

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA DE QUÍMICA

Lais da Silva Monteiro



IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALÍVIO EM UM
SIMULADOR DE TRANSIENTE HIDRÁULICO

RIO DE JANEIRO

2023

Lais da Silva Monteiro

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALÍVIO EM UM SIMULADOR DE
TRANSIENTE HIDRÁULICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheira Química

Orientadores: Prof^a. Heloísa Lajas Sanches Fernandes, D.Sc.

Claudio Veloso Barreto, M.Sc.

Pedro Alex Belem Lima, B.Sc.

Rio de Janeiro

2023

Lais da Silva Monteiro

IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ALÍVIO EM UM SIMULADOR DE
TRANSIENTE HIDRÁULICO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Química da
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado em 18 de dezembro de 2023.

Prof^a. Heloísa Lajas Sanches Fernandes, D.Sc., EQ/UFRJ

Claudio Veloso Barreto, M.Sc, PUC/RJ

Pedro Alex Belem Lima, B.Sc., PUC/RJ

Prof^a. Kese Pontes Freitas Alberton, D.Sc., EQ/UFRJ

Marco Túlio Cícero Araújo Fernandes, D.Sc., ETU/UFRJ

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por todo incentivo e amor incondicional que foram essenciais para que eu pudesse superar os obstáculos e chegar até aqui.

Ao Lucas, que tenho a felicidade de ter ao meu lado, pela paciência e compreensão que foram fundamentais nesse período.

Ao Matheus, Pedro e Victor, amigos que encontrei nessa jornada, por compartilharem tantos momentos incríveis ao longo desses anos.

À equipe do SIMDUT, por todo o conhecimento compartilhado e confiança depositada em mim.

Aos meus orientadores, por acompanharem todo o processo de elaboração deste trabalho e terem dado todo o suporte necessário para solução dos desafios encontrados.

RESUMO

MONTEIRO, Lais. **Implementação do Sistema de Alívio em um Simulador de Transiente Hidráulico**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

A compreensão dos transientes hidráulicos é essencial para garantir a operação segura de oleodutos e a simulação precisa desses eventos possibilita prever e gerenciar os eventos transientes de forma eficaz. Um código computacional em Python preexistente, que emprega o método das características e o método de diferenças finitas para simular as pressões máximas resultantes do fechamento de uma válvula de bloqueio, foi aprimorado por meio da implementação de Programação Orientada a Objetos (POO). Possibilitando a resolução de problemas relacionados ao fluxo em redes em dutos por meio de solução numérica matricial e a inclusão da modelagem de dispositivos de segurança. Essas melhorias e implementações permitiram uma análise mais aprofundada sobre os eventos de transientes hidráulicos em oleodutos, contribuindo para projetos e investigação de operações sistemas de transporte de fluidos. O disco de ruptura e a válvula de alívio (PSV), que foram os equipamentos de segurança modelados, desempenham um papel crucial na proteção dos sistemas de transporte de fluidos e garantem a integridade dos equipamentos, meio ambiente e pessoas envolvidas na operação. O código desenvolvido foi validado ao comparar os resultados com o programa comercial Synergy Pipeline Simulator® (SPS), revelando erros relativos de até 1,9% nos cenários avaliados. A norma *API STANDARD 520* foi empregada para dimensionar o sistema de alívio em um caso específico que foi capaz de reduzir a pressão máxima atingida ao longo do oleoduto. Os testes de malha de cálculo mostraram que o programa desenvolvido exige menos recursos computacionais devido à menor necessidade de refinamento da malha para alcançar resultados semelhantes ao SPS.

Palavras-chave: método das características, disco de ruptura, válvula de alívio, PRV, programação orientada a objetos

ABSTRACT

MONTEIRO, Lais. **Implementação do Sistema de Alívio em um Simulador de Transiente Hidráulico**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Understanding hydraulic transients is essential to ensure the safe operation of pipelines, and the precise simulation of these events enables the effective prediction and management of transient events. An existing Python computational code that utilizes the method of characteristics and finite difference method to simulate maximum pressures resulting from the closure of a blocking valve was enhanced through the implementation of Object-Oriented Programming (OOP). This enhancement allowed problem-solving related to flow in pipeline networks via numerical matrix solution and the inclusion of modeling safety devices. These improvements and implementations allowed a deeper analysis of hydraulic transient events in pipelines, contributing to projects and investigations in fluid transport system operations. The rupture disk and pressure safety valve (PRV), modeled safety equipment, play a crucial role in protecting fluid transport systems and ensuring the integrity of equipment, the environment, and individuals involved in the operation. The developed code was validated by comparing results with the commercial program Synergy Pipeline Simulator® (SPS), revealing relative errors of up to 1.9% in the evaluated scenarios. The API STANDARD 520 norm was used to size the relief system in a specific case, which was able to reduce the maximum pressure reached along the pipeline. The calculation grid tests showed that the developed program requires fewer computational resources due to lower grid refinement needed to achieve similar results compared to the SPS.

Keywords: characteristic method, rupture disk, relief valve, PRV, Object-Oriented Programming

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação do golpe de Ariete.....	16
Figura 2 – Representação da malha de cálculo para uma tubulação.	21
Figura 3 - Tubulação com variação de diâmetro.....	23
Figura 4 - Tubulação com ramificação.....	23
Figura 5 – Representação de um disco de ruptura instalado em uma tubulação... 	26
Figura 6 – Representação de uma PSV do tipo mola	28
Figura 7 – Diagrama simplificado de programação.....	33
Figura 8 – Ilustração do sistema utilizado como exemplo para regime permanente	34
Figura 9 – Ilustração do sistema utilizado como exemplo para regime transiente	36
Figura 10 – Curva de Fechamento da válvula linear	40
Figura 11 – Representação esquemática do modelo 1.....	40
Figura 12 – Representação esquemática do modelo 2.....	41
Figura 13 – Representação esquemática do modelo 3.....	42
Figura 14 – Curva de abertura da PSV	43
Figura 15 – Modelo de aplicação sem sistema de segurança instalado.....	43
Figura 16 – Perfil de elevação considerado no Estudo de caso	44
Figura 17 – Curva de fechamento da válvula de bloqueio.....	45
Figura 18 – Curva característica do sistema de bombeio	46
Figura 19 – Modelo de aplicação com Disco de Ruptura.....	47
Figura 20 – Modelo de aplicação com PSV	47
Figura 21 – Caso 1: Pressão e vazão ao longo do oleoduto	49
Figura 22 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio.....	51
Figura 23 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da tolerância do erro de pressão no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio.....	52
Figura 24 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da malha de cálculo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio	53
Figura 25 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida modificando a tolerância e o espaçamento de cálculo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio.....	54
Figura 26 – Caso 2: Pressão à montante da válvula de bloqueio ao longo tempo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio.....	55
Figura 27 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio.....	57
Figura 28 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da tolerância de pressão no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio	58
Figura 29 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste de espaçamento da malha no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio	59
Figura 30 – Caso 3: Pressão a montante da válvula ao longo do tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio.....	60
Figura 31 – Caso 4: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio com disco de ruptura	62

Figura 32 – Caso 4: Pressão a montante do disco de ruptura ao longo do tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio.....	63
Figura 33 – Caso 5: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio com PSV	65
Figura 34 – Caso 5: Pressão a montante da PSV ao longo do Tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio.....	65
Figura 35 – Estudo de Caso: Pressão e vazão no regime permanente.....	67
Figura 36 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto sem o sistema de alívio.....	68
Figura 37 – Estudo de Caso: Pressão a montante da válvula de bloqueio ao longo do tempo sem o sistema de alívio.....	68
Figura 38 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto com disco de ruptura.....	71
Figura 39 – Estudo de Caso: Pressão e Vazão a montante do disco de ruptura ao longo do tempo	71
Figura 40 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto com PSV	73
Figura 41 – Estudo de Caso: Pressão e Vazão a montante da PSV ao longo do tempo	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores preliminares para Kd e Kc	29
Tabela 2 – Áreas efetivas e designação de letras para orifícios padrões.	30
Tabela 3 – Propriedades físicas do Oleoduto de validação	39
Tabela 4 – Propriedades físicas do fluido de validação.....	39
Tabela 5 – Pressão nos tanques de validação	39
Tabela 6 – Propriedades do disco de ruptura	41
Tabela 7 – Propriedades da PSV	42
Tabela 8 – Propriedades físicas do Oleoduto do Estudo de Caso	44
Tabela 9 – Propriedades físicas do fluido do Estudo de Caso	44
Tabela 10 – Propriedades da válvula de bloqueio do Estudo de Caso.....	45
Tabela 11 – Pressão nos tanques de validação	47
Tabela 12 – Casos simulados	48
Tabela 13 – Caso 1: Principais características utilizadas na simulação	49
Tabela 14 – Caso 1 – Regime permanente: Comparação da pressão e vazão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.....	50
Tabela 15 – Caso 2 – Transiente de fechamento lento: Principais características utilizadas na simulação	50
Tabela 16 – Caso 2 - Transiente de fechamento lento: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.	51
Tabela 17 – Caso 2 - Teste de malha e tolerância de pressão: Comparação da pressão no ponto de maior erro relativo.....	54
Tabela 18 – Caso 3: Principais características utilizadas na simulação	56
Tabela 19 – Caso 3 – Transiente de fechamento rápido: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.	57
Tabela 20 – Caso 4: Principais características utilizadas na simulação	61
Tabela 21 – Caso 5: Principais características utilizadas na simulação	64
Tabela 22 – Caso 6: Principais características utilizadas na simulação	66
Tabela 23 – Caso 6 – Regime permanente do estudo de caso : Comparação da pressão e vazão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.....	67
Tabela 24 – Caso 7 – Estudo de Caso sem sistema de alívio: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.	69
Tabela 25 – Dados para o dimensionamento dos dispositivos de segurança.....	70
Tabela 26 – Dados para o dimensionamento do disco de ruptura	70
Tabela 27 – Caso 8 – Estudo de Caso com disco de ruptura: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.	72
Tabela 28 – Dados para o dimensionamento da PSV	72
Tabela 29 – Caso 9 – Estudo de Caso com PSV: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API – American Petroleum Institute.

MOC – Método das características .

PMTA – Pressão máxima de trabalho admissível: maior valor de pressão a que um equipamento pode ser submetido continuamente.

PSV – Válvula de alívio de pressão.

Setpoint - valor de referência estabelecido para uma variável.

SPS – Synergy Pipeline Simulator®: software de simulação de fluxo transitório comercializado pela DNV e reconhecido internacionalmente para simulações de termo hidráulicas em dutos.

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Celeridade da onda de pressão
A	Área da seção transversal
A_r	Área de descarga efetiva requerida
A_{ef}	Área efetiva de descarga a partir das áreas de orifício padrão da norma <i>API 526: Flanged Steel Pressure-relief Valves (2023)</i>
B	Variável auxiliar
CM	Equação característica negativa
CP	Equação característica positiva
C_v	Coefficiente da válvula
D	Diâmetro interno do tubo
e	Espessura da parede do tubo
E	Módulo de Young do material de fabricação do tubo
f	Fator de atrito
F_R	Fração de abertura da válvula
g	Aceleração da gravidade
G_I	gravidade específica do líquido, referente à água em condições padrão
H	Carga piezométrica
K	Módulo de compressibilidade
K_c	fator de correção para instalações com um disco de ruptura
K_d	Coefficiente de descarga nominal
K_v	Fator de correção devido à viscosidade
K_w	Fator de correção devido à contrapressão
L	Comprimento da tubulação
N	Número de sessões da tubulação
P	Pressão
Q	Vazão
R	Variável auxiliar
Re	Número de Reynolds
t	Tempo
v	Velocidade de escoamento
ε	Rugosidade da parede do tubo
$\Delta\varepsilon_T$	Deformação total
ε_1	Deformação longitudinal
ε_2	Deformação lateral
ν	Modulo de Poisson do material da tubulação
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica do fluido
ρ_w	Massa específica da água

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O GOLPE DE ARIETE	16
2.2	EQUAÇÃO DA CELERIDADE	19
2.3	MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS	19
2.4	MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS	21
2.5	SISTEMAS COMPLEXOS	22
2.5.1	O passo de tempo para sistemas complexos:	24
2.6	DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA:.....	25
2.6.1	Disco de ruptura	26
2.6.2	Válvulas de Alívio de pressão - PSV	27
2.6.3	Dimensionamento da área efetiva requerida: Disco de ruptura e PSVs...	28
3	METODOLOGIA	31
3.1	METODOLOGIA DE PROGRAMAÇÃO.....	31
3.2	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM REGIME PERMANENTE.....	34
3.3	SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM REGIME TRANSIENTE.....	35
3.4	MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS PARA O SISTEMA DE ALÍVIO	37
3.4.1	Disco de Ruptura	37
3.4.2	Válvula de Alívio (PSV)	37
3.5	COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE COMERCIAL	38
3.5.1	Modelos considerados na validação	39
3.5.1.1	<i>Modelo de Validação 1 – Sem sistemas de segurança acoplados</i>	40
3.5.1.2	<i>Modelo de Validação 2 – Com disco de ruptura</i>	41
3.5.1.3	<i>Modelo de Validação 3 – Com PSV</i>	42
3.5.2	Modelo de Aplicação com Perfil de Elevação	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	COMPARATIVO ENTRE SIMULADORES.....	48
4.1.1	Caso 1 - Regime permanente	49
4.1.2	Caso 2 - Transiente de fechamento lento	50
4.1.3	Caso 3 – Transiente de fechamento rápido	56

4.1.4	Caso 4 – Fechamento Rápido com Disco de Ruptura.....	60
4.1.5	Caso 5 - Fechamento Rápido com PSV.....	63
4.1.6	Caso 6 - Modelo de Aplicação – Regime Permanente	66
4.1.7	Caso 7 - Modelo de Aplicação Sem Sistema de Alívio	67
4.1.8	Caso 8 - Modelo de Aplicação Com Disco de Ruptura.....	70
4.1.9	Caso 9 - Modelo de Aplicação Com PSV	72
5	CONCLUSÕES	75
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
	APÊNDICE A - EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS....	79

1 INTRODUÇÃO

O uso de tubulações é uma das formas mais comuns e eficientes utilizadas pela indústria para o transporte de fluidos como água, petróleo, gás natural e entre outros produtos químicos. Segundo o Relatório Anual Integrado (2023), somente em 2022, a Transpetro foi responsável pela movimentação de 630 milhões de m³ de produtos entre as operações dos 7,7 mil quilômetros de oleodutos e 49 terminais, terrestres e marítimos.

Todo sistema de transporte de fluidos está sujeito ao fenômeno do transiente hidráulico. Esse fenômeno ocorre quando há variação na vazão, a qual provoca perturbações tais como ondas de pressão, que são propagadas através do sistema (RENNÓ, 1984).

Neste contexto, Lima (2020) desenvolveu um simulador de transientes hidráulico em dutos, a fim de investigar o comportamento do sistema ao fechar uma válvula de bloqueio repentinamente. O simulador, foi desenvolvido na linguagem de programação Python. O método das características, mais conhecido por sua sigla em inglês, MOC, que se refere à expressão *method of characteristics*, foi empregado como técnica matemática para resolução das equações diferenciais parciais. Os equipamentos modelados incluíram válvulas de bloqueio e retenção, bombas centrifugas e tanques. Além dos equipamentos modelados por Lima (2020), é importante destacar a importância dos equipamentos de segurança que são fundamentais para garantir a integridade dos elementos, meio ambiente e das pessoas envolvidas na operação.

As válvulas de alívio de pressão (*Pressure Relief Valves – PRV*) em oleodutos tem por objetivo a proteção à vida e à propriedade, garantindo a confiabilidade do sistema. Em eventos no qual o oleoduto é bloqueado de forma acidental, a pressão interna se eleva rapidamente numa situação chamada de salto de pressão (*surge pressure*). A função das *PRVs* é retirar parte do fluido transportado no oleoduto para evitar o aumento da pressão de operação acima de um limite pré-estabelecido no projeto. (FILGUEIRAS et al., 2014)

Este trabalho dá continuidade ao estudo realizado por Lima (2020), com o objetivo de incluir novas funcionalidades ao simulador de transientes hidráulicos desenvolvido pelo autor. A primeira modificação importante ao código, foi a sistematização da organização do sistema de equações algébricas oriundas da aplicação do MOC. Com a utilização de uma abordagem matricial para esta organização, é possível a análise de

sistemas complexos de oleodutos de forma mais generalizada. Além disso, os modelos de dois equipamentos de segurança, a *PRV* e o disco de ruptura, foram incorporados ao simulador. Essas melhorias e implementações permitiram uma análise mais aprofundada sobre transientes hidráulicos, contribuindo para novos projetos e investigação de operações seguras de sistemas de transporte de fluidos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é incluir a modelagem de sistemas de alívio ao simulador de Lima (2020), possibilitando uma análise mais completa dos fenômenos de transiente hidráulico e avaliação de segurança operacional de dutos utilizando o simulador. Adicionalmente, as rotinas de cálculo foram adaptadas e reestruturadas utilizando Programação Orientada a Objeto (POO), a fim de facilitar a implementação de melhorias futuras e inclusão de novos equipamentos

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Tratamento matricial das equações de métodos de características para soluções de problemas de escoamento em redes de dutos;
- Permitir a simulação de vazamentos e injeções de produtos ao longo do duto, necessário para simulação de sistemas de segurança;
- Modelagem do disco de ruptura e a válvula de alívio do tipo mola (PSV), também chamadas de *PRVs* (*pressure relief valve*).
- Realizar testes comparativos com resultados obtidos pelo simulador comercial Synergy Pipeline Simulator (SPS).
- Utilizar o simulador em Python desenvolvido para projeto de um sistema de segurança;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em seu trabalho, Lima (2020) descreve os métodos utilizados para obter as equações fundamentais necessárias à simulação dos transientes hidráulicos, fundamentando-se na teoria geral do golpe de aríete, conforme apresentada por Wylie e Streeter (1978).

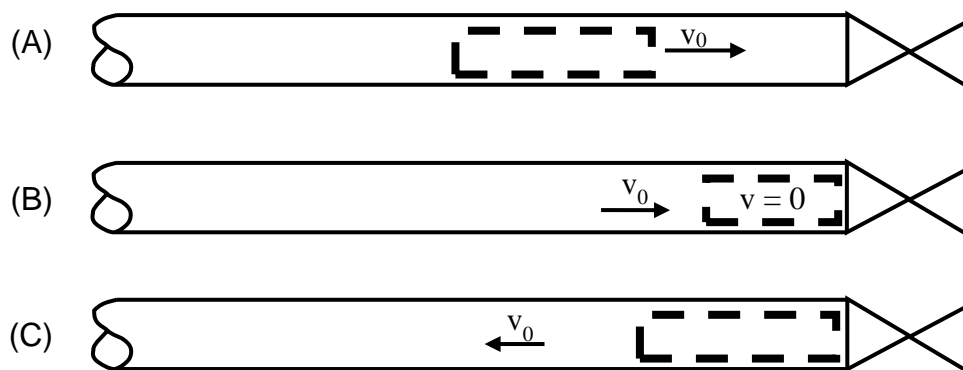
2.1 O GOLPE DE ARÍETE

O golpe de aríete é um fenômeno comum em sistemas de dutos, normalmente ocorre quando vazão é rapidamente alterada, resultando em um aumento acentuado na pressão da tubulação (XIA, *et al*, 2023).

Wylie e Streeter (1978), descrevem fisicamente o fenômeno do golpe de aríete: Ao fechar uma válvula instantaneamente, o fluido que antes estava passando livremente a uma velocidade v_0 (A), representado pelo volume de controle na Figura 1, colide com o corpo da válvula e então começa a ser comprimido pela massa de fluido que o seguia (B) resultando no aumento da pressão interna. Esse aumento persiste até atingir a máxima compressão do fluido em toda a extensão da tubulação.

À medida que o fluido inicia seu processo de descompressão, uma onda de pressão, com velocidade de propagação a , toma o sentido contrário (C), até que atinja o tanque de armazenamento e novamente volta a ser comprimido devido à baixa pressão do reservatório.

Figura 1 – Representação do golpe de Aríete.



Fonte: Adaptada (Wylie e Streeter, 1978)

Este ciclo se repete a cada $\frac{2L}{a}$ segundos, onde a é a velocidade de propagação da onda e L o comprimento total da tubulação, sendo que a ação do atrito do fluido e das perdas de energia provocadas pelo comportamento elástico tanto do fluido quanto da parede do duto, vão atuar na atenuação da onda de pressão, até que o sistema entre em repouso.

