura 25 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 01 .....	48
Figura 26 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	48
Figura 27 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 05, unidade 01 .....	49
Figura 28 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 01 .....	50
Figura 29 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	50
Figura 30 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 06, unidade 01 .....	51
Figura 31 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 01 .....	51
Figura 32 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	52
Figura 33 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 07, unidade 01 .....	53
Figura 34 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 01 .....	53
Figura 35 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	54
Figura 36 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 08, unidade 01 .....	54
Figura 37 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 01 .....	55
Figura 38 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	55

Figura 39 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 09, unidade 01 .....	56
Figura 40 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 10, unidade 01 .....	57
Figura 41 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 01 .....	58
Figura 42 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 01, após a eliminação dos outliers .....	58
Figura 43 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 01, unidade 02 .....	59
Figura 44 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 02 .....	59
Figura 45 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	60
Figura 46 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 02, unidade 02 .....	60
Figura 47 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 02 .....	61
Figura 48 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	61
Figura 49 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 03, unidade 02 .....	62
Figura 50 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 02 .....	62
Figura 51 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	63
Figura 52 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 04, unidade 02 .....	63
Figura 53 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 02 .....	64
Figura 54 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	64
Figura 55 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 05, unidade 02 .....	66

Figura 56 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 02 .....	66
Figura 57 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	67
Figura 58 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 06, unidade 02 .....	68
Figura 59 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 02 .....	69
Figura 60 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	69
Figura 61 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 07, unidade 02 .....	70
Figura 62 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 02 .....	70
Figura 63 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	71
Figura 64 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 08, unidade 02 .....	72
Figura 65 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 02 .....	72
Figura 66 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	73
Figura 67 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 09, unidade 02 .....	74
Figura 68 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 09, unidade 02 .....	74
Figura 69 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 09, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	75
Figura 70 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 10, unidade 02 .....	76
Figura 71 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 02 .....	76
Figura 72 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 02, após a eliminação dos outliers .....	77

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo da condição de pressão de ajuste em relação a pmta .....	6
Quadro 2 - Principais aspectos construtivos dos vasos de pressão.....	11
Quadro 3 - Classe dos fluidos, conforme NR-13 .....	13
Quadro 4 - Dispositivos de alívio - principais características.....	16
Quadro 5 - Resumo dos cenários de sobrepressão, conforme API 521.....	21
Quadro 6 - Métodos de normalização de variáveis .....	27
Quadro 7 - Classe do vaso de pressão conforme o perfil de pressão .....	30
Quadro 8 - Parâmetros da pesquisa bibliográfica da primeira palavra-chave .....	32
Quadro 9 - Parâmetros da pesquisa bibliográfica da segunda palavra-chave .....	35
Quadro 10 - Categoria dos dados .....	37

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade e tipo de eventos anormais observados na operação de válvulas de segurança .....	3
Tabela 2 - Causa raiz dos eventos das falhas em válvulas de segurança .....	4
Tabela 3 - Valores mínimos recomendados para Cpk .....	24
Tabela 4 - Resumo dos principais parâmetros estatísticos, por unidade, por equipamento [Valores adimensionais] .....	78
Tabela 5 - Parâmetros quantitativos dos dados após a eliminação dos <i>outliers</i> tipo 1, por unidade, por equipamento .....	80
Tabela 6 - Resumo dos principais parâmetros estatísticos, após a eliminação dos <i>outliers</i> tipo 1, por unidade, por equipamento .....	81
Tabela 7 - Valores da pressão de ajuste da PSV, por unidade, por equipamento.....	82
Tabela 8 - Quantidade de eventos em que a PSV atuou, por unidade, por equipamento.....	83
Tabela 9 - Redução da pressão de ajuste obtida pela metodologia proposta .....	84

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>American Petroleum Institute</i> (Instituto Americano do Petróleo, em tradução livre)
ASME	The American Society of Mechanical Engineers (Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos, em tradução livre)
CCF	<i>Common cause failures</i> , (falha de causa comum, em tradução livre)
Cp <sup>1</sup>	<i>Capability Process Index</i> (índice de capacidade do processo, em tradução livre)
Cpk <sup>2</sup>	<i>Capability Process Index</i> (índice de capacidade do processo, em tradução livre)
CSV	<i>Comma-separated values</i> (Valores separados por vírgula, em tradução livre)
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i> (Estudo de Risco e Operabilidade, em tradução livre)
ICDE	<i>International CFF Data Exchange</i> (base internacional de dados para troca de informações sobre falha de causa comum, em tradução livre)
IPL	<i>Independent Protection Layers</i> (Camada de Proteção Independentes, em tradução livre)
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i> Análise das Camadas de Proteção, em tradução livre
LSL	<i>Lower Specification Limit</i> (Limite Inferior de especificação, em tradução livre)
Min	Função que retorna o menor valor numérico dentre um conjunto de números

---

<sup>1</sup> Aplicado para processos que operam centralizadamente às especificações.

<sup>2</sup> Aplicado para processos que não operam centralizadamente às especificações.

PMO	Pressão Máxima de Operação
PMTA	Pressão Máxima de Trabalho Admissível
PSV	<i>Pressure Safety Valve</i> (Válvula de segurança, em tradução livre)
USL	<i>Upper Specification Limit</i> (Limite Superior de especificação, em tradução livre)
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , Ambiente de Desenvolvimento Integrado, em tradução livre
ISD	<i>Inherently Safer Design</i> (Projeto Inerentemente Seguro, em tradução livre)
RBI	<i>Risk-Based Inspection</i> (Inspeção baseada no risco, em tradução livre)

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos industriais envolvem a aplicação de energia na realização de operações de inúmeras naturezas: pressurização, transformação, transporte, transferência de calor, mudança de fases, dentre outros. Em cada uma destas operações, a energia deve estar sendo condicionada, tanto no aspecto da sua intensidade, da sua aplicação, assim como a sua contenção em condições tais que não possa ser dispersada de forma inadequada e/ou indesejada para o ambiente, pois, em sendo assim, resultados negativos podem advir (acidentes com pessoas ou com o meio ambiente, perdas financeiras, danos à imagem do empreendimento).

Com o objetivo de possibilitar que a energia, na forma de fluido pressurizado, fique adequadamente condicionada no recipiente que a contém, este deve ser capaz de suportar os esforços mecânicos (decorrentes da pressão).

Todavia, distúrbios operacionais, quer sejam de origem da variabilidade normal, ou de eventos decorrentes de fatores especiais, podem resultar em situações de sobrepressão, com potencial risco de causar a perda de contenção da energia (fluido).

Para evitar tal situação, os equipamentos (denominados vasos de pressão) que contém o fluido possuem dispositivos que atuam aliviando o fluido em casos de sobrepressão, pois é de extrema importância para a garantia da integridade estrutural em equipamentos pressurizados. Este alívio é realizado por diversos tipos de dispositivos, sendo as válvulas de segurança as mais comuns.

Um aspecto importante nesta proteção é a determinação da pressão de ajuste, que corresponde ao valor em que a válvula de segurança irá abrir, possibilitando com que o fluido, total ou parcialmente, escoe para fora do equipamento, evitando a sobrepressão nos equipamentos.

Caso o valor da pressão de ajuste seja elevado, a sobrepressão poderá possibilitar que tensões mecânicas elevadas sejam aplicadas ao equipamento, mesmo estando abaixo da pressão máxima admissível, o que pode resultar na propagação ou ativação de descontinuidades latentes existentes. Por outro lado, se a pressão de ajuste foi adotada como sendo um valor baixo, mas acima da pressão de operação, a perda de material significará prejuízo econômico, tanto pelo valor do material em si como pela energia nele aplicada ao longo do processo produtivo. Além disso, haverá risco à segurança estrutural e das pessoas, uma vez que o fluido de

processo usualmente será liberado ao ambiente de forma abrupta. Costumeiramente a determinação da pressão de alívio é realizada na etapa de projeto, sendo neste valor ao longo do tempo de operação, sem alteração.

Este trabalho apresenta uma metodologia na qual o valor da pressão de alívio da válvula de segurança foi definido a partir de um procedimento de engenharia reversa, isto é, baseado em um histórico de dados reais da pressão de operação de vasos de pressão instalados em duas unidades de uma empresa do ramo de óleo e gás, em contraste do procedimento usual, em que se define a pressão de abertura da válvula de segurança a partir da pressão de projeto. É descrito um estudo de caso de um conjunto de vasos de pressão, para o qual o valor da pressão de operação, coletado a cada hora para diferentes intervalos de tempo de operação normal, foi utilizado para determinar estatisticamente o valor da pressão de ajuste da válvula de segurança, baseado nos conceitos de capacidade, sendo usado para tal o Cpk (Índice que compara a variação do processo em relação aos limites de especificação, para um processo com comportamento estatisticamente normal, porém não centralizado entre os citados limites), resultando na definição do valor mais adequado à calibração da pressão de ajuste.

## 1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

As indústrias de processos são definidas, conforme Kuwashima et al. (2023, apud *Collins English Dictionary*<sup>3</sup>, 2021), como sendo “uma indústria, tal como uma indústria química ou petroquímica, que têm como finalidade o processamento de matérias primas em produtos”.

Para tal, estes empreendimentos possuem equipamentos que efetuam funções específicas. Por exemplo, há os equipamentos de transferência de massa (compressores, bombas); condução de massa (tubulações e seus acessórios); produção de vapor (caldeiras); acumulação de fluidos (vasos de pressão); dentre outros.

Os vasos de pressão, conforme definido pelo ASME, são equipamentos destinados a conter fluidos no interior, sob pressão diferente da atmosférica (ASME, 2015), sendo a pressão interna maior que a atmosférica na maioria das aplicações.

---

<sup>3</sup> <https://www.collinsdictionary.com/us/dictionary/english/process-industry> (Accessed 12 February 2021)

Decorrente da variação natural das condições operacionais, ou resultante de causas anormais (incêndios, falhas operacionais, reações químicas imprevistas, falha no fornecimento de utilidades<sup>4</sup>), a pressão no interior do vaso de pressão pode atingir valores que ocasionem a perda da integridade estrutural, com consequente liberação indesejada do fluido para o ambiente, existindo dispositivos instalados nestes equipamentos com a finalidade de prover a liberação do fluido, de forma segura.

Conforme (AGENCY et al., 2002), as ocorrências de falhas em válvulas de segurança, originadas do *International CCF5 Data Exchange (ICDE6) database*, apresentou os resultados indicados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade e tipo de eventos anormais observados na operação de válvulas de segurança

Evento reportado	Quantidade		Total de eventos
	Grau de falha observada		
	Falha parcial	Falha completa	
Falha ao abrir	93	11	104
Falha ao fechar	28	3	31
Abertura inadvertida	11	0	11
Outro	3	0	3
<b>Total</b>	<b>135</b>	<b>14</b>	<b>149</b>

Fonte: adaptado de (AGENCY et al., 2002)

Verifica-se na Tabela 1 a predominância dos eventos relacionados à “falha ao abrir”, enquanto que a Tabela 2 pode ser constatado que a “falha ao abrir” tem como causa raiz, em ordem decrescente: problemas associados aos internos (28); ação humana (25); procedimento inadequado (22); Projeto, fabricação ou construção inadequada (18); de forma que problemas associados a falha de abertura correspondem a cerca de 70% do total de falhas relativos a válvulas de segurança.

<sup>4</sup> Utilidades são insumos necessários à realização dos processos industriais. Exemplo: água, eletricidade, ar comprimido, etc.

<sup>5</sup> *Common cause failures*, falha de causa comum em tradução livre.

<sup>6</sup> *International CCF Data Exchange*, base internacional de dados para troca de informações sobre falha de causa comum, em tradução livre.

As condições referentes ao evento reportado, conforme (AGENCY et al., 2002) são detalhadas na Tabela 2.

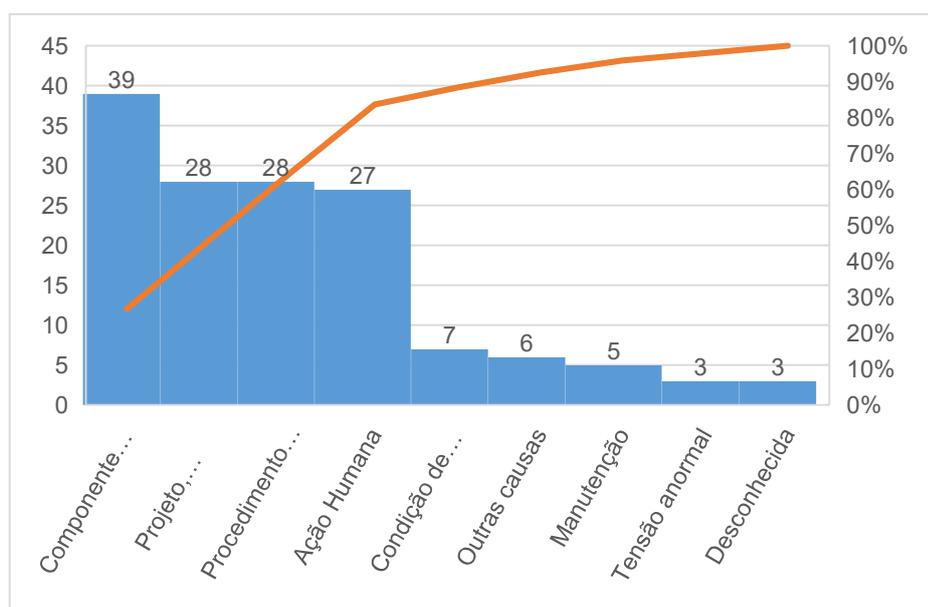
Tabela 2 - Causa raiz dos eventos das falhas em válvulas de segurança

Causa raiz	Evento reportado			Total
	Falha ao fechar	Falha ao abrir	Abertura inadvertida	
Tensão anormal	1	2	0	3
Condição de outros componentes	0	1	6	7
Projeto, fabricação ou construção inadequados	10	18	0	28
Ação Humana	2	25	0	27
Componente interno	11	28	0	39
Manutenção	0	5	0	5
Outras causas	4	1	1	6
Procedimento inadequado	3	22	3	28
Desconhecida	0	2	1	3

Fonte: adaptado de (AGENCY et al., 2002)

Na Figura 1 constata-se como principais causas raiz dos eventos nas válvulas de segurança: (a) componentes internos; (b) projeto, fabricação ou construção inadequados; (c) Procedimento inadequado; (d) Ação Humana; correspondendo mais de 80% das ocorrências.

Figura 1 - Gráfico de Pareto das causas raiz (valor total)



Fonte: Autor (2025)

Portanto, um eventual problema neste dispositivo de segurança pode comprometer a integridade do vaso de pressão, caso venha a abrir em um valor acima daquele para o qual foi calibrada/ajustada.

Por outro lado, caso a válvula não feche, ou venha abrir com um valor abaixo do especificado, haverá a liberação indevida do fluido, com perda:

- 1) financeira, decorrente do descarte indesejado do fluido;
- 2) financeira, pois a energia demandada para pressurizar o fluido será perdida;
- 3) financeira/ecológica, devido ao potencial impacto negativo, caso o fluido tenha restrição em termos de liberação ao ambiente.

O dimensionamento dos dispositivos de proteção contra sobrepressão em equipamentos, especificamente vasos de pressão, usualmente considera vários aspectos, tais como:

- (a) pressão máxima de operação;
- (b) características físicas e químicas do fluido;
- (c) temperatura.

Pelo menos duas situações podem ser constatadas quando da definição da pressão de ajuste do dispositivo de proteção contra sobrepressão:

- (i) Adota-se a pressão de ajuste como sendo a pressão máxima de pressão admissível (PMTA<sup>7</sup>); ou,
- (ii) Adota-se a pressão de ajuste como sendo o menor valor adequado acima da pressão máxima de operação.

Nestes cenários, podemos observar as características apresentadas no Quadro 1.

---

<sup>7</sup> 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. (BRASIL, 2022)

Quadro 1 - Comparativo da condição de pressão de ajuste em relação a pmta

<b>SITUAÇÃO</b>	<b>VANTAGEM</b>	<b>DESvantAGEM</b>
Pressão de ajuste como sendo a pressão máxima de pressão admissível (PMTA)	O fluido só será liberado quando for atingida a PMTA, sendo recomendado quando o fluido apresenta elevado custo ou potencial impacto negativo caso liberado para o ambiente.	O equipamento ficará sob elevada pressão (consequentemente tensões mecânicas), nos casos de ocorrência de eventos anormais, caso estas sejam ligeiramente abaixo da PMTA.
Pressão de ajuste como sendo o menor valor adequada acima da pressão máxima de operação (PMO)	Evitam-se tensões mecânicas elevadas.	Possibilidade de liberação do fluido, com potencial: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Perda da energia aplicada na pressurização;</li> <li>- Perda do fluido;</li> <li>- Impacto negativo do fluido no ambiente onde foi liberado.</li> </ul>

Fonte: Autor (2025)

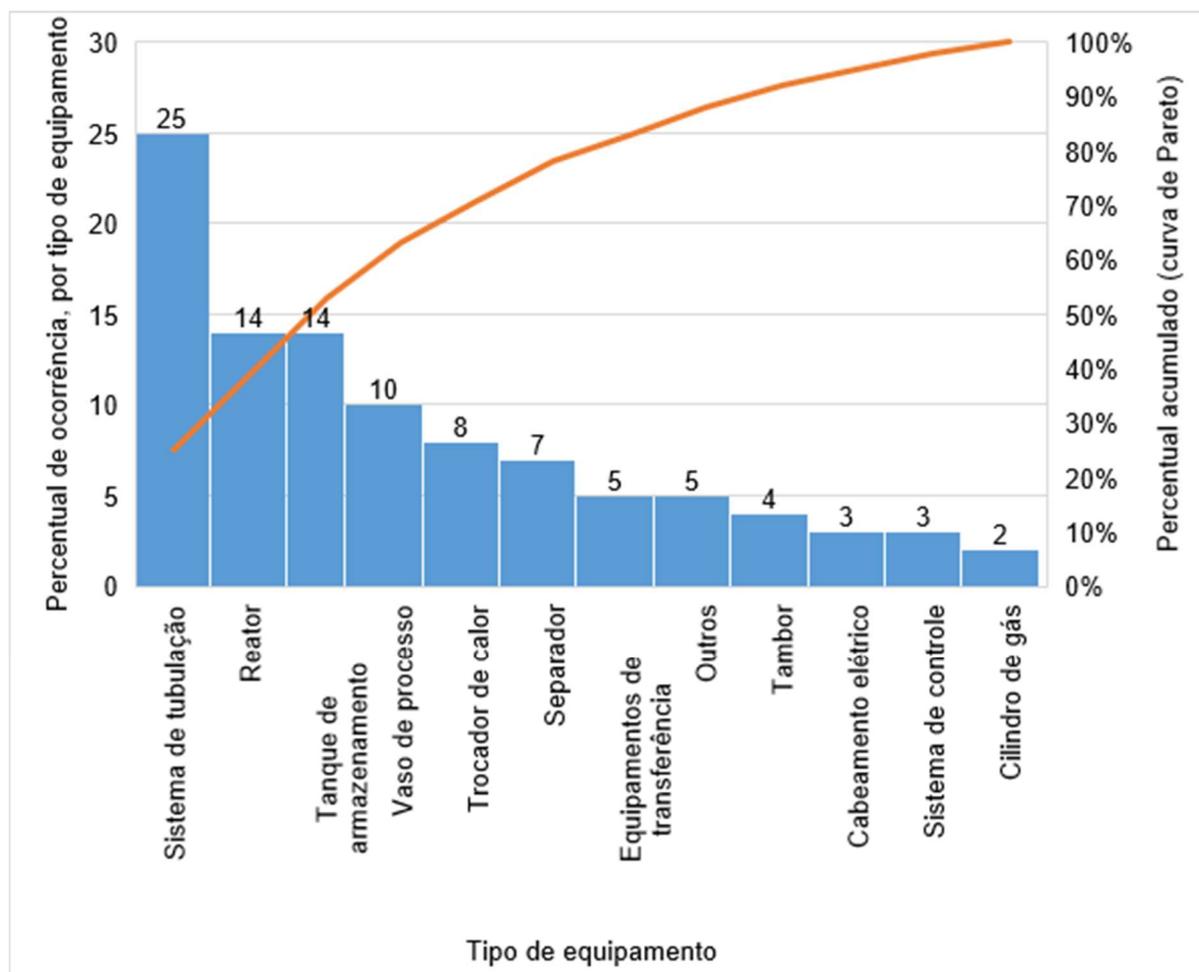
Sendo assim, defronta-se o projeto com estes cenários conflitantes e este projeto propõe estudar, a partir de dados reais, qual deve ser o valor da pressão de ajuste a ser adotada.

A Norma Regulamentadora número 13 (NR-13) é o documento legal, emitido pelo Ministério do Trabalho e Emprego, que tem como finalidade definir os requisitos mínimos para a gestão da integridade estrutural das caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques, para a segurança e saúde dos trabalhadores. ((EMPREGO, 2022).

As informações sobre a quantidade de acidentes, por tipo de equipamentos, são, geralmente, de difícil obtenção, decorrente do potencial impacto negativo destes eventos para as empresas.

Dados estatísticos sobre acidentes são encontrados em Kidam e Hurme (2013), estando indicados na Figura 2.

Figura 2 - Percentual das causas de acidentes, por tipo de equipamento, sem a consolidação dos eventos associados aos vasos de pressão

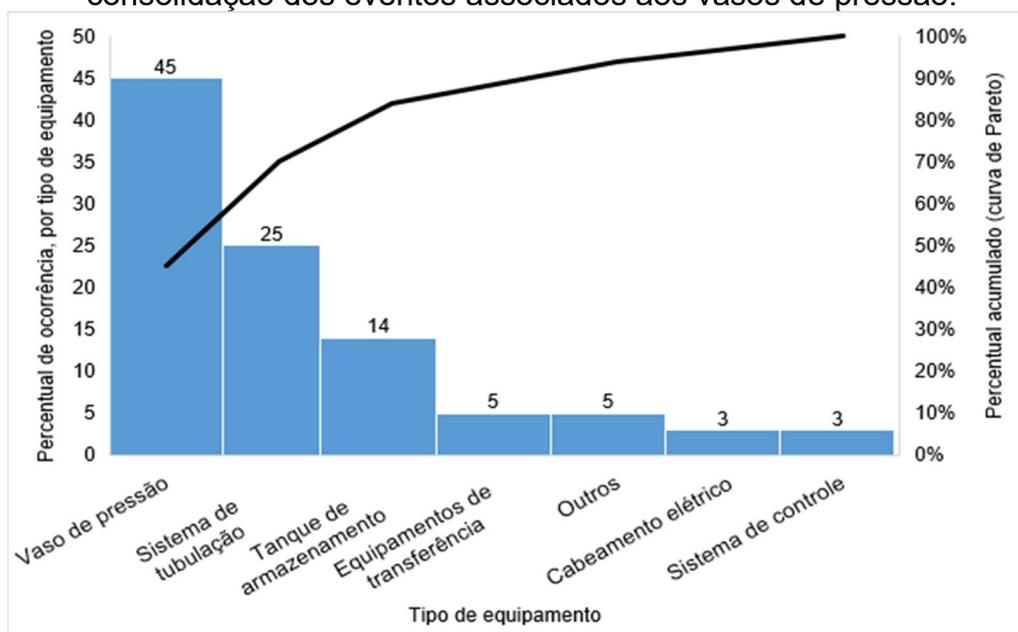


Fonte: adaptado de (KIDAM; HURME, 2013)

Percebe-se na Figura 2 que os autores classificaram os tipos de equipamentos de forma que os vasos de pressão foram apresentados em várias classes, resultando em potencial descaracterização da relevância dos vasos de pressão em termos do equipamento associado aos acidentes.

Sendo assim, considerando que os reatores, vasos de processo, trocadores de calor, tambores e cilindros de gases são vasos de pressão, a estatística indicada na Figura 2 pode ser melhor apresentada conforme a Figura 3, na qual pode ser constatada a influência das ocorrências dos vasos de pressão como causa de acidentes.

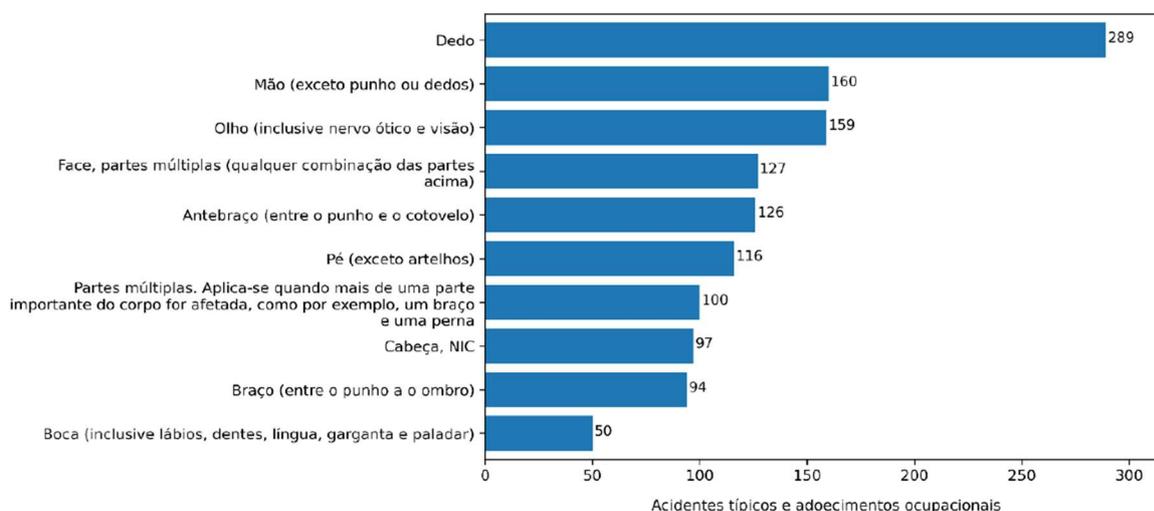
Figura 3 - Percentual das causas de acidentes, por equipamentos, após a consolidação dos eventos associados aos vasos de pressão.



Fonte: adaptado de (KIDAM; HURME, 2013)

Em termos das consequências dos acidentes em caldeiras ou vasos de pressão para os operadores de processo, podemos identificar na Figura 4 as partes do corpo humano mais afetadas, com destaque para os dedos, mãos, olho e face, indicando ocorrências que podem inabilitar, total ou parcialmente, os trabalhadores.

Figura 4 - Partes do corpo humano afetadas por acidentes em caldeiras ou vasos de pressão

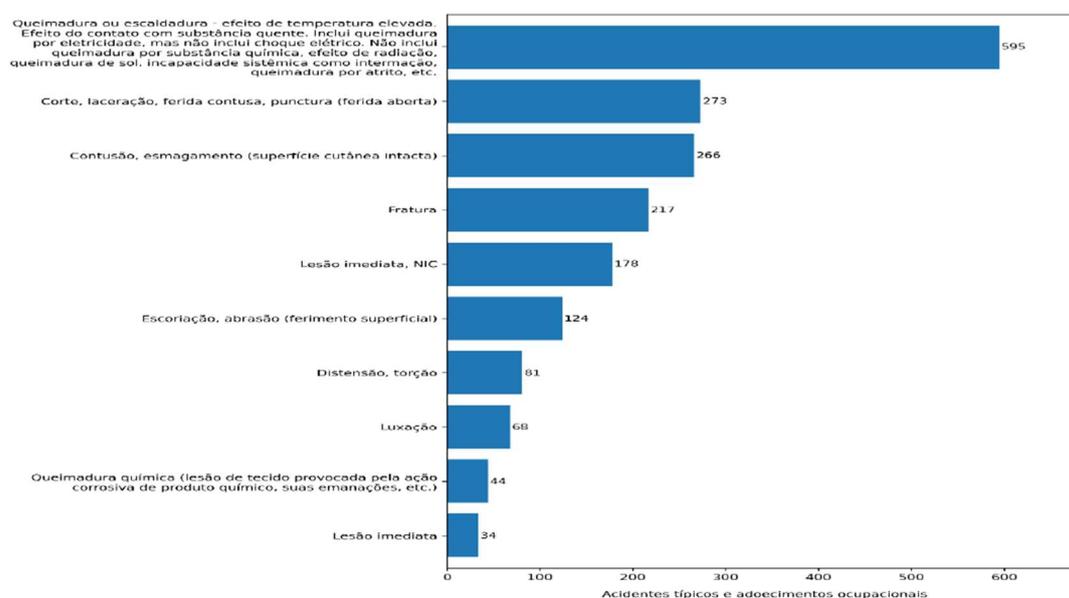


Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

Ainda analisando os aspectos da consequência dos acidentes com as caldeiras ou vasos de pressão, identifica-se que as lesões de queimaduras, corte, contusão ou fratura correspondem, conjuntamente, a mais de 70% do total. (Figura 5)

Os vasos de pressão devem possuir, por requisitos estruturais e legais, tais como a NR-13, um dispositivo (usualmente válvulas de segurança) que proporcione o alívio da pressão, de forma automática, caso ocorra algum evento que resulte em uma sobrepressão. Estes dispositivos precisam atuar de forma que evite que o vaso de pressão possa atingir uma condição em que a sua integridade estrutural seja comprometida, quer seja por uma deformação mecânica permanente, ou, no pior cenário, pela ruptura do equipamento.

