

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

WANESSA JULIANE LOPES VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO SIMPLIFICADO PARA O CÁLCULO DO
PERFIL DE PRESSÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS EM CATENÁRIA LIVRE**

Maceió
2024

WANESSA JULIANE LOPES VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO SIMPLIFICADO PARA O CÁLCULO DO
PERFIL DE PRESSÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS EM CATENÁRIA LIVRE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador/a: Prof. Dr. Altair Marques da Silva.

Maceió
2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

V665d Vieira, Wanessa Juliane Lopes.
Desenvolvimento de um modelo simplificado para o cálculo do perfil de pressão em dutos flexíveis em catenária livre / Wanessa Juliane Lopes Vieira. – 2024.
44 f. : il. color.

Orientador: Altair Marques da Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 42-44.

1. Dutos flexíveis. 2. Simulação de escoamento. 3. Perfil de pressão. 4. Catenária livre. I. Título.

CDU: 66.0 : 622.276



Universidade Federal de Alagoas
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia
Curso de Engenharia Química



Av. Lourival de Melo Mota – Tabuleiro do Martins Maceió – AL,
CEP: 57072-970, Tel: (82) 3214-1281

FOLHA DE APROVAÇÃO

WANESSA JULIANE LOPES VIEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO SIMPLIFICADO PARA O CÁLCULO DO
PERFIL DE PRESSÃO EM DUTOS FLEXÍVEIS EM CATENÁRIA LIVRE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química. Apresentado em 22 de agosto de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ALTAIR MARQUES DA SILVA
Data: 09/09/2024 19:24:43-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Altair Marques da Silva
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
gov.br ANTONIO OSIMAR SOUSA DA SILVA
Data: 09/09/2024 22:29:01-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Avaliador: Prof. Dr. Antônio Osimar Sousa da Silva
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARITZA MONTOYA URBINA
Data: 09/09/2024 22:14:39-0300
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Avaliadora: Profa. Dra. Maritza Montoya Urbina
(Universidade Federal de Alagoas)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ao meu esposo Kevem Williams, que sempre me apoiou e esteve ao meu lado em todos os momentos, cuidando de mim. Ele me viu nos meus piores momentos e, ainda assim, escolheu permanecer ao meu lado, enfrentando junto comigo meus desesperos com provas, trabalhos, apresentações, projetos e preocupações. Kevem, sua força e apoio me permitiram continuar.

Aos meus pais, por sempre me apoiarem e incentivarem minha educação, proporcionando-me o suporte necessário para continuar estudando e alcançar minhas conquistas. Vocês foram e sempre serão minha base.

À minha irmã, Viviane Bruna Lopes Vieira, por estar sempre comigo, me apoiando e incentivando. Sei que posso sempre contar com você. Tenho muito orgulho de você.

Às minhas amigas Sarah Rodrigues Costa Sousa, Ana Beatriz Holanda da Silva, Larissa Yasmin Alves Batista e Andressa Guedes de Freitas, por todo o apoio dado durante toda a graduação. Dividimos todos os altos e baixos dessa jornada, que não foi fácil, mas com certeza ficou mais leve e divertida com vocês ao meu lado. Tenho certeza de que um futuro brilhante está reservado para cada uma de vocês pelas pessoas incríveis que são e pela capacidade que possuem. Vocês merecem o mundo.

Agradeço também aos professores da UFAL pelos ensinamentos e, em especial, ao meu orientador Altair Marques da Silva, por aceitar meu convite e por todo o suporte fornecido.

Agradeço à minha família por sempre me incentivar e acreditar em mim. O apoio de vocês foi fundamental para que eu pudesse continuar e alcançar meus objetivos.

A todos, meu sincero agradecimento e reconhecimento pela importância que tiveram em minha vida acadêmica e pessoal.