Durante o golpe de aríete, o aumento repentino da pressão pode resultar em uma pequena variação na área transversal da tubulação. Conforme descrito por Wylie e Streeter (1978), essa variação na área transversal da tubulação é consequência de uma deformação radial total $\left(\Delta\varepsilon_T \frac{D}{2}\right)$ em todo o perímetro (πD) , conforme a equação (1):

$$\Delta A = \Delta\varepsilon_T \frac{D}{2} \pi D \quad \text{ou} \quad \frac{\Delta A}{A} = 2\Delta\varepsilon_T \quad (1)$$

A deformação radial é composta pela deformação longitudinal (ε_1) e lateral (ε_2), que estão relacionadas com o coeficiente de Poisson do material (ν), da seguinte forma:

$$\nu = \frac{\varepsilon'_2}{\varepsilon_1} \quad (2)$$

$$\varepsilon_T = \varepsilon_2 - \varepsilon'_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \nu \quad (3)$$

Relacionando a tensão (σ) e deformação (ε), considerando o módulo de Young do material (E), obtemos a tensão longitudinal (σ_1) unitária e a tensão lateral unitária σ_2 pela lei de Hooke:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \quad e \quad \varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} \quad (4)$$

Para tubos de parede fina $\left(\frac{D}{e} > 20\right)$, a tensão lateral pode ser descrita pela fórmula de Barlow a seguir:

$$\Delta\sigma_2 = \frac{D\Delta P}{2e} \quad (5)$$

Podemos então substituir as equações (3), (4) e (5) na equação (6), e reescrevê-la em função da diferença de pressão:

$$\frac{\Delta A}{A\Delta P} = \frac{2}{E\Delta P} \left(\frac{D\Delta P}{2e} - \nu\Delta\sigma_1 \right) \quad (6)$$

A tensão longitudinal ($\Delta\sigma_1$), depende da forma em que a tubulação está ancorada, fazendo as devidas considerações e simplificações para cada caso a (6) se torna:

Para tubulação ancorada em apenas uma das extremidades: $\Delta\sigma_1 = \frac{D\Delta P}{4e}$

$$\frac{\Delta A}{A\Delta P} = \frac{D}{Ee} \left(1 - \frac{\nu}{2} \right) \quad (7)$$

Para tubulação ancorado em ambas as extremidades: $\varepsilon_1 = 0$ e $\sigma_1 = \nu \sigma_1$

$$\frac{\Delta A}{A\Delta P} = \frac{D}{Ee} (1 - \nu^2) \quad (8)$$

Para tubulação com juntas de expansão: $\sigma_1 = 0$

$$\frac{\Delta A}{A\Delta P} = \frac{D}{Ee} \quad (9)$$

Considerando suas semelhanças as equações (7), (8) e (9) podem ser simplificadas para equação (10), de forma que a constante C_1 dependerá do caso estudado:

$$\frac{\Delta A}{A\Delta P} = \frac{D}{Ee} C_1 \quad (10)$$

A análise para tubos de paredes espessas $\left(\frac{D}{e} < 20\right)$, procede da mesma forma que para tubos de paredes finas. No entanto, para tubos de paredes espessas, a variação de

tensão e deformação ao longo da parede do tubo é levada em consideração. A análise chega à mesma equação para a velocidade da onda que para tubos de paredes finas, desde que redefinamos os coeficientes C_1 da equação para cada caso (Bruce E. Larock, 1999).

Caso (a) ancoragem da tubulação somente na extremidade a montante;

$$C_1 = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[\left(\frac{5}{4} - \mu \right) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right] \quad (11)$$

Caso (b) restrição total do tubo contra movimento axial.

$$C_1 = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[(1 - \mu^2) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right] \quad (12)$$

Caso (c) juntas de dilatação longitudinais ao longo da tubulação.

$$C_1 = \frac{1}{1 + \frac{e}{D}} \left[(1) + 2 \frac{e}{D} (1 + \mu) \left(1 + \frac{e}{D} \right) \right] \quad (13)$$

2.2 EQUAÇÃO DA CELERIDADE

A velocidade de propagação da onda de pressão decorrente de um transiente hidráulico, chamada de celeridade, é também deduzida por Wylie e Streeter (1978) e pode ser escrita em função do módulo de compressibilidade do fluido $\left(K = \rho \frac{\Delta P}{\Delta \rho} \right)$ e da deformação da parede do tubo, conforme explicitado na equação (14):

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{K}{E} \right) \left(\frac{D}{e} \right) \right] C_1}} \quad (14)$$

2.3 MÉTODO DAS CARACTERÍSTICAS

O fenômeno do transiente hidráulico, pode ser descrito a partir das equações diferenciais parciais de movimento (15) e continuidade (16) descritas a seguir:

$$g \frac{\partial H}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (15)$$

$$v \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

Sendo $\frac{\partial H}{\partial x}$ e $\frac{\partial v}{\partial x}$ a derivada parcial em relação a x da carga piezométrica e da velocidade, respectivamente, e $\frac{\partial H}{\partial t}$ a derivada parcial da carga piezométrica em relação ao tempo, as equações (15) e (16), formam um par de equações diferenciais parciais hiperbólicas quase lineares em termos de duas variáveis dependentes, velocidade (v) e carga piezométrica (H), e duas variáveis independentes, distância ao longo do tubo (x) e tempo (t) (WYLIE e STREETER, 1978), que não tem solução analítica, sendo necessário o uso de algum método numérico para sua resolução. Diversos métodos podem ser utilizados para solucionar o problema, sendo um dos mais comuns o método das características.

O método das características foi utilizado por Wylie e Streeter (1978) para transformar as equações continuidade e do movimento em equações ordinárias e algumas simplificações são realizadas: Durante um transiente hidráulico podemos considerar que a variação da velocidade no tempo será muito maior que a variação da velocidade ao longo do duto ($\frac{\partial v}{\partial t} \gg v \frac{\partial v}{\partial x}$), e que a variação da carga piezométrica ao longo do tempo é maior que ao longo do duto ($\frac{\partial H}{\partial t} \gg v \frac{\partial H}{\partial x}$), assim, podemos desprezar o segundo termo da equação do movimento (15) e o primeiro termo da equação da continuidade (16):

$$L_1 = g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (17)$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2 \partial v}{g \partial t} = 0 \quad (18)$$

Combinando linearmente as equações (17) e (18), utilizando um multiplicador λ desconhecido obtemos:

$$L = L_1 + \lambda L_2 = \lambda \left[\frac{g \partial H}{\lambda \partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \lambda \frac{a^2 \partial v}{g \partial t} \right] + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \quad (19)$$

Geralmente as variáveis v e H são funções do espaço e do tempo, se a variável independente x for descrita como função de t obtemos:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (20)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad (21)$$

Se analisarmos as equações (17), (18) e (19) observamos que:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{g}{\lambda} = \frac{\lambda a^2}{g} \quad (22)$$

$$L = \lambda \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} \quad (23)$$

Ao isolarmos λ na equação (22) obtemos:

$$\lambda = \pm \frac{g}{a} \quad (24)$$

Que substituindo os dois valores λ de nas equações (22) e (23), obtemos dois pares de equações diferenciais ordinárias:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = +a \end{array} \right\} C^+ \quad (25)$$

$$\left. \right\} C^- \quad (26)$$

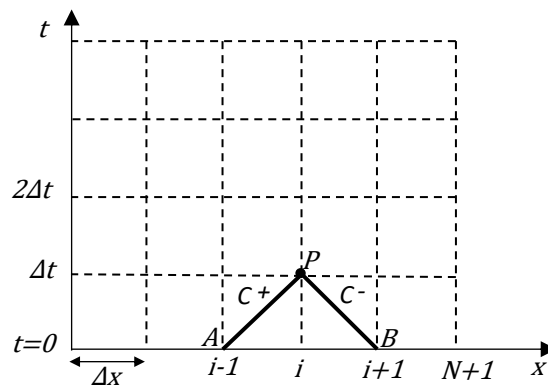
$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{g}{a} \frac{dH}{dt} + \frac{dv}{dt} + \frac{fv|v|}{2D} = 0 \\ \frac{dx}{dt} = -a \end{array} \right\} C^- \quad (27)$$

$$\left. \right\} C^+ \quad (28)$$

2.4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Considerando que a tubulação é dividida em N trechos de tamanho Δx e o passo de tempo pode ser definido por $dt = \frac{dx}{a}$. A representação da malha de cálculo para uma tubulação pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2 – Representação da malha de cálculo para uma tubulação.



Fonte: Adaptada (Wylie e Streeter, 1978)

Partindo das condições de regime permanente ($t=0$), onde os valores de velocidade de escoamento e carga piezométrica são conhecidos em todos os pontos da malha Δx as equações (25), e (27) podem ser reescritas em função da vazão e integradas para obtenção das equações de compatibilidade (29) e (30), calculados em cada ponto interno i . Essas equações, descrevem a propagação da onda de pressão e vazão ao longo da tubulação durante um transiente.

$$C^+: H_{Pi} = C_P - BQ_{Pi} \quad (29)$$

$$C^-: H_{Pi} = C_M + BQ_{Pi} \quad (30)$$

C_P e C_M são obtidos pelas equações (31) e (32), resultante do passo de tempo anterior no ponto $i - 1$ e $i + 1$ da tubulação, e a carga piezométrica no ponto i obtido pela equação (33).

$$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (31)$$

$$C_M = H_{i+1} + BQ_{i+1} - RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (32)$$

$$H_{Pi} = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (33)$$

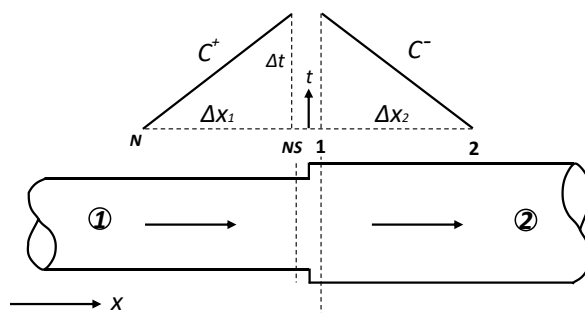
$$\text{Onde } B = \frac{a}{g} \text{ e } R = \frac{f dx}{2gDA^2}$$

2.5 SISTEMAS COMPLEXOS

No estudo de sistemas complexos, Wylie e Streeter (1978) tratam as seções internas de cada equipamento, a cada instante de tempo, independentemente das outras partes do sistema. Em sistemas onde há mais de um duto interligado a outro, por exemplo, somente as condições finais das tubulações vão interagir com os equipamentos adjacentes e cada condição de contorno será tratada independentemente.

A equação de continuidade deve ser satisfeita a cada instante de tempo. Na ligação de tubulações com diferentes propriedades, é assumido que o ponto da tubulação a jusante possui a mesma carga e vazão do último ponto da tubulação a montante. A Figura 3 demonstra o caso em que os diâmetros entre as duas tubulações conectadas são diferentes, mas isso é válido para as outras propriedades da tubulação como a rugosidade ou espessura da parede do tubo. Sendo $Q_{P_{1,NS}} = Q_{P_{2,1}}$ e $H_{P_{1,NS}} = H_{P_{2,1}}$.

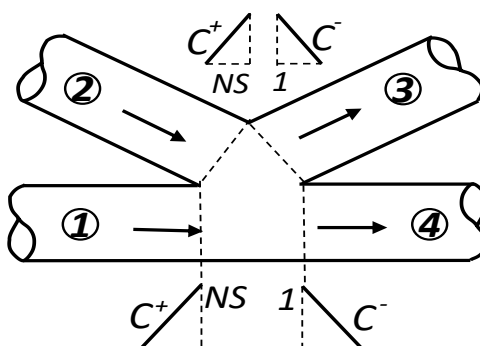
Figura 3 - Tubulação com variação de diâmetro



Fonte: Adaptada (Wylie e Streeter, 1978)

Para junção de conexões onde existe uma ramificação, a junção é vista como uma conexão pontual, um “nó”, com duas variáveis: a vazão nodal Q_n (que pode ser zero) e uma pressão nodal ou linha hidráulica. Qualquer equipamento pode estar conectado aos nós. A Figura 4 mostra a representação esquemática da conexão entre 4 tubulações.

Figura 4 - Tubulação com ramificação



Fonte: Adaptada (Wylie e Streeter, 1978)

Onde podemos escrever:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_P + Q_n = 0 \quad (34)$$

Sendo $\sum Q_P$ o somatório da vazão instantânea de todas as tubulações conectadas a este nó. Uma carga comum (H_p) é assumida para todas os equipamentos conectados naquele ponto, ignorando efeitos de perda de carga pontual, ou seja:

$$H_p = H_{P_1NS} = H_{P_2NS} = H_{P_3,1} = H_{P_4,1} \quad (35)$$

Uma equação de compatibilidade é necessária para cada entrada e saída da ramificação, sendo nesse caso a equação (29) para os tubos 1 e 2 e a equação (30) para os tubos 3 e 4. Para uma equação de Q_n conhecido e carga desconhecida, obtemos:

$$Q_{P_{1,NS}} = -\frac{H_P}{B_1} + \frac{C_P}{B_1} \quad (36)$$

$$Q_{P_{2,NS}} = -\frac{H_P}{B_2} + \frac{C_P}{B_2} \quad (37)$$

$$-Q_{P_{3,1}} = -\frac{H_P}{B_3} + \frac{C_{M_3}}{B_3} \quad (38)$$

$$-Q_{P_{4,1}} = -\frac{H_P}{B_4} + \frac{C_{M_4}}{B_4} \quad (39)$$

Somando as equações (36), (37), (38) e (39), obtemos:

$$\sum Q_P = -H_P \sum \frac{1}{B} + \frac{C_{P_1}}{B_1} + \frac{C_{P_2}}{B_2} + \frac{C_{M_3}}{B_3} + \frac{C_{M_4}}{B_4} = 0 \quad (40)$$

Que também pode ser escrita em função de H_P :

$$H_P = \frac{\frac{C_{P_1}}{B_1} + \frac{C_{P_2}}{B_2} + \frac{C_{M_3}}{B_3} + \frac{C_{M_4}}{B_4}}{\sum \frac{1}{B}} \quad (41)$$

Para uma junção com vazão nodal desconhecida, mas pressão conhecida, os fluxos da tubulação podem ser determinados explicitamente a partir das equações de compatibilidade obtidas pelo método das características e diferenças finitas. A vazão nodal pode ser determinada diretamente pela equação (34). Quando a equação (40) é substituída na equação (34), definimos F que é função das variáveis H_P , e a vazão dos elementos conectados.

$$F = -H_P \sum \frac{1}{B} + \frac{C_{P_1}}{B_1} + \frac{C_{P_2}}{B_2} + \frac{C_{M_3}}{B_3} + \frac{C_{M_4}}{B_4} + Q_n = 0 \quad (42)$$

2.5.1 O passo de tempo para sistemas complexos:

Para solucionar sistemas complexos pelo método das características, é necessário que o passo de tempo Δt seja igual para cada tubulação j .

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j N_j} \quad (43)$$

Podemos observar que nesse caso seria impossível obter um Δt em comum para a maioria dos sistemas complexos. Wylie e Streeter (1978) propõem que, considerando que o cálculo da celeridade possui muitas incertezas atribuídas, pode-se considerar uma variação de até 15% (ψ_j) no valor da mesma. Obtendo assim:

$$\Delta t = \frac{L_j}{a_j(1 \pm \psi_j)N_j} \quad (44)$$

Para sistemas onde o Δt não possa ser ajustado dessa forma, outras aproximações são necessárias.

2.6 DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA:

Na indústria química e petroquímica, vasos e tubulações são protegidos contra sobrepressão por meio de dispositivos de alívio de segurança, geralmente discos de ruptura ou válvulas de segurança (Mutegi, M. K.; Schmidt, J.; Denecke, J, 2019).

Dispositivos de segurança são fundamentais para proteção de pessoas dos perigos dos processos, evitar danos aos equipamentos e à propriedade, minimizar as perdas de produto e cumprir requisitos normativos e regulamentares.

Por serem dispositivos leves e pequenos, os discos de ruptura podem ser feitos de diversos tipos de materiais, até mesmo de ligas metálicas ou compósitos resistentes a corrosão, diferente do material usual das *PRVs*.

A válvula de alívio de pressão (*PRV*) é um componente de segurança indispensável e, em muitos casos, sua instalação é uma exigência legal em todos os tipos de equipamentos sob pressão (Zhang, J *et al.* 2018)

A norma *API STANDARD 520 - Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Device* (2014), do *American Petroleum Institute* (API), estabelece os requisitos para o projeto e instalação de válvulas de segurança, alívio de pressão e dispositivos de segurança para proteção contra sobrepressão em equipamentos de processo.

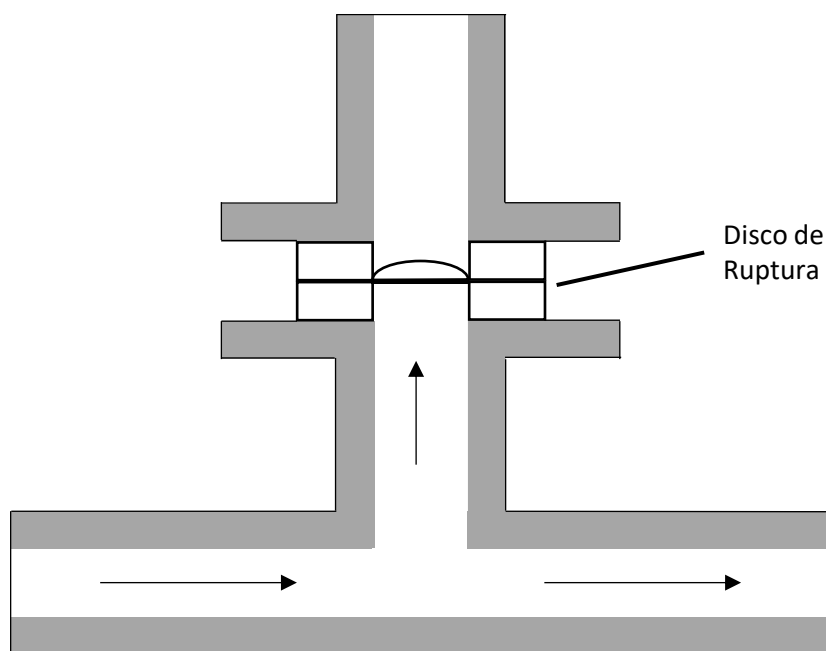
Para estabelecer o tamanho e o projeto de um dispositivo de alívio de pressão para qualquer aplicação, o projetista deve primeiro determinar as condições para as quais a proteção contra sobrepressão pode ser necessária. Deve-se ter cuidado ao estabelecer as várias contingências que podem resultar em sobrepressão. As contingências que podem causar sobrepressão devem ser avaliadas em termos das pressões geradas e das taxas nas quais os fluidos devem ser aliviados. (*API STANDARD 520 – Part I*, 2014).

2.6.1 Disco de ruptura

O disco de ruptura é um dispositivo de segurança utilizado em sistemas que trabalham com fluidos pressurizados. É um elemento de menor resistência mecânica que falha na pressão designada para proteger vasos de pressão, tanques de armazenamento, tubulações e outros equipamentos de sistemas pressurizados contra danos causados por aumento de pressão e condições de vácuo excessivo (XIUPING, 2012).

O desenho esquemático da Figura 5 representa a instalação de um disco de ruptura em uma tubulação:

Figura 5 – Representação de um disco de ruptura instalado em uma tubulação.



Fonte: Elaboração própria

As setas representam a direção do fluxo. O disco, geralmente flangeado à tubulação, ao romper, abre caminho para passagem do fluido para atmosfera ou pode ser encaminhado a tanques de armazenamento para evitar a perda de produto.

Os discos podem ser utilizados sozinhos, em série ou em paralelo com dispositivos de alívio e podem ser feitos de uma variedade de materiais. Um problema importante relacionado aos discos de ruptura é a flexão do metal à medida que as pressões do processo mudam. A flexão pode levar à falha prematura em pressões abaixo da pressão de ajuste. Por esta razão, alguns sistemas de disco de ruptura são projetados para operar em pressões bem abaixo da pressão de ajuste (Crowl, Louvar; 2011).

Discos de ruptura e válvulas de alívio são utilizados em série para casos nos quais fluidos muito corrosivos ou incrustantes podem danificar o corpo da válvula através do contato direto. Nesse caso, o disco é utilizado para a proteção da integridade do equipamento e não diretamente para proteção da operação. É importante ressaltar que, ao instalar dispositivos em série, é necessário ajustá-los para que tenham o mesmo *setpoint* de abertura.

De acordo com a *API 520*, a escolha do disco de ruptura é um processo iterativo onde deverão ser considerados os limites da faixa de projeto de fabricação do disco que é tipicamente baseado na Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA) do equipamento a ser protegido.

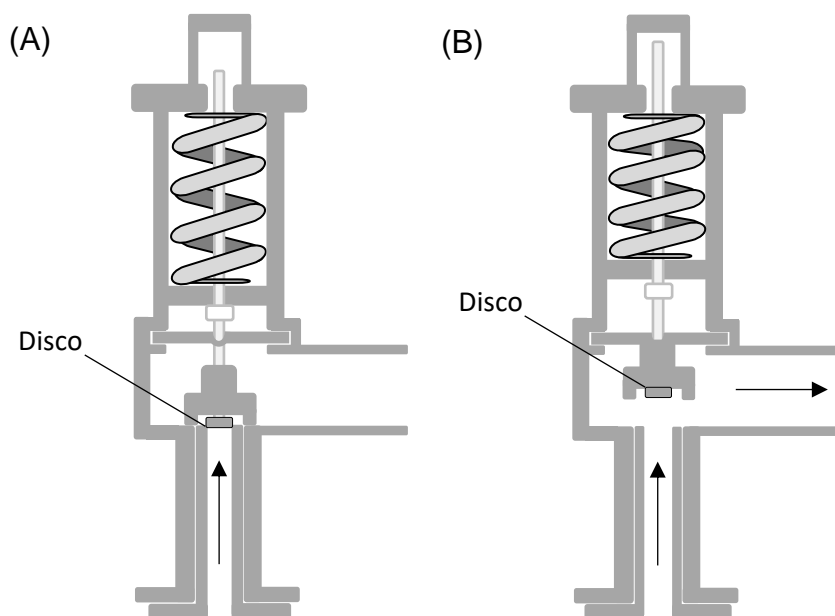
2.6.2 Válvulas de Alívio de pressão - PSV

Diferente dos discos de ruptura, as válvulas de alívio do tipo mola são dispositivos de segurança reversíveis, projetadas para abrir a um *setpoint* de pressão e fechar quando as condições do sistema voltarem a normalidade.

Os elementos básicos de uma PSV do tipo mola incluem um bocal de entrada conectado ao vaso ou sistema a ser protegido, um disco móvel que controla o fluxo através do bocal e uma mola que controla a posição do disco (*API STANDARD 520*, 2014).

A força devido à pressão do fluido atua na parte inferior do disco de fechamento da válvula e é contrabalançada por uma força mecânica direta que atua em sentido contrário devido à mola, pelo peso do disco e por uma força imposta pela contrapressão do fluido. Normalmente estas válvulas atingem sua capacidade de descarga certificada com uma sobrepressão de 10% para gases e vapores e de 10 a 25% para líquidos (Carneiro, 2011).

Figura 6 – Representação de uma PSV do tipo mola



Fonte: Elaboração própria

A Figura 6, representa a PSV do tipo mola em dois estágios, em (A) a pressão exercida pelo fluido no disco não é maior que a contrapressão da mola, fazendo com que a mesma permaneça fechada. Em (B), o fluido exerceu uma pressão maior que a contrapressão da mola, comprimindo-a e empurrando o disco, conseqüentemente abrindo passagem para o fluido para a tubulação do sistema de alívio.