Figura 5 - Lesões resultantes de acidentes com caldeiras e vasos de pressão



Fonte: (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2021)

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver e aplicar uma metodologia para a determinação da pressão de ajuste do dispositivo de segurança em equipamentos pressurizados, baseado em dados coletados de um conjunto de equipamentos em operação, visando o equilíbrio entre segurança, integridade estrutural, continuidade operacional e custos financeiros e ambientais.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

1. Revisão do estado da arte pertinente a ajustes de válvulas de segurança e capacidade de processos;
2. Coleta e tratamento de dados da pressão de operação de equipamentos em campo;
3. Determinar a distribuição estatística da pressão de operação a partir de uma análise exploratória dos dados;
4. Propor uma metodologia para a determinação do valor a ser utilizado como sendo a pressão de ajuste, considerando aspectos de capacidade do processo;
5. Aplicar e avaliar a metodologia em um conjunto de equipamentos instalados em duas unidades industriais;
6. Publicar resultados em revista indexada.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 VASOS DE PRESSÃO

TELLES (1996) define os vasos de pressão (Figura 6) como equipamentos projetados e operados para conter no seu interior fluidos, em pressão manométrica diferente da atmosférica.

Figura 6 - Vaso de pressão



Fonte: (KSTEEL, 2025)

Em termos construtivos, os vasos de pressão podem apresentar inúmeras formas geométricas, dimensões, processos de fabricação ou materiais, visto a enorme quantidade de aplicações que estes equipamentos se deparam com (Quadro 2).

Quadro 2 - Principais aspectos construtivos dos vasos de pressão

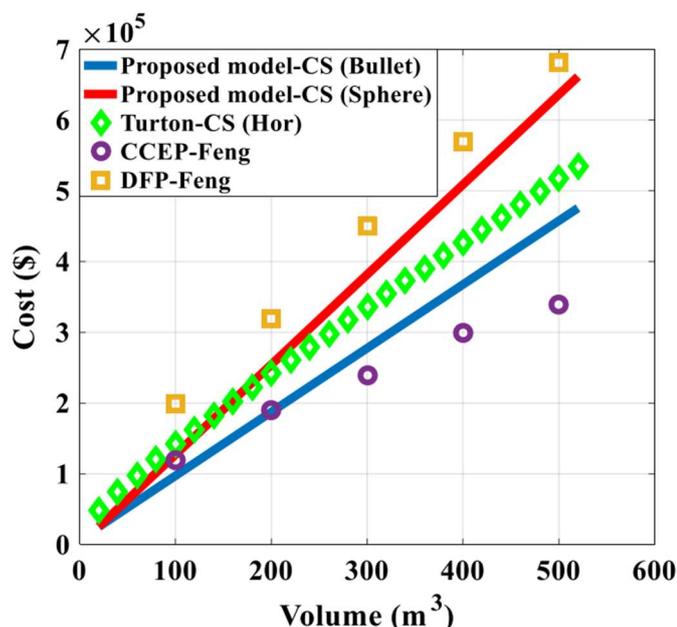
CARACTERÍSTICA	DETALHAMENTO
Forma geométrica	Cilíndrico, esférico, Cilíndrico-cônico
Posição	Vertical, Horizontal, Inclinado
Processos de fabricação	Soldado, Rebitado, Forjado
Materiais (principais tipos)	Aço carbono, Aço inoxidável, Fibras, Titânio, Níquel

Fonte: Autor (2025)

A estimativa do custo de aquisição dos vasos de pressão foi realizada por Shamoushaki *et al.* (2021), referente à aplicação para uma usina geradora de energia elétrica. Neste estudo, através do levantamento de informações de um banco de dados, com data base 2020, os autores, através de uma robusta regressão multivariável, estimaram o custo de vários equipamentos (compressor, bomba, *air cooler*, trocador de calor, vaso de pressão), em função da capacidade de cada equipamento.

No tocante aos vasos de pressão, conforme indicado na Figura 7, o custo destes equipamentos varia linearmente com o volume do equipamento. O estudo envolveu 180 dados, apresentando um intervalo de confiança  $\pm 12,1\%$ , para os vasos cilíndricos, e de  $\pm 12,4\%$ , para os esféricos. Shamoushaki *et al.* (2021). As curvas apresentadas correspondem aos modelos propostos por diferentes pesquisadores. (Figura 7)

Figura 7 – Custo estimado de vaso de pressão, em dólar, por volume (m<sup>3</sup>)



Fonte: Shamoushaki *et al.* (2021)

Decorrente de condições operacionais, ou por eventos de causa específica (incidente e/ou acidente), o vaso de pressão pode ser submetido à situação de pressão anormal, sendo necessário que sejam incorporados ao equipamento e/ou processo, recursos que atuem de forma a garantir a integridade operacional, ou, em um eventual cenário mais crítico, a mitigação dos efeitos indesejados decorrentes.

No Brasil, os vasos de pressão são categorizados como I, II, III, IV ou V, conforme a NR-13 (BRASIL, 2022) considerando três parâmetros:

- (a) Pressão máxima de operação;
- (b) Volume interno;
- (c) Tipo de fluido(s) que o equipamento contém.

Para a determinação da PMTA de um vaso de pressão são realizados cálculos definidos pelos códigos de projeto (o ASME é o mais comum), onde as características do equipamento (diâmetro, material, processo de fabricação, processo de verificação da qualidade) são considerados.

Em termos do fluido armazenado no vaso de pressão, a NR-13 especifica as seguintes classes, conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Classe dos fluidos, conforme NR-13

<b>CLASSE DO FLUIDO</b>	<b>TIPO DO FLUIDO</b>
A	Fluidos inflamáveis Fluidos combustíveis com temperatura superior ou igual a 200 °C Fluidos tóxicos, com limite de tolerância igual ou inferior a 20 ppm Hidrogênio Acetileno
B	Fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200 °C Fluidos tóxicos, com limite de tolerância igual ou superior a 20 ppm
C	Vapor de água Gases asfixiantes simples Ar comprimido
D	Outros fluidos não enquadrados nas classes anteriores

Fonte: Adaptado de (EMPREGO, 2022)

## 2.2 VÁLVULAS DE SEGURANÇA

Várias camadas de proteção independentes, indicados pela sigla IPL, (*Independent Protection Layers*, Camada de Proteção Independentes, em tradução livre ) são consideradas para fins de implementar a segurança do processo, sendo a LOPA (*Layer of Protection Analysis*, Análise das Camadas de Proteção, em tradução livre) a metodologia desenvolvida nos anos 1990 que, em conjunto com o HAZOP (*Hazard and Operability Study*, Estudo de Risco e Operabilidade, em tradução livre) possibilita a avaliação de risco de um processo.

O IPL corresponde à identificação da condição de independência de cada recurso de proteção em relação aos demais recursos que tenham a função ou condição de proporcionar segurança ao processo. (WILLEY, 2014).

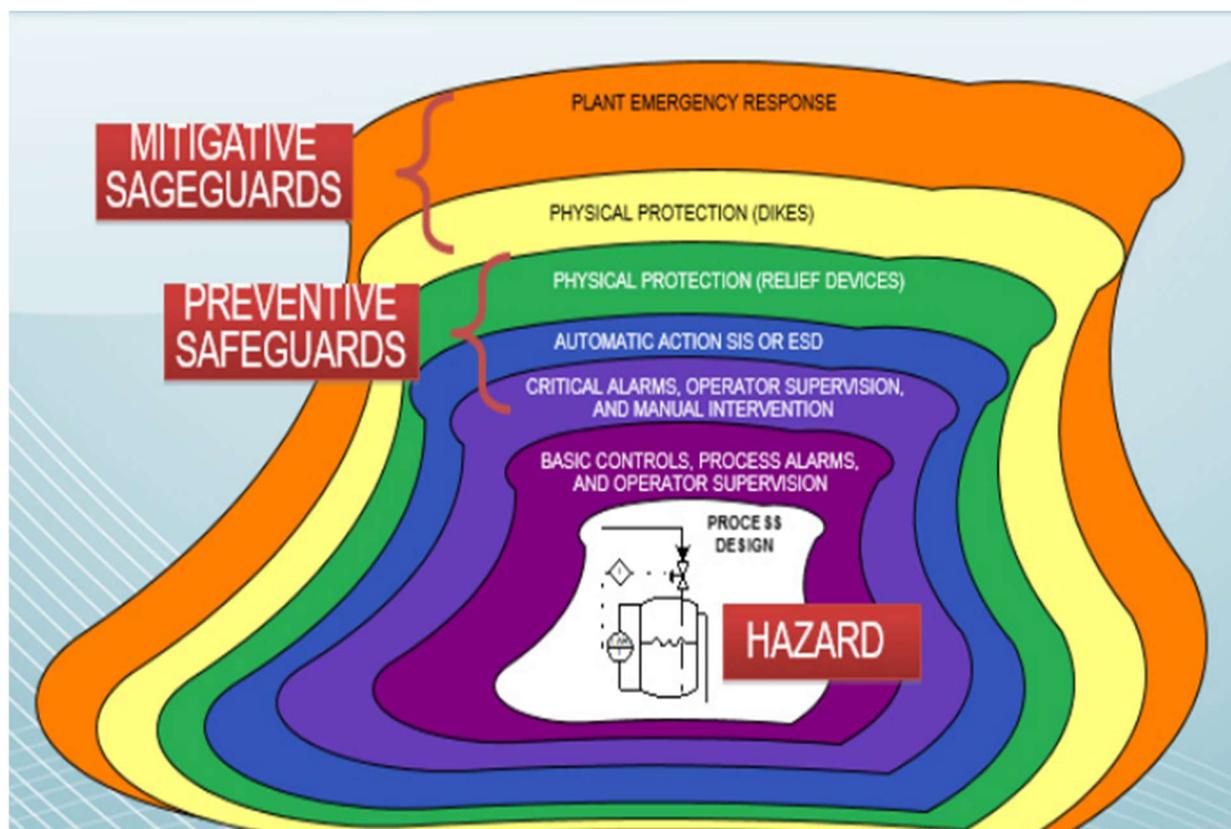
LOPA é a metodologia semiquantitativa aplicada para avaliar a eficácia das camadas de proteção independentes (IPL), objetivando que seja alcançado um nível aceitável na segurança do processo. (MUNIZ, 2016).

HAZOP refere-se a metodologia a ser realizada por grupo multidisciplinar para identificar os riscos e propor contramedidas para mitigar, reduzir ou eliminar completamente as fontes potenciais de risco de um processo, atividade ou operação. (KOTEK; TABAS, 2012)

Na Figura 8 são apresentadas as várias camadas de proteção independentes (ILP), podendo ser identificada aquela correspondente a *physical protection (relief devices)*<sup>8</sup>, sendo esta camada correspondente aos itens que possuem a função de proporcionar a adequada (em termos do momento em que atuam, sob pressão aliviam o fluido do interior do equipamento, e em qual valor de vazão este alívio é realizado) proteção do equipamento.

---

<sup>8</sup> *Physical protection (relief devices)*, proteção física (dispositivos de alívio), em tradução livre.

Figura 8 - Camadas de proteção<sup>9</sup>

Fonte: (WILLEY, 2014)

No Quadro 4 e Figura 9 estão destacados os tipos mais comuns dos dispositivos alívio de pressão, com as suas principais características.

Podemos constatar que as válvulas de segurança ou as válvulas de alívio correspondem a maioria das aplicações, pois apresentam, ambas, a condição de rearme automático, o que confere a estes itens a capacidade de retornarem ao *status* fechado, evitando, assim, o escoamento do fluido, após cessado o evento da sobrepressão.

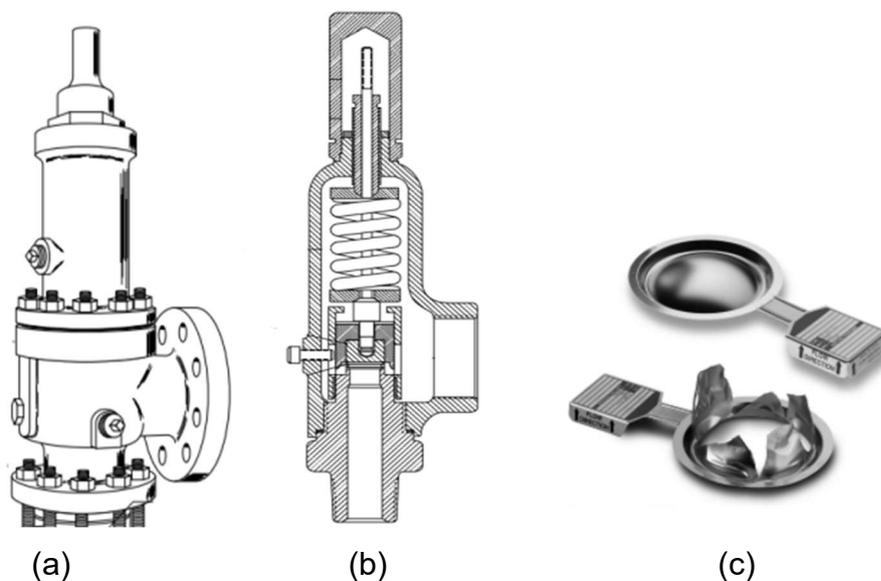
<sup>9</sup> Tradução livre do conteúdo da figura: (a) *Plant Emergency Response*: Resposta de Emergência da Planta; (b) *Physical Protection*: Proteção física; (c) *Physical Protection (Relief Devices)*: Proteção física (Dispositivos de alívio); (d) *Automatic Action SIS or ESD*: Ação de controle automático; (e) *Critical Alarms, Operator Supervision, and manual intervention*: Alarmes críticos, Supervisão Operacional em intervenção manual; (f) *Basic Controls, Process Alarms, and Operator Supervision*: Controles básicos, alarmes do processo, e supervisão operacional; (g) *Harzard*: Perigo; (h) *Mitigative safeguards*: Salvaguardas mitigadoras; (i) *Preventive Safeguards*: Salvaguardas preventivas.

Quadro 4 - Dispositivos de alívio - principais características

DENOMINAÇÃO DO DISPOSITIVO	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS
Válvula de segurança [Figura 9 (a)]	a) Dispositivo auto operado pelo fluido do processo. b) Projetado para uso com fluidos gasosos. c) Possui a condição de rearme automático <sup>10</sup>
Válvula de alívio [Figura 9 (b)]	a) Dispositivo auto operado pelo fluido do processo. b) Projetado para uso com fluidos líquidos. c) Possui a condição de rearme automático.
Disco de ruptura [Figura 9 (c)]	a) Dispositivo auto operado pelo fluido do processo. b) Projetado para uso com fluidos gasosos, ou líquidos, ou mistura gases-líquidos. c) Não possui a condição de rearme automático.

Fonte: Autor (2025)

Figura 9 - Dispositivos de proteção



Fonte: Adaptado de (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2000)

<sup>10</sup> Rearme automático, no contexto desta dissertação, corresponde à característica que um dado dispositivo possui para retornar à sua condição inicial, uma vez que a ação de atuação é cessada. O dispositivo de proteção opera na condição “fechada” (sem permitir o escoamento para o ambiente externo ao equipamento onde está instalado). Quando a pressão de operação atinge o valor em que o dispositivo foi calibrado(ajustado), este deve “abrir”, possibilitando que o fluido escoe para “fora” do equipamento. Em continuidade, quando a pressão no interior do equipamento retorna ao valor adequado, o dispositivo volta à condição “fechada”, caracterizando-se, assim, a condição de “rearme automático”.

Conforme Hellemans (2009), atribui-se ao cientista Denis Papin (Figura 10) a invenção da válvula de segurança, tendo sido um importante marco na evolução das condições de segurança operacional, pois possibilitou o aumento na confiabilidade e integridade estrutural dos vasos de pressão, caldeiras e demais equipamentos ou instalações que operavam sob pressão.

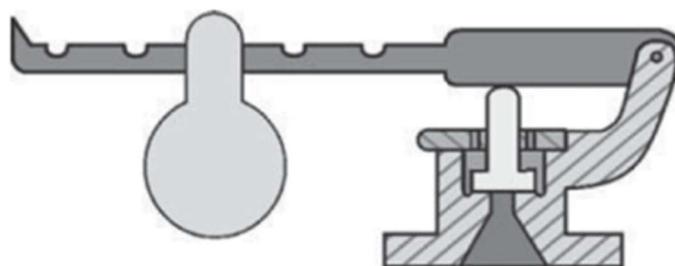
Figura 10 - Denis Papin



Fonte: (HELLEMANS, 2009)

Os primeiros dispositivos que funcionavam com o objetivo de proteger quanto aos eventos de sobrepressão utilizavam o princípio da alavanca mecânica, sendo o ajuste realizado por meio da determinação da posição da massa de contrapeso adequada ao equilíbrio estático que garantisse estar “fechado” o dispositivo até que fosse atingida a pressão de operação que atuasse, realizando a “abertura”. (Figura 11)

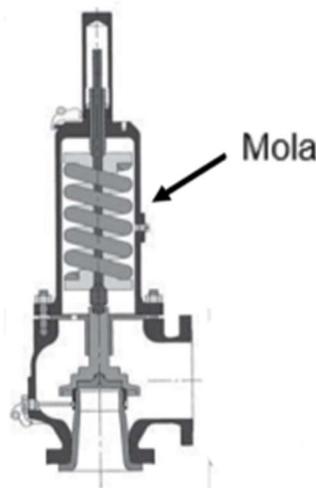
Figura 11 - Dispositivo de proteção, com princípio de funcionamento por contrapeso



Fonte: Adaptado de (HELLEMANS, 2009)

À medida da evolução tecnológica assim requereu, o princípio de funcionamento dos dispositivos de alívio evolui, para ser utilizada mola (Figura 12), pois este elemento mecânico possibilita uma maior facilidade de ajuste, além de apresentar uma configuração construtiva mais compacta, quando comparada com o princípio anterior. Este modelo é, praticamente, o que corresponde a maioria das aplicações.

Figura 12 - Dispositivo de alívio, com princípio de funcionamento por mola



Fonte: Adaptado de (HELLEMANS, 2009)

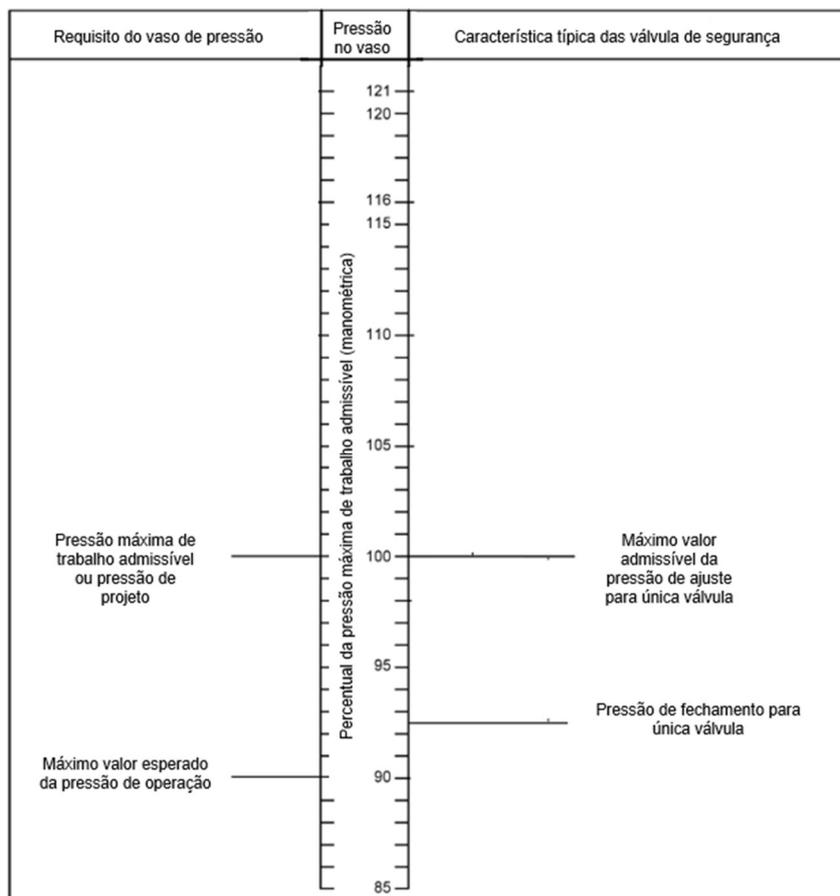
A proteção dos equipamentos que operam sob pressão, quanto às ocorrências de sobrepresão, é geralmente realizada por dispositivos de proteção contra sobrepresão (os mais comuns<sup>11</sup> são as válvulas de segurança ou válvulas de alívio), sendo estes itens responsáveis em direcionar o excesso de fluido para um local/ambiente adequado, possibilitando com que o equipamento retorne à condição segura de operação.

O código ASME (The American Society of Mechanical Engineers) (ASME, 2015) indica que o dispositivo de proteção contra sobrepresão deve ser ajustado para aliviar a pressão em um valor menor ou igual à PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível), sendo este critério também utilizado pela Norma Regulamentadora NR-13 (BRASIL, 2022), e pelo API 520 (Figura 13).

---

<sup>11</sup> Também podem ser utilizados discos de ruptura, válvulas “quebra-vácuo”, dentre outros; a depender da necessidade e característica de cada situação.

Figura 13 - Valores de pressão em relação ao percentual da pressão máxima de trabalho admissível



Fonte: API 520, com adaptações

Ao longo da vida útil dos equipamentos (vasos de pressão) é esperado que ocorram eventos que podem resultar no comprometimento da PMTA, principalmente na redução do seu valor, em relação à condição “novo” do equipamento.

Podemos citar, como exemplo, a presença de processos corrosivos que reduzem a resistência mecânica estrutural:

- (a) Perda de espessura da parede do vaso;
- (b) Danos metalúrgicos;
- (c) Efeitos da temperatura (aquecimento ou resfriamento anormal);
- (d) Esforços mecânicos.

Sendo assim, a redução do valor da PMTA do equipamento é acompanhada pela redução da pressão de ajuste de PSV, pois esta, conforme os códigos de projeto dos vasos de pressão deve sempre ser menor ou igual à PMTA.

A norma API 520 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API), 2020) (*American Petroleum Institute*) apresenta as orientações no tocante ao dimensionamento, seleção e instalação dos dispositivos de proteção contra sobrepressão, sendo uma das normas mais utilizadas quanto do projeto dos equipamentos que operam sob pressão.

O dimensionamento das válvulas de segurança é realizado considerando-se vários aspectos, sendo os principais:

- (i) Identificação/determinação da pressão de ajuste (pressão em que a válvula “abre”, possibilitando o alívio do fluido (parcialmente ou totalmente) para o exterior do equipamento;
- (ii) Determinação do diâmetro mínimo de passagem do fluido, sendo esta grandeza função, principalmente, da vazão a ser aliviada e da pressão em que ocorre este alívio;
- (iii) Determinação dos materiais construtivos da válvula de segurança, objetivando serem utilizados produtos compatíveis (com ausência ou baixa influência dos fenômenos de corrosão); e,
- (iv) Aspectos do escoamento do fluido após a ocorrência do alívio, com a finalidade de identificar possíveis efeitos da ocorrência de contrapressão.

A norma API 520, parte 1, relaciona dezesseis cenários possíveis que devem ser considerados para a determinação da vazão de alívio (item ii), estando estes cenários apresentados no Quadro 5 de forma resumida.

Quadro 5 - Resumo dos cenários de sobrepressão, conforme API 521

(continua)

<b>CAUSA DA SOBREPRESSÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
Bloqueio indevido da saída do fluido do equipamento.	Fechamento indevido da válvula de saída do fluido do equipamento, ou bloqueio devido a obstrução.
Falha no sistema de arrefecimento do equipamento.	Perda da capacidade de remoção do calor presente no equipamento, decorrente de falha no sistema de arrefecimento (por exemplo: (i) falha no trocador de calor, ou na bomba, ou na tubulação; (ii) falta de água; (iii) falta de energia elétrica; etc.).
Falha do sistema de absorção do fluido.	Em processos em que é necessária a presença controlada de um fluido absorvedor (que se combina adequadamente com o fluido de processo), a falta deste fluido absorvedor pode resultar em uma elevação anormal da pressão no equipamento.
Acumulação de não condensáveis.	O acúmulo anormal de não condensáveis pode resultar em uma condição similar à perda total do sistema de arrefecimento.
Entrada anormal de material volátil no equipamento.	Caso um fluido volátil seja introduzido no equipamento, decorrente da sua própria característica de expansividade, a pressão pode atingir valores anormalmente elevados.
Enchimento completo e indevido do equipamento.	A ocupação de todo o volume interno do equipamento, principalmente em caso de fluido na fase líquida, pode resultar em sobrepressão no equipamento.
Falha no controle automático do processo.	A perda do controle automático do processo associado ao equipamento, possibilita a ocorrência da elevação da pressão.
Entrada anormal de calor ou vapor do processo.	Situação semelhante àquela descrita como falha no sistema de arrefecimento, todavia tendo como causa a entrada de calor ou vapor de processo.

Quadro 5 - Resumo dos cenários de sobrepressão, conforme API 521

(conclusão)

<b>CAUSA DA SOBREPRESSÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICA</b>
Explosão interna ou ocorrência de transientes abruptos da pressão.	A pressão no equipamento pode atingir valores muito altos caso ocorra uma explosão interna ao equipamento.
Reação química.	Efeitos exotérmicos e de elevação da pressão podem ser resultantes do descontrole da reação química.
Expansão hidráulica.	O efeito da expansão hidráulica, geralmente associada ao aporte anormal de calor e/ou reação química inesperada, possibilita a elevação da pressão interna, que, em alguns casos, pode atingir valores muito altos.
Incêndio.	Além de possibilitar a elevação da pressão no equipamento decorrente do efeito térmico sobre o fluido contido, o incêndio também pode causar o comprometimento das características metalúrgicas do material construtivo do equipamento.
Falha no trocador de calor.	Situação semelhante àquela descrita como falha no sistema de arrefecimento.
Falha no fornecimento de utilidades.	Eventos como falta de utilidades (energia elétrica, combustível, vapor d'água, ar comprimido, água de arrefecimento), falta de insumos, acidentes/eventos operacionais, dentre outros, podem ocasionar a sobrepressão no equipamento.
Ocorrência de sobrepressão durante as atividades de manutenção.	Decorrente da eventual retirada de funcionamento dos dispositivos e sistemas de proteção contra sobrepressão durante as atividades de manutenção, ocorrências de elevação indevida da pressão no equipamento podem ocorrer.
Aspectos associados ao projeto da tubulação.	Certos cenários operacionais (transientes no escoamento) podem ocasionar sobrepressão.

Fonte: API 520, com adaptações

## 2.2 ASPECTOS ESTATÍSTICOS E SOBRE A CIÊNCIA DE DADOS

Os processos industriais são concebidos com a finalidade de, a partir de insumos adequados, fabricar produtos que atendam às exigências da especificação requerida pelo mercado.

Torna-se necessário avaliar se este comportamento aleatório do processo está adequado para que a especificação requerida seja atendida, preferencialmente sem que haja desperdício ou perda, quer seja dos insumos, quer seja do produto. Para tanto, diversas métricas foram introduzidas com o objetivo de mensurar os padrões de controle da qualidade, entre eles vários índices de capacidade de processo foram definidos e estudados (CHEN; DING, 2001).

Um dos primeiros índices criados para quantificar a capacidade do processo, denominado índice de capacidade potencial, foi definido por Juran (1988), e parte do princípio que o conjunto de dados do processo possui distribuição normal aproximadamente gaussiana. Esse índice, portanto, compara variabilidade permitida ao processo (diferença entre limites de especificação superior e inferior) com a dispersão natural e inerente do processo (desvio padrão da amostra). Dessa forma, esse índice pode não fornecer uma indicação do centralizado esse processo está em relação aos seus limites de especificação, sendo mais utilizados para processos com distribuição simétrica (WERNER, 2017) (COSTA SOARES *et al.*, 2024).