*"Sucesso não é a chave para a felicidade.
Felicidade é a chave para o sucesso. Se você
ama o que faz, você terá sucesso."*

— Herman Cain

RESUMO

Os dutos flexíveis são tubulações utilizadas para o transporte de petróleo, fluidos de injeção, gás e demais produtos químicos. Em instalações de produção do tipo satélite, esses dutos interligam a cabeça do poço de petróleo a uma unidade de exploração e produção. A simulação do escoamento nesses dutos, para a obtenção do perfil de pressão, requer o conhecimento das condições de escoamento, como as propriedades do fluido e as variáveis operacionais e geométricas. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um método simplificado para calcular o perfil de pressão ao longo de dutos flexíveis em poços do tipo satélite com configuração em catenária livre e criar uma interface gráfica que implemente esse método. O objetivo é fornecer uma ferramenta para simular o comportamento da pressão em escoamentos multifásicos, considerando escoamentos estacionários e ponderando a pressão da coluna d'água junto com a perda de carga por atrito. Os resultados obtidos com a implementação do método simplificado foram promissores. A simulação realizada com a interface gráfica desenvolvida mostrou que o método é eficaz para prever o perfil de pressão em dutos flexíveis com escoamento multifásico, pois a validação dos resultados com dados de modelos comerciais utilizados por softwares sofisticados demonstrou boa precisão, com erros inferiores a 15% para o escoamento vertical devido à coluna d'água e inferiores a 0,1% para o escoamento horizontal, confirmando a adequação do modelo simplificado. Assim, o método desenvolvido é promissor para simular perfis de pressão em dutos flexíveis com escoamento multifásico, fornecendo uma base sólida para futuros aprimoramentos e aplicações na indústria *offshore*.

Palavras-Chave: *Dutos flexíveis, Perfil de pressão, Simulação de escoamento, Catenária livre.*

ABSTRACT

Flexible pipelines are used for transporting oil, injection fluids, gas, and other chemicals. In satellite production installations, these pipelines connect the oil wellhead to an exploration and production unit. Simulating the flow in these pipelines to obtain the pressure profile requires knowledge of flow conditions, such as fluid properties and operational and geometric variables. This work aims to develop a simplified method for calculating the pressure profile along flexible pipelines in satellite wells with a free-hanging catenary configuration and to create a graphical interface that implements this method. The objective is to provide a tool for simulating pressure behavior in multiphase flows, considering steady flows and accounting for water column pressure along with frictional pressure loss. The results obtained from implementing the simplified method were promising. The simulation performed with the developed graphical interface showed that the method is effective in predicting the pressure profile in flexible pipelines with multiphase flow. Validation of the results with data from commercial models used by sophisticated software demonstrated good accuracy, with errors less than 15% for vertical flow due to the water column and less than 0.1% for horizontal flow, confirming the adequacy of the simplified model. Thus, the developed method is promising for simulating pressure profiles in flexible pipelines with multiphase flow, providing a solid foundation for future improvements and applications in the offshore industry.

Keywords: *Flexible pipes, Pressure profile, Flow simulation, Free catenary.*

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Pressão
L	Comprimento
f	Fator de atrito
f_{bi}	Fator de atrito bifásico
ρ	Densidade
ρ_{bi}	Densidade bifásica
v	Velocidade
g	Gravidade
θ	Ângulo
D	Diâmetro
ε	Rugosidade do duto
Re	Número de Reynolds
μ_{bi}	Viscosidade bifásica
H_L	Holdup líquido
TDP	<i>Touch Down Point</i>
Δ	Delta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 Geral.....	12
2.2 Específicos	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 Produção de petróleo OffShore.....	13
3.1.1 Exploração de petróleo OffShore.....	13
3.1.2 Dutos flexíveis.....	13
3.1.3 Sistemas de poços submarinos	15
3.1.4 Escoamento de Petróleo	16
3.2 Escoamento multifásico	17
3.2.1 Padrões de escoamento.....	17
3.2.2 Equação do gradiente de pressão multifásico.....	19
3.2.3 Procedimento de cálculo de perda de carga no escoamento multifásico.....	20
3.3 Desenvolvimento WEB	22
3.3.1 Frontend.....	22
3.3.2 Backend	23
4 METODOLOGIA.....	24
4.1 Modelo Matemático	24
4.2 Desenvolvimento da Interface Gráfica	26
5 RESULTADOS	36
6 CONCLUSÃO.....	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A produção *offshore* envolve a extração de recursos naturais, como petróleo e gás natural, das reservas localizadas abaixo do leito do mar. Essa forma de produção é uma extensão da exploração e produção terrestre, onde plataformas e outros tipos de instalações são construídas para acessar recursos em águas rasas, profundas e ultra profundas. Essa forma de produção é vital para a indústria global de energia, uma vez que muitas das maiores reservas de petróleo do mundo estão situadas em áreas offshore (Morais, J. M., 2013).