Independentemente de a válvula estar aliviando diretamente para a atmosfera ou se o escoamento for direcionado para um sistema de coleta, a contrapressão pode afetar o funcionamento da PRV. Os efeitos da contrapressão podem incluir variações na pressão de abertura, redução na capacidade de fluxo, instabilidade ou uma combinação dos três (API STANDARD 520, 2014).

2.6.3 Dimensionamento da área efetiva requerida: Disco de ruptura e PSVs

O dimensionamento é provavelmente a etapa mais importante durante a etapa de seleção do dispositivo de segurança.

Um equipamento subdimensionado não pode aliviar a pressão do sistema de forma eficaz e um sistema sobredimensionado resulta em custos desnecessários de material e mão-de-obra (SMITH; ZAPPE, 2004).

De acordo com a *API STANDARD 520* (2014), considerando líquido incompressível, o cálculo de dimensionamento da área do disco pode ser obtido a partir da equação (45).

$$A_r = 11,78 \frac{Q}{K_d K_w K_c K_v} \sqrt{\frac{G_I}{P_s - P_2}} \quad (45)$$

Onde P_s é a pressão de *setpoint* de abertura e P_2 é a contrapressão manométrica total. Devido ao fator de conversão adotado pela equação (45), é necessário utilizar as unidades adequadas para o correto dimensionamento da área requerida, onde as pressões são dadas em kPa, a vazão em L/min e a área é obtida em mm².

O coeficiente K_c é o fator de correção para instalações com disco de ruptura e o coeficiente de descarga nominal K_d , é obtido junto ao fabricante da válvula. Preliminarmente, pode ser considerado os seguintes valores para estes coeficientes.

Tabela 1 – Valores preliminares para K_d e K_c

Condição	K_d	K_c
PSV combinada com o do disco de ruptura	0,65	0,9 ⁽¹⁾
PSV	0,65	1,0
Disco de ruptura	0,62	-

⁽¹⁾ Quando não possui um valor certificado.

Fonte: *API STANDARD 520* (2014)

K_w é o fator de correção devido à contrapressão. Para válvulas do tipo mola ou se a contrapressão for atmosférica, K_w será igual a 1,0.

K_v é o fator de correção devido a viscosidade, calculado conforme a equação (46).

$$K_v = \left(0,9935 + \frac{2,878}{Re^{0,5}} + \frac{3242,75}{Re^{1,5}} \right)^{-1} \quad (46)$$

$$Re = \frac{Q(18,800 G_I)}{\mu \sqrt{A_{ef}}} \quad (47)$$

Conforme observado na equação (46), K_v dependente do número de Reynolds, que por sua vez é função da velocidade de escoamento. Como a velocidade de escoamento depende da área do orifício a ser selecionado, é necessário fazer um processo iterativo. Por isso, num primeiro momento, considera-se $K_v = 1$ para o dimensionamento de uma

área requerida preliminar. A partir dela, seleciona-se o orifício com área imediatamente superior à área preliminar calculada a partir dos tamanhos de orifício apresentados na Tabela 2, definidos pela norma *API 526: Flanged Steel Pressure Relief Valves (2023)*. Em posse da área do orifício preliminar, recalcula-se o K_v com o número de Reynolds atualizado e verifica-se se a nova área requerida é atendida pelo orifício selecionado. Se a área corrigida exceder a área de orifício escolhida, os cálculos apresentados deverão ser repetidos usando o próximo tamanho de orifício padrão.

Tabela 2 – Áreas efetivas e designação de letras para orifícios padrões.

Letra designada	Área efetiva (po ²)
D	0,110
E	0,196
F	0,307
G	0,503
H	0,785
J	1,287
K	1,838
L	2,853
M	3,600
N	4,340
P	6,380
Q	11,050
R	16,000
T	26,000

Fonte: Adaptado da *API STANDARD 526, 2023*.

Para os discos de ruptura, a equação (45) é aplicável somente quando este alivia diretamente para a atmosfera, está instalado a uma distância máxima de oito vezes o diâmetro da tubulação do bocal de entrada, possui um comprimento de descarga não excedendo cinco vezes o diâmetro da tubulação de descarga e apresenta diâmetros de entrada e saída iguais ou maiores que o tamanho nominal da tubulação do dispositivo (*API STANDARD 520, 2014*).

3 METODOLOGIA

A partir do equacionamento descrito no item 2 , o programa desenvolvido por Lima (2020) em Python foi adaptado para possibilitar a simulação de transientes envolvendo os dispositivos de segurança e sistemas complexos. A metodologia de cálculo anterior consistia em resolver todo o equacionamento por meio de substituição, o que se torna inviável à medida que o sistema de equações vai se tornando cada vez mais complexo.

Este item descreve a metodologia aplicada programação e adaptação do código, modelagem dos equipamentos de segurança, validação e análise de resultados do transiente hidráulico.

O programa foi adaptado e testado majoritariamente em um notebook com Windows® 11, processador Intel® Core i7 e 8 GB de memória RAM.

3.1 METODOLOGIA DE PROGRAMAÇÃO

A metodologia de programação do código baseia-se na orientação a objetos (POO), diferente do trabalho de Lima (2020), onde o mesmo seguiu uma abordagem não orientada a objetos. A decisão de adotar a POO foi motivada pela necessidade de enfrentar desafios identificados no trabalho anterior, onde foram observadas limitações na estruturação do código, principalmente para criação dos modelos. Com o uso da POO, foi possível utilizar uma abordagem modular e flexível no código, criando as classes como unidades fundamentais de abstração, encapsulando dados e comportamentos relacionados. Essa abordagem facilita a compreensão, manutenção e evolução do código, uma vez que cada classe é responsável por suas próprias funcionalidades. A POO também viabilizou a implementação do modelo de balanço matricial para a resolução de sistemas em redes, conforme explorado por Barreto (2011). Isso possibilitou a realização de cálculos em tubulações com ramificações e a abordagem nodal.

Em Python, classes são modelos que definem as características e comportamentos de objetos. Desse modo, uma classe foi criada para cada equipamento modelado, tornando-os, dessa forma, objetos com atributos que são facilmente definidos pelo usuário. O conceito de superclasses também foi utilizado durante a criação dos nós, que são responsáveis por definir a conexão entre os equipamentos.

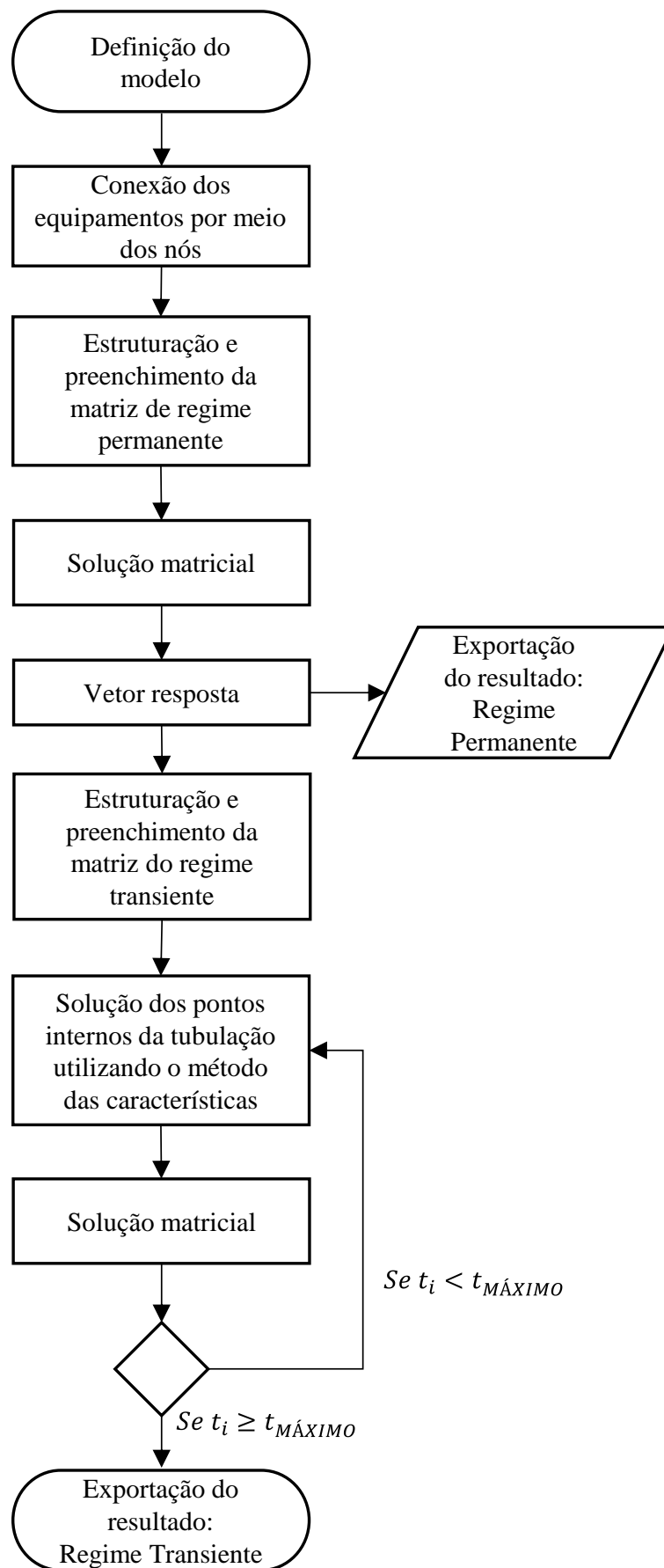
Ao criar qualquer objeto que é um equipamento, como por exemplo uma válvula de bloqueio definida pela classe “Block_Valve” ou uma tubulação definida

pela classe “Transferline”, é necessário que o usuário determine suas características gerais como seu nome, os nós em que o equipamento será conectado e seus atributos específicos que dependem do tipo de equipamento. Os atributos necessários para criar uma nova válvula de bloqueio pela classe “Block_Valve”, por exemplo, são; o nome do equipamento, nome do nó a montante e a jusante, o coeficiente de abertura da válvula e sua curva de fechamento. Um exemplo da definição de uma válvula de bloqueio no código, cujo C_v é de 1000 gpm/psi^{0,5}, é demonstrado a seguir:

```
valvula = Block_Valve ('valve1', 'n02', 'n03', 1000, "valve_curve.xlsx")
```

Onde, “valve_curve.xlsx”, é o nome do arquivo onde o usuário definiu a curva de fechamento da válvula.

A classe dos nós de conexão permite que o usuário configure quais equipamentos estão conectados ao mesmo ponto, representando facilmente o sistema desejado. As classes responsáveis pela simulação do regime permanente e regime transiente abrangem toda a estruturação das matrizes de cálculo, o uso do *solver* e os mecanismos de armazenamento e exportação de dados. Durante a inicialização da simulação o usuário tem a liberdade para definir o tempo desejado para simulação do transiente hidráulico, assim como a tolerância relativa do erro do *solver* para o cálculo de vazão e pressão, configurada por padrão em 10^{-8} . O funcionamento do programa é representado de forma simplificada pelo diagrama da Figura 7.

Figura 7 – Diagrama simplificado de programação

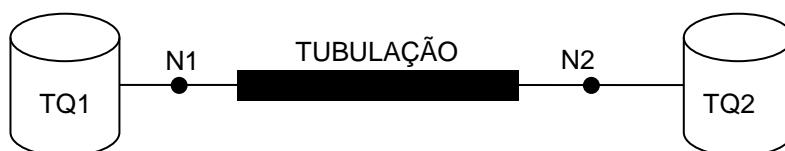
3.2 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM REGIME PERMANENTE

Utilizando o conceito de nós, é possível construir o problema resolvendo os balanços de massa nos nós e as equações características dos equipamentos conectados. As equações da válvula de bloqueio, válvula de retenção e bomba centrífuga são descritas por Lima (2020) e podem ser consultadas no APÊNDICE A .

Quando se lida com elementos conectados em série, é possível resolver o problema por meio de um sistema de equações, que pode ser representado de forma matricial. A aplicação do método a sistemas em regime permanente é ilustrada pelo exemplo a seguir.

Considerando um sistema composto por dois tanques conectados por uma tubulação, ilustrado na Figura 8, as equações descritivas podem ser desenvolvidas a partir do balanço de massa em cada nó de conexão e da equação característica da tubulação enquanto os tanques são tidos como condição de contorno.

Figura 8 – Ilustração do sistema utilizado como exemplo para regime permanente



O balanço de massa em cada nó:

$$N1: Q_{TQ1} = Q_{TUB} \text{ ou } Q_{TQ1} - Q_{TUB} = 0 \quad (48)$$

$$N2: Q_{TUB} = Q_{TQ2} \text{ ou } Q_{TUB} - Q_{TQ2} = 0 \quad (49)$$

Equações características dos equipamentos conectados:

$$TQ1: H_{TQ1} = H_{N1} \quad (50)$$

$$TQ2: H_{TQ2} = H_{N2} \quad (51)$$

$$\text{Tubulação: } H_{N1} - H_{N2} = \frac{8fL|Q_{TUB}|Q_{TUB}}{\pi^2 g D^5} \quad (52)$$

Podemos reescrever o sistema de equações matricialmente da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{8fL|Q_{TUB}|}{\pi^2 g D^5} & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{TQ1} \\ Q_{TUB} \\ Q_{TQ2} \\ H_{N1} \\ H_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 10 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (53)$$

Na formulação matricial cada linha é uma equação e cada coluna é uma variável. Para elementos cuja a dependência da vazão é linear, a solução das equações é relativamente simples. Quando os elementos apresentam uma relação não linear com a vazão, como no caso da tubulação, é necessário recorrer a métodos numéricos para resolução da matriz. Entre os métodos mais comuns estão o método de Newton-Raphson, o método da secante e o método de bisseção. Essas técnicas iterativas permitem aproximar a solução das equações não lineares até alcançar a precisão desejada. Para este tipo de resolução, existem bibliotecas em diversos tipos de linguagens computacionais que fornecem algoritmos eficientes e robustos para a resolução numérica de equações não lineares.

A função utilizada para resolver o sistema não linear no programa foi a *fsolve* do módulo *optimize* da biblioteca *ScyPy*. Essa função aplica o algoritmo da biblioteca MINPACK para resolver sistemas não lineares. Especificamente, ela se baseia na adaptação do método híbrido de Powell para encontrar a solução de sistemas não lineares. Sua tolerância ao erro para o cálculo de vazão e pressão é ajustável e seu padrão é igual a 10^{-8} .

3.3 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS EM REGIME TRANSIENTE

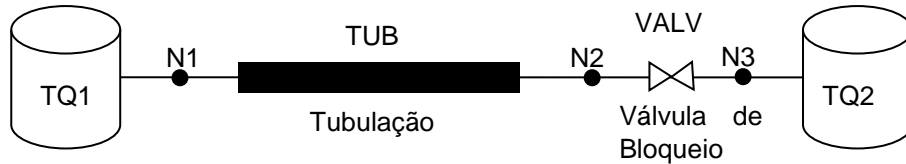
A metodologia apresentada no item anterior é utilizada para calcular a vazão e pressão do regime permanente do sistema, onde podemos considerá-las constante em toda a tubulação. Para o cálculo em regime transiente, que pode ocorrer durante o fechamento de uma válvula, é necessário utilizar outra abordagem.

É necessário modificar a matriz utilizada anteriormente, para que seja possível calcular a vazão nas extremidades da tubulação separadamente pelas equações (29) e (30). A pressão e vazão dos pontos internos da tubulação, são calculados separadamente. Dessa forma, a cada passo de tempo de simulação, a matriz é recalculada e as variáveis resolvidas separadamente, como os pontos internos da tubulação e a fração de abertura da válvula, são atualizadas para possibilitar o cálculo do próximo passo.

A aplicação do método a sistemas em regime transiente pode ser ilustrada pelo exemplo a seguir.

Em um sistema com dois tanques conectados por uma tubulação seguida de uma válvula representado na Figura 9.

Figura 9 – Ilustração do sistema utilizado como exemplo para regime transiente



Balanco de massa em cada nó:

$$N1: Q_{TQ1} = Q_{TUB} \text{ ou } Q_{TQ1} - Q_{TUB^-} = 0 \quad (54)$$

$$N2: Q_{TUB} = Q_{VALV} \text{ ou } Q_{TUB^+} - Q_{VALV} = 0 \quad (55)$$

$$N3: Q_{VALV} = Q_{TQ2} \text{ ou } Q_{VALV} - Q_{TQ2} = 0 \quad (56)$$

Equações características dos equipamentos conectados:

$$TQ1: H_{TQ1} = H_{N1} \quad (57)$$

$$TQ2: H_{TQ2} = -H_{N3} \quad (58)$$

$$TUB^- C^-: H_{N2} = C_M + BQ_{TUB^-} \text{ ou } H_{N2} - BQ_{TUB^-} = C_M \quad (59)$$

$$TUB^+ C^+: H_{N1} = C_P - BQ_{TUB^+} \text{ ou } H_{N1} + BQ_{TUB^+} = C_P \quad (60)$$

$$VALV.: Q_{VALV} = C_V \sqrt{\rho_W g \Delta H} \text{ ou } \frac{Q_{VALV} |Q_{VALV}|}{C_V^2 \rho_W g} + H_{N2} - H_{N3} = 0 \quad (61)$$

Podemos então, reescrever o sistema de equações matricialmente da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -B & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{|Q_{VALV}|}{C_V^2 \rho_W g} & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{TQ1} \\ Q_{TUB^-} \\ Q_{TUB^+} \\ Q_{VALV} \\ Q_{TQ2} \\ H_{N1} \\ H_{N2} \\ H_{N3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ H_{TQ1} \\ C_M \\ C_P \\ 0 \\ H_{TQ2} \end{bmatrix} \quad (62)$$

Onde: $B = \frac{a}{g} = \frac{1}{\lambda}$

Nesse caso, a variável de vazão da tubulação teve que ser separada para cada uma das extremidades, pois diferente do regime permanente, no regime transiente a vazão em cada ponto da tubulação poderá ter um valor diferente.

A cada passo de tempo o valor de C_M e C_P é calculado pelas equações (31) e (32), e o valor do C_v da válvula é atualizado em função da curva de fechamento da mesma.

3.4 MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS PARA O SISTEMA DE ALÍVIO

3.4.1 Disco de Ruptura

O disco de ruptura foi modelado no código em Python como uma válvula de bloqueio modificada. Diferente da válvula de bloqueio, em que o usuário define sua curva de abertura e o momento em que ela vai abrir ou fechar durante a simulação, o disco de ruptura se comporta como uma válvula totalmente fechada até que a pressão do nó a montante atinja a pressão do *setpoint* de abertura definido para o equipamento. Nesse momento o status do disco de ruptura passa de fechado para totalmente aberto instantaneamente, liberando assim o caminho para o fluxo de produto para o sistema de alívio modelado. Esta “verificação” da pressão a montante do disco é feita a cada instante de tempo.

3.4.2 Válvula de Alívio (PSV)

O mecanismo da válvula de alívio foi modelado para se diferenciar do disco de ruptura, possibilitando o seu fechamento caso a pressão a montante retorne a um valor inferior à pressão de fechamento estabelecida. Por esse motivo, a sobrepressão a montante da válvula é verificada e seu status definido a cada instante de tempo. Com base no estado da válvula, podemos identificar sua condição atual:

- Totalmente fechada: A pressão na entrada ainda não atingiu o *setpoint* de abertura estabelecido.
- Abrindo ou Aberta: A pressão na entrada é igual ou superior ao *setpoint* de abertura.
- Fechando: A válvula já foi aberta e a pressão na entrada foi aliviada e atingiu novamente o *setpoint* de fechamento.

Para modelagem da válvula de alívio, o usuário deve fornecer o valor de seu coeficiente de descarga em $\text{gpm/psi}^{0,5}$, o valor de seu *setpoint* em kgf/cm^2 e sua curva de abertura em função da fração de abertura pelo tempo

Assim que a pressão a montante da PSV atinge o *setpoint* e o estado muda de totalmente fechada para abrindo, uma variável auxiliar que salva o tempo decorrido no processo de abertura, com tempo total igual a 0,5 segundos, é utilizada para determinar a fração de abertura da mesma a partir da curva da válvula. Essa variável auxiliar, também é responsável pelo fechamento da mesma, onde a partir do momento em que o estado da PSV muda para fechando, ocorre o mesmo processo, mas agora com a determinação da fração de fechamento.

3.5 COMPARAÇÃO COM O SOFTWARE COMERCIAL

A fim de validar o programa desenvolvido, os resultados do simulador em Python foram comparados com os do o simulador comercial SPS.

O SPS é um software da DNV GL que permite análises detalhadas do fluxo de fluidos, pressão, temperatura e outros parâmetros ao longo de um sistema de tubulação. Diferente do programa em Python, o SPS aplica o método das diferenças finitas diretamente para discretizar as equações diferenciais parciais. No entanto, mesmo ao utilizar abordagens diferentes, espera-se que os resultados obtidos pelos dois programas sejam comparáveis ou próximos entre si.

Todas as premissas consideradas no programa desenvolvido, que são resultantes das simplificações realizadas durante o equacionamento, estão listadas a seguir:

- Escoamento monofásico (fase líquida);
- Escoamento unidimensional;
- Escoamento isotérmico;
- Propriedades físicas do fluido e do oleoduto constantes;
- Fator de atrito durante o transiente constante e igual ao fator de atrito do regime permanente inicial determinado pela equação de Colebrook-White (63);

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (63)$$

Onde:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (64)$$

3.5.1 Modelos considerados na validação

Para validar a nova metodologia de programação e os novos equipamentos modelados, foram criados 3 modelos para serem testados e comparados utilizando os dois programas.