Com o objetivo de suprir essa deficiência, Kane (1986) propõe o índice de capacidade do processo (Cpk), que é definido conforme equação (1):

$$Cpk = \min \left[ \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma}, \frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma} \right] \quad (1)$$

Onde:

USL: Limite de especificação superior

LSL: Limite de especificação inferior

$\bar{x}$ : Média

$\sigma$ : Desvio padrão

De acordo com Goswami e Dutta (2013) a utilização dessa definição para índice de capacidade do processo em relação aos conceitos de capacidade do processo propostos anteriormente leva em relação o quanto um processo está operando de forma centralizada com as especificações

Em virtude do objeto de interesse do presente trabalho ser a calibração de ajuste de abertura da válvula de segurança de vasos de pressão evitando assim condições de sobrepressão, é de fundamental importância levar em consideração a distância da distribuição de pressões em relação aos limites de especificação (particularmente seu limite de especificação superior). Dessa forma o índice de capacidade a ser utilizado do decorrer da dissertação será o Cpk.

O Cpk, portanto, correlaciona o intervalo da especificação do produto, em relação à especificação do processo, sendo desejado, portanto, que o indicador apresente um valor maior que a unidade.

Conforme Montgomery (2009), os valores recomendados para avaliação da capacidade de um processo estão apresentados na Tabela 3

Tabela 3 - Valores mínimos recomendados para Cpk

Característica do processo	Especificações bilaterais	Especificações unilaterais
Processos existentes	1,33	1,25
Novos processos	1,50	1,45
Segurança, carga ou parâmetro crítico de processo existente	1,50	1,45
Segurança, carga ou parâmetro crítico de novo processo	1,67	1,60

Fonte: Adaptado de Montgomery (2009)

A utilização de conceitos probabilísticos em projetos é largamente adotada em projetos de engenharia civil, aeronaves e aplicações aeroespaciais, estando pesquisadores avaliando estes conceitos nos projetos dos vasos de pressão. (PRASHANT; GAUR, 2014)

Estudos avaliativos do processo de liberação segura de energia em sistema com fluidos líquidos foram realizados, por meio de simulações em condições de *shutdown*<sup>12</sup> em situações normais e emergenciais. (LU *et al.*, 2021)

Aspectos quanto à manutenção dos elementos finais de um sistema instrumentado de segurança (SIS) foram analisados e usados para determinação das estratégias de manutenção em termos de custo e probabilidade média de falha sob demanda. (ZHANG, A. *et al.*, 2020). Estes SIS também foram pesquisados quando

<sup>12</sup> Desligamento, em tradução livre do inglês.

submetidos a condições prolongadas de demanda sob falha. (XIE; LUNDTEIGEN; LIU, Y., 2021).

Uma das novas tendências de análise e simulação é a utilização de gêmeos digitais e *data science*<sup>13</sup>, estando estudos sendo realizados por inúmeros autores, nas mais variadas aplicações. (KOBAYASHI; ALAM, 2024) (GORGOGIANNI *et al.*, 2023) (NITZLER *et al.*, 2022) (AYENSA-JIMÉNEZ *et al.*, 2019).

A utilização dos indicadores Cp e Cpk para fins de análise da capacidade de processos é amplamente utilizada, por representar uma ferramenta numérica que permite verificar se o processo está operando dentro das especificações desejadas. (OLIVEIRA *et al.*, 2011) (MAHAPATRA, 2020) (KASHIF *et al.*, 2023) (SEENIVASAN *et al.*, 2024) (WU; PEARN; KOTZ, 2009) (LIU, S. W.; WU; TSAI, 2021)

O valor usualmente utilizado na avaliação do Cpk como um processo capaz é 1,33 ou 1,67, a depender da exigência em virtude da confiabilidade requerida visando garantir a adequação da condição do processo em termos dos limites da especificação pré definidos. Em processos da área de saúde, caracterizados pelo elevado rigor de capacidade do processo necessário, aplicam-se, geralmente, o maior valor (1,67). (RAMOS, 2007) (HREHOVA, 2016) (GONÇALEZ; WERNER, 2009) (SIMION, 2021) (ARZAK *et al.*, 2020) (WOOLURU; SWAMY; NAGESH, 2014)

Um dos conceitos fundamentais da ciência de dados e estatística ao se avaliar um conjunto de dados é a análise exploratória de dados, EDA (*Exploratory Data Analysis*, em tradução livre). Shaik et al. (2025) discorre que o objetivo primário da análise exploratória de dados é a identificação de padrões, correlações e anomalias em um conjunto de dados que possa ser usado para influenciar procedimentos analíticos e tomada de decisões.

Dessa forma, consistem em etapas da análise exploratória de dados que serão utilizadas no decorrer do trabalho a avaliação da distribuição dos dados, a seleção e avaliação de parâmetros estatísticos, bem como a criação de gráficos e histogramas.

A análise exploratória de dados, então, será utilizada como uma ferramenta objetivando a visualização dos dados, obtenção de resumos estatísticos que serão incorporados na metodologia, e obtenção dos perfis de distribuição das pressões médias de operação.

---

<sup>13</sup> Ciência de dados, em tradução livre do inglês.

Durante o processo de análise exploratória dos dados, também foi constatada a necessidade de avaliar como o conjunto de dados será tratado para garantir o atendimento a questões específicas da amostragem, tais como:

- (a) Necessidade de manter a confidencialidade de informações: Como o presente trabalho se propõe a trabalhar com dados reais da indústria do óleo e gás, houve a necessidade de tratamento dos dados de forma a garantir o sigilo de informações;
- (b) Necessidade de flexibilidade da metodologia com equipamentos distintos: Com o objetivo de se propor uma metodologia flexível, os equipamentos avaliados possuem uma grande variabilidade em termos de classificação de fluido contido, pressões de operação e volume do equipamento. O método escolhido precisa permitir a comparação dos equipamentos apesar das suas distinções.
- (c) Facilidade de visualização e interpretação do perfil de pressões: É necessário que o método de pré-processamento permita fácil interpretação dos perfis de pressão, como por exemplo a presença de pressões negativas.

Dessa forma, foram avaliados procedimentos de pré-processamento de dados objetivando o cumprimento dos requisitos. Entre as técnicas avaliadas estão procedimentos de normalização de dados, escalonamento de variáveis (*feature scaling*, em tradução livre) e perturbação de dados (*data perturbation*, em tradução livre).

O Quadro 6 a seguir faz um comparativo entre os métodos. (JAIN; BHANDARE, 2013) (SURENDRA KUMAR REDDY KODURU, 2022) (KUMARSINGH; VERMA; S. THOKE, 2015).

Quadro 6 - Métodos de normalização de variáveis

Método	Fórmula matemática	Comentário
Normalização Z-Score	$X_{norm} = \frac{X - \bar{x}}{\sigma}$	Faz com que a média seja 0 e desvio padrão seja 1.  Não atende o requisito (c) uma vez que não é possível discernir de maneira rápida regiões de pressões nulas
Escalonamento Min-Máx	$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$	Desloca os dados de forma que todos os registros fiquem entre 0 e 1.  Não atende os requisitos (b) e (c) uma vez que cada equipamento terá uma pressão média normalizada diferente, dificultando a comparação, e não permite facilmente discernir valores negativos de pressões
Escalonamento Máx Absoluto	$X_{norm} = \frac{X}{ X_{max} }$	Escalona os gráficos de forma que o valor de pressão máxima seja 1.  Não atende ao requisito (b), uma vez que cada equipamento terá uma pressão média diferente, dificultando a comparação
Centralização	$X_{norm} = X - \bar{x}$	Faz a média dos dados ser zero.  Não cumpre o requisito (a), uma vez que pontos de pressão nula serão deslocados para o valor $-\bar{x}$ , não garantido sigilo de informações.
Normalização pela média	$X_{norm} = \frac{X}{\bar{x}}$	Desloca a pressão média normalizada para 1.  Atende aos critérios definidos.

Fonte: autor (2025)

Onde:

 $X_{norm}$ : Variável normalizada $X$ : Variável $X_{min}$ : Menor valor registrado da variável $X_{máx}$ : Maior valor registrado da variável $\bar{x}$ : Média $\sigma$ : Desvio padrão

Outra aplicação fundamental da análise exploratória de dados será na visualização de tratamento dos dados classificados como *outliers*. Kim et al. (2022) define *outlier* como uma observação que se desvia das demais, que são geradas por um mecanismo diferente do mecanismo de interesse. Audibert et al. (2022) faz a equivalência dos termos *outlier* e anomalia, e faz a sua distinção de tipos para o contexto de séries temporais, da seguinte forma:

- (a) Anomalias pontuais: Corresponde a um ponto de registro que difere do resto do conjunto de dados, sendo o tipo mais simples.
- (b) Anomalias contextuais: Corresponde a um registro de dados que pode ser classificado como normal ou anômalo a depender do contexto em que é analisado
- (c) Anomalias coletivas: Corresponde a um conjunto de registros que, ao aparecerem juntos representam uma anomalia, porém a aparição individual poderia não caracterizar uma anomalia.

Ao se observar a operação de um equipamento pressurizado durante um intervalo de 10 anos, seria normal esperar que este equipamento fosse submetido a paradas para despressurização e manutenção. Porém analisando o contexto em que se busca avaliar os dados para obtenção do perfil da pressão de operação durante a campanha normal do equipamento, os momentos de despressurização proposital serão considerados *outliers*. Levando esse fator em consideração, os dados coletados próximos aos valores de pressão nula (equipamento despressurizado) serão considerados *outliers* (anomalias) contextuais, e, portanto, serão retiradas do conjunto de dados.

Para a determinação da pressão máxima de operação dos vasos de pressão (SOUSA, DE, 2025) utilizou como critério para excluir os *outliers* que não correspondem à condição normal de operação os valores para o qual a pressão de operação é igual ou menor que metade da média aritmética dos dados sob análise.

O uso deste critério deveu-se às características intrínsecas dos processos nos quais os vasos de pressão são utilizados. SOUSA (2025), definiu cinco classes de perfil de operação (Quadro 7), tendo cada uma destas classes aspectos específicos em termos operacionais, de esforços mecânicos e estatísticos.

Especificamente em relação aos vasos de pressão que apresentam o perfil de pressão classe A (Quadro 7), observa-se que há duas condições da pressão de operação:

- (a) pressão de operação razoavelmente constante, com duração longa, tendo variações decorrentes de fatores normais, ou de causas especiais; ou,
- (b) pressão de operação com valor zero (ou bem próximo deste valor), de breve duração (em relação à condição da pressão de operação razoavelmente constante), decorrente dos eventos em que o equipamento foi retirado da operação.

Sendo assim, para estes vasos de pressão com perfil de operação classe A (Quadro 7), constata-se que há um intervalo entre as condições (a) e (b) acima indicadas, para o qual há baixa densidade de eventos operacionais.

Desta forma, com o objetivo de segregar estas duas citadas condições, e de forma original, SOUSA (2025), definiu que o valor que corresponde à metade da pressão média de operação, pode ser utilizado como critério para separação entre estas duas condições, sendo este critério adequando tanto em termos operacionais, dos esforços mecânicos presentes, e, principalmente, nos aspectos estatísticos.

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

(continua)

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

Fonte: (SOUSA *et al.*, 2025)

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

(conclusão)

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

Fonte: (SOUSA *et al.*, 2025)

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 VÁLVULA DE SEGURANÇA

Considerando as características do tema associado a esta dissertação, foram realizadas pesquisas na plataforma *online* da *ScienceDirect*<sup>14</sup>, objetivando identificar e interpretar os artigos publicados nos cinco anos mais recentes (2020 a 2025).

Para tanto, conforme indicam os Quadro 8 e Quadro 9, foram parametrizadas palavras-chave, além da indicação dos anos de interesse, áreas do conhecimento aplicáveis, bem como o tipo de documento (artigos).

Quadro 8 - Parâmetros da pesquisa bibliográfica da primeira palavra-chave

PARÂMETRO DE PESQUISA	QUANTIDADE DE RESULTADOS OBTIDOS
Palavras-chave " <i>Pressure Safety Valve</i> "	753
Anos (2020 até 2025)	271
Documentos tipo <i>Review articles</i> ou <i>Research articles</i>	162
Áreas <i>Engineering</i> e <i>Energy</i>	127
Título da publicação <i>Process Safety and Environmental Protection;</i> <i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries;</i> <i>Reliability Engineering &amp; System Safety;</i> <i>Energy;</i> <i>Engineering Failure Analysis;</i> <i>Journal of Energy Storage;</i> <i>International Journal of Pressure Vessels and Piping.</i>	62
Artigos cujo conteúdo é adequado ao tema da dissertação.	13

Fonte: autor (2025)

<sup>14</sup> Ferramenta de pesquisa editada pela Elsevier. Pesquisa realizada de 23/03 a 30/03/2025.

A quantidade de documentos publicados, relacionados à segurança e confiabilidade, foi descrita por meio de uma revisão bibliométrica por Tamascelli (2024), tendo como perspectiva a utilização de *machine learning*<sup>15</sup>, constatado que um rápido crescimento de pesquisas nesta área, com potencial de futuro desenvolvimento na utilização de dados de processo nas ações que objetivem o aumento da segurança operacional. (STEFANA; RAMOS; PALTRINIERI, 2024)

Behie *et al.* (2020) efetuou levantamento dos acidentes associados às maiores perdas, ocorridos nos Estados Unidos, no período de 1978 até 2017, em várias áreas do ramo petroquímico e do petróleo-gás, tendo constatada uma redução na quantidade dos eventos, ao mesmo tempo em que parece ter sido atingido um platô, indicando que ações dos programas de gerenciamento da segurança de processo precisam ser fortalecidas e revitalizadas.

Uma avaliação da importância da busca da garantia da segurança do processo, associando às condições dinâmicas da operação é discutida por Sun *et al.* (2021), tendo os autores sugerido que visão falha/confiabilidade pela perspectiva da verificação da resiliência do desempenho das barreiras de segurança.

A proposta apresentada por Park *et al.* (2020) discute os aspectos a serem considerados durante a etapa de desenvolvimento do projeto do processo, notadamente em termos da *Inherently Safer Design (ISD)*<sup>16</sup> aponta a importância da utilização de sistemas ativos que atuem decorrente da condição momentânea do risco, com a devida detecção e iniciação da ação de proteção.

Também foi realizado estudos por Aghazadeh *et al.* (2024) que utilizou dados de processo para a avaliação da confiabilidade operacional, associado a aspectos e princípios estatísticos de tempo médio para falhar (cuja sigla em inglês é MTTF<sup>17</sup>)

Javid (2025) ressalta o compromisso que as empresas atuais se defrontam quanto à busca da segurança, e as restrições orçamentárias, indicando que os aspectos quanto ao desperdício da energia acumulada (pressão e/ou temperatura), assim como o indesejado descarte de insumos e/ou produtos. O autor propõe um modelo matemático, na condição de biobjetivo, seguindo o conceito do RBI<sup>18</sup> (*Risk-Based Inspection*).

---

<sup>15</sup> Aprendizado por máquina, em tradução livre.

<sup>16</sup> Projeto inerentemente seguro, em tradução livre. Corresponde à concepção que atua na eliminação dos perigos, em vez de controlá-lo, por meio da redução da quantidade de materiais perigosos.

<sup>17</sup> *Mean Time To Failure*.

<sup>18</sup> Inspeção baseado no risco, em tradução livre.

Ainda no aspecto referente à liberação de fluido inflamável decorrente de vazamentos e explosão, Li *et al.* (2025) utilizou ferramentas probabilísticas (simulação de Monte Carlo<sup>19</sup>).

Zong *et al.* (2022) realizou estudos experimentais e numéricos, analisando a interação fluido-estrutura de um sistema vaso de pressão-tubulação-válvula de segurança, tendo constatado a relevância da pressão de ajuste da PSV e da rigidez da mola, em termos do comportamento dinâmico da PSV.

Zhu *et al.* (2020) discute as oportunidades de melhora e desafios, referentes às condições de ocorrência de eventos emergenciais de *shutdown*<sup>20</sup>, apontando a existência de dois pontos de vista quanto à origem: operacional ou organizacional, sendo um dos cenários identificado pelos autores associados à sobrepressão, com potencial dano à integridade mecânica de válvulas, instalações, tubos, dentre outros itens.

Na tendência, cada vez mais presente na utilização de monitoramento contínuo dos processos, foi observado que as plantas industriais que utilizam os dados deste monitoramento como parâmetros para a definição do plano de manutenção, baseando na condição, passaram a aplicar um maior intervalo entre as atividades de manutenção, com conseqüente potencial ganho financeiro e operacional. (ABBASINEJAD; HOURFAR; ELKAMEL, 2021).

No mesmo prisma em termos da utilização do banco de dados para fins de avaliação das condições de segurança do processo, Singh *et al.* (2022). Por meio de um estudo de caso, tendo como objeto o sistema de segurança de uma empresa inglesa, os autores inspecionaram as causas e conseqüências em cenários de potenciais falhas/acidentes nas operações, identificando a importância dos dispositivos de proteção contra sobrepressão, para a garantia da integridade mecânica dos vasos de pressão.

O efeito no comprometimento da capacidade de atuação as barreiras de segurança, em termos da degradação decorrente do tempo foi pesquisado por Marchetti *et al.* (2024), sendo realizado um estudo de caso em uma planta química.

---

<sup>19</sup> Modelo estatístico baseado em grande quantidade de amostras aleatórias, que são usadas para obtenção de resultados numéricos.

<sup>20</sup> Desligamento e/ou parada inesperada de um equipamento, unidade ou instalação industrial, em tradução livre.

### 3.2 CAPABILIDADE DO PROCESSO - Cpk

Quadro 9 - Parâmetros da pesquisa bibliográfica da segunda palavra-chave

PARÂMETRO DE PESQUISA	QUANTIDADE DE RESULTADOS OBTIDOS
Palavras-chave “Cpk process capability index”	18
Anos (2020 até 2025)	6
Documentos tipo <i>Review articles</i> ou <i>Research articles</i>	5
Áreas <i>Materials Science</i> e <i>Decision Sciences</i>	4
Artigos cujo conteúdo é adequado ao tema da dissertação.	3

Fonte: autor (2025)

Percebe-se a reduzida publicação referentes à palavra-chave “Cpk process capability index”, mesmo este tema sendo amplamente utilizado na avaliação da capacidade de um dado processo atender às especificações exigidas ao produto.

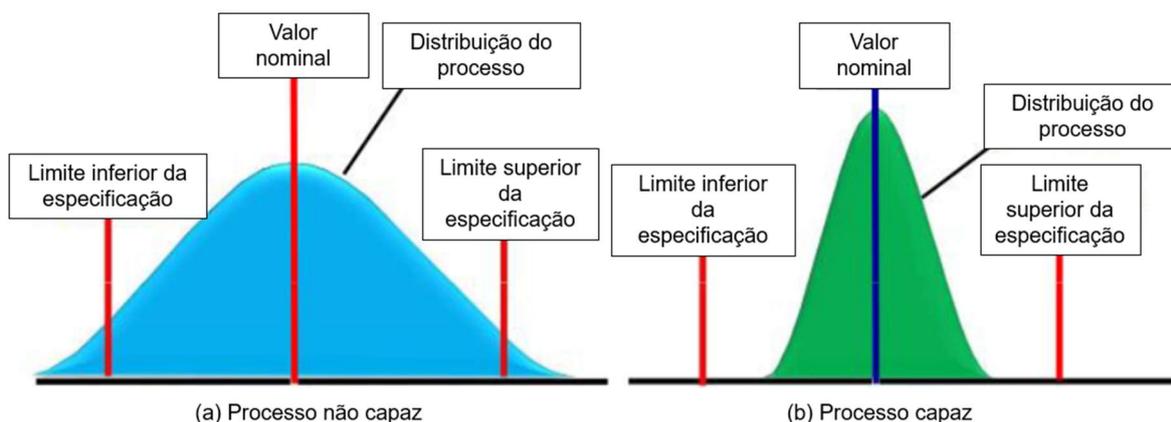
Guleria *et al.* (2021) reporta os resultados obtidos na eliminação de desperdícios na linha de fabricação de engrenagens, através da redução da variabilidade do processo. Também, sendo que aplicado a uma fábrica de mancais, Kulkarni *et al.* (2023) utilizou o indicador Cpk para avaliação da capacidade do processo.

O indicador Cpk foi utilizado por Song *et al.* (2024) na avaliação da capacidade do processo de fabricação de placas de circuito impresso, tendo os autores adotado no trabalho o parâmetro  $Cpk > 1$  como sendo a condição de aceitação do processo, para fins de atendimento às especificações do produto.

O trabalho de Franklin e Wasserman (1991) define os valores adequados de Cpk a serem considerados para fins da avaliação quantitativa quanto à capacidade do processo.

Na Figura 14 estão apresentadas duas condições do processo: (a) processo não capaz, no qual há ocorrência de produtos que possuem características que não atendem os limites da especificação; (b) processo capaz, cujos produtos atendem às especificações.

Figura 14 - Representação da distribuição de processo



Fonte: Adaptado de (MAHAPATRA *et al.*, 2020)

### 3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS VASOS QUANTO AO PERFIL DA PRESSÃO DE OPERAÇÃO

A imensa variação de tipos de processos industriais resulta em condições diferentes da pressão de operação, o que pode dificultar a determinação de uma sistemática de análise do perfil desta variável.

Com o objetivo de metodizar estudos que considerem a grandeza pressão (SOUSA *et al.*, 2025) propôs cinco classes do perfil da pressão de operação, associando cada uma delas às principais características em termos dos seguintes aspectos:

- (a) Operacionais: conjuntura da aplicação da pressão e temperatura, em termos dos requisitos de processo;
- (b) Mecânico: considerando as condições das cargas mecânicas (pressão, temperatura);
- (c) Estatísticos: identificando os atributos estatísticos esperados, em termos da média, desvio padrão, e forma da curva de distribuição dos dados.

Nesta presente dissertação serão considerados os vasos de pressão enquadrados no critério da CLASSE A, pois são aqueles cuja presença nas aplicações industriais representa mais de 75% das ocorrências (Quadro 7).

### 3.4 OUTLIERS

Os *outliers* são valores que divergem significativamente dos demais dados de uma amostra. Desta forma, os *outliers* devem ser identificados, analisados e, na maioria das vezes, eliminado do conjunto de dados, de forma que a presença dos *outliers* não comprometa negativamente o estudo a ser realizado. Em termos da presença de *outliers* em processos industriais, (SOUSA ET AL., 2025) propõe a classificação indicada no Quadro 10.

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: (a) fora de operação; (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: (a) ser identificados; (b) ser verificados se a ocorrência se deve a causa especial; (c) ser descartados da análise, caso sejam originados de causa especial; (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: (SOUSA *et al.*, 2025)

## 4. METODOLOGIA

Para atender os objetivos propostos, foi elaborada uma metodologia de pesquisa e aplicação da mesma em 2 unidades industriais distintas, sendo:

- (I) A unidade 01 correspondente a um empreendimento petroquímico;
- (II) A unidade 02 refere-se a uma planta de refino de petróleo.

Para tanto, foram coletados dados de pressão de operação (em kgf/cm<sup>2</sup>) de 20 vasos de pressão, sendo 10 equipamentos para cada unidade. Para a unidade 1, mais nova, foram selecionados vasos com pelo menos 1 ano de dados diários, coletados a cada hora. Para a unidade 2 o critério tomado foi pelo menos 10 anos de dados tomados a cada hora. Para melhor avaliação da abrangência da metodologia, em ambas unidades se buscou vasos com diversas aplicações, em termos do fluido armazenado, pressão e temperatura de operação. A coleta desses dados se deu a partir de um sistema automatizado, consistindo de sensores, conversores, transmissores e sistema de armazenamento das grandezas.

Os processos industriais ocorrem sob vários parâmetros operacionais, por exemplo: pressão, temperatura, concentração, nível, etc. Para fins deste trabalho a pressão será a variável considerada. Destaca-se que a temperatura é uma grandeza que apresenta uma variação em relação ao tempo menor que a pressão, por isso não é a mais indicada para fins de determinação da pressão de ajuste. Todavia, no projeto da PSV, a temperatura é um dos fatores a ser considerados quando da determinação dimensional da área de passagem do fluido.

As medições de pressão são realizadas em um intervalo fixo de tempo para cada equipamento, podendo apresentar alguma variação a depender do conjunto de medição e equipamento.

Os dados coletados corresponderam a dois intervalos de amostragem:

- (i) 10 equipamentos por um período de 1 ano, instalados na unidade 01.
- (ii) 10 equipamentos por um intervalo de 10 anos, instalados na unidade 02.

A obtenção dos dados procedeu-se na condição real de operação dos equipamentos, o que significa que estão inclusos no conjunto de dados medições realizadas durante eventuais flutuações de operação e paradas para manutenção dos vasos, possibilitando, assim, a representação efetiva de eventos que efetivamente ocorrem nos processos produtivos industriais.

Para a realização da análise exploratória dos dados, foi escolhido o desenvolvimento do código em *Python*, utilizando a IDE (*Integrated Development Environment*, Ambiente de Desenvolvimento Integrado, em tradução livre) do Google Colab. Essa escolha foi feita devido a maior flexibilidade apresentada para tratamento dos dados, uma vez que o código é salvo na nuvem associada ao usuário, permitindo alterações em tempo real, independentemente da localização do usuário. Além disso, a diversidade de bibliotecas específicas para análise dos dados e criação de gráficos, tais como *pandas*, *NumPy*, *Plotly* e *Seaborn*, faz do *Python* uma excelente escolha para a avaliação dos dados.

Com a finalidade de preservar a condição de confidencialidade dos dados, os mesmos foram normalizados pela média, o que permitiu a avaliação integral dos parâmetros estatísticos do processo, permitindo, também, a comparação entre equipamentos que possuam condições operacionais diferentes, bem como, com as demais plantas industriais existentes, permitindo a aplicação da metodologia nos diversos empreendimentos que possuem válvulas de segurança.

Optou-se então pelo método de normalização pela média, conforme já apresentado no Capítulo 2, e detalhado no Quadro 6. Dessa forma, todos os equipamentos apresentarão pressão média de operação normalizada igual a 1, de forma que a comparação entre variações de registros de pressões para cada equipamento são feitas de forma simples. Além disso, permite a visualização e comparativo de pressões mínima, máximas e pressão de ajuste da PSV em percentuais da pressão média de operação.

Em sequência, foi avaliada a aderência dos dados em relação à condição de operação regular do vaso. Para corrigir discrepâncias em virtude de processos de despressurização do vaso para manutenção, sendo excluídos aqueles que sejam menores que 50% da média aritmética calculada (*outliers* tipo 1), pois estes valores não correspondem à condição normal de operação, conforme proposto por (SOUSA, DE, 2025). Em seguida deu-se início a avaliação da pressão de abertura da válvula de segurança.

Tendo como base a literatura abordada, um processo pode ser considerado capaz caso o índice Cpk seja maior ou igual a 1,33. É proposto então, a realização do processo de engenharia reversa. Partindo da premissa de que o equipamento exerce sua função de forma capaz, será encontrado o valor da pressão de abertura da válvula de segurança ao se fixar o valor de Cpk.

Serão fixados três valores para Cpk em ordem crescente de conservadorismo, sendo eles 1,33; 1,66 e 2,00. Considerando que a função da válvula de segurança é a sua abertura em caso de sobrepressão, a pressão definida como *set point* da PSV será o limite de especificação superior, e, portanto, o limite inferior não será considerado.

De forma resumida, para a elaboração da metodologia de pesquisa, as seguintes etapas foram realizadas:

1. Revisão bibliográfica/bibliométrica da literatura sobre a aplicação do índice Cpk;
2. Coleta dos dados brutos de 20 vasos de pressão: limpeza inicial da planilha e conversão para a extensão csv;
3. Importação para ambiente Python via Google Colab: criação de *dataframe* e correção de tipos de variáveis de *object* para *datetime64* e *float*;
4. Pré-processamento e análise exploratória de dados: Retirada de valores nulos do *dataframe*, obtenção da pressão média de operação, normalização de dados pela pressão média, obtenção de desvio padrão, moda e mediana;
5. Identificação e retirada de *outliers* tipo 1;
6. Definição dos parâmetros para determinação do valor de abertura da PSV;
7. Elaboração de gráficos;
8. Obtenção e discussão de resultados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados correspondentes aos vinte vasos de pressão, sendo dez de cada unidade.

Sendo assim, a partir dos dados coletados foram criados gráficos do tipo série histórica, com o objetivo de visualizar os perfis de pressão de operação do processo, e também foram elaborados histogramas para acompanhamento das frequências de registro das pressões, a fim de se observar a presença de uma tendência de distribuição das pressões de operação.

Por se tratarem de equipamentos presentes na indústria do óleo e gás, esses equipamentos possuem em seu interior fluídos de diferentes classificações perante a NR-13, sendo em alguns casos exigida a presença de redundância de vasos similares por questões de segurança e em atendimento a norma.