Os dutos flexíveis desempenham um papel crucial no transporte de petróleo, fluidos de injeção, gás e outros produtos, principalmente na exploração de petróleo *offshore*. Dependendo do layout submarino, esses dutos podem ser classificados como *Flowline*, quando assentados no leito marinho, ou *Riser*, quando conectam a unidade flutuante ao trecho posicionado no leito marinho (*Flowline*) (Baldan, E. L. e Machado, K. C., 2010; Barbosa, A. R., 2022).

Durante a exploração de petróleo *offshore*, é comum encontrar um escoamento multifásico, caracterizado pelo transporte simultâneo de duas ou mais fases com propriedades diferentes e imiscíveis em uma tubulação. Isso ocorre devido à composição do fluido transportado ser composta muitas vezes por óleo-água-gás, ou ainda, outras substâncias como areia. Logo, existe a necessidade de um estudo sobre o comportamento de um escoamento multifásico com o intuito garantir uma produção contínua e de qualidade (Santos, C. S., 2015; Nascimento, J. C. S., 2013).

Entretanto, a complexidade do escoamento multifásico é notória por conta dos diversos arranjos espaciais que as fases encontradas no fluido podem apresentar. Por isso, se faz necessário estudos aprofundados e elaborados de modelos matemáticos e correlações que representem e aproximem o comportamento de um escoamento multifásico. Tais desafios fazem com que as características deste tipo de escoamento, como a perda de carga e os coeficientes de transferência de calor e massa, sejam difíceis de representar. Isso dificulta a compreensão do comportamento do fluido durante o escoamento para determinação do perfil de pressão e temperatura (Rocha, D. B., 2020).

A implementação de sensores de pressão em dutos flexíveis utilizados na exploração de petróleo offshore, com o intuito de obter o perfil de pressão do escoamento multifásico, enfrenta desafios diversos. Esses desafios incluem a necessidade de garantir que os sensores possam resistir às condições ambientais extremas, tais como temperaturas elevadas e pressões extremas, assegurando, simultaneamente, a capacidade dos sensores em fornecer leituras precisas e

confiáveis. Além disso, fatores como o custo associado, a complexidade da instalação e os desafios relacionados à manutenção tornam a instalação desses sensores inviável (Chaves, T. C., 2011; Lemos, G. G., 2022).

Diante do exposto, este trabalho visa desenvolver um método simplificado para calcular o perfil de pressão ao longo do duto flexível em poços diretamente ligados a plataforma com configuração do duto flexível livre no mar, além de elaborar uma Interface Gráfica funcional que facilite a aplicação do método encontrado. O objetivo deste método é explicar de forma simplificada o comportamento da pressão em um escoamento multifásico, considerando um escoamento estacionário e assumindo que o comportamento da pressão ao longo do duto é resumidamente dado pela ponderação entre a pressão exercida pela coluna d'água e a perda de carga por atrito ao longo do duto. Além disso, o trabalho visa desenvolver um *software* integrado a uma interface gráfica que aplique, através de um conjunto de funções desenvolvidas na linguagem *python*, o método desenvolvido.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Desenvolver um método simplificado para o cálculo do perfil de pressão ao longo do duto flexível em poços do tipo satélite com configuração em catenária livre, além de uma interface gráfica que aplique o método encontrado.

2.2 Específicos

- Desenvolver um método simplificado para o cálculo do perfil de pressão;
- Criar uma interface gráfica para simular o método simplificado;
- Avaliar os valores obtidos na interface gráfica com dados de modelos comerciais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de petróleo *OffShore*

3.1.1 Exploração de petróleo *OffShore*

A exploração de petróleo em mar, também chamada de *offshore*, começou por volta do final dos anos 1940, tendo como marco a primeira exploração viável no Golfo do México no estado americano da Louisiana em 1947 com a descoberta de jazidas de petróleo de difícil extração no mar. Os desafios para extração deste petróleo nessas novas áreas fizeram com que as empresas petrolíferas investissem em centros de pesquisa e desenvolvimento (P&D) junto a instituições científicas e universidades, com intuito de desenvolver pesquisas voltadas para inovações e tecnologias na exploração e produção *offshore* (Morais, J. M., 2013).