Para os cinco casos analisados na validação foi considerado um oleoduto sem perfil de elevação e com propriedades físicas descritas na Tabela 3:

Tabela 3 – Propriedades físicas do Oleoduto de validação

	Comprimento desenvolvido	Diâmetro	Espessura	Módulo de Elasticidade	Rugosidade	Módulo de Poisson
Oleoduto	5,0 km	20"	0,25"	207 GPa	0,0018 pol	0,3

As propriedades do produto considerado em todos os cenários de validação estão descritas na Tabela 4:

Tabela 4 – Propriedades físicas do fluido de validação

Massa Específica	Viscosidade	Módulo de Compressibilidade
998 kg/m ³	0,001 Pa.s	2,2 GPa

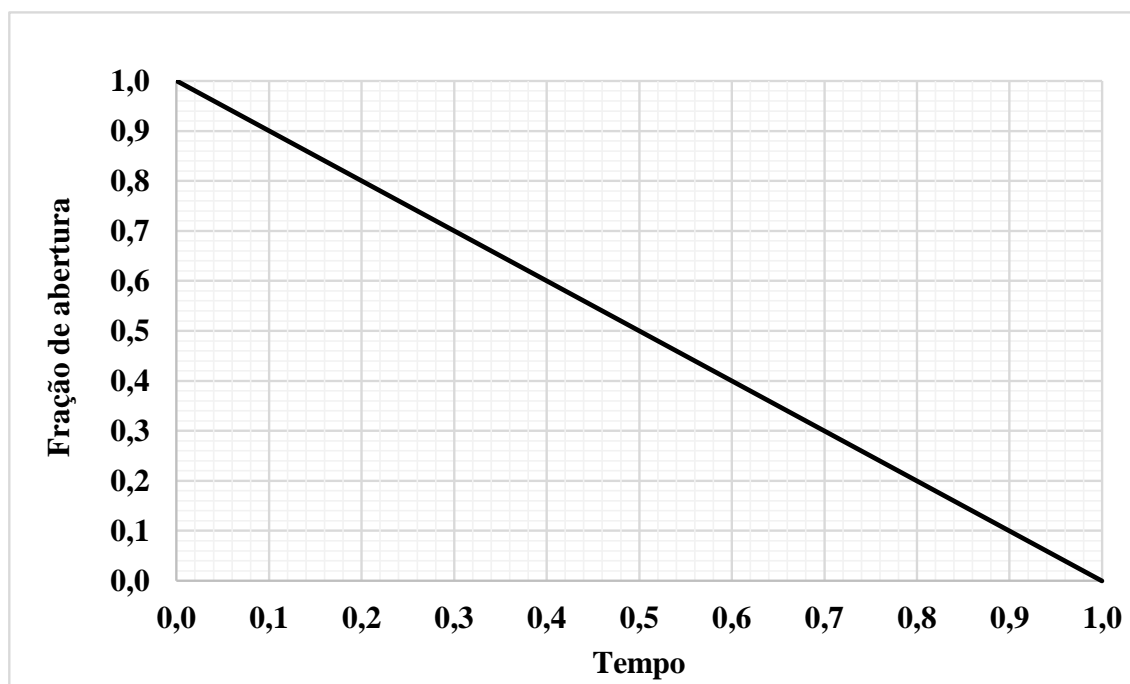
As pressões adotadas como condição e contorno nos tanques modelados estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Pressão nos tanques de validação

	Pressão
Tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Tanque de alívio	1,0 kgf/cm ²

Para todos os casos estudados na validação foi considerada uma válvula com Cv igual a 1000,0 gpm/psi^{0,5} e curva de fechamento linear e está conforme na Figura 10.

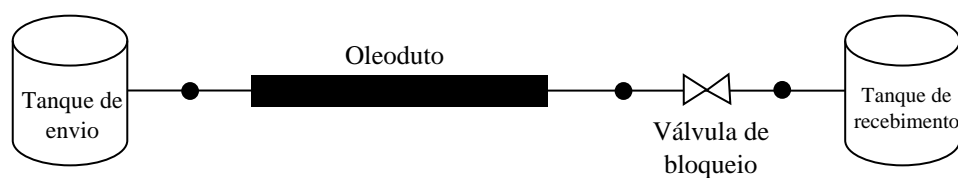
Figura 10 – Curva de Fechamento da válvula linear



3.5.1.1 Modelo de Validação 1 – Sem sistemas de segurança acoplados

O modelo 1 será utilizado para análise e validação do regime permanente e regime transiente de fechamento da válvula de bloqueio do tanque de recebimento, seu desenho esquemático está representado na Figura 11:

Figura 11 – Representação esquemática do modelo 1



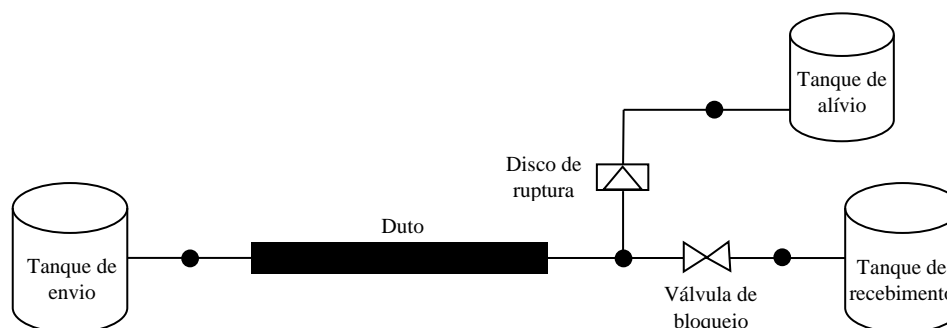
Os seguintes casos foram simulados no modelo 1:

- Caso 1: Regime permanente
- Caso 2: Regime transiente de fechamento da válvula de bloqueio com tempo de fechamento igual a 60,0 segundos.
- Caso 3: Regime transiente de fechamento da válvula de bloqueio com tempo de fechamento igual a 1,0 segundo.

3.5.1.2 Modelo de Validação 2 – Com disco de ruptura

O modelo 2 será utilizado para análise e validação da modelagem do disco de ruptura e está representado no desenho esquemático da Figura 12, o tempo de fechamento adotado para a válvula de bloqueio será de 1,0 s.

Figura 12 – Representação esquemática do modelo 2



A Tabela 6 apresenta as características do disco de ruptura modelado para o caso 4.

Tabela 6 – Propriedades do disco de ruptura

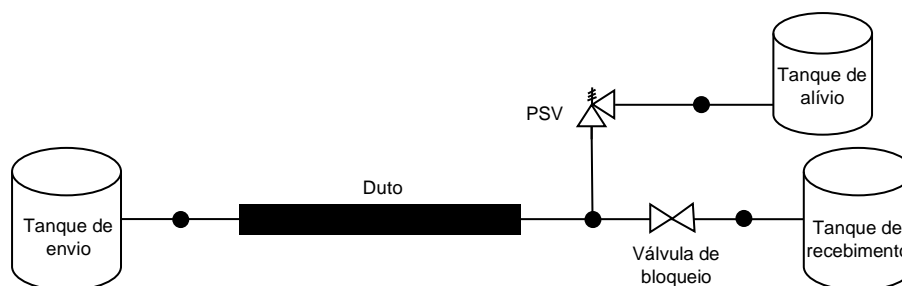
Disco de Ruptura	Cv	Setpoint de abertura
Caso 4	180 gpm/psi ^{0,5}	40 kgf/cm ²

Conforme mencionado nos Objetivos Específicos (Seção 1.2) deseja-se comparar as simulações realizadas através do código Python que está sendo desenvolvido com simulações realizadas no simulador comercial SPS. Porém, o SPS não possui o elemento de disco de ruptura disponível para simulação, por isso, para validação do código em Python, foi necessário representá-lo através de uma válvula de bloqueio com um tempo de abertura rápido o suficiente para que fosse considerado instantâneo, o valor definido para validação foi de 0,001 min ou 60 ms. Para simular o mecanismo de abertura do disco na válvula de bloqueio do SPS, uma função foi criada de modo que a pressão a montante da válvula de bloqueio seja verificada a cada instante de tempo e assim que ela fique acima da pressão definida, a válvula abrirá instantaneamente.

3.5.1.3 Modelo de Validação 3 – Com PSV

O modelo 3 será utilizado para análise e validação da modelagem da PSV e está representado no desenho esquemático da Figura 13, o tempo de fechamento adotado para a válvula de bloqueio será de 1,0 s.

Figura 13 – Representação esquemática do modelo 3



A Tabela 7 apresenta as características da PSV modelada para os casos 5.

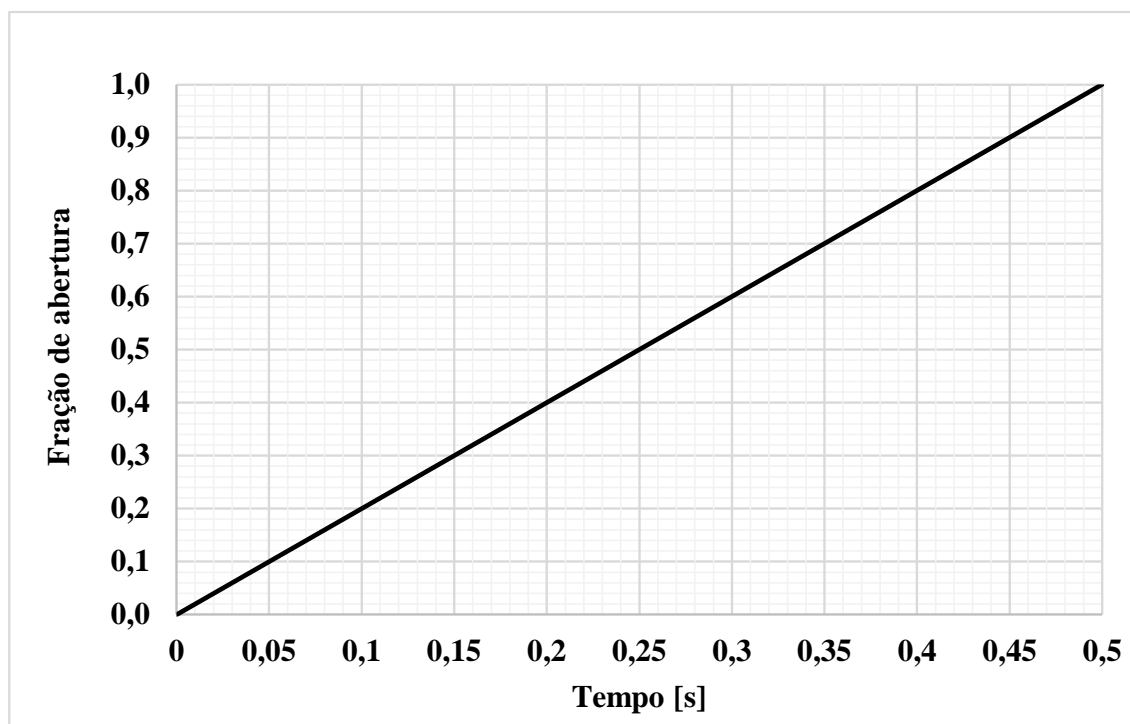
Tabela 7 – Propriedades da PSV

PSV	Cv	Setpoint de abertura/fechamento
Caso 5	200,0 gpm/psi ^{0,5}	40 kgf/cm ²

Diferente do disco de ruptura, a válvula de alívio é um equipamento disponível para simulação no SPS, o elemento numérico adotado foi uma RV (*Relief valve*) que representa o funcionamento de uma válvula de alívio do tipo mola.

Nos dois programas, o usuário tem a possibilidade de definir a curva e o tempo de fechamento da válvula de acordo com suas necessidades específicas. Para efeitos de comparação com o simulador comercial, foi considerada uma curva de abertura conforme representado abaixo:

Figura 14 – Curva de abertura da PSV



3.5.2 Modelo de Aplicação com Perfil de Elevação

Lima (2020), analisou os efeitos do transiente hidráulico e a influência de diferentes produtos, curva de bombas, curvas de válvula e tempo de fechamento. A fim de dimensionar dispositivos de segurança para um sistema de oleoduto, o modelo de aplicação de Lima (2020) será utilizado, sendo composto por uma bomba centrífuga, válvula de retenção, oleoduto, válvula de bloqueio e os tanques de envio e recebimento, sua ilustração esquemática está representada a seguir:

Figura 15 – Modelo de aplicação sem sistema de segurança instalado



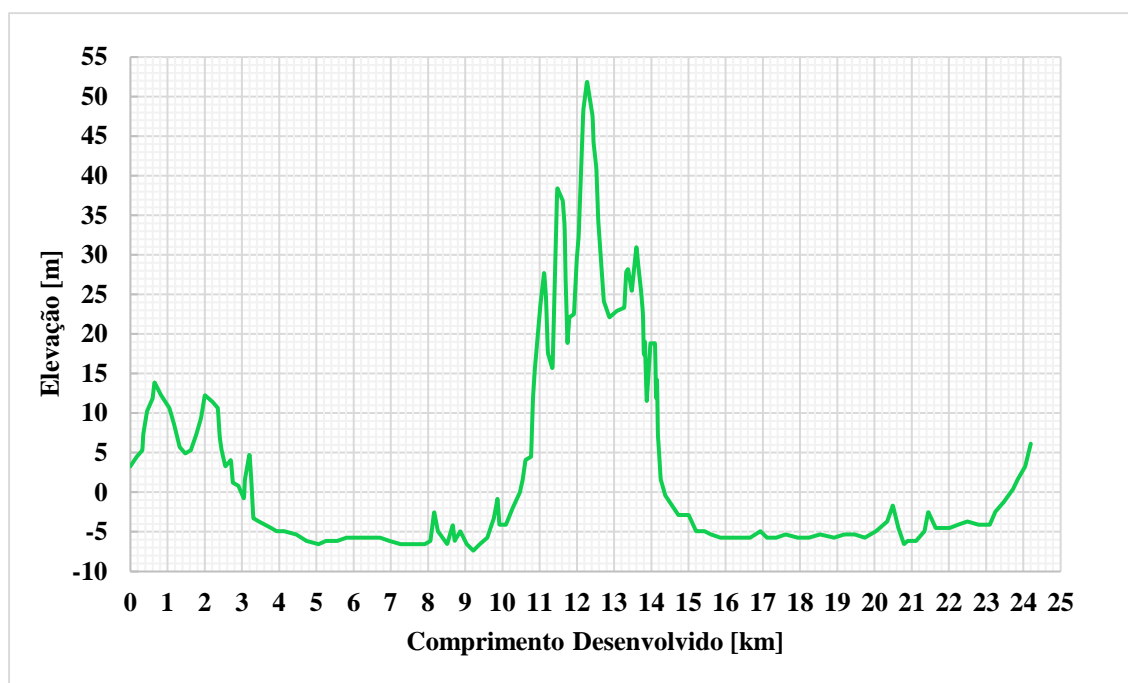
Para fins de análise e dimensionamento do sistema de alívio, assumiu-se que o oleoduto em questão, possui limite de resistência de pressão igual a 51,0 kgf/cm². A

Tabela 8 apresenta as propriedades físicas do oleoduto e a Figura 16 apresenta o perfil de elevação considerado no estudo de caso.

Tabela 8 – Propriedades físicas do oleoduto do modelo de aplicação

	Comprimento desenvolvido	Diâmetro	Espessura	Módulo de Elasticidade	Rugosidade	Módulo de Poisson
Oleoduto	24,4 km	20"	0,5"	207 GPa	0,0018"	0,3

Figura 16 – Perfil de elevação considerado no Estudo de caso



A Tabela 9 apresenta as características físicas do produto considerado para simulação do transiente e dimensionamento do dispositivo de segurança:

Tabela 9 – Propriedades físicas do fluido do modelo de aplicação

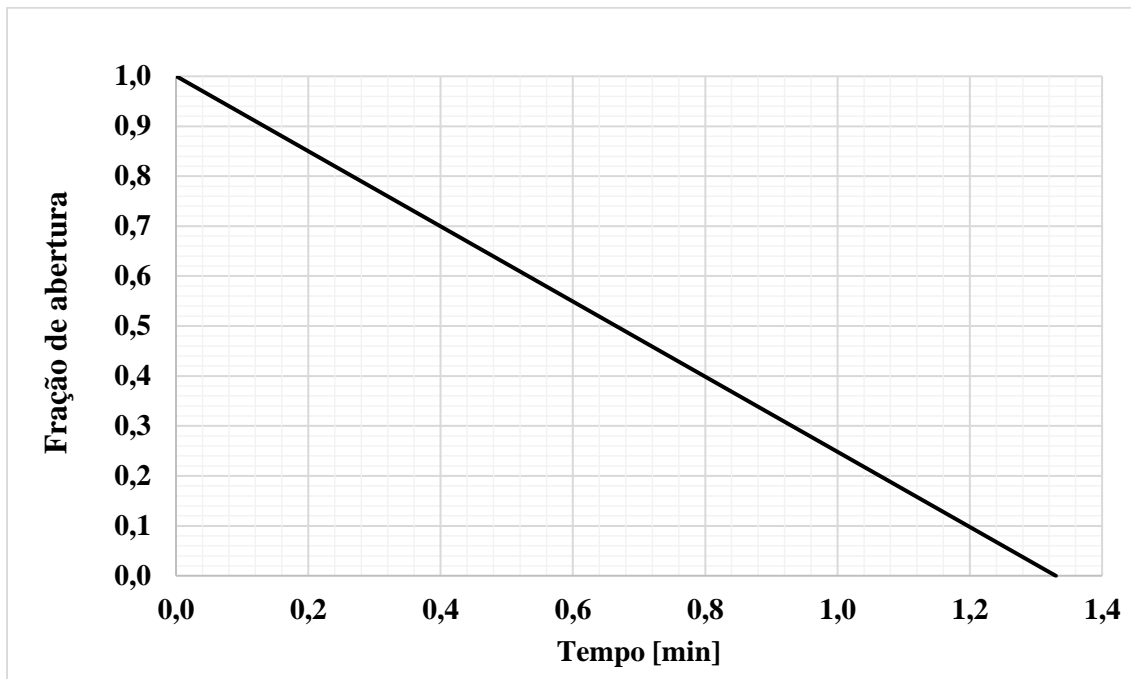
Massa Específica	Viscosidade	Módulo de Compressibilidade
865 kg/m ³	0,003 Pa.s	1,5 GPa

As propriedades consideradas para válvula de bloqueio estão descritas na Tabela 10 e sua curva de abertura está representada na Figura 17:

Tabela 10 – Propriedades da válvula de bloqueio do modelo de aplicação.

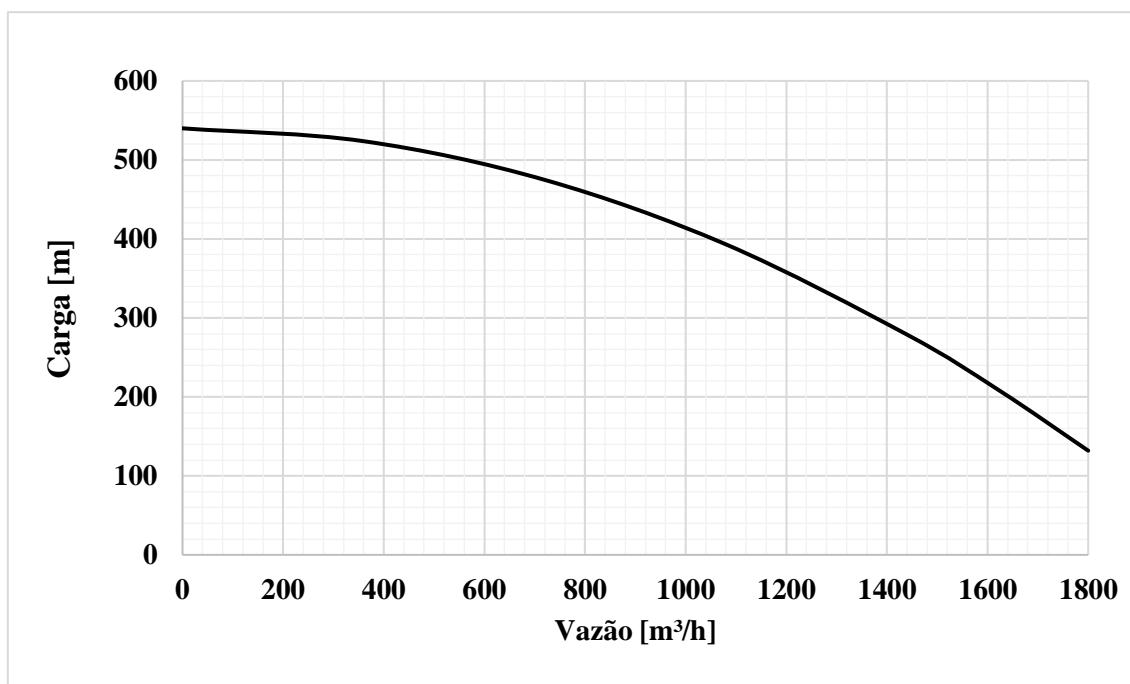
Cv [gpm/psi ^{0,5}]	Tempo de fechamento
10.000	1 min e 20 s

Figura 17 – Curva de fechamento da válvula de bloqueio



A Curva da bomba centrífuga utilizada no modelo é representada pela Figura 18.

Figura 18 – Curva característica do sistema de bombeio



O dimensionamento dos dispositivos de segurança será realizado de acordo com o equacionamento descrito no item 2.6.3, que nos fornecerá a área requerida do orifício em polegadas.

A determinação da vazão de alívio, informação necessária para o dimensionamento, pode ser feita da seguinte forma: inicialmente, é estabelecida a posição de instalação e o *setpoint* do dispositivo de alívio. Em seguida, com ajuda do programa desenvolvido, simulamos o fechamento gradual da válvula de bloqueio até que o ponto onde se planeja integrar o dispositivo de segurança alcance a pressão equivalente ao *setpoint* de abertura. A vazão de alívio é então determinada pela vazão alcançada nesse momento.

Para modelagem destes equipamentos nos simuladores de transiente hidráulico, é necessário que a área do orifício seja definida como o dado de entrada representado pelo coeficiente de descarga em unidades inglesas [gpm/psi^{0,5}]. Dessa forma é necessário fazer a conversão da área obtida utilizando a equação (65) demonstrada por Carneiro (2011):

$$C_v \left[\frac{\text{gpm}}{\text{psi}^{0,5}} \right] = 38K_d A [\text{pol}^2] \quad (65)$$

Para o estudo de caso, a posição escolhida para a inclusão do sistema de alívio foi a montante da válvula de bloqueio, que será fechada provocando o transiente hidráulico.