Dessa forma, para os equipamentos que possuam o mesmo tipo de fluido pressurizado em seu interior os comentários serão agrupados visto que serão esperados resultados similares, apesar das particularidades de cada vaso no que diz respeito a sua integridade estrutural e presença de descontinuidades.

Em continuidade, foi realizado um comparativo entre a pressão de ajuste da PSV utilizada em campo e a obtida através da metodologia proposta.

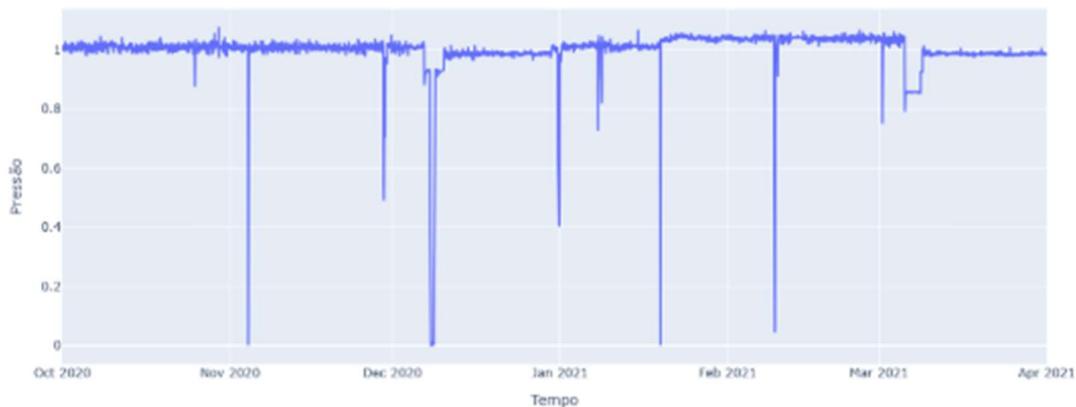
É importante destacar, que no processo de coleta dos prontuários dos vasos de pressão, as informações relativas à pressão de ajuste da PSV utilizada em campo não foram disponibilizadas, sendo esses casos indicados nos posteriormente nos comentários.

No final da seção, uma tabela irá consolidar os principais dados obtidos, sendo procedida uma análise qualitativa-quantitativa comparativa.

Para fins de consistência, simplificação e robustez da análise, os equipamentos da mesma unidade que apresentam comportamentos similares estão agrupados entre si, em um mesmo tópico.

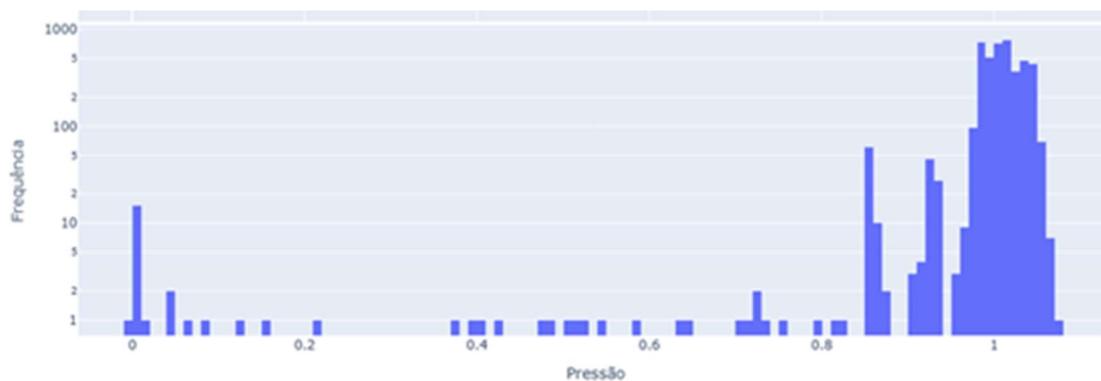
## 5.1 Equipamentos 01, 02 e 03, unidade 01

Figura 15 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 01, unidade 01



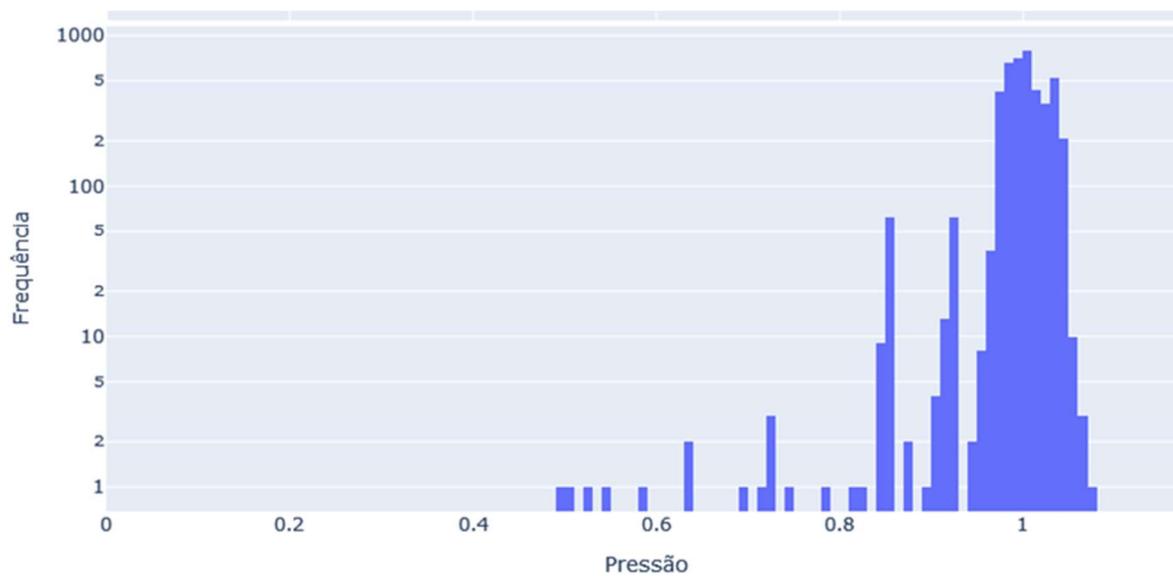
Fonte: Autor (2025)

Figura 16 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 01



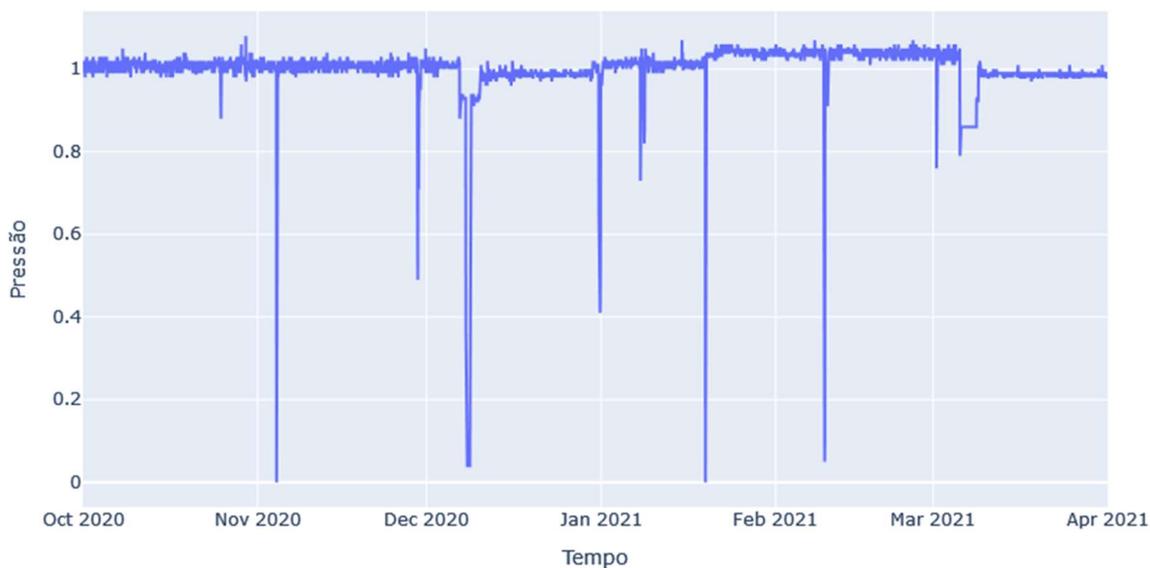
Fonte: Autor (2025)

Figura 17 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



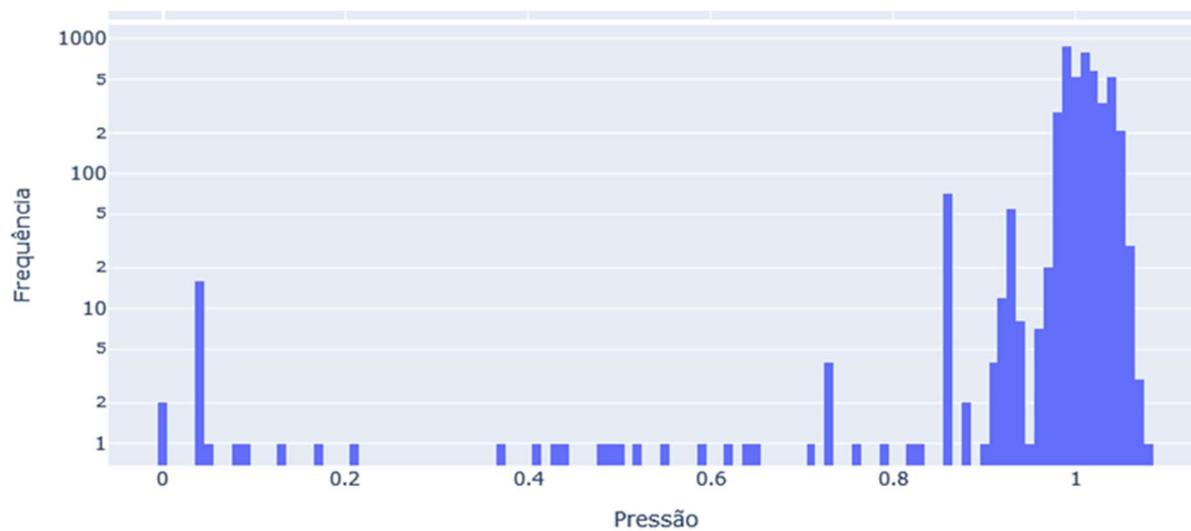
Fonte: Autor (2025)

Figura 18 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 02, unidade 01



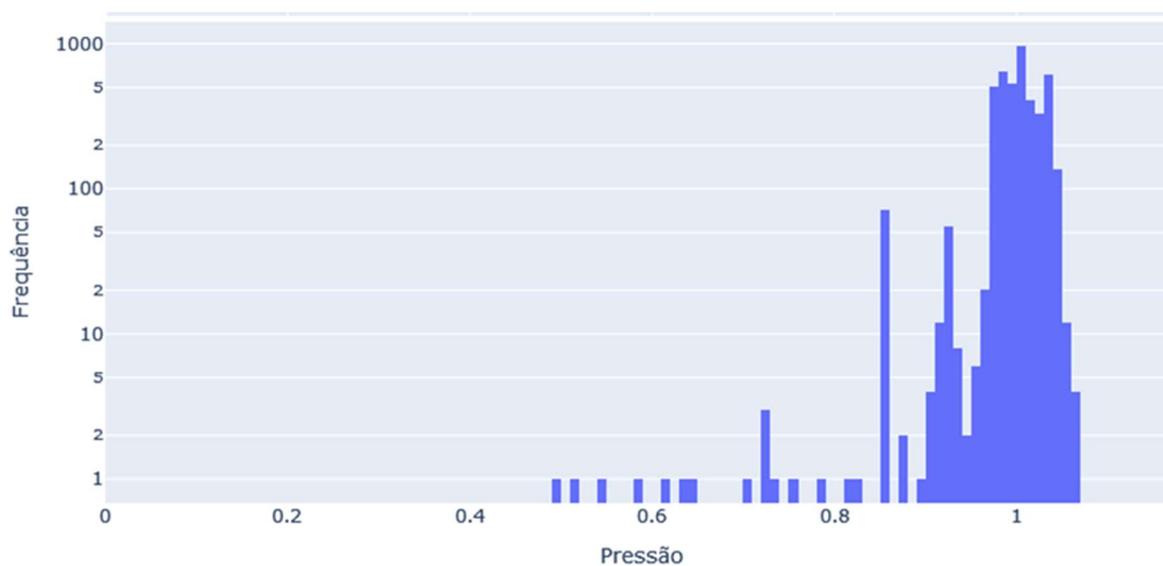
Fonte: Autor (2025)

Figura 19 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 01



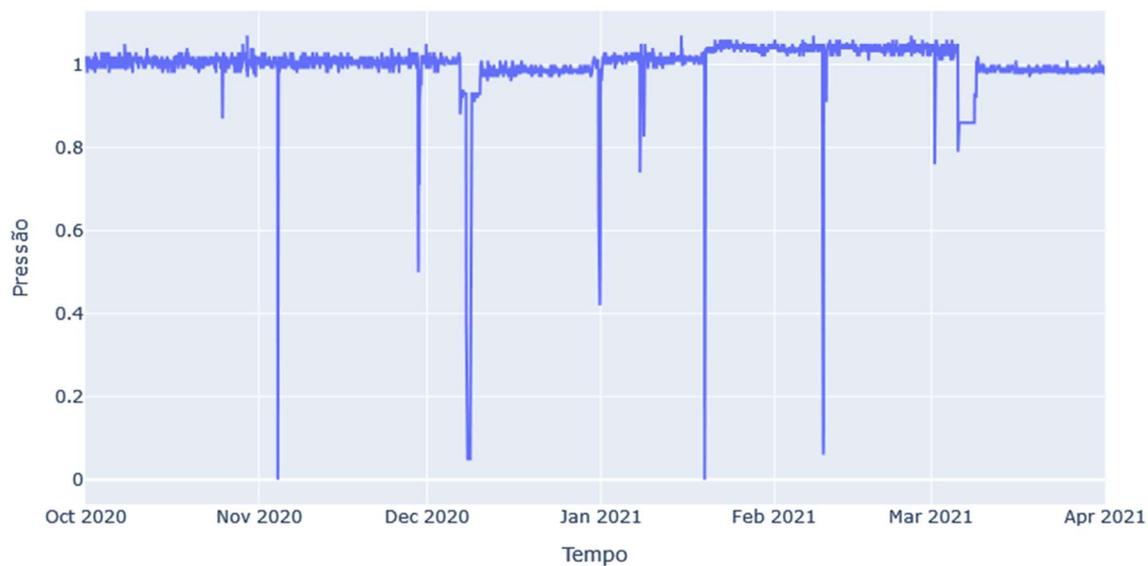
Fonte: Autor (2025)

Figura 20 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



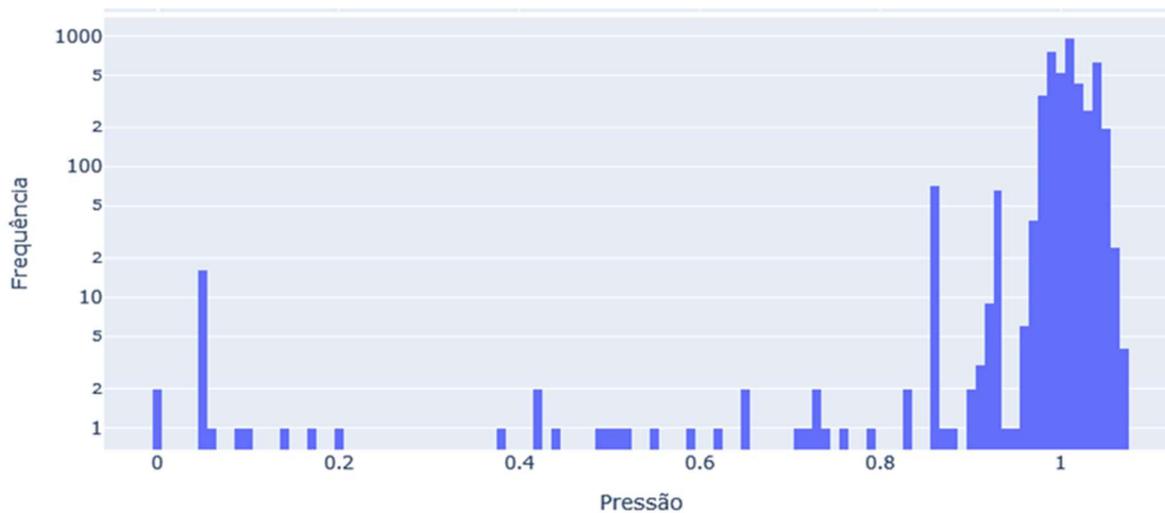
Fonte: Autor (2025)

Figura 21 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 03, unidade 01



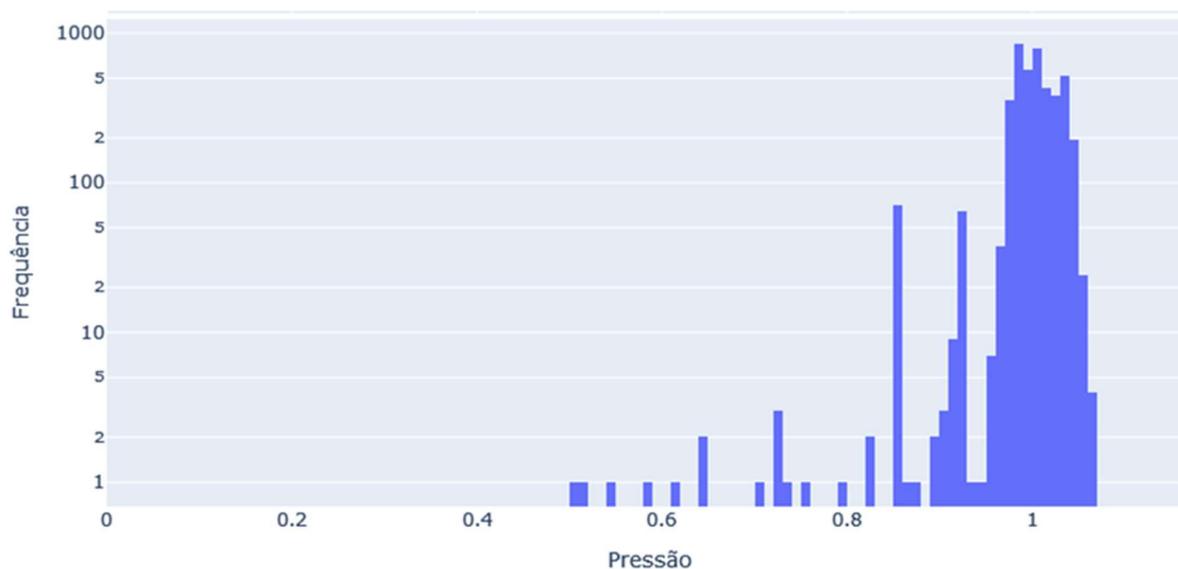
Fonte: Autor (2025)

Figura 22 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 23 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

Os equipamentos 01, 02 e 03 da unidade 1 armazenam fluidos de classe C conforme NR-13. Constata-se nas Figura 15, Figura 18 e Figura 21 que os equipamentos apresentam comportamento operacional com razoável estabilidade, com pouca flutuação de valores em torno da pressão média de operação. Isso é constatado ao observar os valores encontrados para o desvio padrão da amostragem de 0,08 que é um dos menores valores encontrados de forma geral. Observa-se regiões com queda repentina da pressão, porém com seu breve retorno a condição de pressão média. Essas ocorrências correspondem, muito provavelmente, a eventos em que houve uma parada da operação, resultando na despressurização do equipamento, seja por motivos de manutenção ou alguma intercorrência operacional.

De todo modo, tais registros não podem ser considerados como operação normal do equipamento, uma vez que tendem a puxar a média para baixo, e em consonância à metodologia proposta, nos casos em que esses valores fiquem abaixo de metade da pressão média de operação estes serão classificados como *outliers*, devendo ser excluídos da análise.

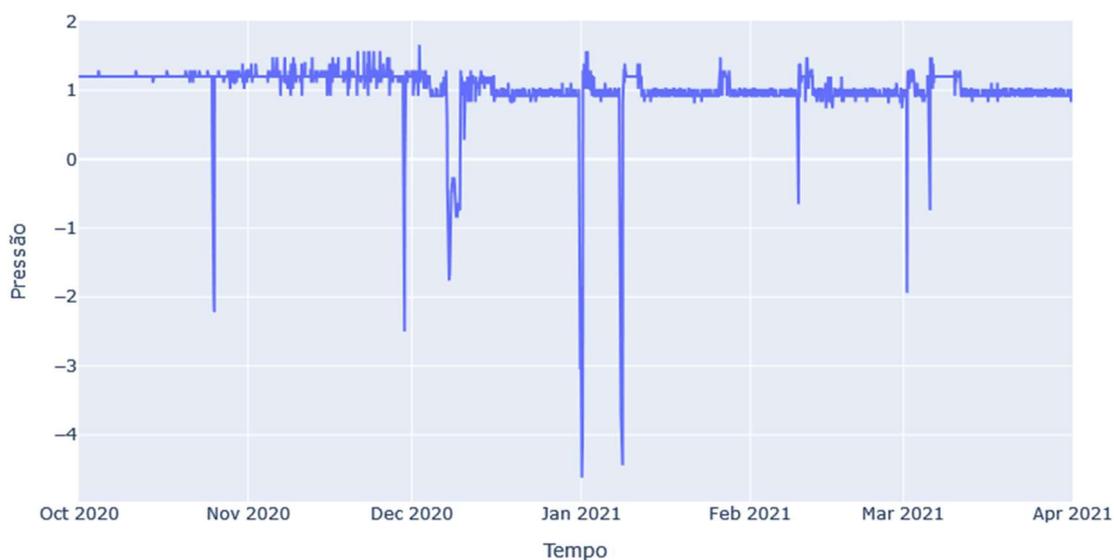
Os histogramas das Figura 16, Figura 19 e Figura 22 mostram a tendência de distribuição dos valores de pressão de operação, confirmando a distribuição de registros nas proximidades da média. A utilização da escala logarítmica também

permite a mais fácil visualização dos registros próximos ao valor nulo característico da despressurização, de forma que os histogramas demonstram uma tendência de distribuição multimodal.

A exclusão dos *outliers* conforme metodologia resulta nos histogramas das Figura 17, Figura 20 e Figura 23, de forma que é possível observar uma aproximação de distribuição normal das amostras. Isso é corroborado por uma redução de 50% no desvio padrão, passando este ao valor de 0,04 nos 3 equipamentos.

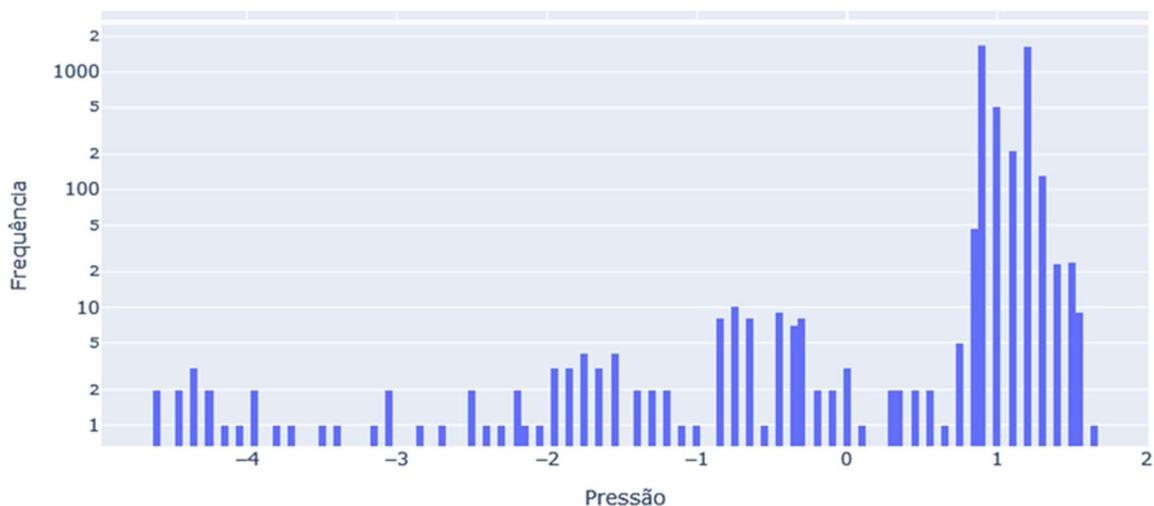
## 5.2 Equipamento 04, unidade 01

Figura 24 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 04, unidade 01



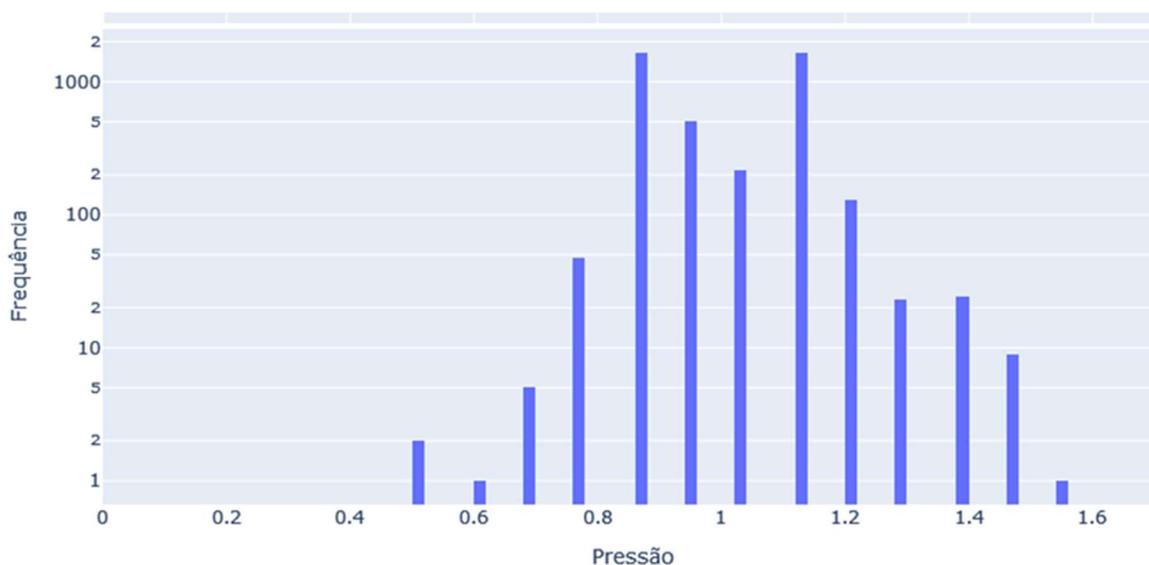
Fonte: Autor (2025)

Figura 25 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 26 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 01, após a eliminação dos outliers



Fonte: Autor (2025)

O equipamento 04 da unidade 1 também trabalha com fluido da classe C conforme classificação da NR-13, porém tem como característica pressão de

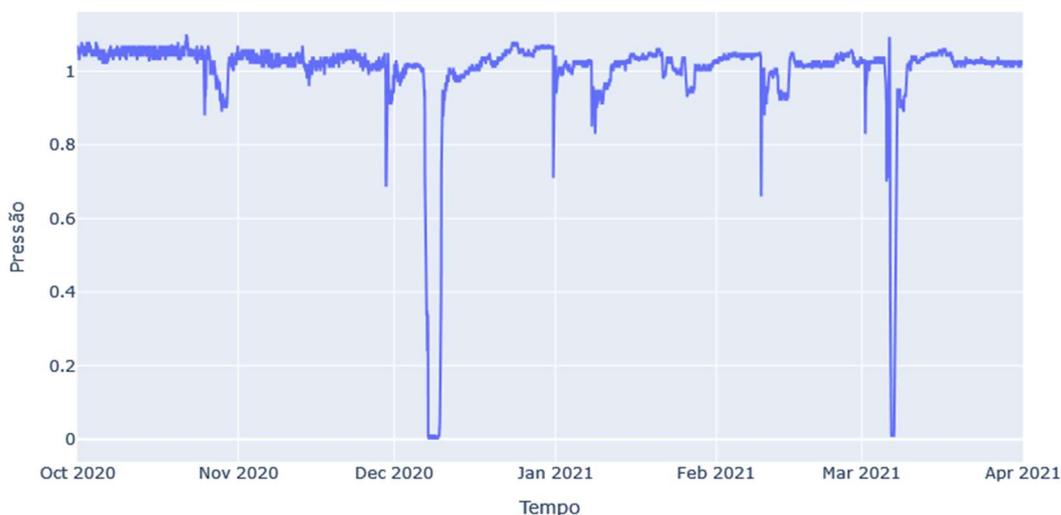
operação menor do que os três primeiros equipamentos avaliados. Percebe-se a partir da Figura 24 que esse equipamento tem seus primeiros registros pressões aproximadamente 20% maiores que a pressão média de operação ao final do ciclo de avaliação, apresentando uma pequena instabilidade e em sequência a estabilização na pressão média de operação, por volta da metade do mês de dezembro de 2020, com menor flutuação em torno da média. No histograma da Figura 25 é possível observar a frequência de distribuições das pressões, com destaque para os registros de pressões negativas de grande escala.