Tais pesquisas foram essenciais para o avanço da exploração em águas profundas e ultra profundas com o desenvolvimento de navios-sonda, plataformas de Posicionamento Dinâmico, Árvores de Natal Molhadas (árvores de válvulas, instaladas no leito marinho), equipamentos de separação dos fluxos de petróleo-gás-água no próprio leito submarino, *risers* (dutos) flexíveis resistentes à altas pressões, da sísmica tridimensional (3-D), entre outras inovações (Morais, J. M., 2013).

No Brasil o primeiro passo para as tecnologias de produção *offshore* foi dado através de adaptações de tecnologias importadas para o desenvolvimento dos primeiros campos de petróleo na Bacia de Campos, entre 1977 e 1984. Em seguida, com a descoberta dos campos de petróleo gigantes de Albacora e Marlim, foi necessário a geração de tecnologias próprias pensadas para viabilizar a produção em águas profundas (Morais, J. M., 2013).

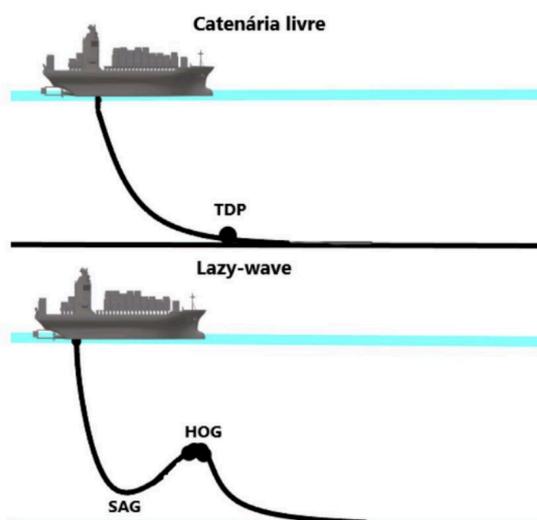
Com a evolução tecnológica, o Brasil conquistou seu primeiro recorde mundial na produção de petróleo *offshore*, com a PETROBRAS, quando fez a utilização experimental de *risers* flexíveis e a instalação da primeira árvore de Natal molhada em um poço de petróleo no país (Morais, J. M., 2013).

3.1.2 Dutos flexíveis

A tecnologia de dutos flexíveis, também chamados de *risers* flexíveis, desempenha um papel fundamental na interligação de poços de petróleo a unidades de produção, permitindo o transporte eficiente de petróleo, gás e outros fluidos. Esses dutos são compostos por várias

camadas de diferentes materiais que interagem entre si. Eles podem apresentar configurações variadas dependendo do procedimento de instalação, assumindo formas como *Lazy Wave* e catenária livre, como mostra a Figura 1 (Baldan, E. L., Machado, K. C., 2010).

Figura 1 - Configurações do riser.



Fonte: Autora, 2023.

A configuração em catenária livre é uma das mais simples e econômicas. Nessa configuração, o duto flexível que conecta o poço à plataforma fica apoiado livremente no fundo do mar. No entanto, em maiores profundidades, essa configuração apresenta algumas limitações. Tais como o excesso de tração no topo, devido a todo o comprimento suspenso ser sustentado pelo ponto de conexão com a plataforma. Ademais, a vida útil do duto pode ser reduzida devido à fadiga, especialmente no primeiro ponto de contato com o leito marinho (*touch down point* ou TDP) e no topo (Baldan, E. L., Machado, K. C., 2010; Albino, J. C. R., 2011).

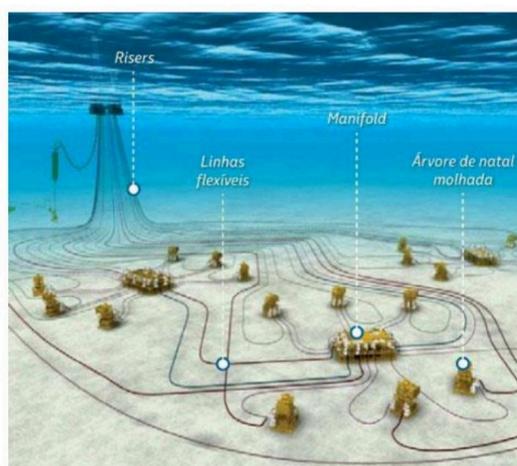
Além disso os dutos flexíveis podem ser classificados com relação a sua aplicação como *risers* ou *flowlines*. Os *flowlines* se encontram dispostos no leito de marinho após a instalação e são submetidos apenas a cargas estáticas, tendo como função de interligar os equipamentos submarinos e os poços até os *risers*. Os *risers* são estruturas que conectam as plataformas à tubulação destinada ao serviço estático ("*flowline*"), podendo ser utilizadas em diversas aplicações (Almeida et al., 2021).