Dois casos serão avaliados: o dimensionamento e a inclusão do disco de ruptura e o dimensionamento e inclusão da PSV, os modelos esquemáticos estão representados na Figura 19 e Figura 20 respectivamente.

Figura 19 – Modelo de aplicação com Disco de Ruptura

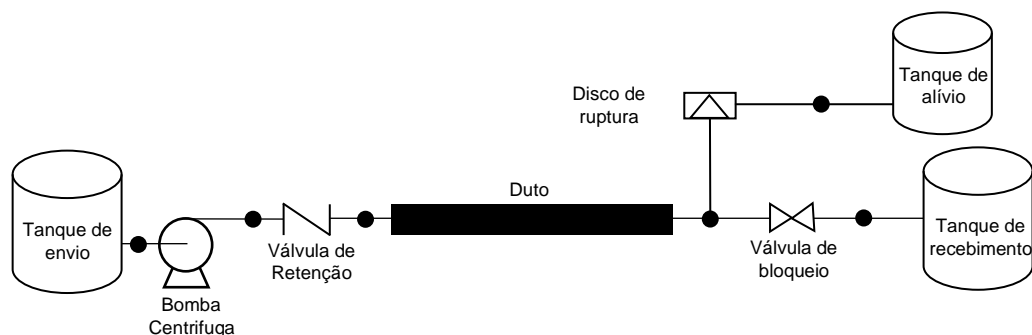
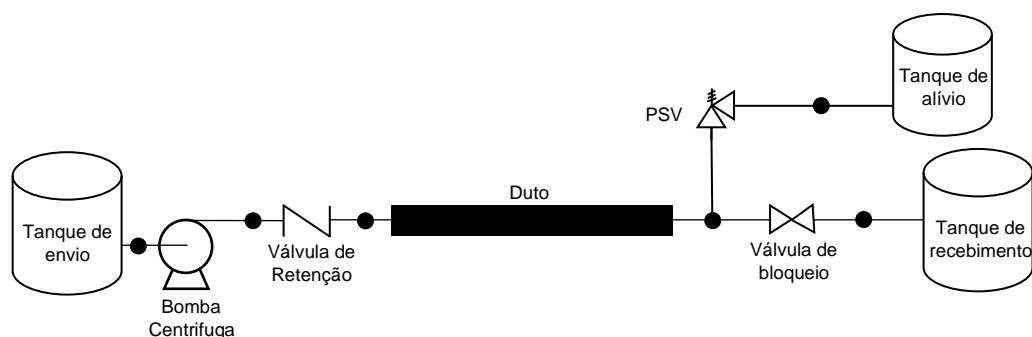


Figura 20 – Modelo de aplicação com PSV



A curva de abertura da PSV será a mesma utilizada para o Caso 5, linear conforme representada na Figura 14.

As pressões adotadas como condição e contorno nos tanques estão descritas na Tabela 11.

Tabela 11 – Pressão nos tanques de validação

	Pressão
Tanque de envio	1,0 kgf/cm ²
Tanque de recebimento	1,0 kgf/cm ²
Tanque de alívio do disco de Ruptura	0,0 kgf/cm ²
Tanque de alívio da PSV	1,0 kgf/cm ²

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPARATIVO ENTRE SIMULADORES

Este item apresentará os resultados obtidos dos modelos de validação usando a metodologia de cálculo numérico desenvolvido em Python neste trabalho, e o impacto dos equipamentos de segurança modelados (disco de ruptura e PSV) nestes resultados conforme descritos na secção 3.5. Na Tabela 12 são apresentados os casos simulados para os modelos de validação:

Tabela 12 – Casos simulados

Caso	Modelos	Tipo de cenário
1	3.5.1.1 – Modelo de validação sem sistema de alívio	Regime permanente
2	3.5.1.1 – Modelo de validação sem sistema de alívio	Transiente de fechamento lento (60s)
3	3.5.1.1 – Modelo de validação sem sistema de alívio	Transiente de fechamento rápido (1s)
4	3.5.1.2 – Modelo de validação com disco de ruptura	Transiente de fechamento rápido (1s) Pressão de ajuste: 40,0 kgf/cm ²
5	3.5.1.3 – Modelo de validação com PSV	Transiente de fechamento rápido (1s) Pressão de ajuste: 40,0 kgf/cm ²
6	3.5.2 – Modelo de aplicação com Perfil de Elevação sem PSV	Regime permanente
7	3.5.2 – Modelo de aplicação com Perfil de Elevação sem PSV	Transiente de fechamento lento (80s) sem sistema de segurança
8	3.5.2 – Modelo de aplicação com Perfil de Elevação com Disco de Ruptura	Transiente de fechamento lento (80s) com sistema de segurança Pressão de ajuste: 40,0 kgf/cm ²
9	3.5.2 – Modelo de aplicação com Perfil de Elevação com PSV	Transiente de fechamento lento (80s) com sistema de segurança Pressão de ajuste: 40,0 kgf/cm ²

4.1.1 Caso 1 - Regime permanente

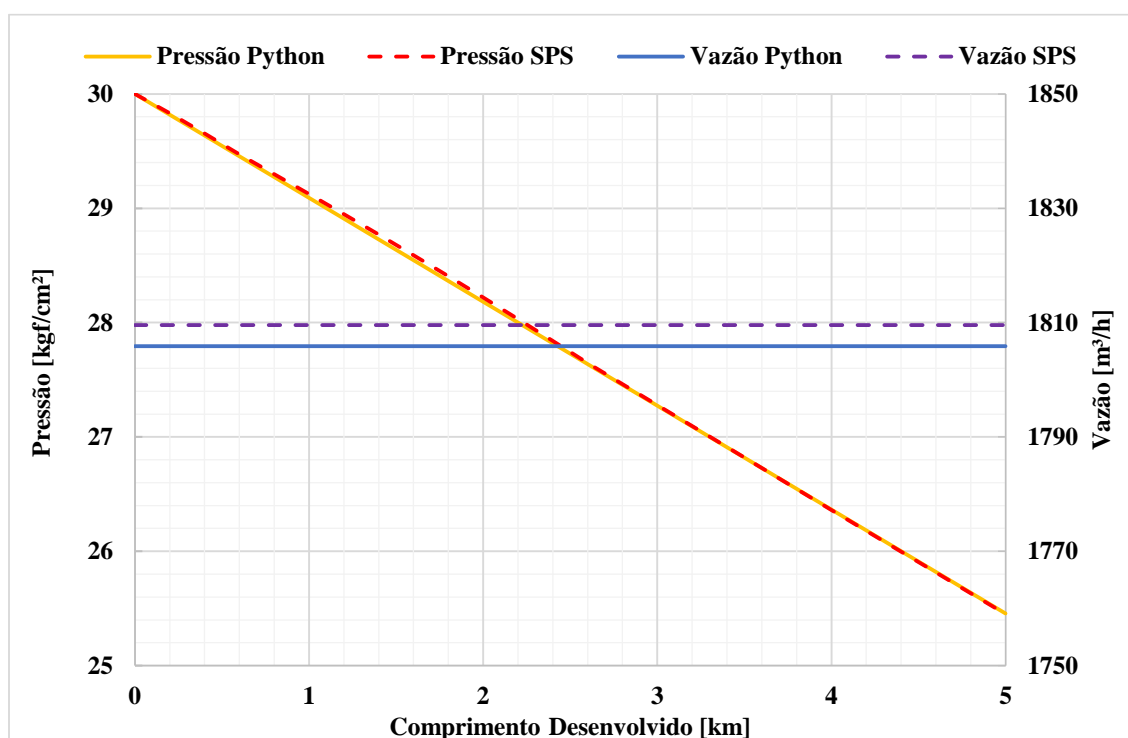
O Caso 1 utiliza o modelo apresentado na Figura 11 para comparar os resultados obtidos para o cálculo de regime permanente. A Tabela 13 apresenta o resumo das principais características utilizadas.

Tabela 13 – Caso 1: Principais características utilizadas na simulação

Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	5,0 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,25 pol
Fluido	
Massa específica	998 kg/m ³
Viscosidade	0,001 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
C _v	1000 gpm/psi ^{0,5}

O gráfico de pressão e vazão ao longo do oleoduto estão representados na Figura 21.

Figura 21 – Caso 1: Pressão e vazão ao longo do oleoduto



Podemos notar que as curvas de pressão ao longo do oleoduto são semelhantes nos dois programas e as curvas de vazão mostram uma discrepância de 3,70 m³/h. É importante ressaltar que essa diferença, em comparação com a magnitude da vazão total, representa um baixo erro relativo. Na Tabela 14 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 14 – Caso 1 – Regime permanente: Comparação da pressão e vazão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	28,45 kgf/cm ²	28,50 kgf/cm ²	0,1%
Vazão	1805,90 m ³ /h	1809,60 m ³ /h	0,2%

4.1.2 Caso 2 - Transiente de fechamento lento

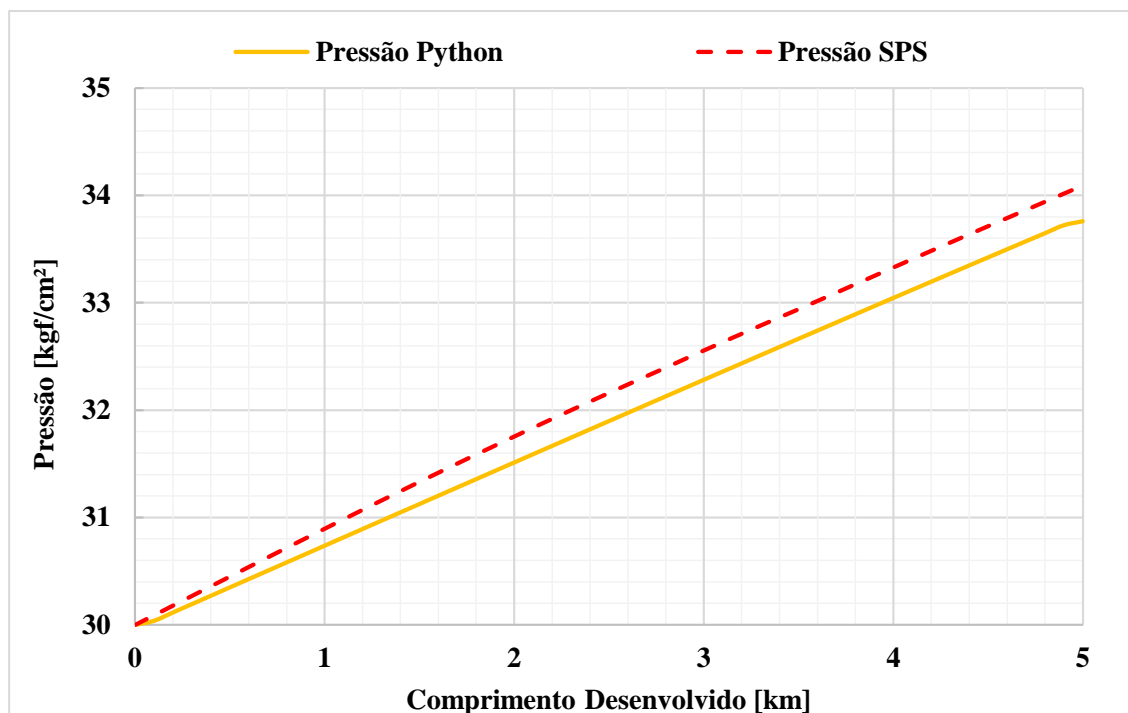
Com base na condição de regime permanente obtida no item anterior, a análise do Caso 2 será feita a partir do fechamento da válvula de bloqueio. A Tabela 15 apresenta o resumo das principais características utilizadas.

Tabela 15 – Caso 2: Principais características utilizadas na simulação

Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	5,0 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,25 pol
Fluido	
Massa específica	998 kg/m ³
Viscosidade	0,001 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
Tempo de curso	1 min
Curva de fechamento	Linear
C _v	1000 gpm/psi ^{0,5}

A Figura 22 apresenta o resultado obtido para pressão ao longo do oleoduto.

Figura 22 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio



Na Tabela 16 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 16 – Caso 2 - Transiente de fechamento lento: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	33,75 kgf/cm ²	34,22 kgf/cm ²	1,3%

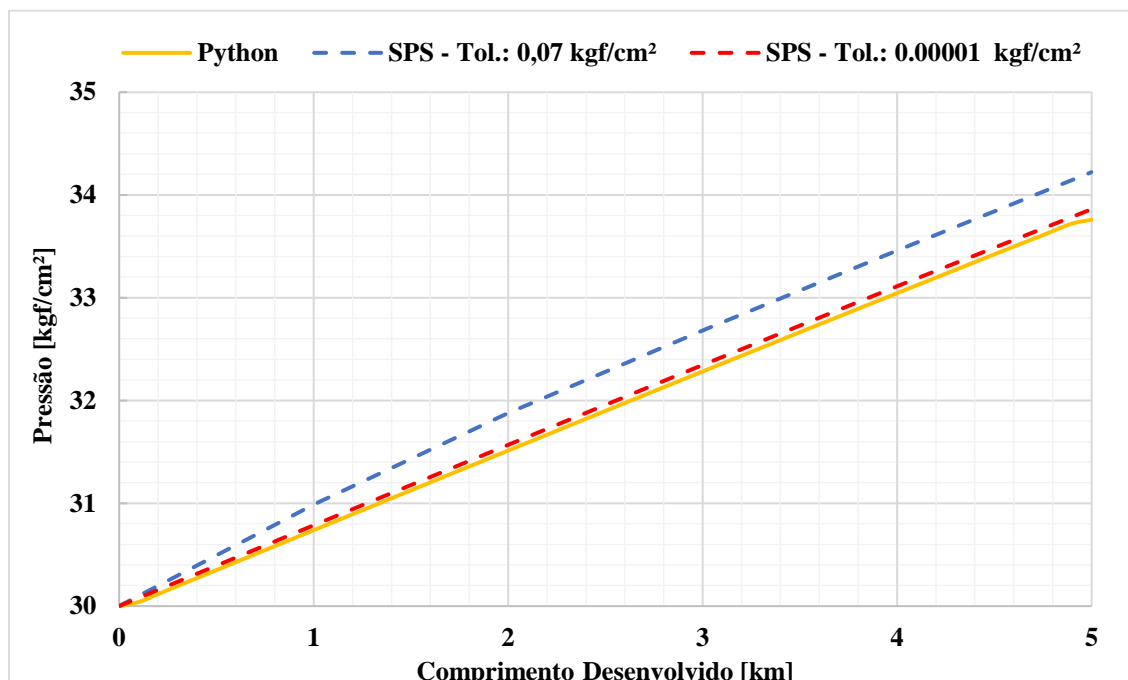
Na Figura 22 é possível observar uma discrepância entre os resultados obtidos pelos dois simuladores. A Tabela 16 mostra que o erro relativo no ponto de maior diferença é igual a 1,3% . Buscando entender o motivo deste comportamento, dois parâmetros foram analisados: a tolerância do erro de pressão e o espaçamento da malha cálculo utilizado.

4.1.2.1 Teste da tolerância de pressão

A tolerância ao erro de pressão é a medida da precisão desejada para os resultados obtidos. Ao definir o modelo a ser simulado no SPS, o usuário pode definir a tolerância máxima do erro no cálculo da pressão. O programa recomenda, para maioria das simulações, uma tolerância moderada entre 1 e 2 psi (0,07 a 0,14 kgf/cm²), que permite

que a simulação ocorra com rapidez e acurácia. Um teste para averiguar a influência da tolerância de pressão no Caso 2 foi realizado, considerando o recomendado pelo programa e uma tolerância muito baixa, de 0.0001 kgf/cm². Os resultados estão na Figura 23.

Figura 23 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da tolerância do erro de pressão no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio



É possível observar que houve influência da tolerância de pressão considerada nos testes, sendo a curva de pressão do teste de menor tolerância, o que mais se aproxima da curva obtida pelo programa em Python e apresenta um erro máximo relativo de 0,3%. É importante ressaltar que a tolerância do erro de pressão e vazão, considerada no programa desenvolvido é definida por padrão como 10^{-8} .

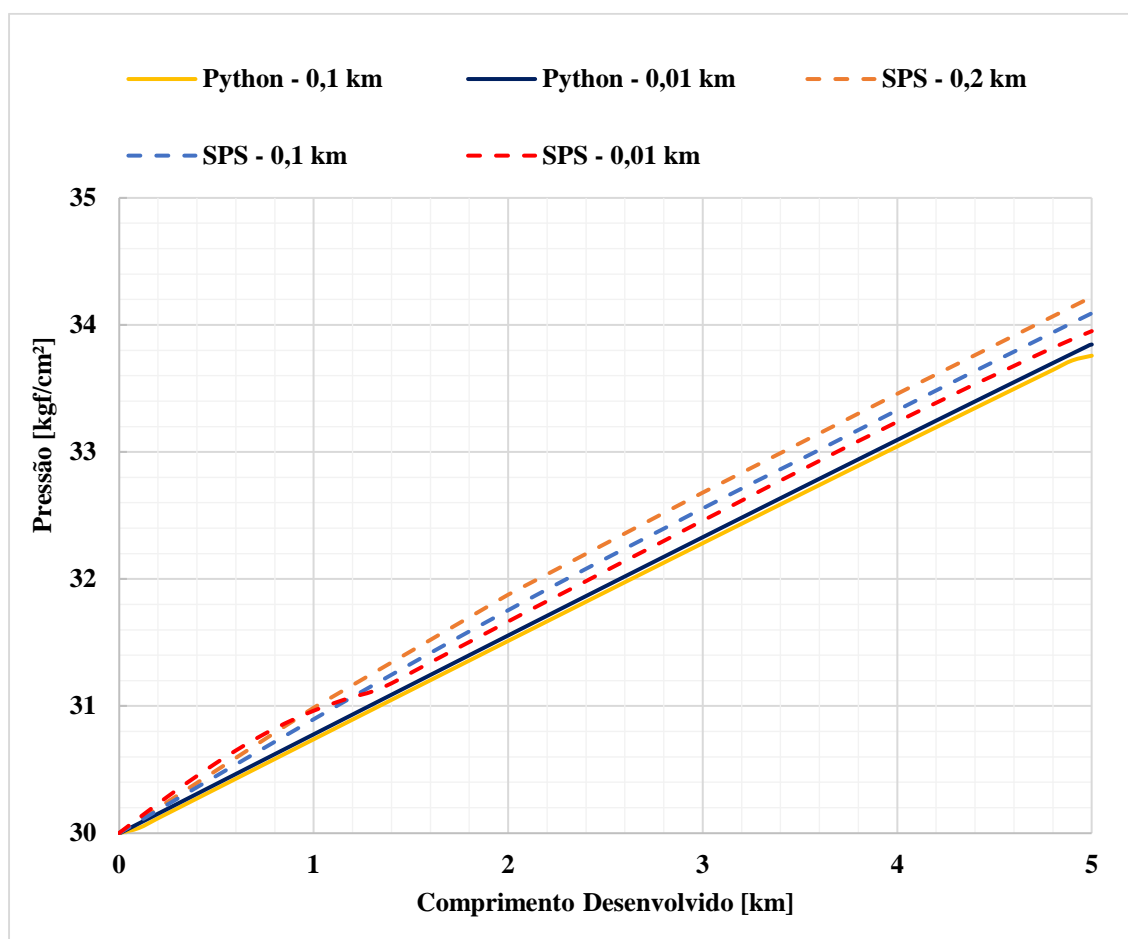
4.1.2.2 Teste de espaçamento da malha de cálculo

O outro parâmetro analisado foi o espaçamento entre os pontos de cálculos internos das tubulações, que é definido no momento de preparação do modelo. O teste de malha de cálculo consiste em avaliar o resultado de um mesmo cenário simulado em diferentes discretizações, i.e. variando a distância entre os pontos de cálculo, para avaliar como o refinamento da malha influencia na precisão dos resultados. Esse teste visa definir a discretização de malha que apresenta a melhor relação custo-benefício entre a precisão dos resultados e velocidade computacional.

O SPS calcula um intervalo padrão entre os pontos com base no passo de tempo mínimo e na velocidade de propagação do som, porém, permite que o usuário defina o atributo de acordo com as necessidades. No programa desenvolvido, a discretização deve ser informada pelo usuário. Nesse caso a equação (44) é utilizada para determinar o passo de tempo adotado para simulação, sendo este calculado função do espaçamento informado.

Todos os resultados apresentados até o momento, utilizaram o espaçamento de cálculo definido automaticamente pelo SPS, igual a 0,2 km, enquanto em Python, o valor considerado foi de 0,1 km. Com o objetivo de analisar a influência deste parâmetro alguns testes foram realizados, mantendo a tolerância de pressão recomendada de 0,07 kgf/cm². A Figura 24 apresenta os resultados de pressão máxima obtidos.