Já na Figura 26 verifica-se a concentração de dados nas regiões próximas a pressão média de operação, com moda registrada em 0.92. A grande quantidade de registros de pressões negativas também resultou em uma grande redução do desvio padrão, aproximadamente 73%, passando de 0,48 para 0,13.

Um aspecto da condição operacional que pode ser constatado na Figura 24 é a existência de eventos onde o equipamento 04 é submetido a pressões negativas, provavelmente decorrente de operações de eliminação de resíduos gasosos por meio da realização de vácuo. A finalidade desta operação é para atendimento de requisitos de acessibilidade ao interior do equipamento, para a realização de serviços de manutenção.

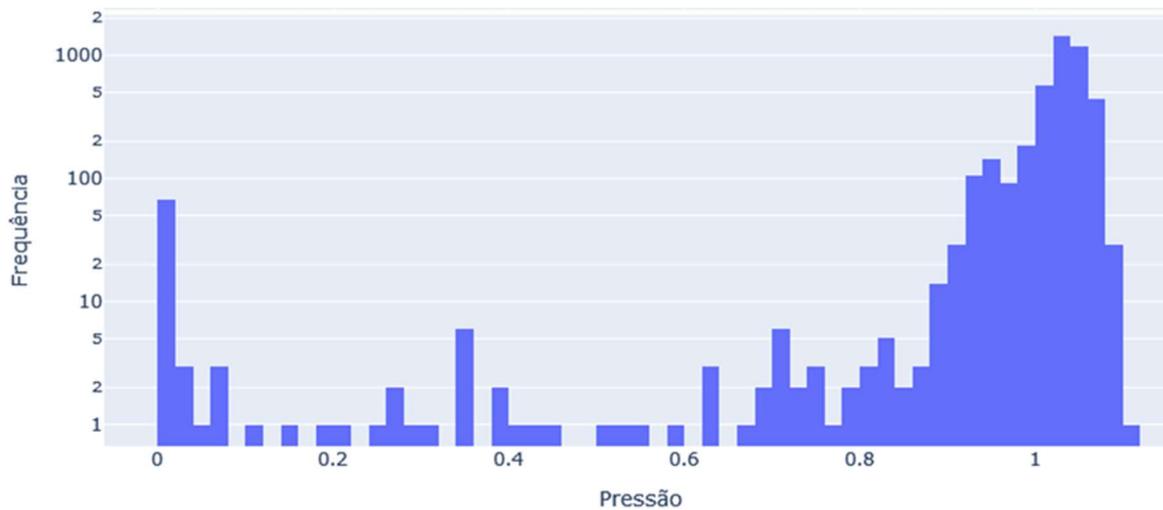
### 5.3 Equipamentos 05 e 06, unidade 01

Figura 27 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 05, unidade 01



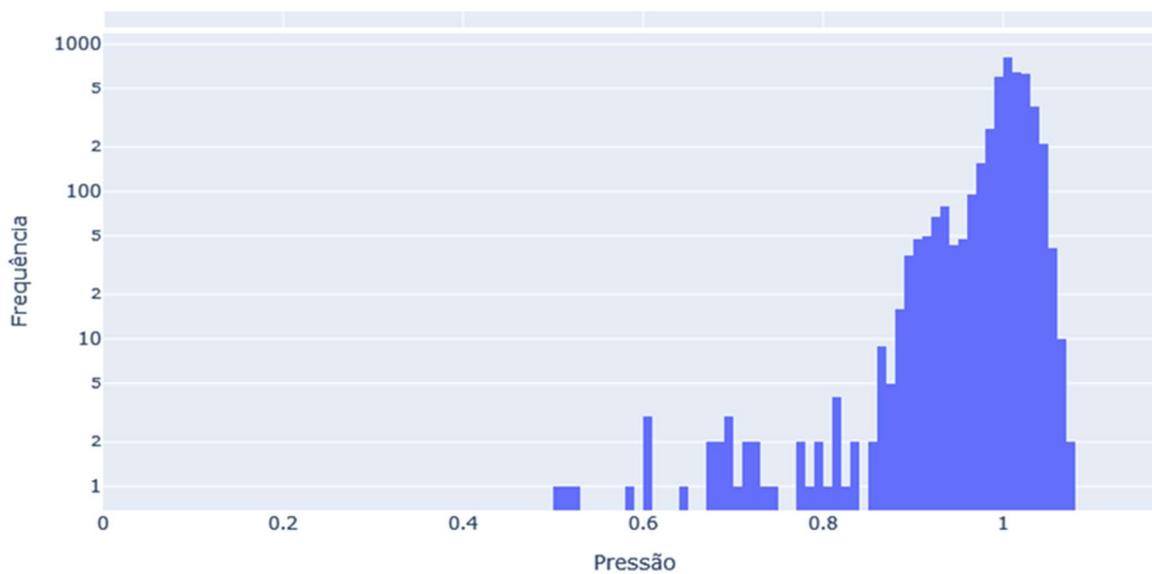
Fonte: Autor (2025)

Figura 28 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 01



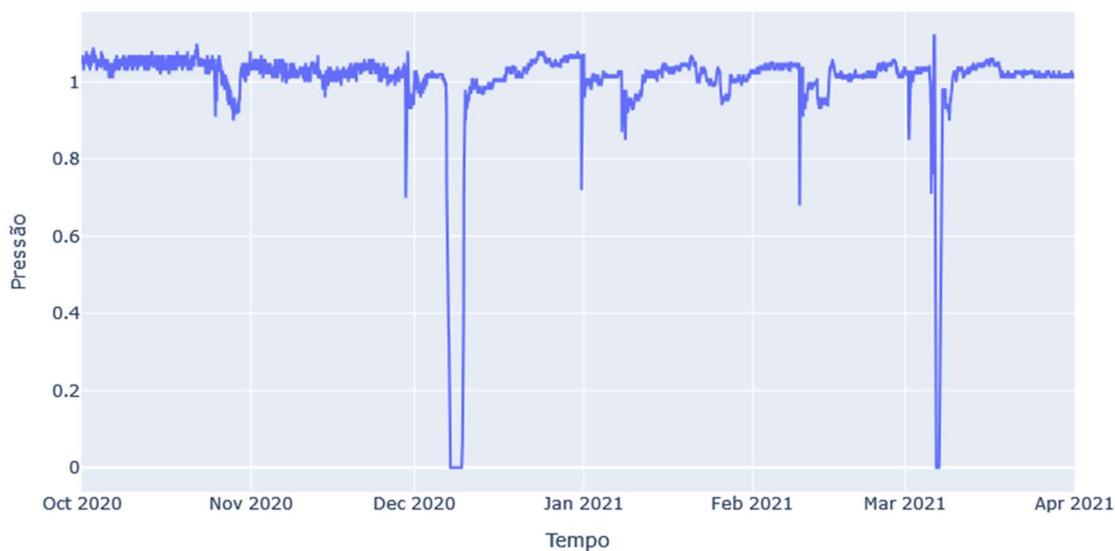
Fonte: Autor (2025)

Figura 29 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 01, após a eliminação dos outliers



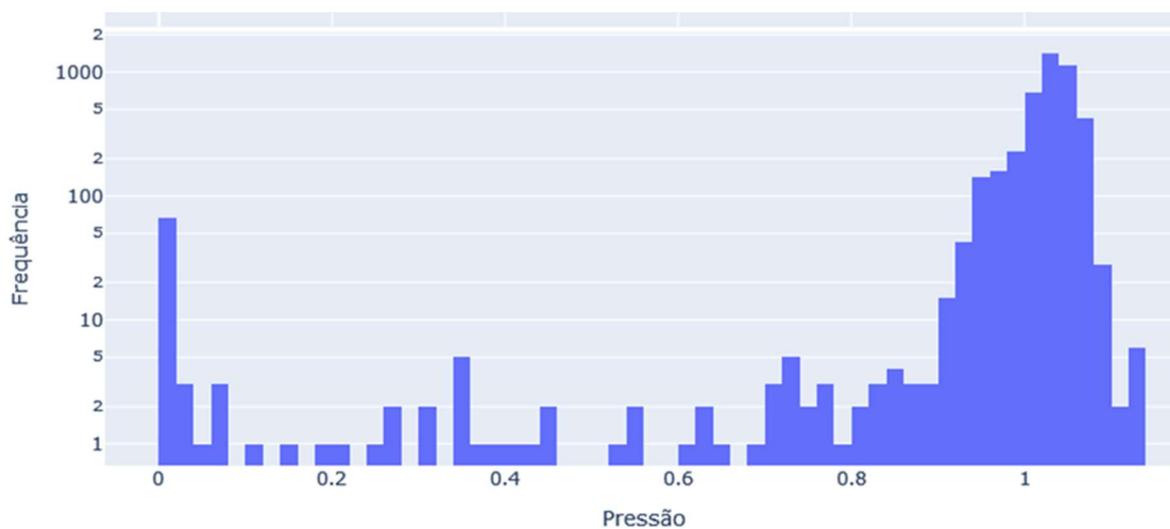
Fonte: Autor (2025)

Figura 30 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 06, unidade 01



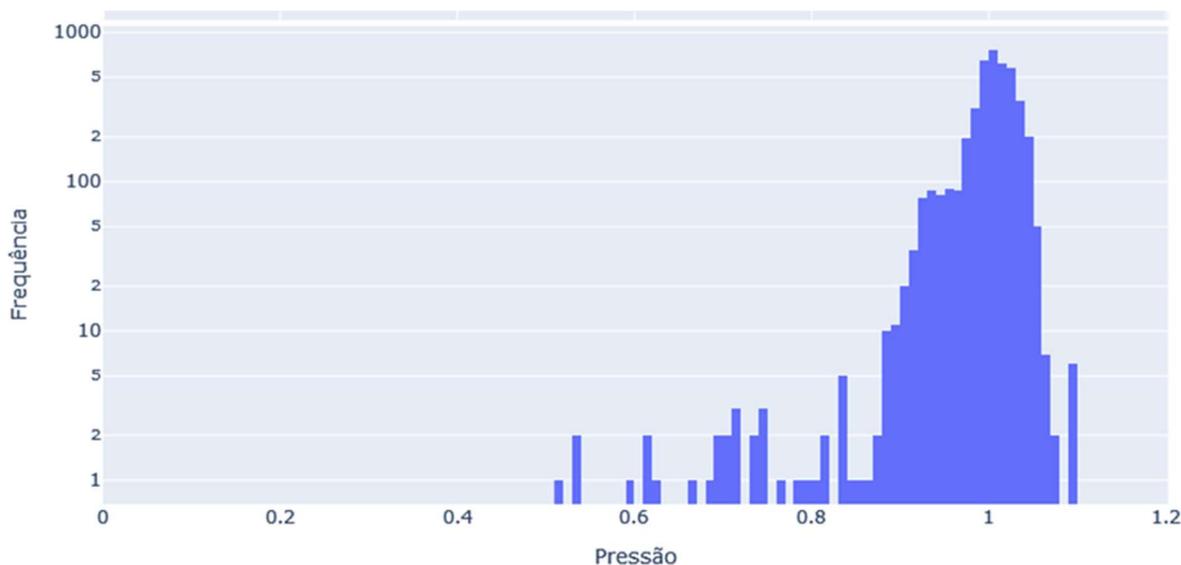
Fonte: Autor (2025)

Figura 31 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 32 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

Os equipamentos 05 e 06 contêm fluidos da categoria A conforme NR-13 e atuam em paralelo. Pelos perfis de pressão de operação das Figura 27 e Figura 30 verifica-se uma condição de estabilidade razoável do processo, o que é corroborado ao se avaliar os desvios padrão encontrados de 0,14 e 0,15, respectivamente.

Em destaque, é possível observar dois intervalos com maiores frequências de pressões nulas, somando aproximadamente 4 dias de registros de pressão nulas ao total, o que certamente é resultado de duas paradas com depressurização total do equipamento. Isso é refletido nas Figura 28 e Figura 31, com picos representativos de pressões nulas nos histogramas.

Mais uma vez, percebe-se pelas Figura 29 e Figura 32 que a retirada dos *outliers* resulta em uma aproximação de distribuição normal das pressões de operação, com reduções de 71% e 73%, respectivamente, nos desvios padrão.

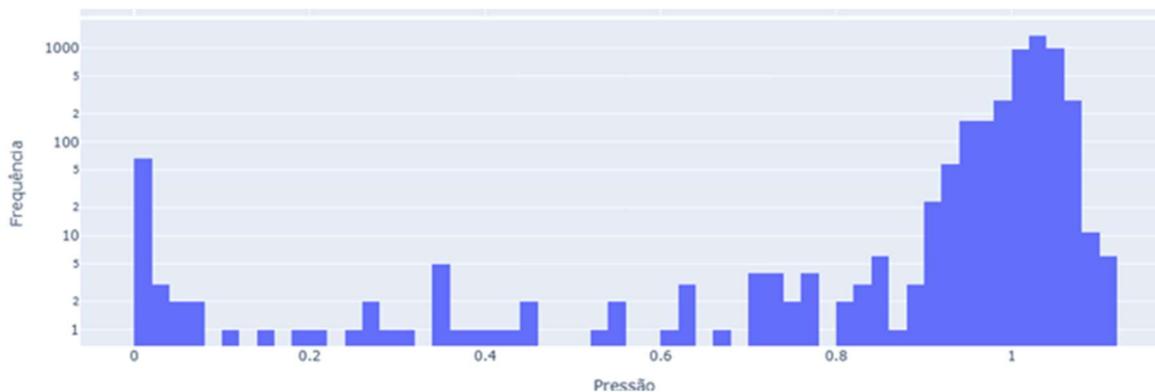
#### 5.4 Equipamento 07, unidade 01

Figura 33 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 07, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 34 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 01



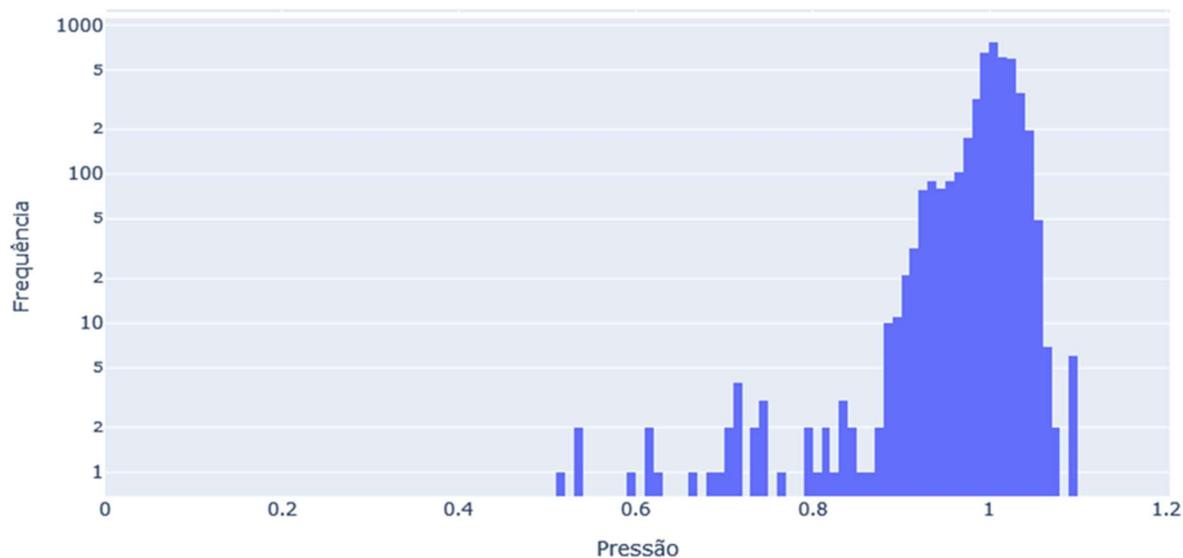
Fonte: Autor (2025)

O equipamento 07 da unidade 1 também contém em seu interior fluido da classe A conforme NR-13. É possível verificar um perfil de pressões muito similar ao dos equipamentos 05 e 06 da mesma unidade (Figura 33).

Isto se deve ao fato de ser um equipamento que atua em condições muito similares, apesar de possuírem fluidos de processos diferentes, e com pressões de projeto distintas dos equipamentos comentados anteriormente.

De toda forma, também se destaca na Figura 33 dois intervalos com maior ocorrência de registros de pressões nulas, resultando em um pico de frequências no histograma da Figura 34. Já no histograma Figura 35, já após a retirada dos *outliers*, percebe-se um único pico de registros bem definidos em torno da média.

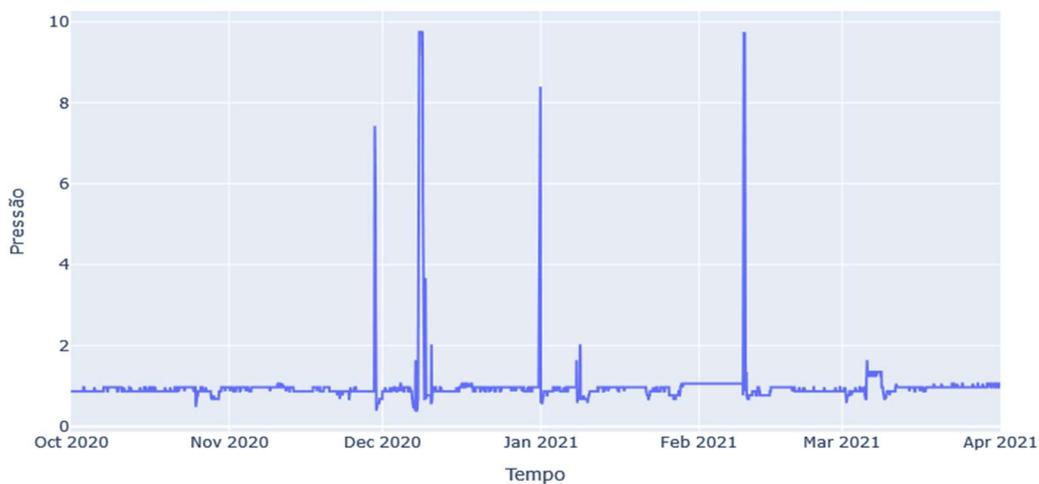
Figura 35 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

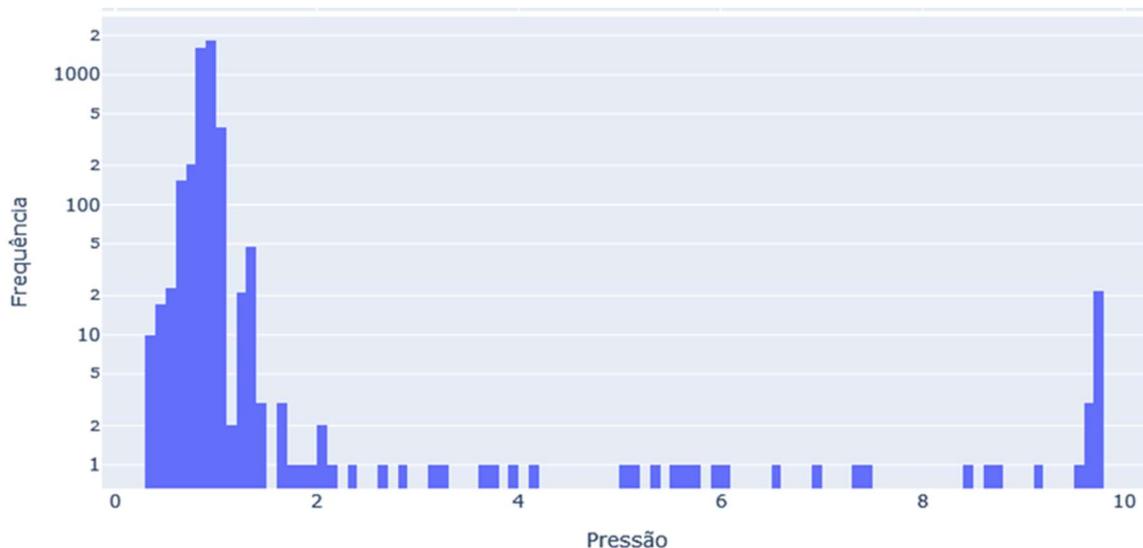
### 5.5 Equipamento 08, unidade 01

Figura 36 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 08, unidade 01



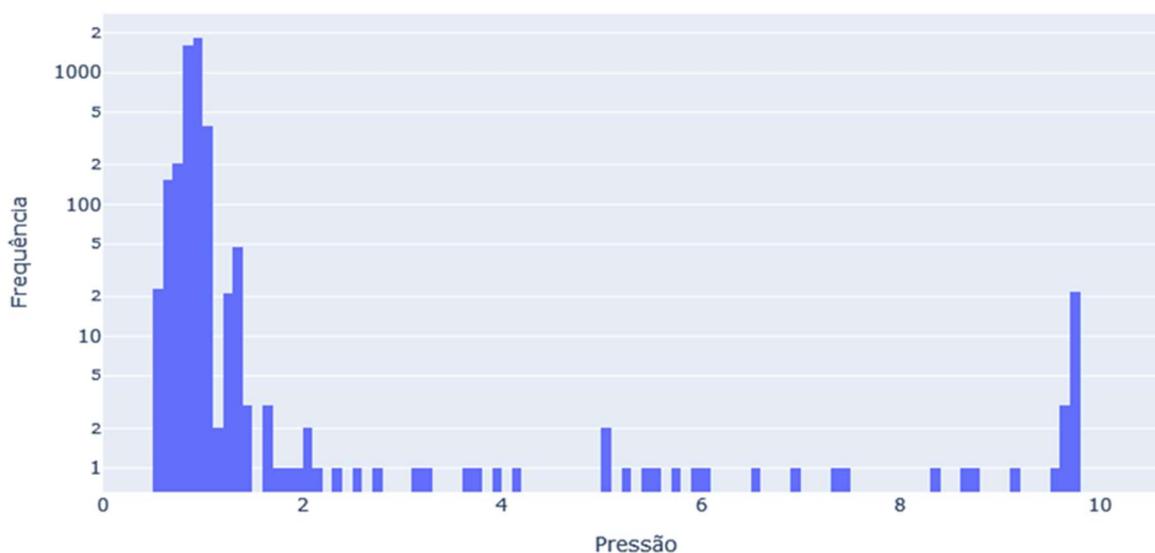
Fonte: Autor (2025)

Figura 37 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 38 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

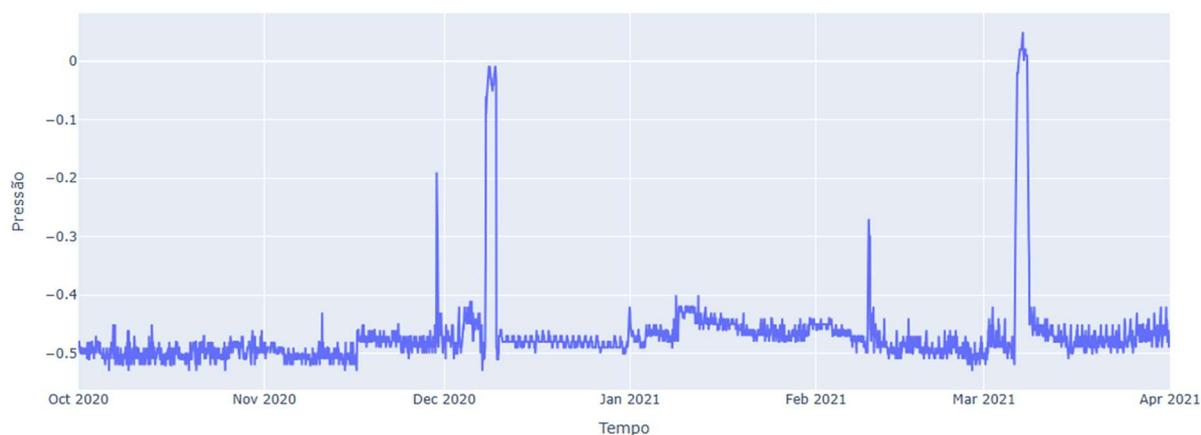
O equipamento 08 da unidade 1 opera com fluido classe C conforme NR-13. Pode-se observar da Figura 36 que o perfil de pressões é bem distinto dos demais. Os registros de pressão de operação têm uma pequena variação em torno da pressão de operação média, porém existem 54 registros onde a pressão de operação superou em duas vezes a pressão média de operação. Isso é um indicativo de ocorrências

recorrentes de pressões acima do esperado, o que pode resultar em sobrepresão do equipamento, caso este não tenha sido projetado para suportar tais pressões. Tais ocorrências também resultam em um elevado desvio padrão observado, igual a 0,78.

Além disso, conforme observado na Figura 37 não foram registrados pontos de pressão nula, de forma que o equipamento certamente não foi despressurizado durante o intervalo de observação. Dessa forma, a retirada de *outliers* não irá causar grande impacto na amostra, como pode ser visto graficamente na Figura 38 e representada pelo mesmo desvio padrão encontrado após a retirada dos *outliers*.

## 5.6 Equipamento 09, unidade 01

Figura 39 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 09, unidade 01

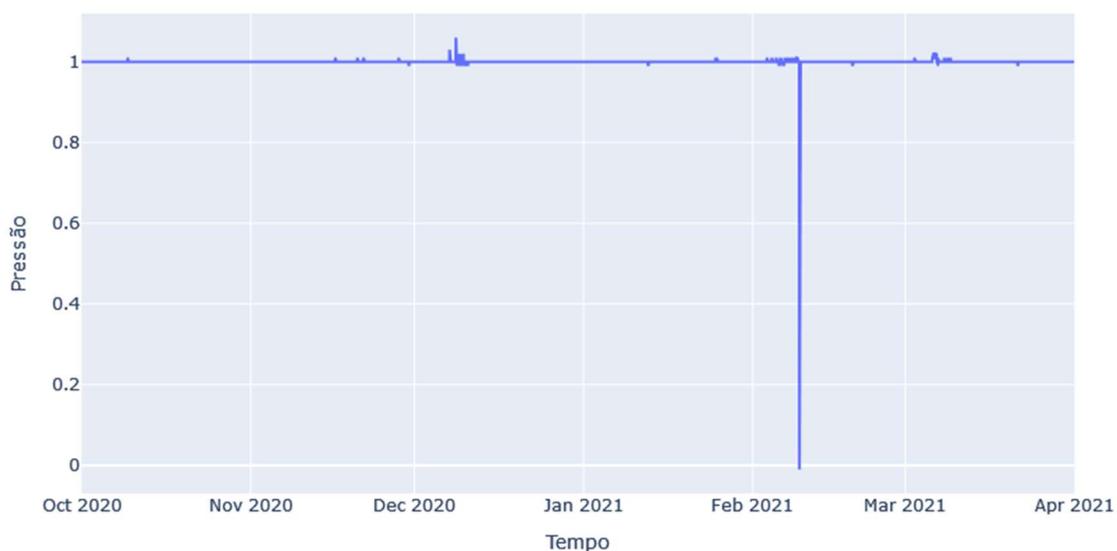


Fonte: Autor (2025)

Na Figura 39 verifica-se que o equipamento 09, da unidade 01, apresenta um perfil de pressão de classe E, conforme definido no Quadro 7, estando, portanto, fora do escopo da presente dissertação, cujo objeto são os vasos de pressão classe A. Desta forma, a metodologia não será aplicada nesse equipamento.

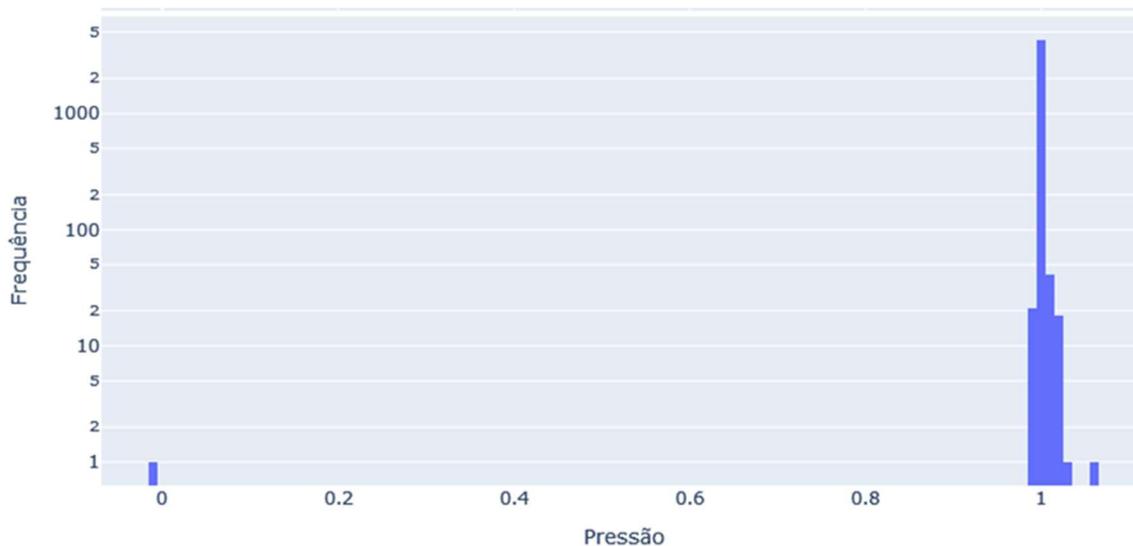
### 5.7 Equipamento 10, unidade 01

Figura 40 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 10, unidade 01



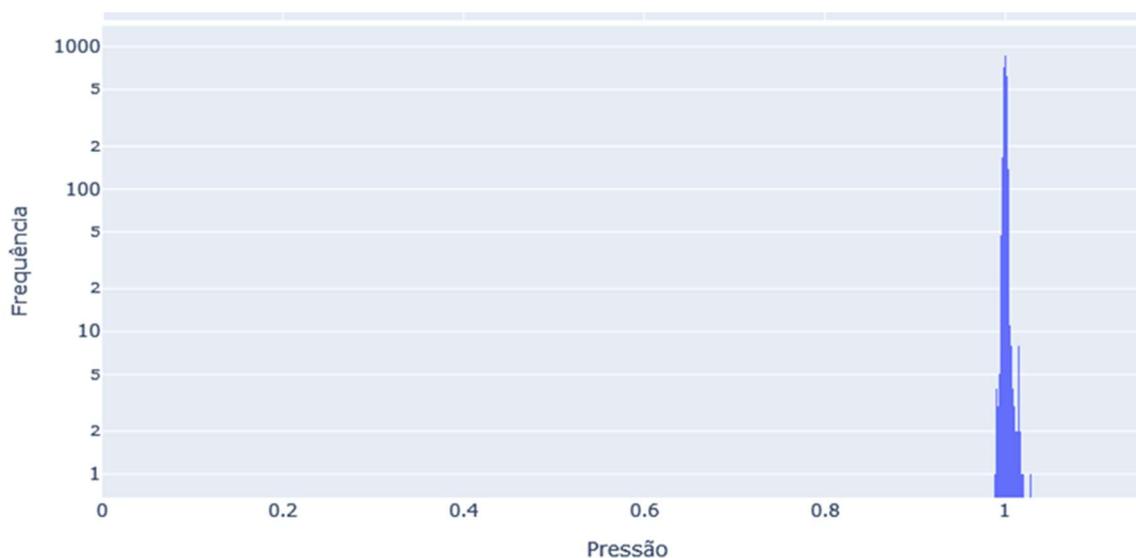
Fonte: Autor (2025)

Figura 41 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 01



Fonte: Autor (2025)

Figura 42 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 01, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

O equipamento 10 da unidade 1 contém fluido da classe C conforme NR-13. Pode-se observar pela Figura 40 um perfil de pressões excepcionalmente uniforme, com pouquíssima variação em relação a pressão média de operação.

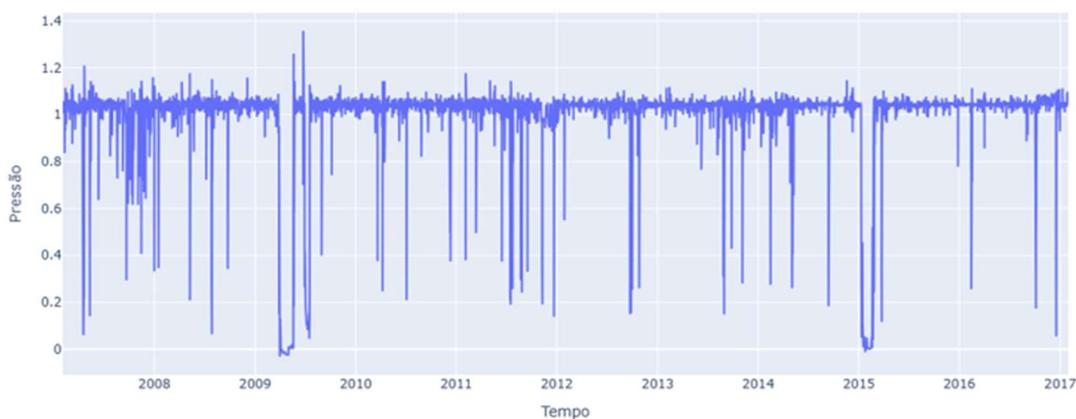
Isso é constatado pela Figura 41, em que o histograma apresenta um pico de frequências em 1 bem definido, e poucos registros de pressões distantes desse valor.

Também é observado apenas um registro de pressão nula durante o intervalo de observação. Esses fatores fazem com que este equipamento apresente o menor desvio padrão, igual a 0,02, entre todos os equipamentos avaliados.

Verifica-se também que a retirada do único *outlier* não resulta em alteração no desvio padrão. (Figura 42)

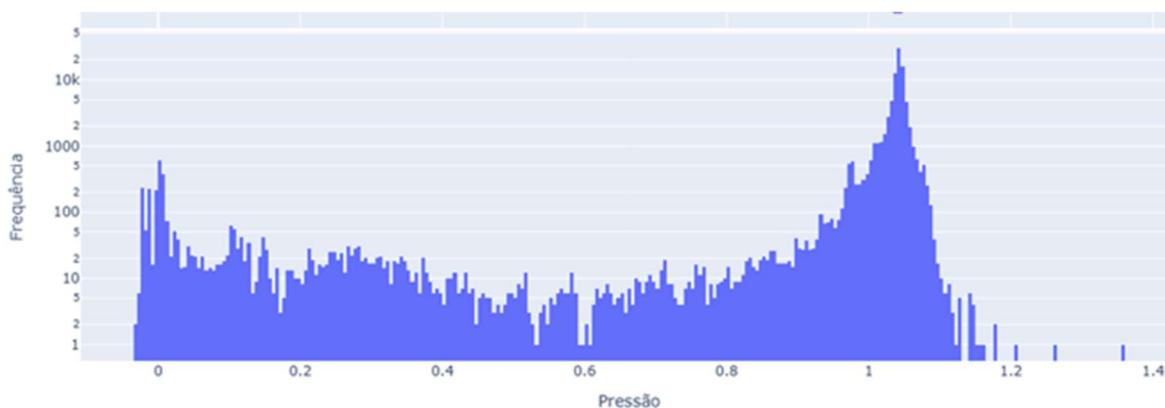
## 5.8 Equipamentos 01, 02, 03 e 04, unidade 02

Figura 43 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 01, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 44 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica, equipamento 01, unidade 02



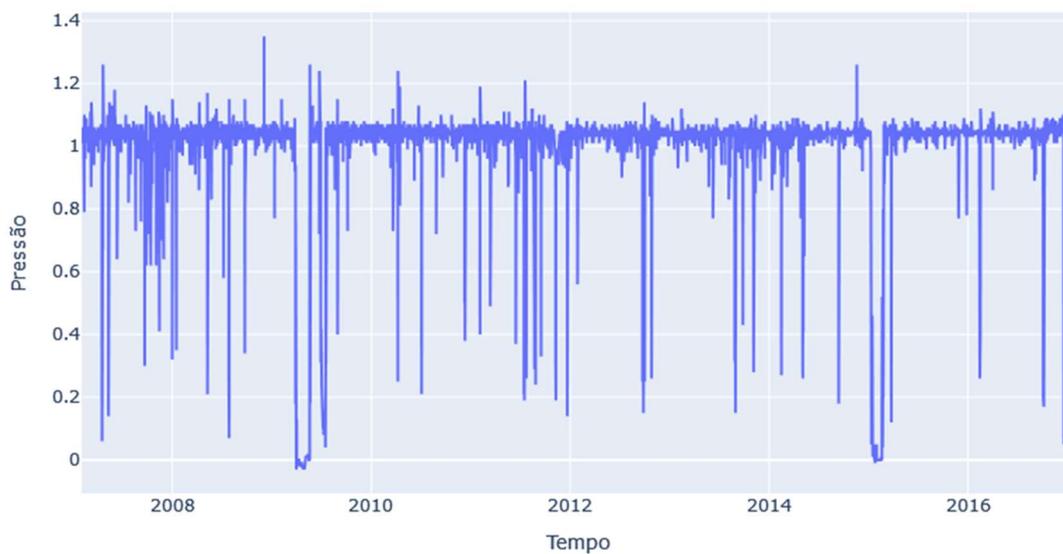
Fonte: Autor (2025)

Figura 45 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 01, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



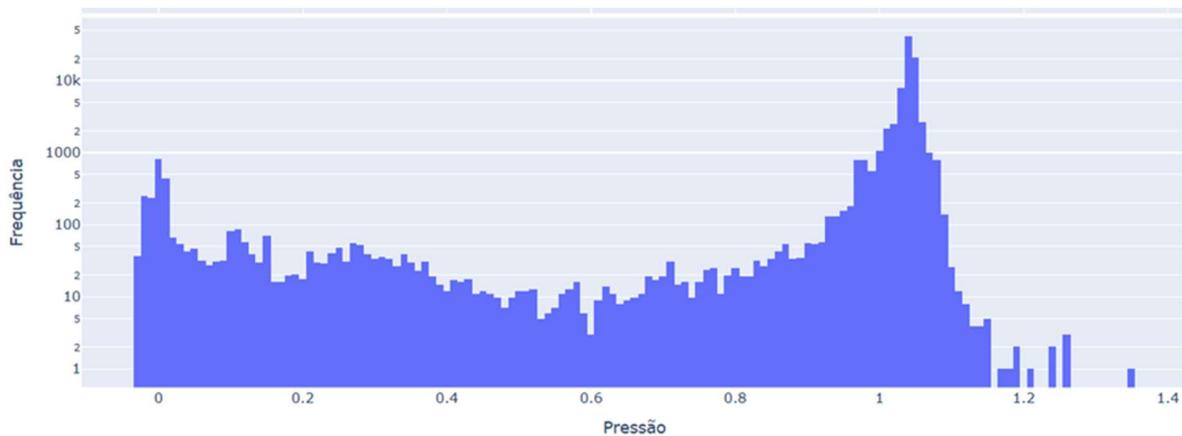
Fonte: Autor (2025)

Figura 46 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 02, unidade 02



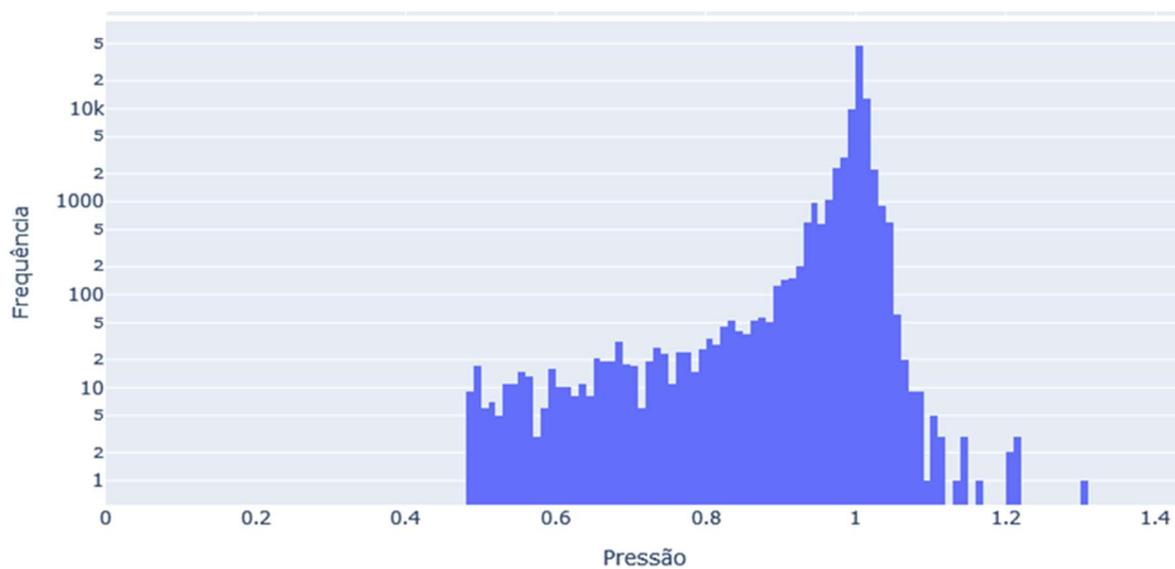
Fonte: Autor (2025)

Figura 47 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 02



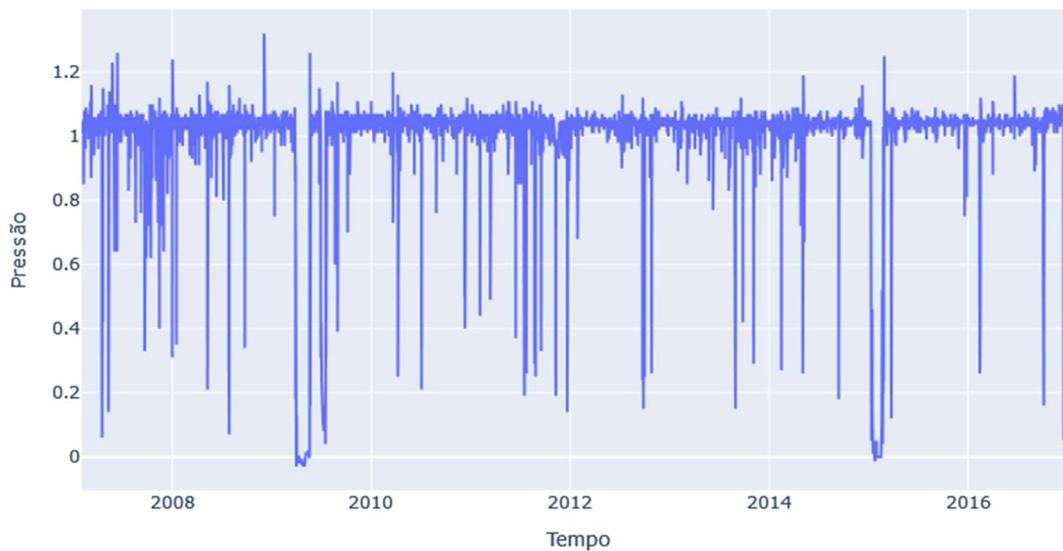
Fonte: Autor (2025)

Figura 48 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 02, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



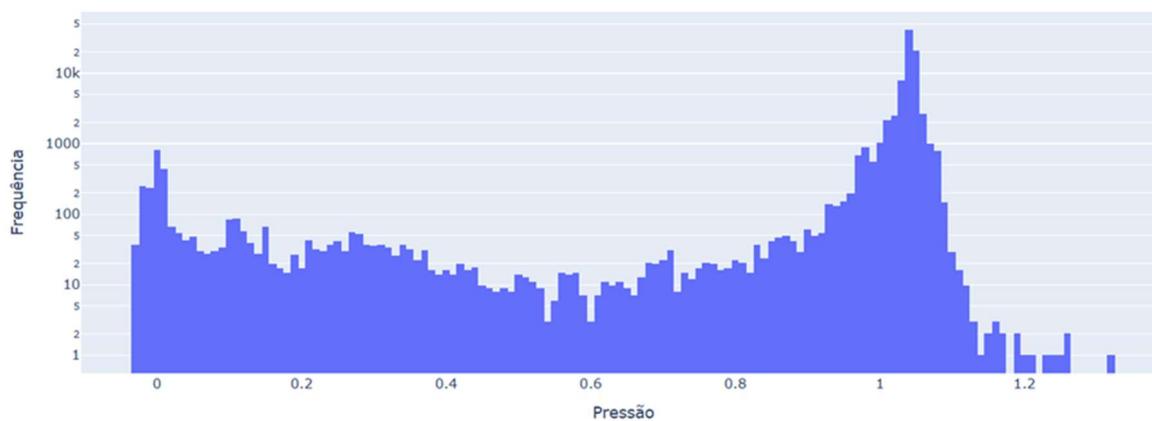
Fonte: Autor (2025)

Figura 49 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 03, unidade 02



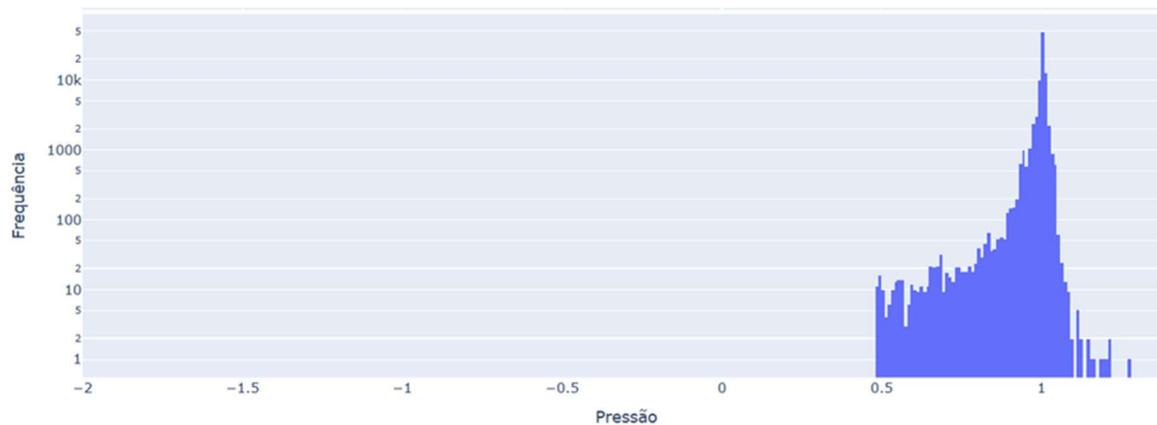
Fonte: Autor (2025)

Figura 50 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 02



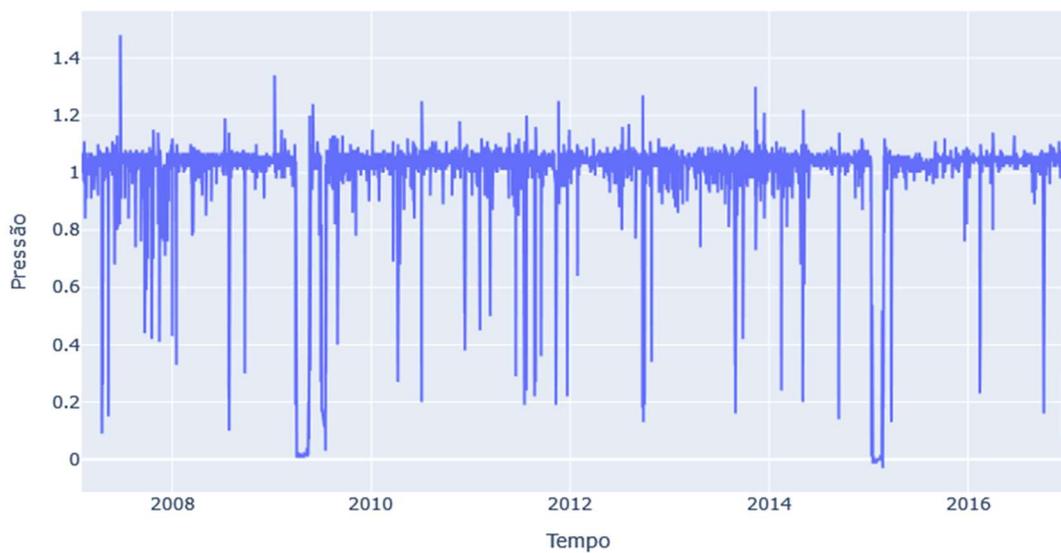
Fonte: Autor (2025)

Figura 51 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 03, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



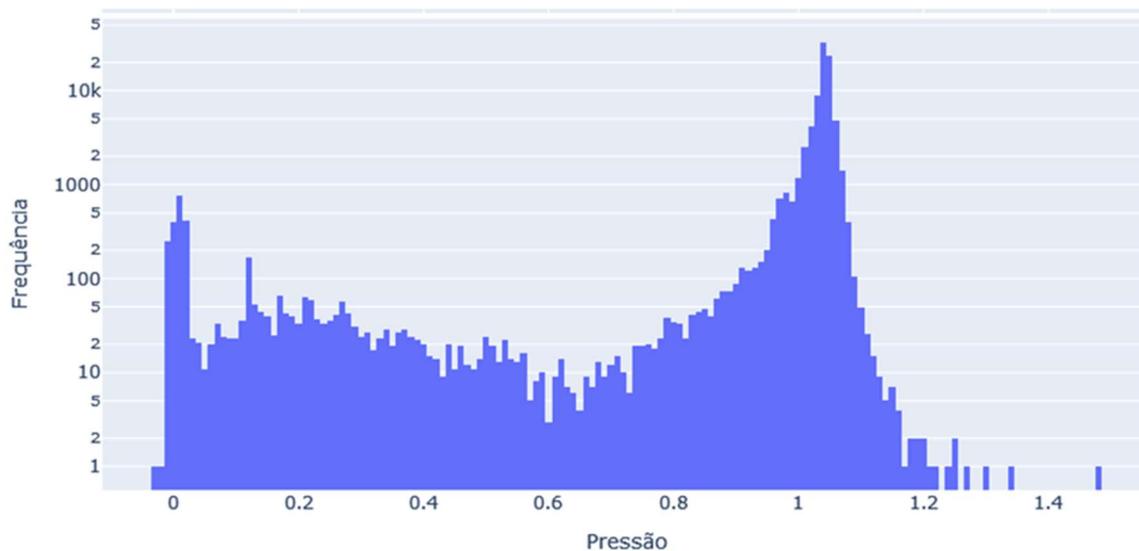
Fonte: Autor (2025)

Figura 52 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 04, unidade 02



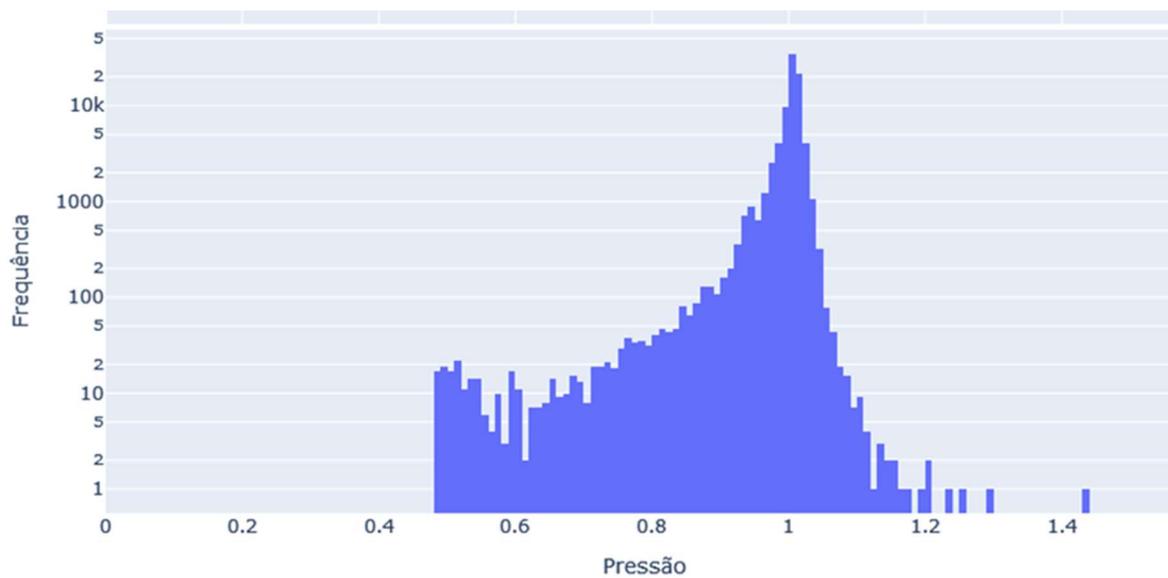
Fonte: Autor (2025)

Figura 53 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 54 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 04, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

Os equipamentos 01, 02, 03 e 04, unidade 02, são vasos de pressão similares, que atuam em paralelo e tem fluido de processo da classe A conforme NR-13.

Dessa forma, possuem volumes, pressões de projeto e pressões de ajuste da válvula de segurança idênticos, sendo as eventuais diferenças em virtude de condições eventuais do processo ou algum aspecto relacionado a estrutura e metalurgia do vaso.

Essas semelhanças podem ser confirmadas ao se verificar as Figura 43, Figura 46, Figura 49 e Figura 52.

Fica evidente também pelos histogramas das Figura 44, Figura 47, Figura 50 e Figura 53 que o intervalo de coleta dos dados na unidade 2, dez anos, contemplou a ocorrência de uma maior gama de eventos dos equipamentos, seja despressurização completa ou parcial devido a flutuações naturais do processo, resultando em registro de pressões em todo o intervalo entre a pressão nula e a pressão média de operação.

Destaca-se um pico de frequências próximos a valores de pressão nula, o que era esperado visto que os equipamentos atuando durante intervalos longos como o período de 10 anos precisam ser submetidos a paradas, mesmo que não haja necessidade de manutenção, para inspeções internas conforme NR-13. Espera-se que essa diversidade de eventos também apareça nos demais equipamentos da unidade.

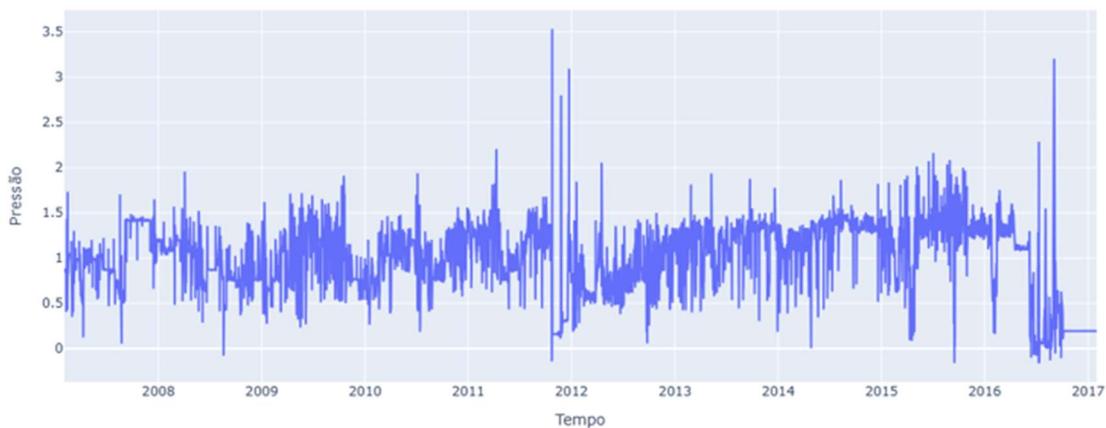
Também é possível observar ocorrências esporádicas de pressões acima da pressão média de operação, que não chegam a passar de 40% acima da pressão média de operação para os quatro equipamentos.

Esses eventos possivelmente resultam de eventos de sobrepressão, onde espera-se que a válvula de segurança atue.

Nos histogramas das Figura 45, Figura 48, Figura 51 e Figura 54, verifica-se a distribuição após a retirada dos *outliers*, resultando na diminuição da assimetria da distribuição.