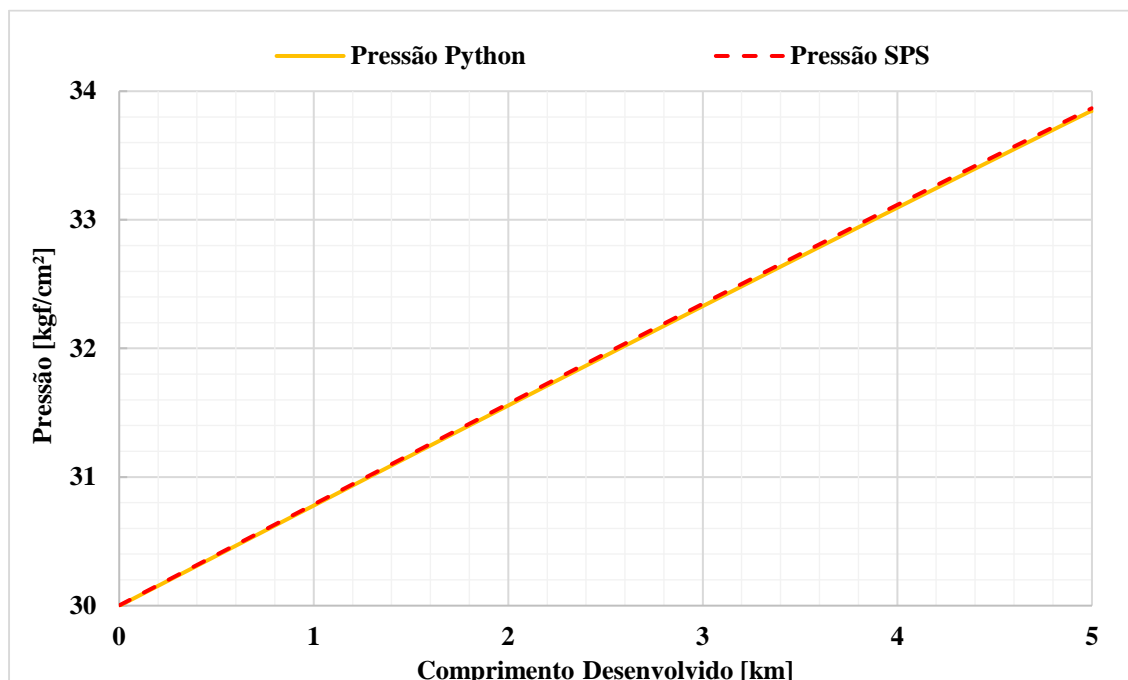
Figura 24 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da malha de cálculo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio



O parâmetro também tem influência sobre os resultados obtidos, fazendo com que a curva se aproxime mais ao passo que refinamos a malha de cálculo dos simuladores.

Um novo teste foi realizado modificando os dois parâmetros simultaneamente, o espaçamento de cálculo foi considerado igual a 0,01 km e tolerância de pressão igual a 0,0001 kgf/cm², os resultados podem ser encontrados na Figura 25.

Figura 25 – Caso 2: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida modificando a tolerância e o espaçamento de cálculo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio



Na Tabela 17 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

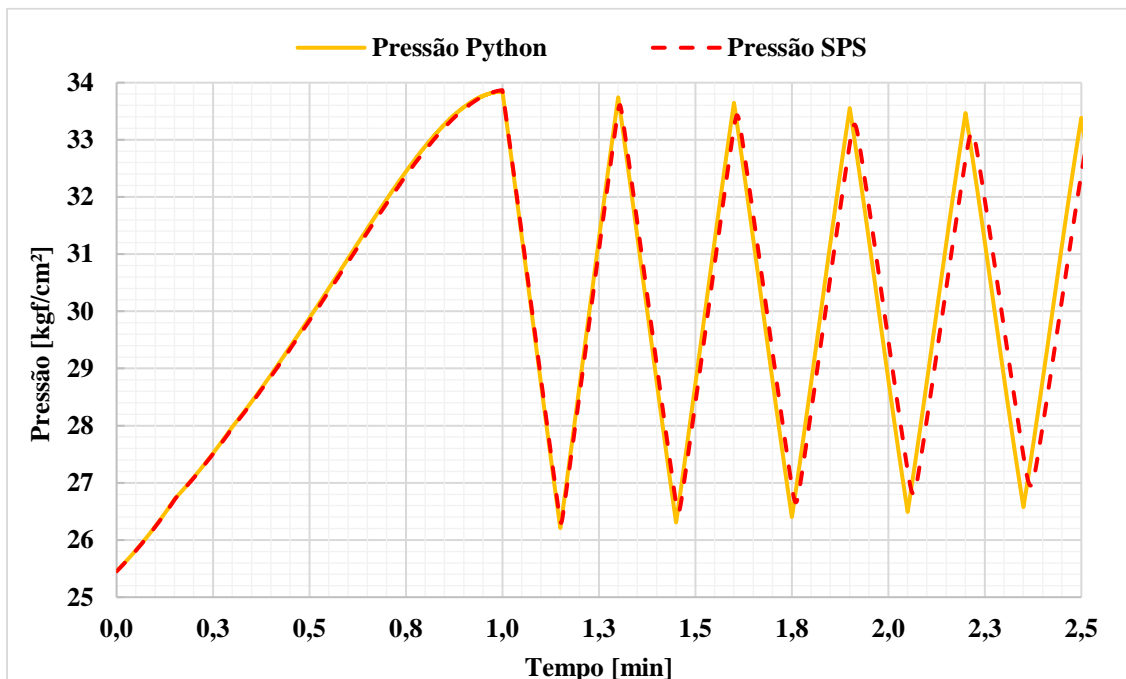
Tabela 17 – Caso 2 - Teste de malha e tolerância de pressão: Comparação da pressão no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	33,84 kgf/cm ²	33,86 kgf/cm ²	0,07%

A pressão ao longo do oleoduto nesse caso, onde os dois parâmetros foram ajustados, retornou um erro relativo de 0,07%, entretanto, quando modificamos estes parâmetros, a demanda computacional dos programas pode aumentar e tornar a simulação mais lenta. Para análise da pressão a montante de válvula de bloqueio no tempo, o espaçamento de cálculo considerado nos dois simuladores foi de 0,01 km e a tolerância

de pressão igual a $0,0001 \text{ kgf/cm}^2$. Os resultados de variação de pressão ao longo do tempo para este cenário, em ambos os simuladores, estão apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Caso 2: Pressão à montante da válvula de bloqueio ao longo tempo no transiente de fechamento lento da válvula de bloqueio



Observando a Figura 26 é possível notar o comportamento da onda de pressão a montante da válvula de bloqueio, no primeiro pico as pressões obtidas pelos dois simuladores, coincidem, enquanto nos seguintes há uma leve discrepância entre as duas, mostrando uma tendência de maior atenuação da onda de pressão no SPS.

O efeito de atenuação mais acentuado presente no SPS, pode ser resultado das aproximações adotadas quanto ao cálculo do fator de atrito, que no simulador em Python é mantido constante e igual ao fator de atrito calculado no regime permanente durante toda a simulação. Existem alguns modelos que podem ser aplicados juntamente ao método das características e que descrevem com maior precisão o amortecimento do pico de pressão, Jensen e colaboradores (2018) discutem três destes modelos: o baseado na convolução (CB), o baseado na aceleração instantânea (IAB) e o baseado na termodinâmica irreversível estendida (EIT).

4.1.3 Caso 3 – Transiente de fechamento rápido

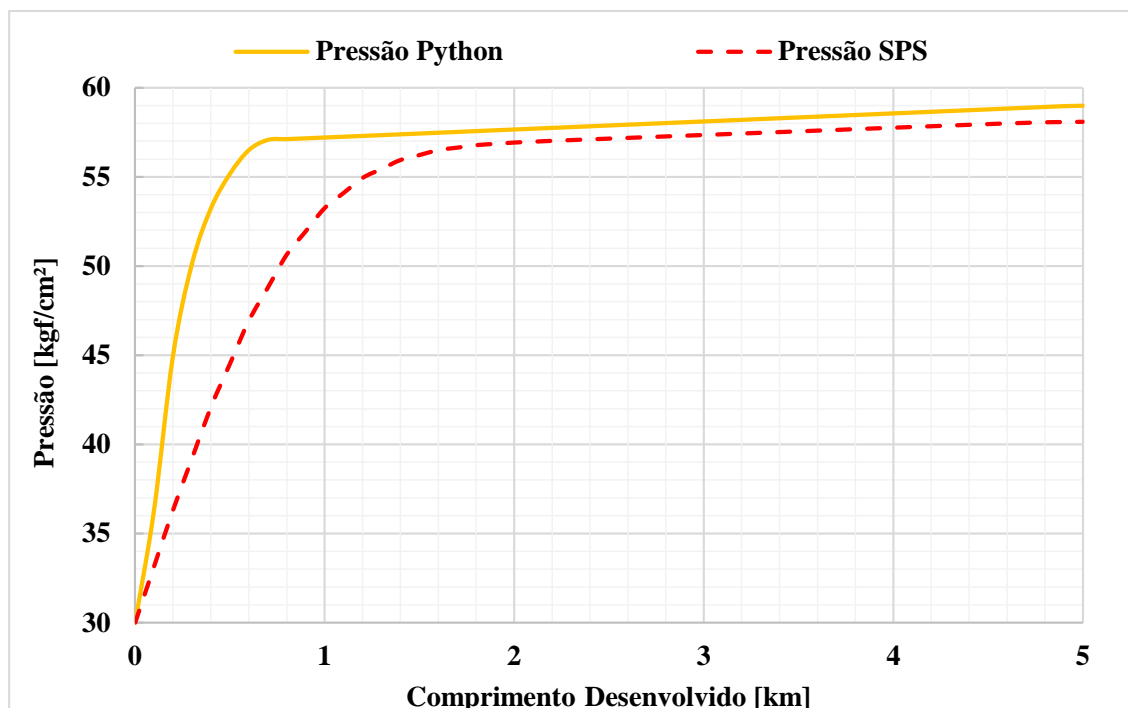
Novamente o modelo será utilizado para análise do transiente de um fechamento de válvula de bloqueio, dessa vez o tempo de curso da válvula será de 1,0 s. A Tabela 18 apresenta o resumo das principais características utilizadas.

Tabela 18 – Caso 3: Principais características utilizadas na simulação

Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	5,0 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,25 pol
Fluido	
Massa específica	998 kg/m ³
Viscosidade	0,001 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
Tempo de curso	1 s
Curva de fechamento	Linear
C _v	1000 gpm/psi ^{0,5}

Realizou-se um primeiro teste sob as condições padrão dos simuladores, cujos resultados estão apresentados na Figura 27.

Figura 27 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio



Na Tabela 19 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 19 – Caso 3 – Transiente de fechamento rápido: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

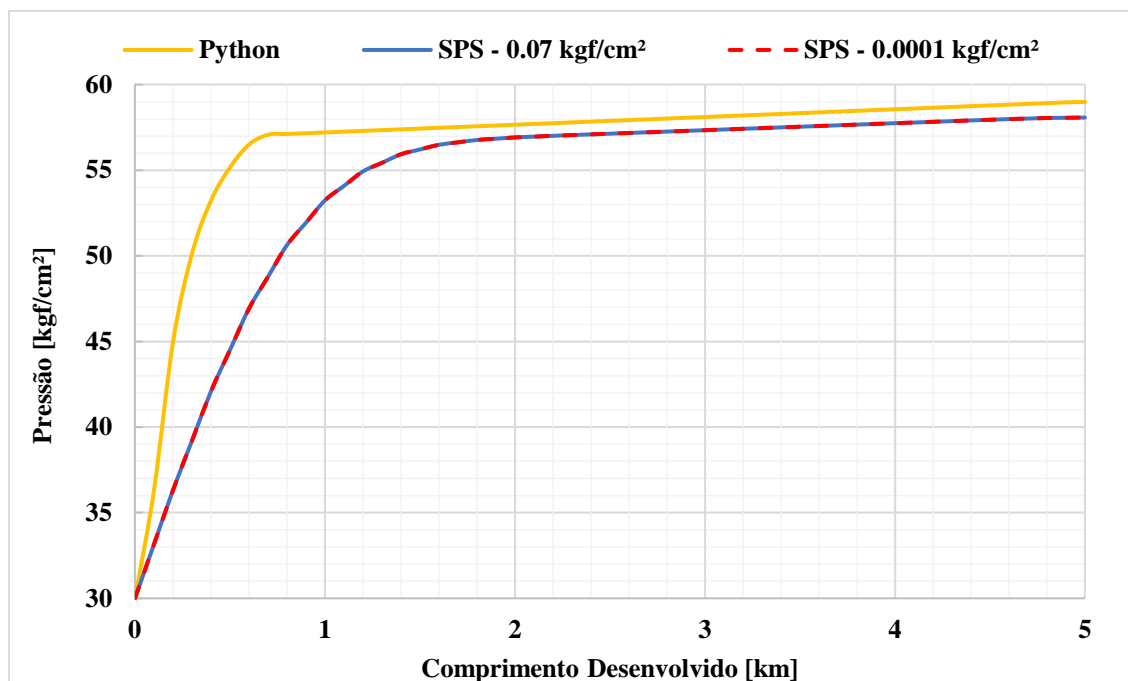
Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	50,12 kgf/cm ²	39,20 kgf/cm ²	27,8%

Aqui observamos novamente uma discrepância entre as pressões obtidas, como aconteceu no Caso 2, porém desta vez mais significativa, com erro relativo de 27,8%. Por esse motivo, o teste de malha foi realizado mais uma vez.

4.1.3.1 Teste da tolerância de pressão

Primeiramente testamos a tolerância de pressão, mantendo o espaçamento da malha calculado pelo SPS:

Figura 28 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste da tolerância de pressão no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio

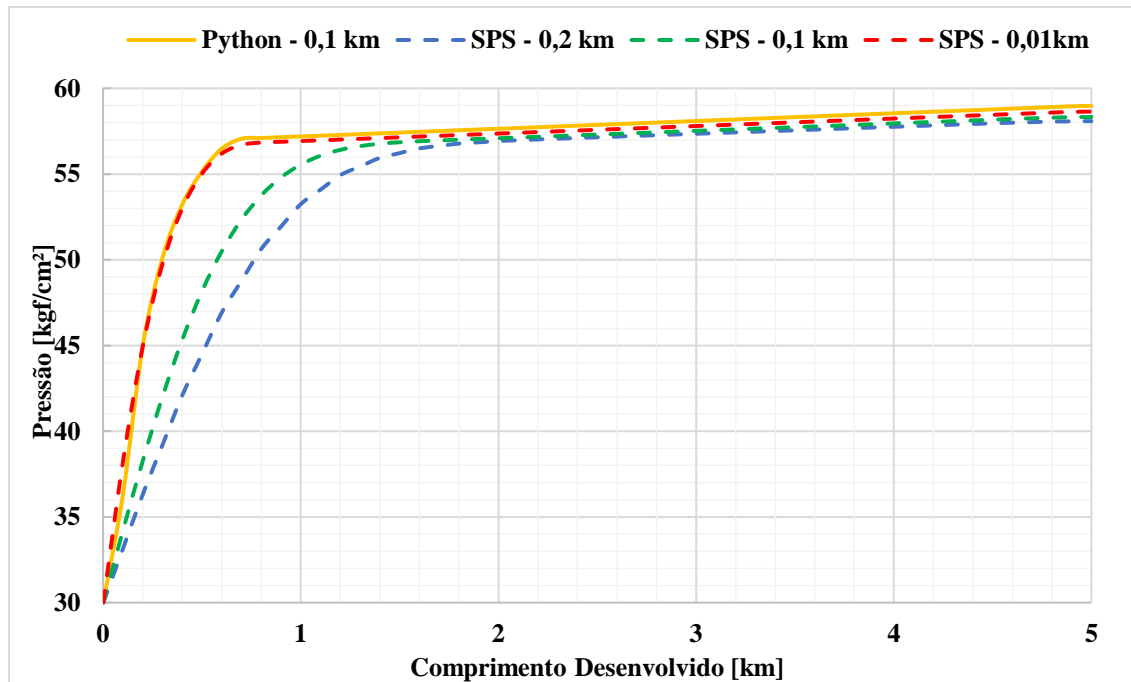


Podemos observar na Figura 28 que neste caso a mudança no parâmetro de tolerância de pressão não melhorou os resultados como aconteceu na análise do Caso 2.

4.1.3.2 Teste de espaçamento da malha

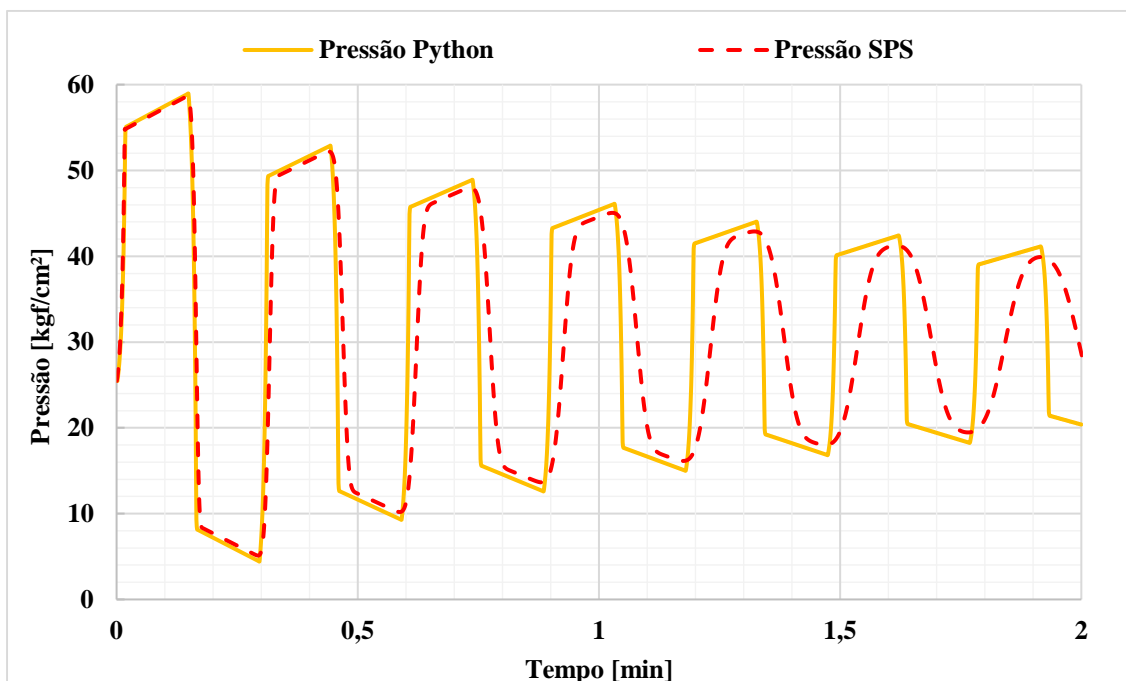
O teste de espaçamento de malha para o fechamento rápido da válvula de bloqueio foi realizado e está ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Caso 3: Pressão máxima ao longo do oleoduto obtida pelo teste de espaçamento da malha no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio



É possível observar que no caso de fechamento rápido, o espaçamento de malha utilizado para os cálculos foi muito mais relevante do que a tolerância de pressão, o erro relativo obtido para a curva com o espaçamento definido como 0,01 km foi de apenas 0,7%. Dessa forma, adotou-se o ajuste que mais se aproximou do resultado obtido pelo Python para analisar dados no tempo da pressão a montante da válvula que foi fechada. A Figura 30 apresenta o resultado de variação da pressão, em ambos os simuladores, considerando a discretização espacial de 0,1 km no Python e 0,01 km no SPS.

Figura 30 – Caso 3: Pressão a montante da válvula ao longo do tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio



Nota-se que o resultado do primeiro pico de pressão é muito semelhante nos dois simuladores, sendo o erro relativo neste ponto de apenas 0,06%. Nos picos seguintes o resultado obtido apresenta uma discrepância em relação ao período e ao formato da onda de pressão, onde os picos de pressão do SPS apresentam uma tendência de atenuação da onda, assim como observado no Caso 2.

4.1.4 Caso 4 – Fechamento Rápido com Disco de Ruptura

O Caso 4 é empregado na validação da modelagem do disco de ruptura implementado no simulador. O modelo é representado pela Figura 12. O *setpoint* de abertura do disco foi definido como 40,0 kgf/cm² e a Tabela 20 apresenta o resumo das principais características consideradas.

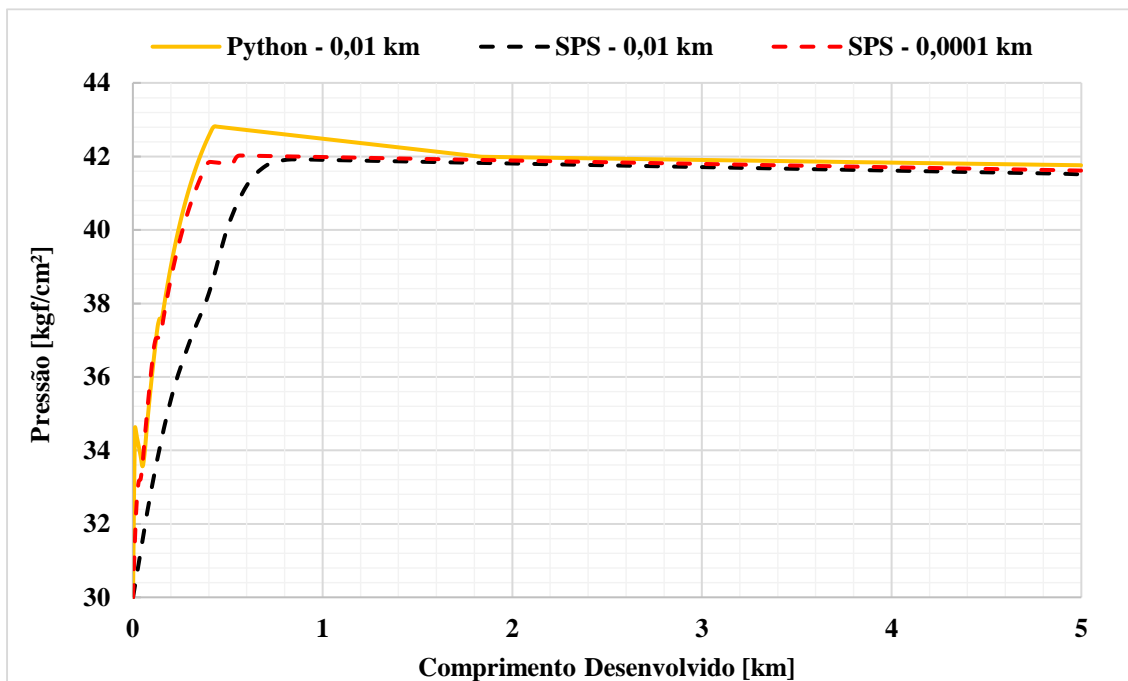
Tabela 20 – Caso 4: Principais características utilizadas na simulação

Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	5,0 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,25 pol
Fluido	
Massa específica	998 kg/m ³
Viscosidade	0,001 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
Tempo de curso	1s
Curva de fechamento	Linear
C _v	1000 gpm/psi ^{0,5}
Disco de ruptura	
C _v	180 gpm/psi ^{0,5}
Setpoint	40,0 kgf/cm ²

4.1.4.1 Teste de espaçamento da malha

Após observar a necessidade dos testes de malha nos casos anteriores, principalmente para o Caso 3, onde também foi analisado o fechamento rápido da válvula de bloqueio, inicialmente utilizou-se o espaçamento de cálculo no SPS de 0,01 km e após verificar novamente a discrepância entre os resultados obtidos foi necessário refinar ainda mais a malha de cálculo. Os resultados de pressão máxima ao longo do oleoduto são apresentados na Figura 31.