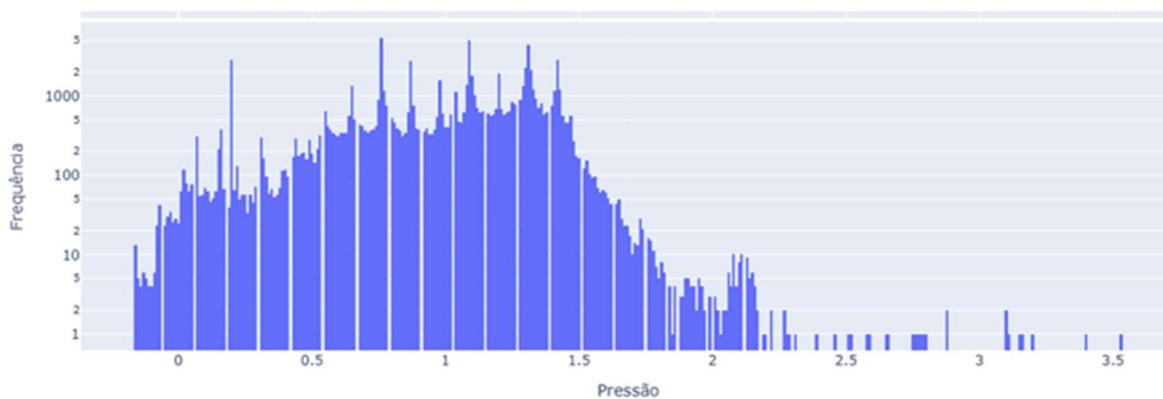
## 5.9 Equipamento 05, unidade 02

Figura 55 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 05, unidade 02



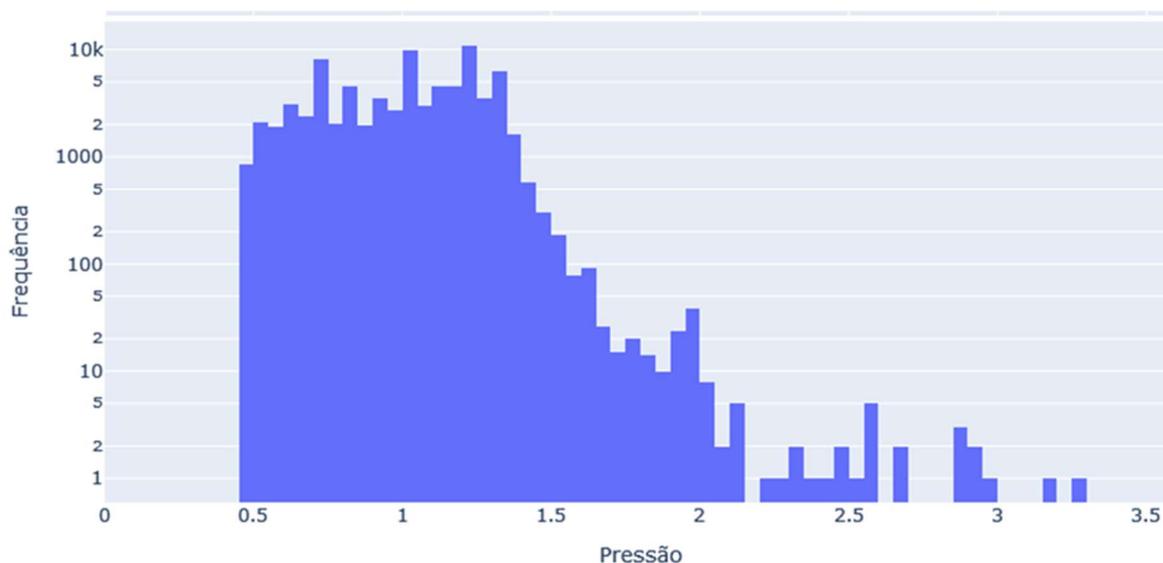
Fonte: Autor (2025)

Figura 56 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 57 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 05, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

O equipamento 05 da unidade 2 contém fluido de classe A conforme NR-13. É possível observar da Figura 55 que o perfil de pressões de operação desse vaso é razoavelmente instável, com bastante flutuação da pressão de operação, principalmente no intervalo entre metade da pressão média de operação e uma vez e meia a pressão média de operação. Isso se reflete no histograma da Figura 56, onde não é possível ver um pico de frequências bem definidos na pressão média de operação.

Outro aspecto importante é a presença de 16 registros de valores de pressão acima de duas vezes a pressão média de operação. Nesse caso, o equipamento certamente foi submetido a eventos de sobrepresão, com atuação da válvula de segurança.

Neste cenário, mesmo em realizada a avaliação aqui proposta, é altamente recomendado que seja realizada uma análise das causas deste comportamento, antes da implementação da definição do valor de calibração.

Todavia, caso estes valores tenham causas identificáveis (não sejam eventos de causa normal), a metodologia aqui sugerida pode ser aplicada, com as seguintes ressalvas:

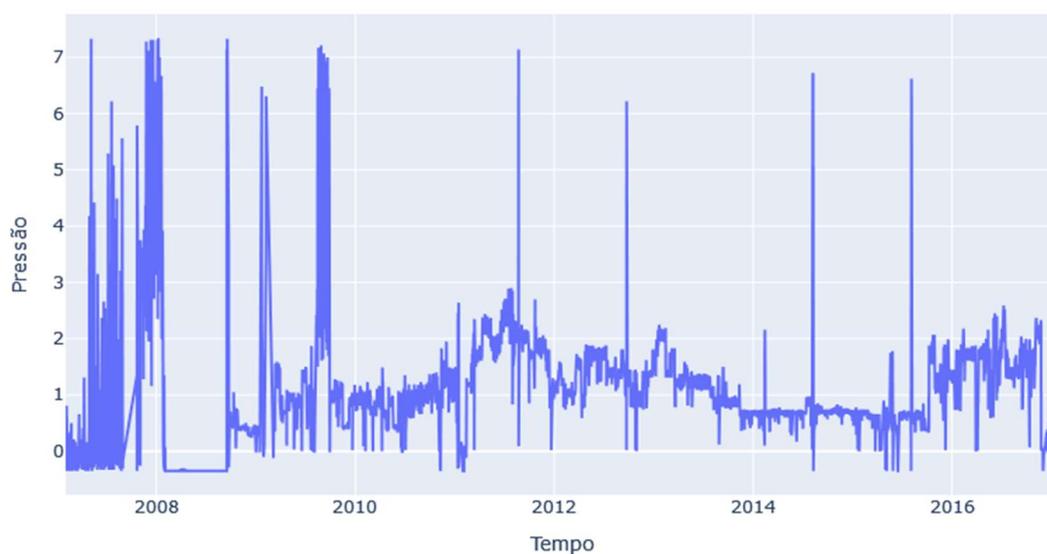
- (a) Os valores elevados observados devem ser excluídos da metodologia de determinação da pressão de ajuste da PSV, e;

(b) A ocorrência dos valores elevados, em se mantendo, ocasionarão, inevitavelmente, a atuação da PSV.

Na Figura 57 é possível ver a distribuição de pressões após a retirada dos *outliers*. Destaca-se a grande presença de valores acima de metade da média, de forma que houve pouca redução no desvio padrão, cerca de 31%.

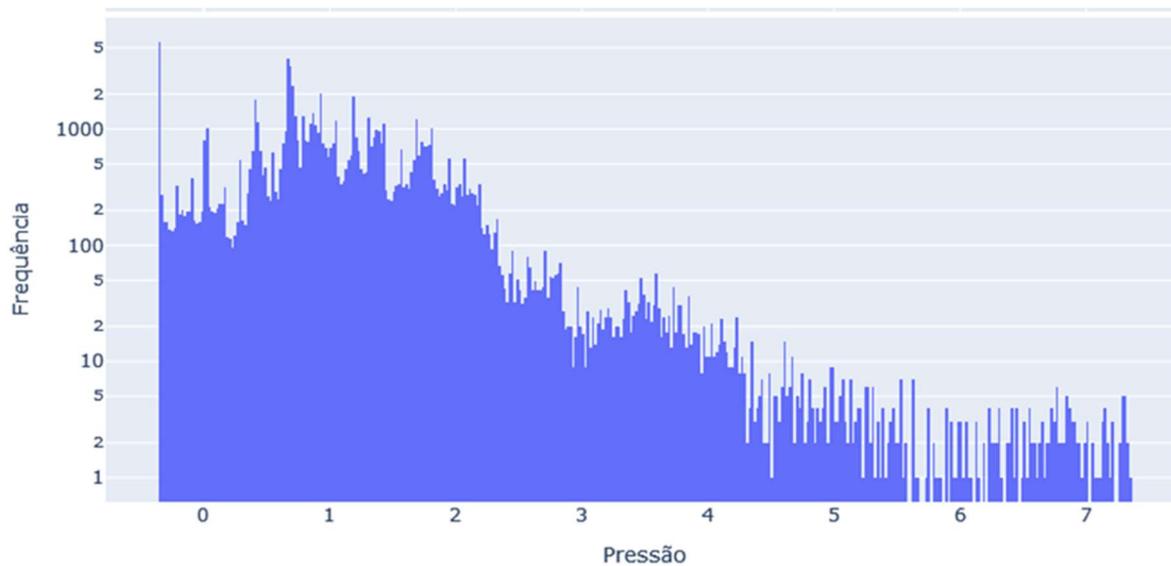
#### 5.10 Equipamentos 06 e 07, unidade 02

Figura 58 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 06, unidade 02



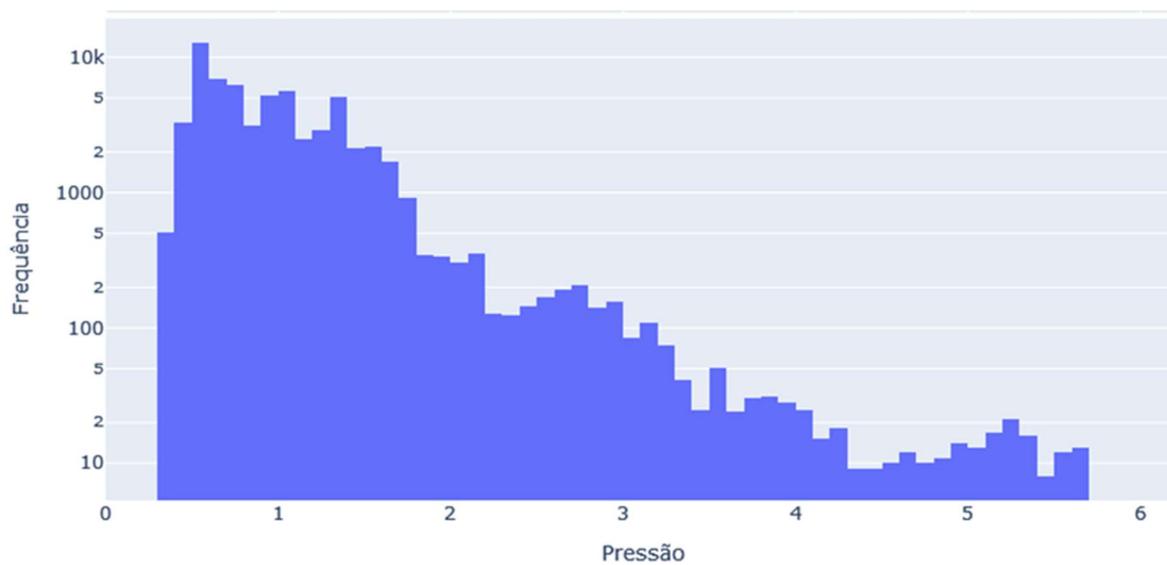
Fonte: Autor (2025)

Figura 59 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 02



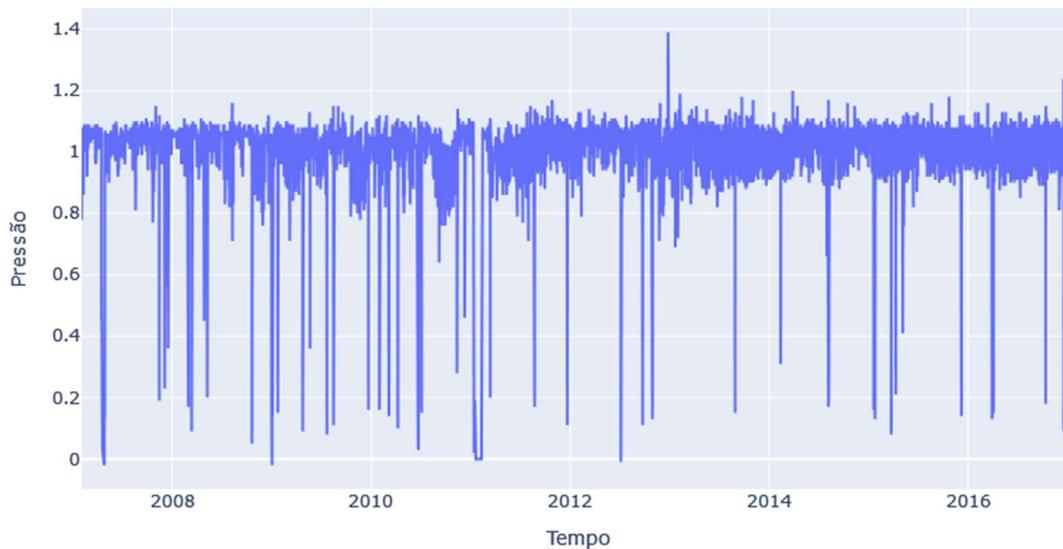
Fonte: Autor (2025)

Figura 60 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 06, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



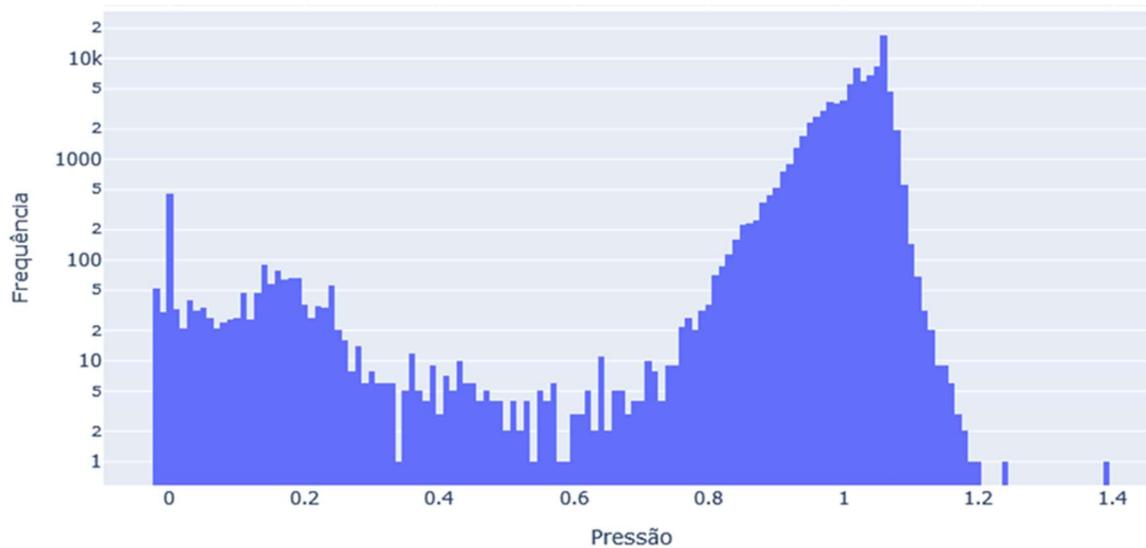
Fonte: Autor (2025)

Figura 61 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 07, unidade 02



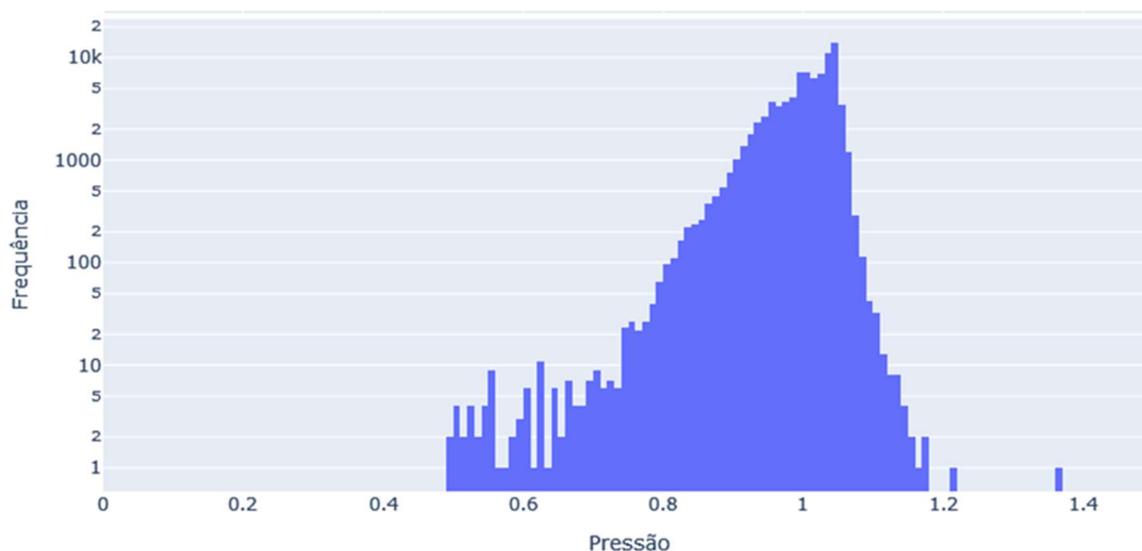
Fonte: Autor (2025)

Figura 62 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 63 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 07, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

Os equipamentos 06 e 07 da unidade 2, bem como outros casos já comentados, são idênticos em termos de volume, pressão de projeto e pressão de ajuste da válvula de segurança e contém fluido da classe A conforme NR-13.

No entanto, como pode ser visto na Figura 58 o perfil de pressões de operação do equipamento 06 é altamente instável, enquanto o equipamento 07 apresenta um grau menor de instabilidade, porém ainda presente, conforme Figura 61. No histograma da Figura 59 verifica-se uma grande presença de registros nas proximidades de pressão nula, incluindo casos de pressões negativas.

Isso resulta em uma grande quantidade de *outliers*, de forma que após a sua retirada conforme Figura 60, foram eliminados cerca de 23% dos dados.

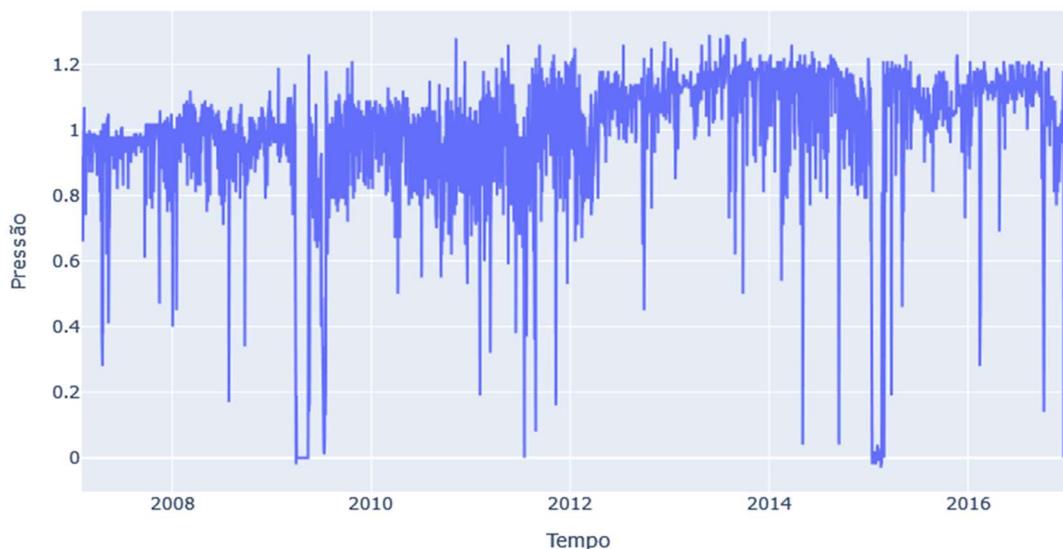
Já para o equipamento 07, conforme histograma da Figura 62, possui pico muito mais definido na região da pressão média de operação, de forma que ao se retirar os *outliers*, conforme Figura 63, resulta numa tendência de distribuição normal, sendo eliminados cerca de 2% dos dados como *outliers*.

É importante destacar que apesar de serem vasos iguais, inclusive com mesma pressão de ajuste de abertura da PSV, a pressão média encontrada no equipamento 07 foi mais de dez vezes maior do que a pressão obtida no equipamento 06.

Não foi possível obter uma justificativa dessa condição apenas avaliando os dados obtidos, de forma que idealmente deve ser verificada as condições do processo antes da aplicação da metodologia para definição da pressão de ajuste da PSV.

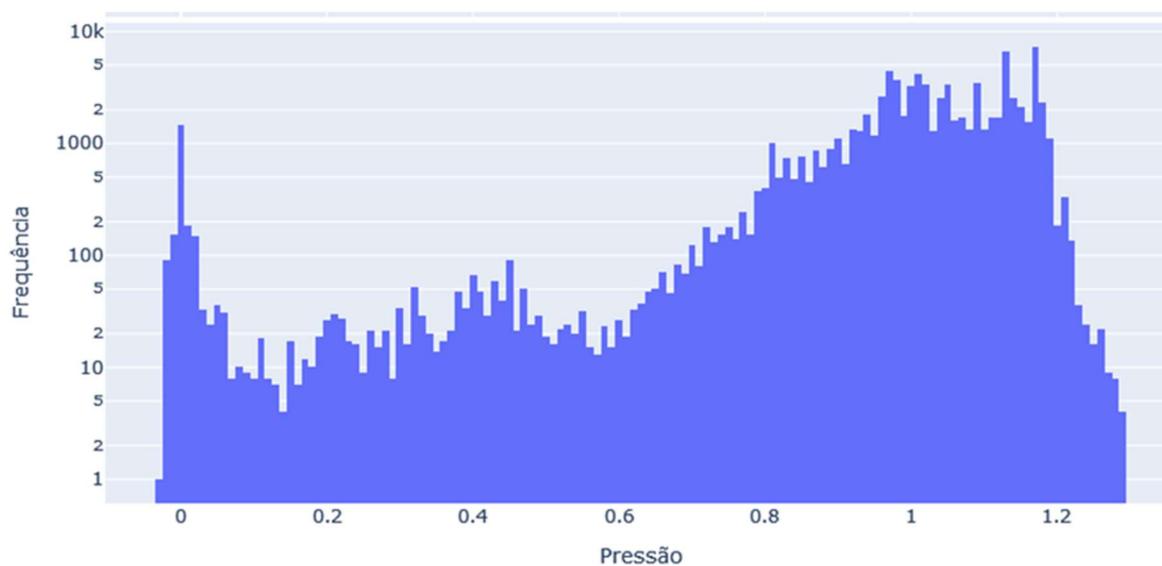
### 5.11 Equipamento 08, unidade 02

Figura 64 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 08, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 65 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 66 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 08, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



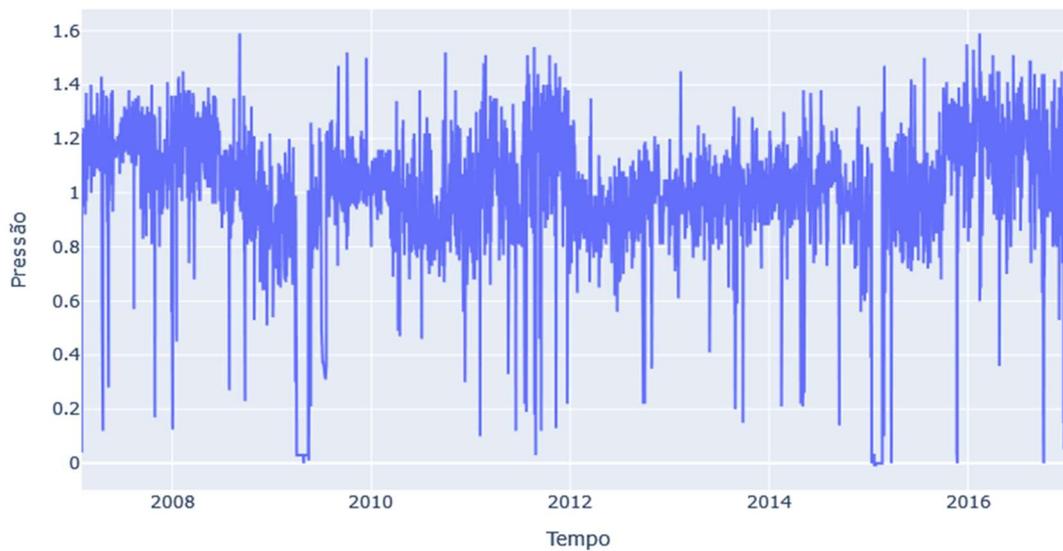
Fonte: Autor (2025)

O equipamento 08 da unidade 2 contém fluido da classe A conforme NR-13. Observa-se pelo perfil das pressões de operação da Figura 64 que o vaso possui certa instabilidade no processo, com destaque para uma possível mudança na pressão de operação média durante o intervalo de amostragem, de forma que se observa um aumento na pressão de operação após um período de aproximadamente cinco anos.

Isso também pode ser visto no histograma da Figura 65, com uma frequência relevante de pressões entre 1,0 e 1,2 vezes a pressão média de operação. Na Figura 66, após a retirada dos *outliers*, é observada a distribuição de pressões, sem um pico definido na média.

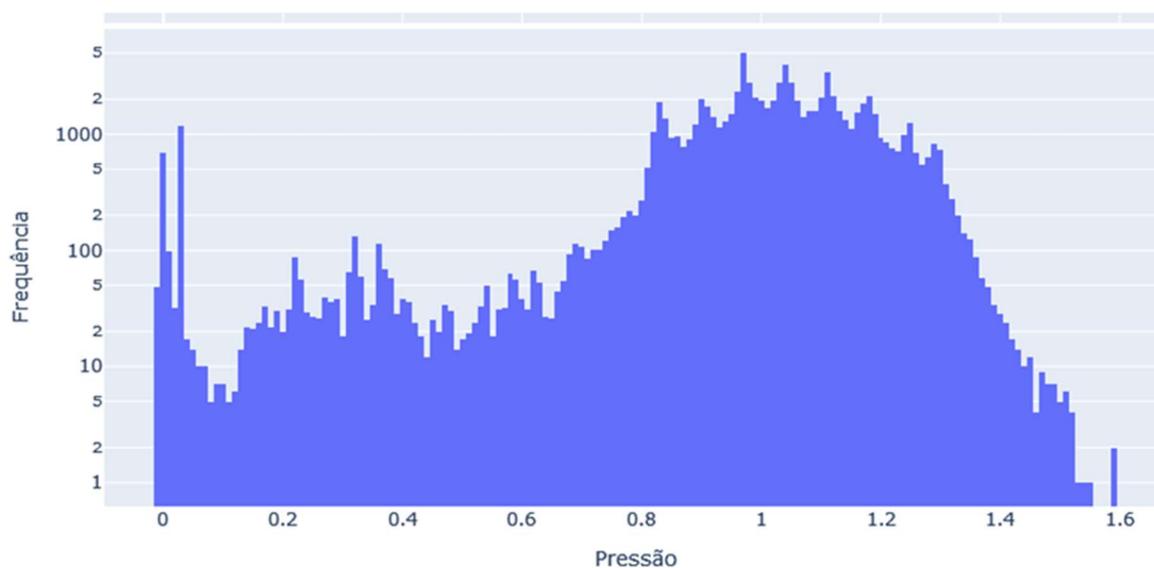
## 5.12 Equipamento 09, unidade 02

Figura 67 - Pressão de operação normalizada versus tempo, equipamento 09, unidade 02



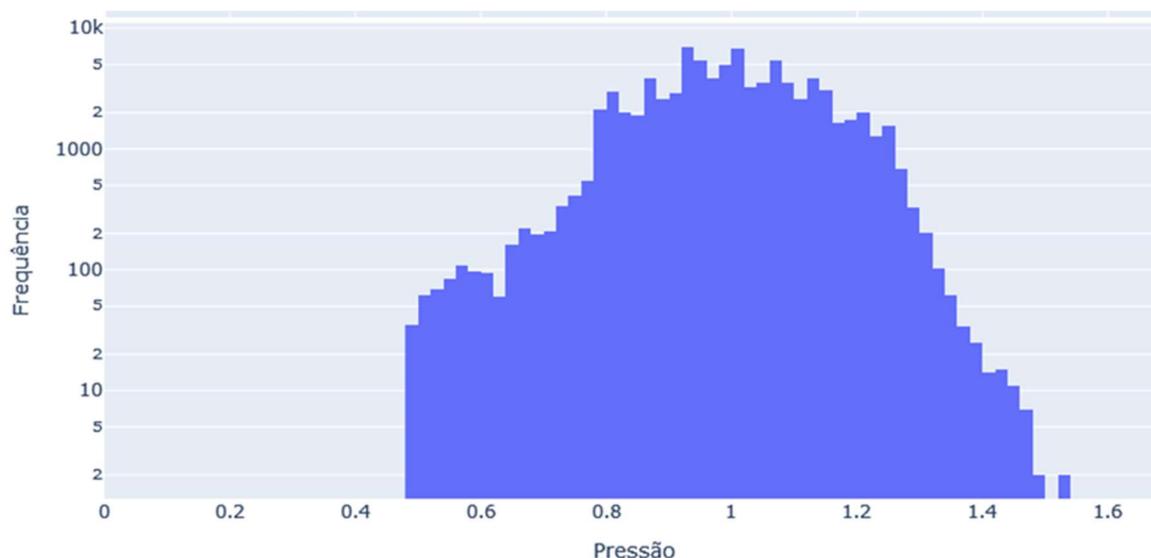
Fonte: Autor (2025)

Figura 68 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 09, unidade 02



Fonte: Autor (2025)

Figura 69 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 09, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

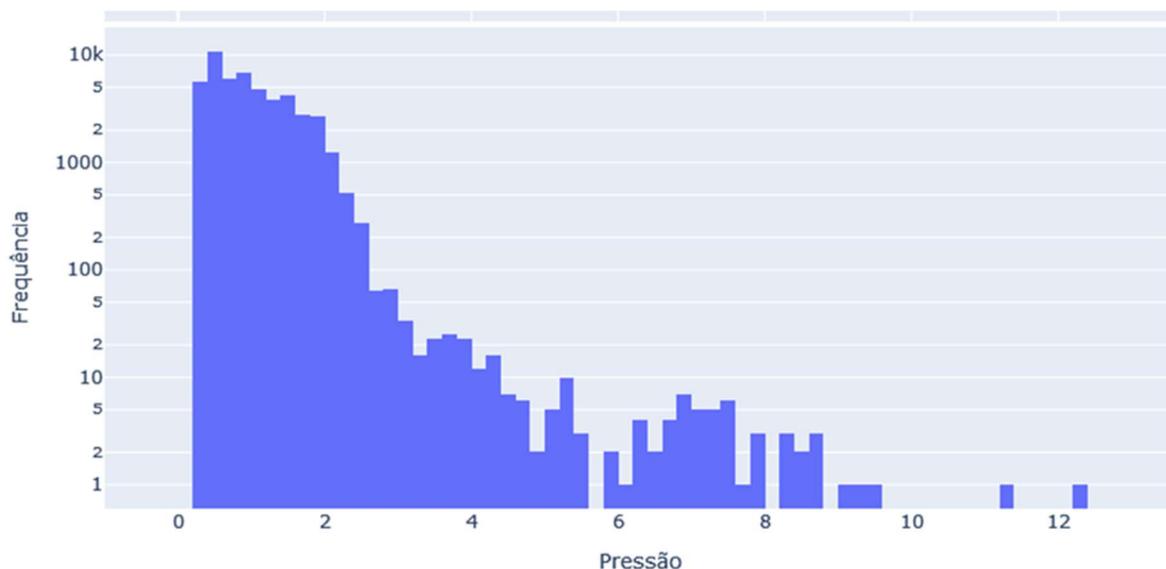
O equipamento 09 da unidade 2 contém fluido da classe A conforme NR-13. É possível ver no perfil de pressões da Figura 67 uma razoável instabilidade do processo, com bastante flutuação de registros entre 0,8 e 1,2 vezes a pressão média de operação.

No histograma da Figura 68 é possível constatar, pelos vários picos de frequência no intervalo mencionado, caracterizando a instabilidade do processo. Também se destaca a grande frequência de registros de pressões próximas a nula, de forma que esse equipamento certamente passou por vários ciclos de depressurização durante o intervalo de amostragem.

Com a retirada dos *outliers*, conforme Figura 69, é possível ver uma aproximação da normalidade na distribuição, sem um pico definido na pressão média de operação.



Figura 72 - Histograma da pressão de operação, em escala logarítmica. equipamento 10, unidade 02, após a eliminação dos *outliers*



Fonte: Autor (2025)

O equipamento 10 da unidade 2 contém fluido da classe A conforme NR-13. Observa-se no perfil de pressões da Figura 70 a grande quantidade de registros de pressões acima da pressão média de operação, com destaque para um registro de pressão acima de 20 vezes a pressão média de operação, o que certamente constitui casos de sobrepressão no vaso com consequência abertura frequente da PSV.

No histograma da Figura 71 verifica-se, além da grande quantidade de registros de pressões acima da média, a grande presença de registros de pressões próximas a nulas.

É esperado, devido a quantidade de eventos de sobrepressão, que o equipamento também tenha sido submetido a muitos casos de despressurização para avaliação da sua integridade e manutenção.

No histograma da Figura 72 é possível verificar a distribuição dos registros após a retirada dos *outliers*. Destaca-se para esse equipamento que foram considerados *outliers* e retirados cerca de 43% dos dados.

#### 5.14 Análise quantitativa-qualitativa comparativa entre os resultados dos equipamentos abordados

Após a eliminação dos valores menores que 50% da média aritmética calculada, *outliers* tipo 1, como apresentado e pode ser observado na Figura 57, possibilita evidenciar a ocorrência dos eventos no qual a pressão de operação ultrapassou valores maiores que 100% da citada média, ratificando os comentários já discutidos.

Como é possível verificar, considerando-se o intervalo amostral entre 1 e 10 anos de operação contínua com paradas eventuais para manutenção, os equipamentos podem ser classificados como vasos de pressão de regime contínuo, classe A, de forma que se observa uma distribuição análoga a normal, com uma única média e baixa dispersão de dados.

Tabela 4 - Resumo dos principais parâmetros estatísticos, por unidade, por equipamento [Valores adimensionais]

Unidade	Equipamento	Média	Desvio Padrão	Mediana	Moda
1	1	1,00	0,08	1,01	1,01
1	2	1,00	0,08	1,01	0,99
1	3	1,00	0,08	1,01	1,01
1	4	1,00	0,48	1,02	0,92
1	5	1,00	0,14	1,03	1,02
1	6	1,00	0,15	1,02	1,02
1	7	1,00	0,14	1,03	1,02
1	8	1,00	0,78	0,97	0,97
1	10	1,00	0,02	1,00	1,00
2	1	1,00	0,19	1,04	1,04
2	2	1,00	0,19	1,04	1,04
2	3	1,00	0,19	1,04	1,04
2	4	1,00	0,18	1,04	1,04
2	5	1,00	0,36	1,09	0,76
2	6	1,00	0,84	0,88	-0,35
2	7	1,00	0,14	1,03	1,06
2	8	1,00	0,21	1,03	1,17
2	9	1,00	0,22	1,03	0,97
2	10	1,00	1,08	0,68	0,27

Fonte: Autor (2025)

Dessa forma, espera-se que o vaso esteja submetido a tensões mecânicas constantes.

A seguir, na Tabela 4, é apresentado um resumo dos principais parâmetros estatísticos observados nos vasos de pressão avaliados.

A partir dos gráficos, também é possível verificar a frequência de parada de operação desses equipamentos para manutenção, caracterizado pelos intervalos de despressurização, permanência em pressão atmosférica, e subsequente repressurização.

Nos histogramas essa tendência é facilmente observada pela frequência nas proximidades de zero.

Com o objetivo de fazer uma avaliação que retrate a operação normal do vaso, isto é, desconsiderando eventos de transição tais como paradas para manutenção, foram retirados do conjunto de dados os *outliers* do tipo 1, que foram definidos como aqueles valores da pressão de operação abaixo do limite inferior de dados, isto é, abaixo da metade da média, conforme equação a seguir:

$$\text{Outlier tipo 1} < \frac{\bar{x}}{2} \quad (2)$$

A representatividade dos dados remanescentes após a retirada dos *outliers* tipo 1, pode ser constatada na Tabela 5, que apresenta um resumo da quantidade de dados que permaneceram após a exclusão.

Percebe-se então que a eliminação das medições do regime de transição representou, no caso mais extremo, menos de 10% da quantidade de dados registrados, garantindo assim a continuidade da representação da amostragem de medições. O novo resumo estatístico e o resultado na redução do desvio padrão na Tabela 6.

Tabela 5 - Parâmetros quantitativos dos dados após a eliminação dos *outliers* tipo 1, por unidade, por equipamento

Unidade	Equipamento	Quantidade de dados originais	Quantidade de <i>outliers</i>	Quantidade de dados remanescentes	Percentual dos dados que permanece [%]
1	1	4369	30	4339	99,31
1	2	4369	30	4339	99,31
1	3	4369	30	4339	99,31
1	4	4369	120	4249	97,25
1	5	4369	94	4275	97,85
1	6	4369	94	4275	97,85
1	7	4369	94	4275	97,85
1	8	4369	27	4342	99,38
1	10	4369	1	4368	99,98
2	1	87522	3386	84136	96,13
2	2	87525	3388	84137	96,13
2	3	87521	3387	84134	96,13
2	4	87530	3359	84171	96,16
2	5	87362	8209	79153	90,60
2	6	83967	19582	64385	76,68
2	7	87395	1736	85659	98,01
2	8	87466	3221	84245	96,32
2	9	87515	3523	83992	95,97
2	10	87469	37475	49994	57,16

Fonte: Autor (2025)

Tabela 6 - Resumo dos principais parâmetros estatísticos, após a eliminação dos *outliers* tipo 1, por unidade, por equipamento

[Valores adimensionais, exceto aqueles da coluna Redução no Desvio Padrão]

Unidade	Equipamento	Média	Desvio Padrão	Mediana	Moda	Redução no Desvio Padrão [%]
1	1	1,00	0,04	1,00	0,98	50
1	2	1,00	0,04	1,00	0,98	50
1	3	1,00	0,04	1,00	0,98	50
1	4	1,00	0,13	0,95	0,87	73
1	5	1,00	0,04	1,01	1,00	71
1	6	1,00	0,04	1,00	1,00	73
1	7	1,00	0,04	1,01	1,00	71
1	8	1,00	0,78	0,96	0,96	0
1	10	1,00	0,003	1,00	1,00	84
2	1	1,00	0,03	1,01	1,01	84
2	2	1,00	0,03	1,01	1,01	84
2	3	1,00	0,03	1,01	1,01	84
2	4	1,00	0,04	1,01	1,01	78
2	5	1,00	0,25	1,01	0,71	31
2	6	1,00	0,55	0,88	0,53	35
2	7	1,00	0,05	1,01	1,04	64
2	8	1,00	0,11	1,01	1,14	48
2	9	1,00	0,13	1,00	0,94	41
2	10	1,00	0,61	0,91	0,33	44

Fonte: Autor (2025)

É visto, então, na Tabela 6, que a retirada dos *outliers* tipo 1 acarretou um resultado positivo na redução dos desvios padrão. Levando em consideração que a redução da pressão para um valor abaixo da metade da média está certamente relacionada com uma despressurização para manutenção, é seguro concluir que a retirada de *outliers* contribui para a avaliação da operação real do equipamento.

Após realizada a análise exploratória de dados, a etapa seguinte será a utilização dos dados de operação normal do vaso de pressão para a definição de um valor de abertura da válvula de segurança. Para isso, será utilizado o índice de capacidade o processo (Cpk), já definido.

Conforme já discutido, a metodologia proposta irá definir como valor se *setpoint* para a abertura da válvula de pressão o limite de especificação superior, USL, de forma que a equação para a determinação da mesma é:

$$\text{Abertura da PSV} = \text{USL} = 3\sigma \cdot Cpk + \bar{x} \quad (3)$$

O resultado dos valores encontrados em função do valor de Cpk (entendido neste contexto como a adoção de um fator de conservadorismo) para os equipamentos avaliados estão compilados na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 - Valores da pressão de ajuste da PSV, por unidade, por equipamento

[Valores adimensionais]					
Unidade	Equipamento	Desvio Padrão	Valor de abertura da PSV		
			Valor adotado para Cpk		
			1,33	1,66	2,00
1	1	0.04	1,15	1,18	1,22
1	2	0,04	1,15	1,18	1,22
1	3	0,04	1,15	1,18	1,22
1	4	0,13	1,53	1,66	1,80
1	5	0,04	1,17	1,21	1,26
1	6	0,04	1,16	1,20	1,24
1	7	0.04	1,16	1,20	1,24
1	8	0,78	4,12	4,89	5,69
1	10	0,003	1,01	1,01	1,02
2	1	0,03	1,13	1,16	1,19
2	2	0,03	1,13	1,16	1,19
2	3	0,03	1,13	1,16	1,19
2	4	0,04	1,14	1,17	1,21
2	5	0.25	2,00	2,26	2,51
2	6	0,55	3,20	3,74	4,30
2	7	0,05	1,20	1,25	1,30
2	8	0,11	1,43	1,54	1,65
2	9	0,13	1,53	1,66	1,80
2	10	0,61	3,42	4,00	4,63

Fonte: Autor (2025)

É possível observar, então, que para a maioria dos casos a pressão de abertura da válvula de segurança fica em um intervalo entre 10% e 25% da média das pressões de operação do equipamento na condição normal.

Destaca-se o caso do equipamento 5 da unidade 2 que, conforme discutido previamente, apresenta um comportamento de instabilidade operacional, resultando

em um maior desvio padrão, e conseqüentemente maior valor de *set point* de abertura da PSV.

A influência desses parâmetros pode ser vista na Tabela 8, que mostra a quantidade de vezes que a válvula de segurança iria abrir, caso fossem utilizados os valores propostos como pressão de abertura da mesma.

Tabela 8 - Quantidade de eventos em que a PSV atuou, por unidade, por equipamento

Unidade	Equipamento	Quantidade de eventos em que a PSV abriu			
		Desvio Padrão	Valor adotado para Cpk		
			1,33	1,66	2,00
1	1	0,04	0	0	0
1	2	0,04	0	0	0
1	3	0,04	0	0	0
1	4	0,13	1	0	0
1	5	0,04	0	0	0
1	6	0,04	0	0	0
1	7	0,04	0	0	0
1	8	0,78	43	42	37
1	10	0,003	33	33	27
2	1	0,03	5	3	2
2	2	0,03	11	7	6
2	3	0,03	10	7	5
2	4	0,04	13	8	4
2	5	0,25	35	23	16
2	6	0,55	549	309	175
2	7	0,05	2	1	1
2	8	0,11	0	0	0
2	9	0,13	2	0	0
2	10	0,61	176	114	79

Fonte: Autor (2025)

Verifica-se então que a aplicação da metodologia para equipamentos que operam em regime contínuo permite o ajuste da válvula de pressão de maneira adequada, de forma que para os vasos de pressão da unidade 1, que possuem 1 ano de registro, houveram poucos casos de abertura da válvula de segurança, com redução na frequência de ocorrências ao se aumentar o grau de conservadorismo.

Por outro lado, para os equipamentos unidade 2, observa-se de forma geral uma maior frequência de ocorrências de abertura da válvula de segurança, o que é de se esperar ao se considerar que no intervalo amostral de dez anos esses equipamentos

certamente passaram por situações de sobrepressão. De toda forma, a aplicação da metodologia resultou em uma frequência de abertura razoável, principalmente para processos mais estáveis. Para processos mais instáveis, percebe-se que o aumento do conservadorismo resulta em uma redução da frequência de aberturas da PSV.

A Tabela 9 apresenta um resumo comparativo entre a o valor da pressão de ajuste da PSV pela metodologia em relação aos valores de ajuste reais utilizados nas unidades industriais. É possível observar de forma geral uma redução do valor da pressão de ajuste da PSV, evidenciando a adequação da metodologia proposta.

Tabela 9 - Redução da pressão de ajuste obtida pela metodologia proposta

Unidade	Equipamento	PMTA normalizada	Pressão de alívio normalizada	Relação entre a pressão de ajuste proposta pela metodologia, em relação ao valor original da pressão de ajuste (%)		
				Cpk = 1,33	Cpk = 1,66	Cpk = 2,00
1	1	1,6	1,20	0,96	0,98	1,02
1	2	1,6	1,20	0,96	0,98	1,02
1	3	1,6	1,21	0,95	0,98	1,01
1	4	49,8	45,73	0,03	0,04	0,04
1	5	1,6	1,53	0,77	0,79	0,83
1	6	1,6	1,57	0,74	0,76	0,79
1	7	1,5	1,39	0,84	0,86	0,89
1	8	9,8	10,00	0,41	0,49	0,57
1	10	3,4	3,38	0,30	0,30	0,30
2	1	1,2	1,21	0,94	0,96	0,99
2	2	1,2	1,21	0,94	0,96	0,99
2	3	1,2	1,21	0,94	0,96	0,99
2	4	1,2	1,21	0,94	0,97	1,00
2	5	2,7	2,73	0,73	0,83	0,92
2	6	20,7	20,67	0,15	0,18	0,21
2	7	1,3	1,29	0,93	0,97	1,01
2	8	2,2	2,16	0,66	0,71	0,77
2	9	1,7	1,67	0,91	0,99	1,08
2	10	16,7	16,67	0,21	0,24	0,28

Fonte: Autor (2025)

## 6. CONCLUSÕES

Após concluídas as avaliações nos vasos de pressões, as seguintes conclusões foram obtidas.

### 6.1 Coleta e análise exploratória dos dados

A coleta dos valores de pressão realizadas em campo permitiu uma avaliação detalhada dos perfis de pressão de operação observados em equipamentos críticos da indústria do petróleo durante períodos de até uma década. O correto entendimento dos dados, com eliminação de *outliers* referentes a paradas para manutenção dos vasos de pressão, permite uma melhor avaliação da condição de operação normal do equipamento e correta definição da pressão média de operação, com significativa redução do desvio padrão sem afetar a qualidade da amostra;

### 6.2 Objetivos

É possível verificar que como conclusão do presente trabalho foi possível avaliar o perfil de pressão um conjunto de equipamentos em unidades industriais distintas, realizar uma avaliação qualitativa e quantitativa dos fatores que influenciam a determinação da média das pressões de operação seguindo um critério para eliminação de dados espúrios. Também foi possível elaborar e aplicar uma nova metodologia para determinação do valor de abertura da válvula de segurança.

### 6.3 Aderência da metodologia

A metodologia proposta e aplicada permitiu a definição e conclusão de que é possível a determinação de um valor equilibrado para a abertura da válvula de segurança. A flexibilidade da adoção da metodologia em virtude do conservadorismo desejado, e perfil de distribuições de pressões observado permite que a pressão de ajuste da válvula de segurança seja feita de forma a garantir um equilíbrio entre economia, segurança e redução de tensões mecânicas.

Verificou-se a possibilidade da redução da pressão de ajuste da PSV, sendo este o resultado que se alinha ao objetivo desta dissertação.

Foi observado também que para alguns equipamentos, a PMTA e pressão de ajuste da PSV reais de campo possuem valores muito mais altos que a pressão média de operação observada. Nesses casos pode-se considerar que os vasos estão

superdimensionados para a condição do processo, de forma que a aplicação da metodologia, visando a redução de ocorrência de sobrepressões e riscos estruturais, não traria muitos benefícios.

#### 6.4 Impactos observados

Em seu texto, no que se refere à pressão de ajuste da válvula de segurança, a NR-13 determina que a pressão de ajuste deverá ser menor do que a PMTA do vaso e atender critérios das normas de fabricação, ficando a cargo do engenheiro a sua determinação. Dessa forma, a metodologia proposta mostrou-se adequada como alternativa para essa avaliação.

Os resultados encontrados no presente trabalho, também possibilitam uma avaliação seguindo critérios de confiabilidade que permitem a diminuição segura do valor de abertura da válvula de segurança, o que também impacta diretamente na condição segura de alongamento do tempo de campanha de diversos equipamentos atualmente instalados em unidades industriais, que por aspectos mecânicos e do processo necessitam da redução do valor da PMTA para atender critérios regulatórios, sem a necessidade de substituição das válvulas de segurança instaladas.

#### 6.5 Impactos esperados

No tocante aos aspectos financeiros, podemos concluir, de forma qualitativa, que a redução esperada da atuação das válvulas de segurança possibilitará uma redução da alívio (descarte) do fluido armazenado no vaso de pressão, representando, portanto, a mitigação do impacto negativo, tanto em termos econômicos (de forma direta), como por evitar riscos empresariais (multas, interdição, imagem perante a sociedade em geral, e aos acionistas) resultantes de impactos negativos de característica ambiental. Destaca-se, ainda, nesta mesma análise financeira, a indisponibilidade de informações quantitativas, decorrente da natural restrição e/ou sigilo empresarial.

## **7. PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS**

7.1 Analisar e implementar metodologia específica para os vasos de pressão que apresentem perfil de pressão de operação B, C, D ou E, conforme indicado no Quadro 7.

7.2 Analisar e implementar metodologia que avalie a influência da adoção de médias móveis (séries temporais de um ano, cinco anos e dez anos), identificando potenciais patamares diferentes de operação, em termos da pressão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAZADEH, M. A. et al. A dynamic system reliability analysis model on safety instrumented systems. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. v. 92, n. April.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries Part I-Sizing and Selection API Recommended Practice 520. **American Petroleum Institute**, 2000. p. 100. Disponível em: <<http://unrn.edu.ar/blogs/mantenimiento-industrial-alto-valle/files/2009/06/api-rp-520-1.pdf>>.

AMERICAN PETROLUEM INSTITUTE (API). **Sizing , Selection , and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries Part I — Sizing and Selection**. Washington, DC: [s.n.], 2020.

ARZAK, M. E. et al. Process capability analysis in filling operation – a case study. **International Journal of Scientific and Technology Research**, 2020. v. 9, n. 3, p. 6650–6655.

ASME, A. S. Of M. E. **Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, DIV 1, 2015**. 2016. ed. [S.l.]: [s.n.], 2015.

AYENSA-JIMÉNEZ, J. et al. An unsupervised data completion method for physically-based data-driven models. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2019. v. 344, p. 120–143. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.09.035>>.

BEHIE, S. W. et al. Guidance to improve the effectiveness of process safety management systems in operating facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020. v. 68, n. July, p. 104257. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104257>>.

BRASIL. **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>>.

FRANKLIN, L. Standard Bootstrap Confidence Internal Estimates of Cpk. *Computers industrial Engineering*, 1991. p. 5.

GONÇALEZ, P. U.; WERNER, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais. **Gestão & Produção**, 2009. v. 16, n. 1, p. 121–132.

GORGOGIANNI, A. et al. Adaptive goal-oriented data sampling in Data-Driven Computational Mechanics. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2023. v. 409, p. 115949. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cma.2023.115949>>.

GULERIA, P. et al. Lean six-sigma: Panacea to reduce rejection in gear manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*, 2020. v. 46, p. 4040–4046. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.559>>.

HELLEMANS, M. **The Safety Relief Valve Handbook: Design and Use of Process**

**Safety Valves to ASME and International Codes and Standards.** [S.l.]: [s.n.], 2009.

HREHOVA, S. Predictive model to evaluation quality of the manufacturing process using Matlab tools. **Procedia Engineering**, 2016. v. 149, n. June, p. 149–154. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.649>>.

JAVID, Y. Efficient risk-based inspection framework: Balancing safety and budgetary constraints. *Reliability Engineering and System Safety*, 2025. v. 253, n. January 2024, p. 110519. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110519>>.

KASHIF, M. *et al.* Robust process capability indices Cpm and Cpmk using Weibull process. **Scientific Reports**, 2023. v. 13, n. 1, p. 1–17. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-023-44267-4>>.

KOBAYASHI, K.; ALAM, S. B. Explainable, interpretable, and trustworthy AI for an intelligent digital twin: A case study on remaining useful life. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2024. v. 129, n. November 2023.

KOTEK, L.; TABAS, M. HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions. **Procedia Engineering**, 2012. v. 42, n. August, p. 808–815. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.473>>.

KSTEEL. Vasos de pressão para amônia. 2025. Disponível em: <<https://www.ksteel.com.br/vaso-de-pressao-para-amonia.php>>. Acesso em: 16 mar. 2025.

KULKARNI, T. *et al.* Construction and Praxis of Six Sigma DMAIC for Bearing Manufacturing Process. *Materials Today: Proceedings*, 2023. v. 72, p. 1426–1433. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.342>>.

LI, J. *et al.* Quantitative risk model and safety assessment of flammable working fluid leakage and explosion in a limited space. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2025. v. 96, n. September 2023, p. 105620. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105620>>.

LIU, S. W.; WU, C. W.; TSAI, Y. H. An adjustable inspection scheme for lot sentencing based on one-sided capability indices. **Applied Mathematical Modelling**, 2021. v. 96, p. 766–778. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.03.034>>.

LU, C. *et al.* Evaluation of operation safety of energy release process of liquefied air energy storage system. **Energy**, 2021. v. 235, p. 121403. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121403>>.

MAHAPATRA, A. P. K. Measures and Its Pharmaceutical Application. **Journal of Drug Delivery and Therapeutics**, 2020. v. 10, n. 5, p. 333–344.

MARCHETTI, S.; MAIO, F. DI; ZIO, E. A Physics-of-Failure (PoF) model-based Dynamic Bayesian Network for considering the aging of safety barriers in the risk assessment of industrial facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. v. 91, n. May, p. 105402. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105402>>.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. 6. ed. Jefferson City: [s.n.], 2009.

MUNIZ, M. **ANÁLISE CRÍTICA DA CONTRIBUIÇÃO DA TÉCNICA LOPA NA GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSO NA INDÚSTRIA.** [S.l.]: [s.n.], 2016.

ISBN 9783319600536.

NITZLER, J. *et al.* A generalized probabilistic learning approach for multi-fidelity uncertainty quantification in complex physical simulations. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 2022. v. 400, p. 115600. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.115600>>.

OLIVEIRA, J. B. De *et al.* Análise Da Capacidade De Um Processo: Um Estudo De Caso Baseado Nos Indicadores Cp E Cpk. **Encontro Nacional De Engenharia De Producao**, 2011. v. 31, p. 15. Disponível em: <[https://www2.unifap.br/furtado/files/2017/04/enegep2011\\_tn\\_sto\\_136\\_863\\_19320.pdf](https://www2.unifap.br/furtado/files/2017/04/enegep2011_tn_sto_136_863_19320.pdf)>.

PARK, S. *et al.* Incorporating inherent safety during the conceptual process design stage: A literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020. v. 63, n. December 2019, p. 104040. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.104040>>.

PRASHANT, A.; GAUR, A. V. Deterministic and Probabilistic Design of Pressure Vessels. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, 2014. v. 3, n. 8, p. 1540–1550.

RAMOS, A. Procedimentos inferenciais em índices de capacidade para dados autocorrelacionados via bootstrap. 2007. p. 20.

SEENIVASAN, R. *et al.* Optimizing Metformin HCl manufacturing: A Six Sigma approach to assess process capability. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, 2024. v. 14, n. 8, p. 103–111.

SIMION, C. Assessment of process stability and capability in a manufacturing organization: a case study. **MATEC Web of Conferences**, 2021. v. 343, p. 05011.

SINGH, P.; SUNDERLAND, N.; GULIJK, C. VAN. Determination of the health of a barrier with time-series data how a safety barrier looks different from a data perspective. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022. v. 80, n. September, p. 104889. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2022.104889>>.

SUN, H. *et al.* Resilience-based approach to safety barrier performance assessment in process facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021. v. 73, n. June, p. 104599. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104599>>.

SONG, Z. *et al.* Effects of post-deposition annealing on structure and mechanical properties of multilayer Ti/DLC films. *Diamond and Related Materials*, 2024. v. 147, n. January, p. 111340. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2024.111340>>.

SOUSA, R. A. F. DE. **METODOLOGIA PARA CATEGORIZAÇÃO DOS VASOS DE PRESSÃO PARA FINS DA NORMA REGULAMENTADORA 13 (NR-13)**. [S.l.]: [s.n.], 2025.

TAMASCELLI, N. *et al.* Artificial Intelligence for safety and reliability: A descriptive, bibliometric and interpretative review on machine learning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2024. v. 90, n. May, p. 105343. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105343>>.

WILLEY, R. J. Layer of protection analysis. **Procedia Engineering**, 2014. v. 84, p. 12–22. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.405>>.

WOOLURU, Y.; SWAMY, D. R.; NAGESH, P. The process capability analysis - A tool for process performance measures and metrics - A case study. **International Journal for Quality Research**, 2014. v. 8, n. 3, p. 399–416.

WU, C. W.; PEARN, W. L.; KOTZ, S. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. **International Journal of Production Economics**, 2009. v. 117, n. 2, p. 338–359.

XIE, L.; LUNDTEIGEN, M. A.; LIU, Y. Performance analysis of safety instrumented systems against cascading failures during prolonged demands. **Reliability Engineering and System Safety**, 2021. v. 216, n. August, p. 107975. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107975>>.

ZHANG, A. *et al.* Optimization of maintenances following proof tests for the final element of a safety-instrumented system. **Reliability Engineering and System Safety**, 2020. v. 196, n. December 2019, p. 106779. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106779>>.

ZHU, P. *et al.* Review of workflows of emergency shutdown systems in the Norwegian oil and gas industry. *Safety Science*, 2020. v. 121, n. March 2019, p. 594–602. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.037>>.

ZONG, C. *et al.* Fluid-structure coupling analysis of a pressure vessel-pipe-safety valve system with experimental and numerical methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2022. v. 199, n. August 2021, p. 104707. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104707>>.