Figura 31 – Caso 4: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio com disco de ruptura



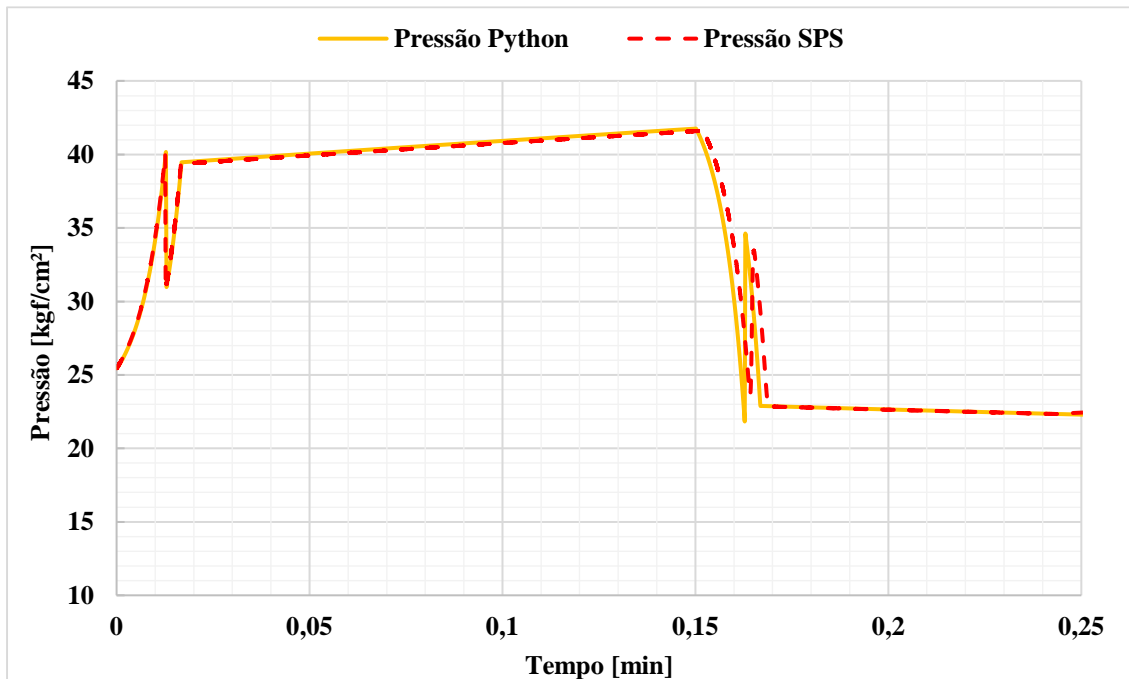
O formato da curva de resultado do SPS se assemelha cada vez mais com o resultado do Python à medida que refinamos a malha. Foi necessário utilizar um espaçamento de cálculo muito menor no SPS (0,0001 km, i.e. 10 cm) do que o utilizado no Python (0,01 km) para que os resultados se aproximassem.

Observa-se que, semelhante aos casos anteriores, ao reduzir o espaçamento de cálculo no SPS, os resultados se aproximaram dos obtidos pelo programa desenvolvido. Se essa tendência persistir, seria necessário utilizar uma malha ainda mais refinada para alcançar resultados mais próximos aos do obtido utilizando o Python.

Esse refinamento da malha de cálculo demanda um grande esforço computacional. Nesse caso específico, a simulação no SPS levou mais de 24 horas para processar apenas 15 segundos do transiente hidráulico, ao passo que no programa desenvolvido, com uma malha de cálculo menos refinada, o resultado foi obtido em menos de 2 minutos.

O maior erro relativo obtido entre o Python (0,01 km) e o SPS (0,0001 km) para pressão máxima foi cerca de 9,6% nos primeiros 30 m, onde ocorre um aumento de pressão devido a segunda volta da onda de pressão, essa diferença acontece por conta da maior tendência a atenuação da onda de pressão que o SPS apresenta. No restante do comprimento desenvolvido o erro relativo não passa de 1,9%, onde a máxima é definida pela primeira onda de pressão.

Figura 32 – Caso 4: Pressão a montante do disco de ruptura ao longo do tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio



Na Figura 32, podemos ver claramente o momento em que o disco rompe ($t \approx 0,01min$), ponto em que a pressão atinge o valor de *setpoint*, definido como 40 kgf/cm². Logo após, ocorre uma queda abrupta na pressão devido a liberação da passagem do fluido para o tanque de alívio. A pressão aumenta novamente por se tratar de um fechamento abrupto da válvula. Se não houvesse o disco de ruptura a pressão máxima atingida seria a mesma indicada no item 4.1.3, onde foi analisado o mesmo fechamento de válvula sem o equipamento de alívio de pressão.

4.1.5 Caso 5 - Fechamento Rápido com PSV

No Caso 5 foi utilizada uma válvula de alívio no lugar do disco de ruptura, o modelo é representado pela Figura 13. O *setpoint* de abertura e fechamento da PSV foi definido igual a 40,0 kgf/cm. A Tabela 21 apresenta o resumo das principais características consideradas.

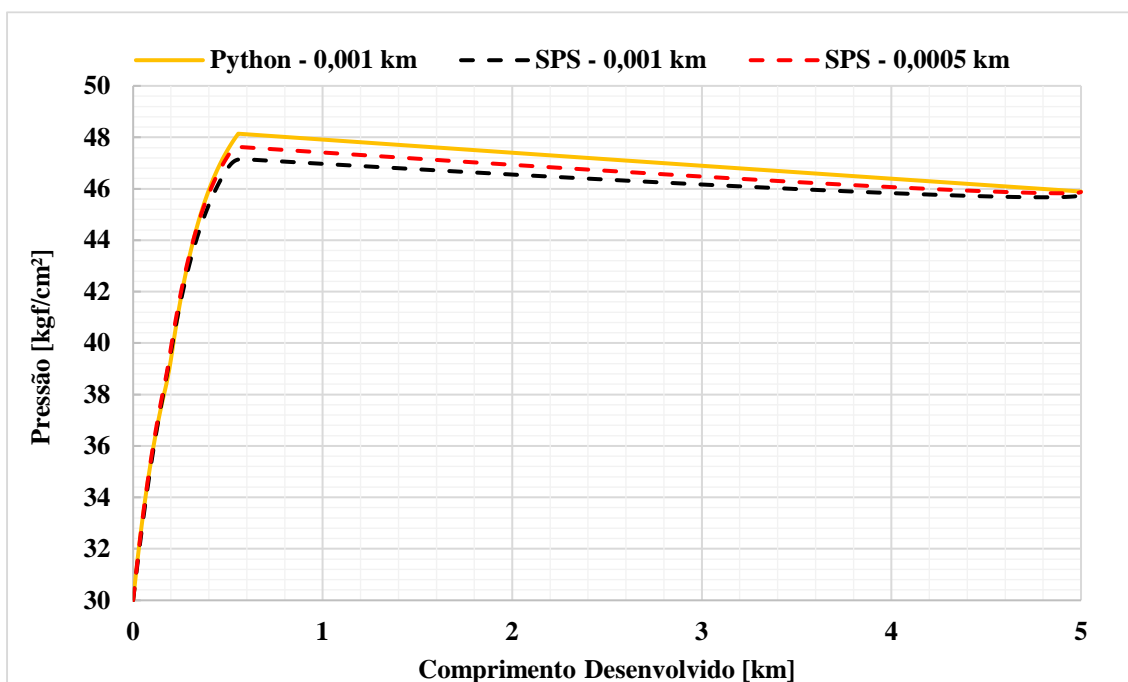
Tabela 21 – Caso 5: Principais características utilizadas na simulação

Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	5,0 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,25 pol
Fluido	
Massa específica	998 kg/m ³
Viscosidade	0,001 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	30,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	21,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
Tempo de curso	1 s
Curva de fechamento	Linear
C _v	1000 gpm/psi ^{0,5}
PSV	
C _v	200 gpm/psi ^{0,5}
Setpoint	40,0 kgf/cm ²

4.1.5.1 Teste de espaçamento da malha

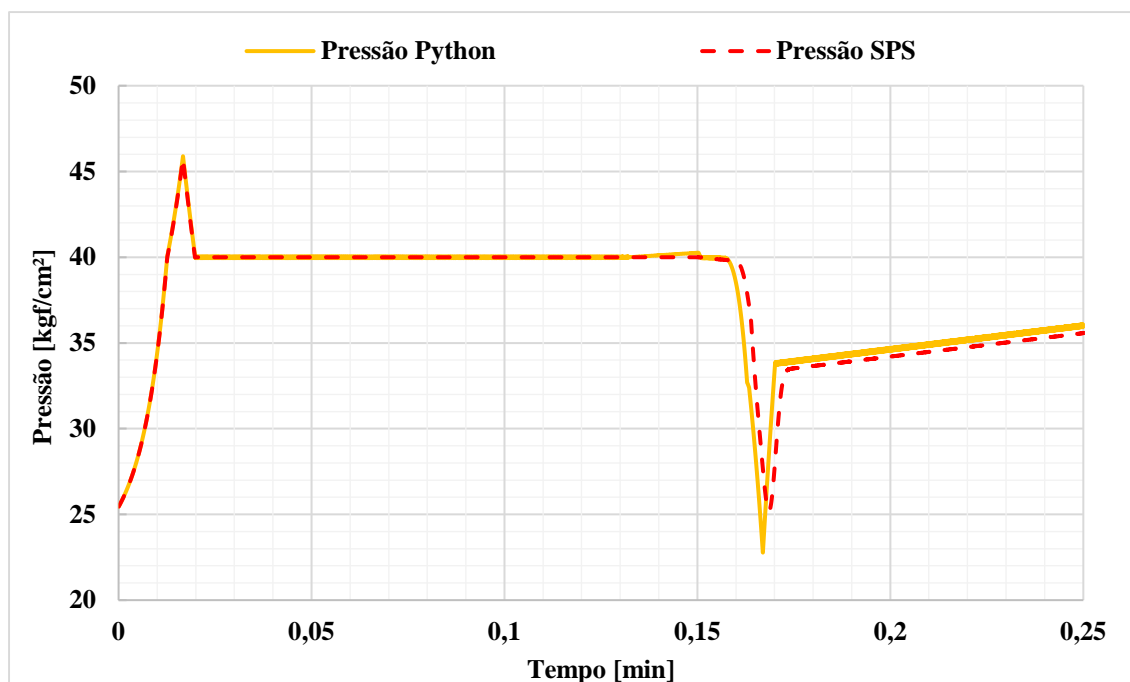
O teste de malha foi realizado considerando dois espaçamentos de cálculo, 0,001 km e 0,0005 km, os resultados comparativos são apresentados seguir na Figura 33.

Figura 33 – Caso 5: Pressão máxima ao longo do oleoduto no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio com PSV



Novamente foi necessário um maior refinamento da malha do cálculo para que a pressão máxima obtida pelo SPS se aproximasse da pressão obtida no programa desenvolvido. A curva com espaçamento de 0,0005 km (50 cm) obteve um erro relativo máximo de 1,1%.

Figura 34 – Caso 5: Pressão a montante da PSV ao longo do Tempo no transiente de fechamento rápido da válvula de bloqueio



Podemos observar que o equipamento modelado não foi capaz de manter sua pressão a montante em 40 kgf/cm² durante o primeiro salto de pressão no transiente. Por se tratar de um fechamento abrupto da válvula de bloqueio, o pico de pressão ultrapassa o *setpoint* de alívio definido num primeiro momento pois a válvula necessita de um tempo para abertura total, diferente do disco de ruptura em que o evento ocorre instantaneamente.

A pressão a montante da PSV teve o mesmo comportamento nos dois simuladores se diferenciando apenas pelo comportamento de atenuação da onda de pressão que é maior no SPS, já discutido anteriormente.

4.1.6 Caso 6 - Modelo de Aplicação – Regime Permanente

O modelo de aplicação que utiliza a bomba centrífuga e um perfil de elevação, conforme descrito no item 3.5.2 será estudado a seguir. A Tabela 22 apresenta o resumo das principais características consideradas na simulação.

Tabela 22 – Caso 6: Principais características utilizadas na simulação

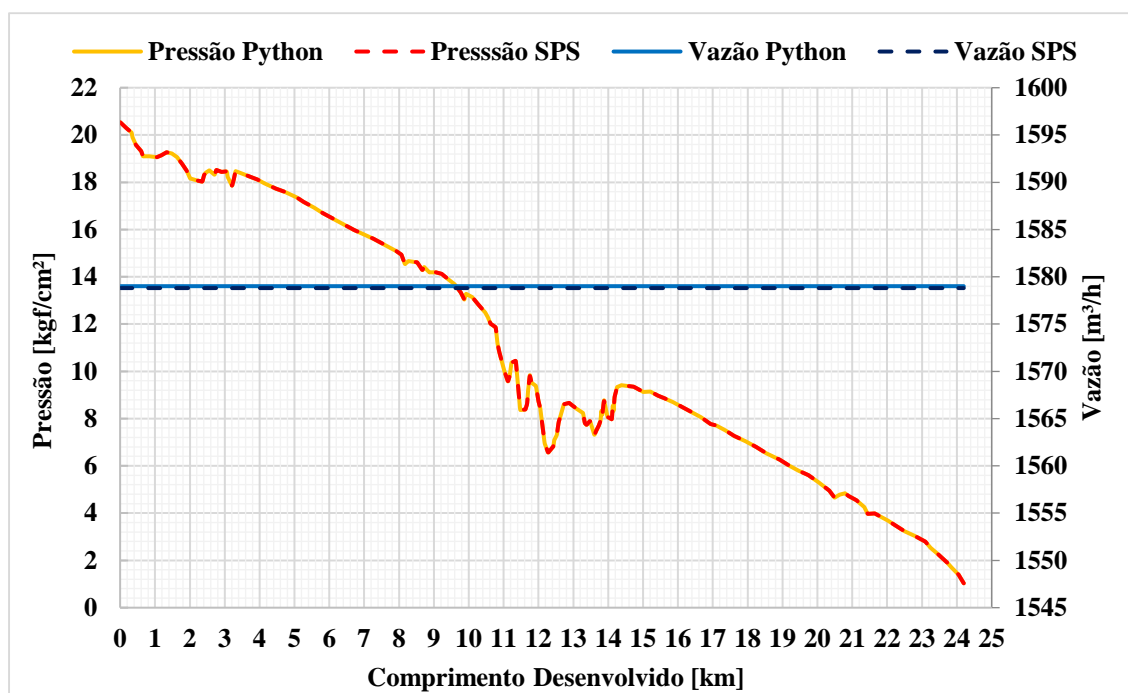
Oleoduto	
Comprimento desenvolvido	24,2 km
Diâmetro	20 pol
Espessura	0,5 pol
Fluido	
Massa específica	865 kg/m ³
Viscosidade	0,003 Pa.s
Tanques	
Pressão no tanque de envio	1,0 kgf/cm ²
Pressão no tanque de recebimento	1,0 kgf/cm ²
Válvula de Bloqueio	
Tempo de curso	1 min e 20 s
Curva de fechamento	Linear
C _v	10000 gpm/psi ^{0,5}

Considerando os resultados dos testes de malha realizados anteriormente, os dois simuladores irão utilizar um espaçamento de cálculo igual a 0,01 km e a simulação no SPS utilizará uma tolerância ao erro de pressão igual a 0,0001 kgf/cm².

Para entender melhor o comportamento do sistema, alvo do nosso estudo de caso, primeiramente é importante avaliar seu comportamento no regime de permanente de

transferência. O regime de transferência representado pela Figura 35 mostra a bomba fornecendo uma vazão de 1579 m³/h e pressão de descarga igual a 20,5 kgf/cm² para o sistema em questão.

Figura 35 – Estudo de Caso: Pressão e vazão no regime permanente



Na Tabela 23 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 23 – Caso 6 – Regime permanente do estudo de caso : Comparação da pressão e vazão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	20,54 kgf/cm ²	20,53 kgf/cm ²	0,05%
Vazão	1579,0 m ³ /h	1578,8 m ³ /h	0,01%

Observa-se que a pressão ao longo do oleoduto, no regime permanente fica bem longe do limite de resistência mecânica do oleoduto de 51,0 kgf/cm².

4.1.7 Caso 7 - Modelo de Aplicação Sem Sistema de Alívio

Com o objetivo de obter a máxima pressão que o sistema pode atingir durante um cenário incidental sem o sistema de alívio, foi realizado o fechamento da válvula de bloqueio localizada no recebimento do oleoduto.

Considerando que a pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), corresponde ao limite de resistência mecânica do oleoduto, estabelecido em 51 kgf/cm², podemos analisar os resultados obtidos.

Figura 36 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto sem o sistema de alívio

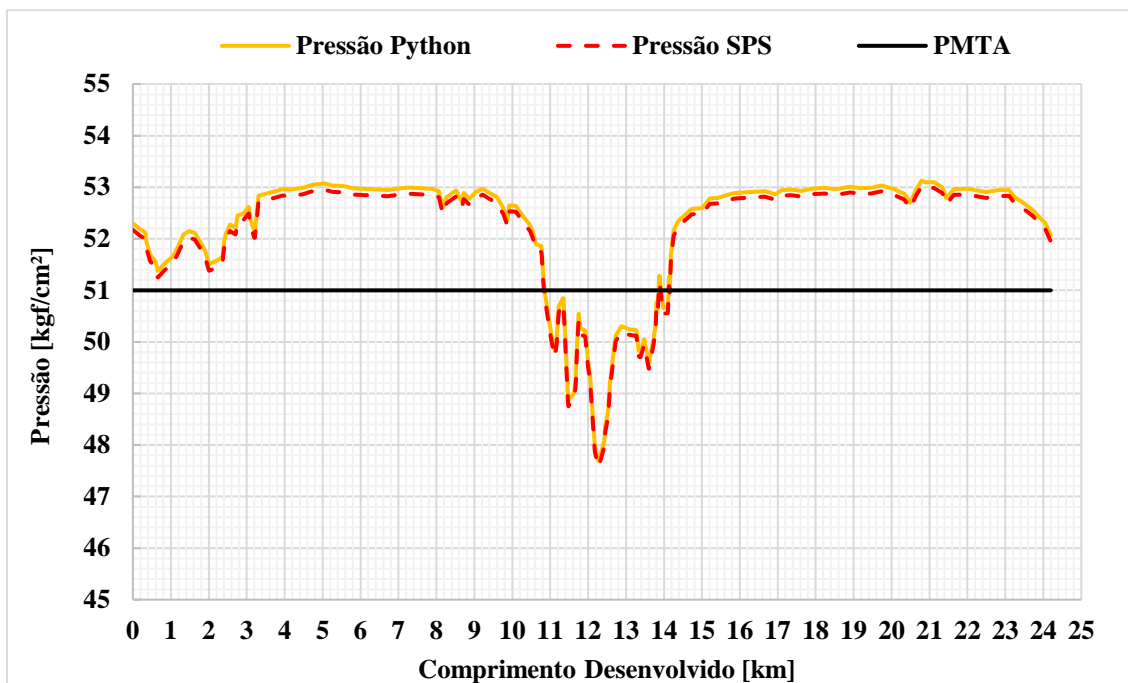
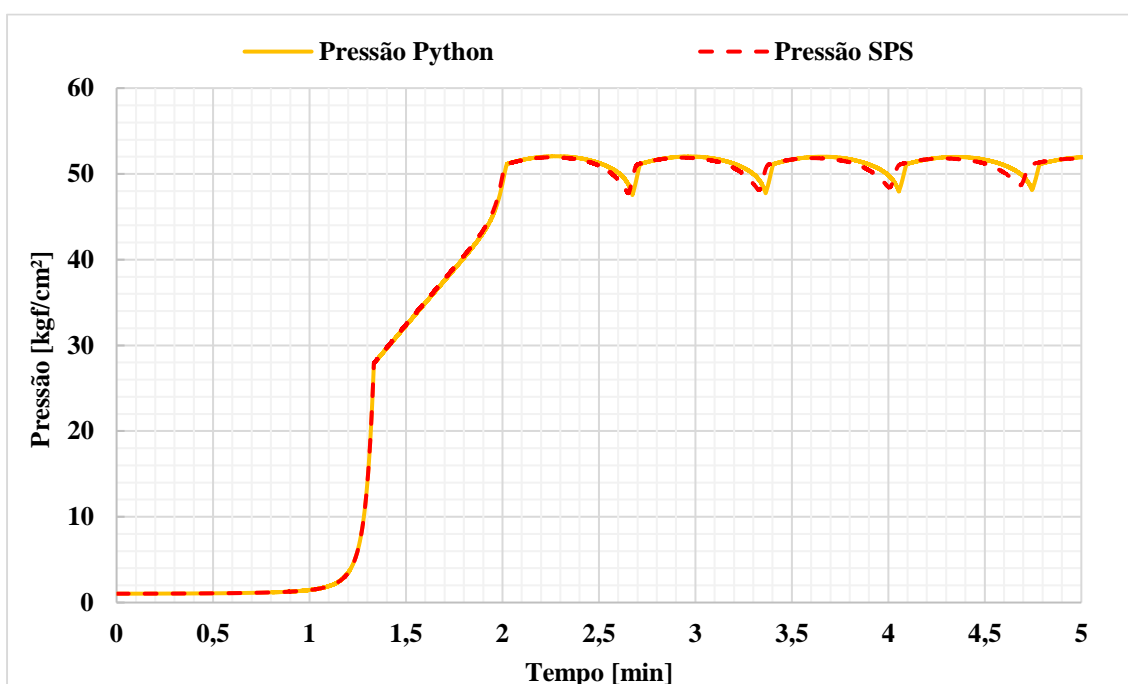


Figura 37 – Estudo de Caso: Pressão a montante da válvula de bloqueio ao longo do tempo sem o sistema de alívio.



Na Tabela 24 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 24 – Caso 7 – Estudo de Caso sem sistema de alívio: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	52,08 kgf/cm ²	52,14 kgf/cm ²	0,25 %

A Figura 36 mostra o perfil de pressão máxima atingida devido o fechamento da válvula de bloqueio. Observa-se que a pressão ultrapassou até 2,0 kgf/cm² do limite de resistência mecânica do oleoduto, que poderia pôr em risco a integridade dos equipamentos, pessoas e meio ambiente em torno do sistema.

A Figura 37 mostra a pressão a montante da válvula de bloqueio, que chega até 52,1 kgf/cm², 1,1 kgf/cm² acima da PMTA .

Considerando a pressão máxima atingida pelo fechamento da válvula de bloqueio, ao definir o *setpoint* de abertura dos dispositivos como 40,0 kgf/cm², o correto dimensionamento da área do orifício será determinante para evitar que o sistema ultrapasse o limite de pressão estabelecido.

Conforme descrito no item 3.5.2, o programa desenvolvido foi utilizado para auxílio da determinação da vazão de alívio requerida. A válvula de bloqueio foi gradativamente fechada até que a pressão à montante dela atingisse 40,0 kgf/cm², valor de *setpoint* estabelecido. Dessa forma, a vazão de alívio requerida obtida igual a 610 m³/h. Os dados utilizados para o dimensionamento dos dispositivos de segurança estão descritos na Tabela 25.

Tabela 25 – Dados para o dimensionamento dos dispositivos de segurança

	Disco de Ruptura	PSV
Vazão de alívio	10167 l/min (610 m ³ /h)	10167 l/min (610 m ³ /h)
Viscosidade	3,0 cP	3,0 cP
Kw	1,0	1,0
Kd	0,62	0,65
Kc	-	1,0
GI	0,867	0,867
P _{set}	3923 kPa (40,0 kgf/cm ²)	3923 kPa (40,0 kgf/cm ²)
P ₂	0 kPa (0,0 kgf/cm ²)	98 kPa (1,0 kgf/cm ²)

4.1.8 Caso 8 - Modelo de Aplicação Com Disco de Ruptura

Para o disco de Ruptura, respeitando as condições de dimensionamento, a contrapressão foi considerada como a pressão atmosférica, 0,0 kgf/cm² manométrica. Com os dados necessários em mãos foi aplicada a metodologia descrita no item 2.6.3. O resultado do dimensionamento está descrito na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultado do dimensionamento do disco de ruptura

Área requerida obtida	4,4 pol ²
Conversão da área para C _v	104 gpm/psi ^{0,5}

Após dimensionado, podemos modelar o disco de ruptura nos programas e simular novamente o fechamento da válvula de bloqueio. O resultado está representado pelas Figura 38 e Figura 39.

Figura 38 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto com disco de ruptura

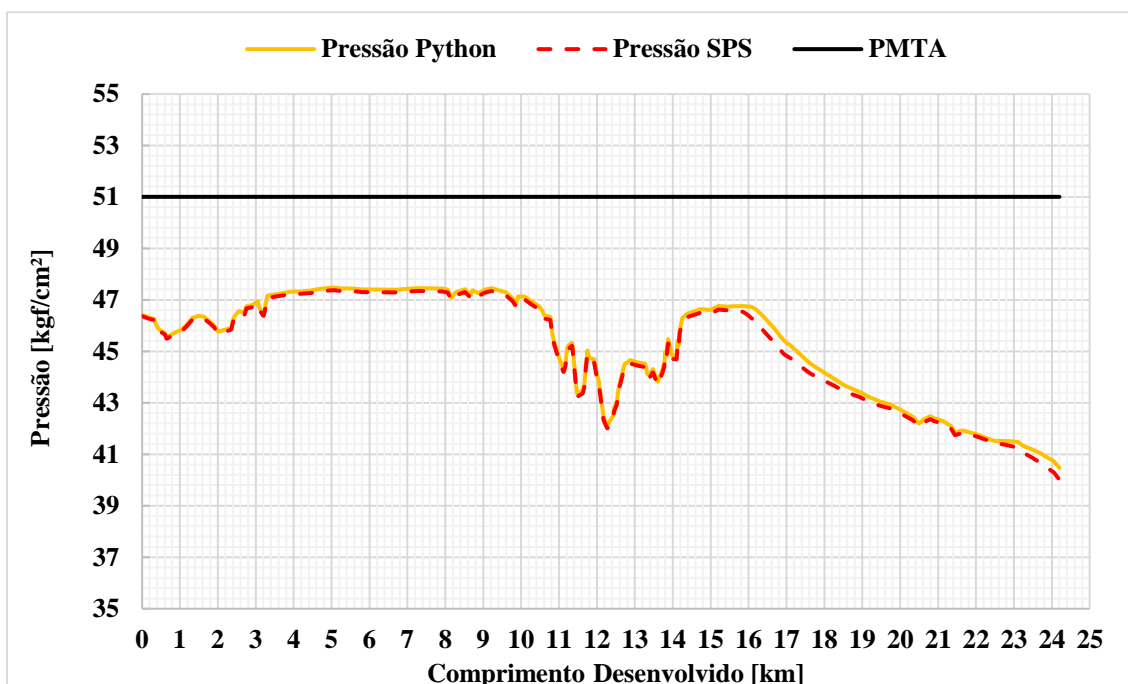
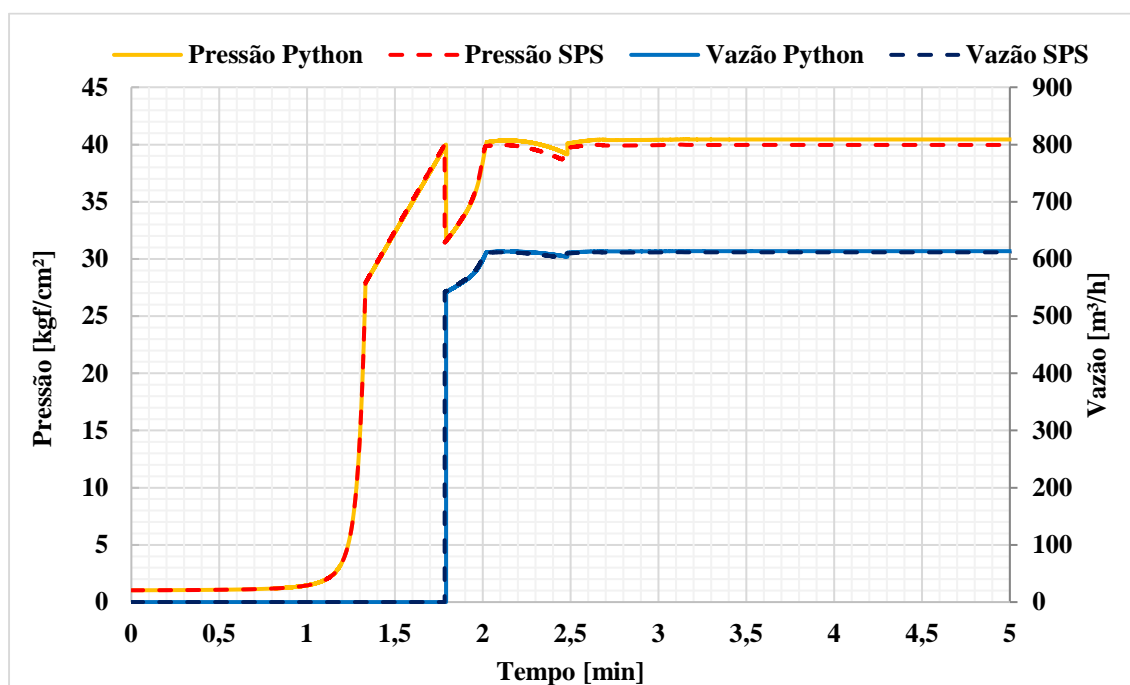


Figura 39 – Estudo de Caso: Pressão e Vazão a montante do disco de ruptura ao longo do tempo



Na Tabela 14 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 27 – Caso 8 – Estudo de Caso com disco de ruptura: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	Erro relativo
Pressão	40,45 kgf/cm ²	40,00 kgf/cm ²	1,2 %

Observa-se pela Figura 38 que o disco de ruptura conseguiu aliviar a pressão do sistema, mantendo-a abaixo do limite estabelecido, a Tabela 14 mostra que o erro máximo relativo entre os dois simuladores foi de apenas 1,2%.

A Figura 39, que apresenta a pressão e vazão a montante do disco de ruptura, mostra que o dispositivo foi bem dimensionado e manteve a pressão daquele ponto muito próxima a pressão de ajuste, com um erro de relativo de 1,0% entre os simuladores e a vazão de alívio obtida foi cerca de 610 m³/h, mesma vazão utilizada para o dimensionamento do dispositivo.

4.1.9 Caso 9 - Modelo de Aplicação Com PSV

Para a PSV, o dimensionamento foi realizado considerando uma contrapressão de 1,0 kgf/cm². Com os dados necessários em mãos podemos aplicar a metodologia descrita no item 2.6.3. O resultado do dimensionamento está descrito na Tabela 28.

Tabela 28 – Resultado do dimensionamento da PSV

Área requerida obtida	4,2 pol ²
Área do orifício padrão	4,34 pol ²
Conversão da área para C _v	107 gpm/psi ^{0,5}

De acordo com a norma API 520, a área requerida obtida pelo dimensionamento resultou na escolha do tamanho de orifício padrão N, conforme Tabela 2 retirada da norma API 526. Após dimensionado e modelado, a simulação foi realizada e o resultado está representado na Figura 40 e Figura 41.

Figura 40 – Estudo de Caso: Pressão máxima ao longo do oleoduto com PSV

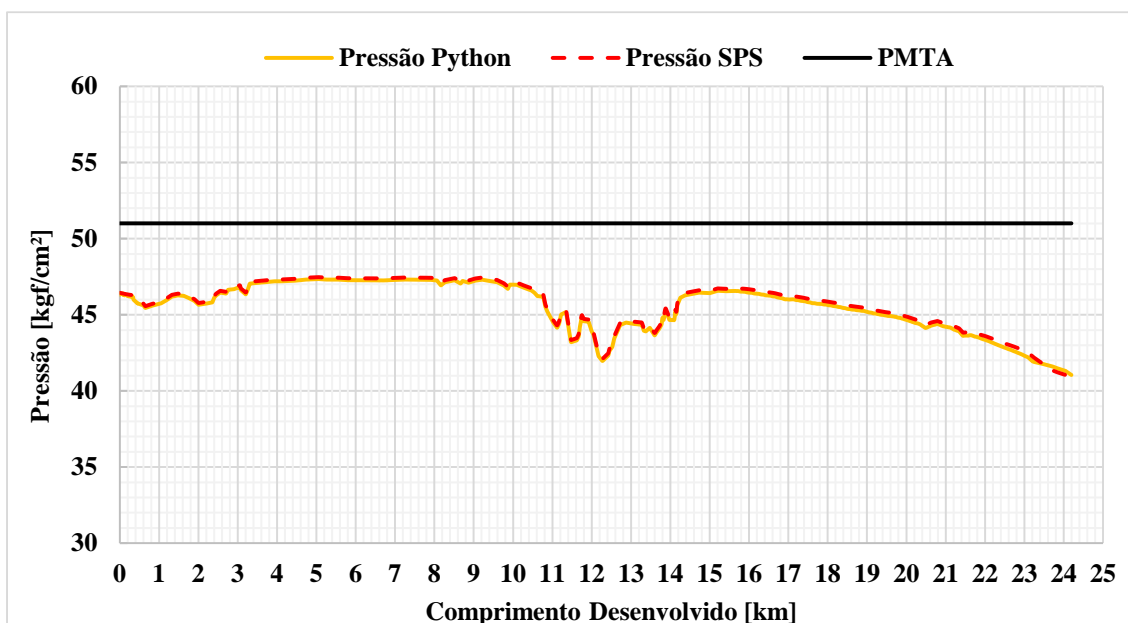
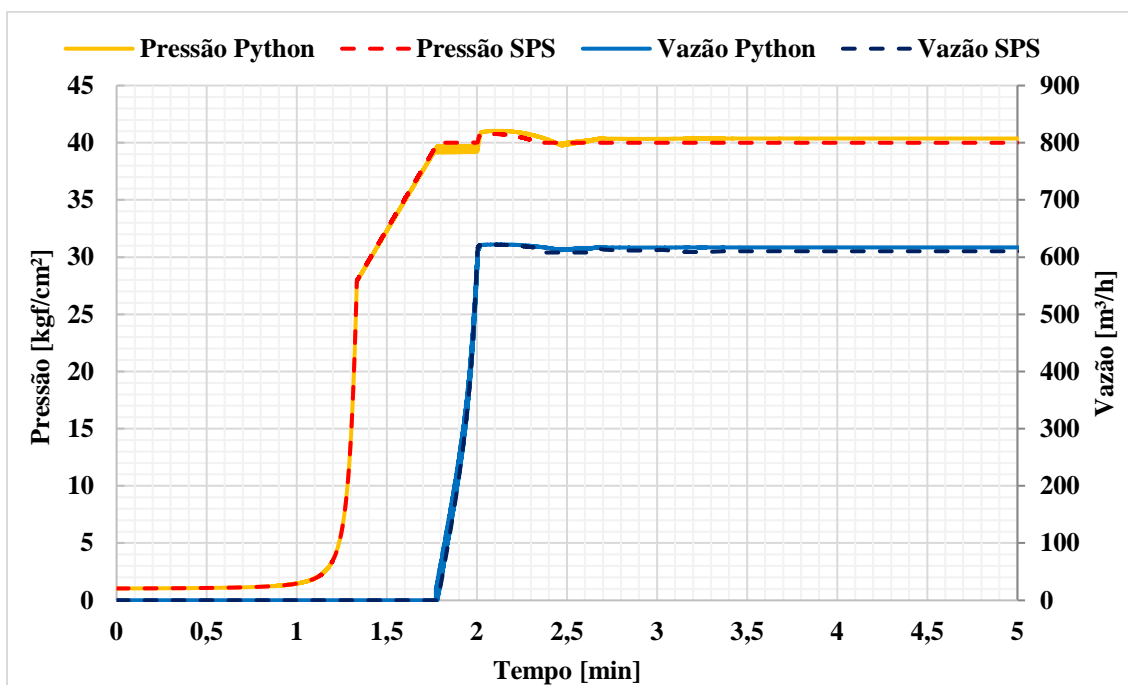


Figura 41 – Estudo de Caso: Pressão e Vazão a montante da PSV ao longo do tempo



Na Tabela 29 estão descritos os valores obtidos na comparação dos simuladores juntamente de seus respectivos erros relativos.

Tabela 29 – Caso 9 – Estudo de Caso com PSV: Comparação da pressão ao longo do oleoduto no ponto de maior erro relativo.

Variável	Python	SPS	<i>Erro relativo</i>
Pressão	41,94 kgf/cm ²	42,26 kgf/cm ²	0,8%

Conforme observado na Figura 40 e na Tabela 29, a PSV também foi bem dimensionada, uma vez que o dispositivo foi capaz de aliviar a pressão do sistema, mantendo-o abaixo do limite estabelecido e o erro relativo ficou abaixo de 0,8%.

A Figura 41 apresenta a pressão e vazão a montante da PSV, e é possível observar que foi possível manter a pressão do ponto no valor do *setpoint* definido com um erro relativo de até 1,0 % entre os simuladores. A vazão de alívio obtida, cerca de 610 m³/h, corresponde ao valor de vazão requerida utilizado no dimensionamento do dispositivo.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, aprimorou-se o simulador de transiente hidráulico desenvolvido por Lima (2020), de modo a simular sistemas de tubulações mais complexos.

O emprego da programação orientada a objetos facilitou a reestruturação do código do simulador e foi fundamental para incorporar a resolução de sistemas em rede por meio de solução de balanço matricial, que permite a simulação do sistema de alívio.

Os testes de malha de cálculo mostraram que a solução obtida pelo programa comercial se aproxima do resultado obtido pelo programa em Python, à medida que refinamos sua malha de cálculo. De forma que o programa desenvolvido exige menos recursos computacionais, pois não tem a necessidade de utilizar uma discretização refinada para alcançar resultados semelhantes ao SPS.

Os testes de validação e comparação entre o programa desenvolvido e o SPS, para os casos de transiente de fechamento da válvula de bloqueio apresentaram um baixo erro relativo para pressão máxima, sendo 0,07% para o fechamento lento e 0,7% para o fechamento rápido. Os resultados de pressão no tempo se diferem apenas pela atenuação da onda que é muito mais acentuada no SPS, por conta da simplificação utilizada nos cálculos realizados pelo programa desenvolvido onde o fator de atrito é considerado constante e igual ao calculado para o regime permanente, durante todo o transiente.

A modelagem dos equipamentos de sistema de alívio foi bem-sucedida e os testes de validação demonstraram um erro relativo de até 1,9% para o disco de ruptura e até 1,1 % para a PSV nos casos de fechamento rápido.

Para o modelo aplicado, os resultados obtidos demonstraram que o dimensionamento do sistema de alívio foi capaz de reduzir a pressão máxima ao longo do oleoduto, durante um cenário de fechamento incidental da válvula de bloqueio, fazendo com que o mesmo não seja submetido a pressões maiores que o limite de resistência mecânica estabelecido. Na análise deste modelo o erro relativo entre os programas foi de 1,2% para o sistema com o disco de ruptura e abaixo de 0,8% para o sistema com a PSV.

O simulador desenvolvido cumpriu o objetivo esperado e demonstrou um bom desempenho e acurácia para os resultados.

Destacam-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Implementar o cálculo do fator de atrito dinâmico, considerando o regime de transferência durante o transiente;

- Implementação do equacionamento de energia, a fim de considerar a variação das propriedades físicas dos produtos em função da temperatura do sistema;
- Implementar a modelagem do comportamento da PSV do tipo mola com aplicação do fator de sobrepressão, necessário para avaliação do comportamento de válvulas de alívio não certificadas. Neste trabalho adotou-se uma abordagem simplificada em relação ao comportamento dinâmico deste dispositivo de acordo com a norma de dimensionamento API 520;
- Implementar a modelagem de outros equipamentos e processos utilizados em sistemas de oleoduto como as válvulas de controle de pressão e vazão, processos de mudança de fase (abertura de coluna) e transporte com diferentes produtos na linha (batelada).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STANDARD 520 - Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices: Part I—Sizing and Selection**. Ninth edition, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API STANDARD 526 - Flanged Steel Pressure Relief Valves**. Eighth edition, 2023.

BARRETO, C. **Simulação Numérica do Escoamento em Estações de Entrega de Gás Natural**. 2011. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica.) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

CARNEIRO, L. **Estudo do comportamento dinâmico de válvula de mola para alívio de pressão em dutos**. 2011. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica.) - PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. Boston: Prentice Hall, 2019.

FILGUEIRAS, L., CARNEIRO, L., PIRES, LUÍS, G., LEVANTINE, N. **Projeto de engenharia de sistema para testes dinâmicos de válvulas de alívio do tipo mola para dutos**. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 17^a, 2014. Rio De Janeiro, Brasil. 17^a. 4 fev. 2016.

JENSEN, R. et al. **Implementation and Validation of a Free Open Source 1D Water Hammer Code**. *Fluids*, v. 3, n. 3, p. 64, 3 set. 2018.

LIMA, P. **Desenvolvimento de um simulador de transientes hidráulicos em dutos com o método das características**. 2020. 98 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

MUTEGI, M. K.; SCHMIDT, J.; DENECKE, J. **Sizing rupture disk vent line systems for high-velocity gas flows**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 62, p. 103950, nov. 2019.

RENNÓ, M. **Análise de Transientes Hidráulicos em Oleodutos**. Rio de Janeiro, 1984. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - COPPE-UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

SMITH, P. J.; ZAPPE, R. W. **Sizing Pressure Relief Devices**. Elsevier eBooks, p. 269–291, 1 jan. 2004.

TRANSPETRO. **Relatório Anual Integrado – 2022**. Brasil, 2023

XIA, X. et al. **Early underground pipeline collapse detection and optimization based on water hammer vibration signal**. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 206, p. 105045–105045, 1 dez. 2023.

WYLIE, E. B.; STREETER, V. L. **Fluid transients**. McGraw-Hill, 1978.

ZHANG, J. et al. **Prediction of blowdown of a pressure relief valve using response surface methodology and CFD techniques**. Applied Thermal Engineering, v. 133, p. 713–726, mar. 2018.

APÊNDICE A - EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS

Equipamento:	Equação:
	$\Delta H = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2$
Bomba Centrífuga	Onde a_0 , a_1 e a_2 são os coeficientes da equação que descreve a curva da bomba
	Se $Q \geq 0$:
	$\Delta H = \frac{Q^2}{C_V^2 \rho_W g}$
Válvula de retenção	Se $Q < 0$:
	$\Delta H = 0$
	$\Delta H = \frac{Q^2}{(F_R C_V)^2 \rho_W g}$
Válvula de Bloqueio	Onde F_R é a fração de abertura definida pela curva da válvula no instante t.
	Se Pressão a montante $< S_p$:
	$\Delta H = 0$
Disco de Ruptura	Se Pressão a montante $\geq S_p$:
	$\Delta H = \frac{Q^2}{C_V^2 \rho_W g}$
	Se Pressão a montante $< S_p$:
	$\Delta H = 0$
	Se Pressão a montante $\geq S_p$
Válvula de Alívio	$\Delta H = \frac{Q^2}{(F_R C_V)^2 \rho_W g}$
	Onde F_R é a fração de abertura definida pela curva da válvula no instante t.

Equipamento:	Equação:
Tubulação	Regime Permanente:
	$\Delta H = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5}$
	Regime transiente:
	$C^+ : H_{Pi} = C_P - BQ_{Pi}$
	$C^- : H_{Pi} = C_M + BQ_{Pi}$
Onde:	$C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1} Q_{i-1} $
	$C_M = H_{i+1} + BQ_{i+1} - RQ_{i+1} Q_{i+1} $
	$H_{Pi} = \frac{C_P + C_M}{2}$
	$B = \frac{a}{g}$
	$R = \frac{fdx}{2gDA^2}$