3.1.3 Sistemas de poços submarinos

A depender da localização dos poços, da disposição dos equipamentos submarinos e das linhas a serem utilizadas, o arranjo submarino pode ser configurado com um sistema *manifold* ou satélite (Santos, C. S. *et al.*, 2015; Vasconcelos, A. L. M., 2015).

O *manifold* é um equipamento de grande porte, instalado no solo marinho com um arranjo de dutos e/ou válvulas projetado para concentrar o petróleo e o gás extraídos por diversas árvores de Natal, de modo a combinar, distribuir, controlar e, muitas vezes, monitorar o fluxo de fluido, além de transportar a produção através de uma linha tronco no leito marinho e efetuar a elevação dos fluidos até a plataforma por meio de *riser*, como mostra Figura 2 (Santos, C. S. *et al.*, 2015; Vasconcelos, A. L. M., 2015).

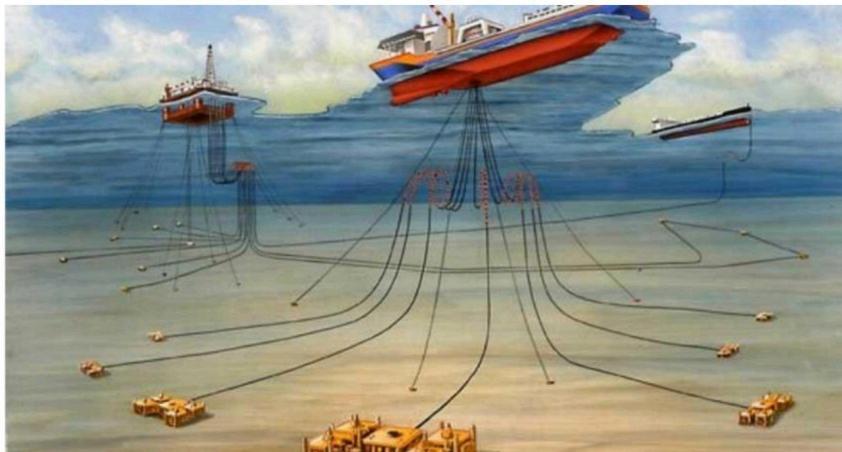
Figura 2 – Sistema submarino com *manifold*.



Fonte: Bnamericanas, 2023.

Os sistemas submarinos utilizados para a exploração *offshore* frequentemente consistem em poços do tipo satélites, nos quais os poços são interligados diretamente da plataforma à Árvore de Natal Molhada (ANM), como mostra a Figura 3. Essa árvore é composta por um conjunto de válvulas operadas remotamente por acionadores hidráulicos (sensores de pressão e temperatura) instalados na cabeça do poço de completação molhada no leito marinho (Santos, C. S. *et al.*, 2015; Vasconcelos, A. L. M., 2015).

Figura 3 – Sistema submarino com poços do tipo satélite.



Fonte: OGV Energy, 2019.

3.1.4 Escoamento de Petróleo

Um dos desafios da exploração de petróleo offshore na indústria global de energia é entender as características e o comportamento do escoamento multifásico. O estudo do escoamento multifásico envolve a movimentação simultânea de petróleo, gás e água, sendo, portanto, particularmente complexo e exigindo uma compreensão detalhada das interações entre as diferentes fases (Santos, C. S., 2015; Nascimento, J. C. S., 2013).

A caracterização e previsão do comportamento dos fluidos durante um escoamento multifásico são essenciais para garantir a eficiência dos sistemas de produção e para a otimização das operações de exploração e produção. Um dos principais desafios técnicos é a simulação precisa deste escoamento multifásico em dutos flexíveis e rígidos, que conectam os poços de petróleo às plataformas de produção. Esses dutos precisam suportar condições extremas de pressão e temperatura, além de variações nas propriedades dos fluidos (BRILL, J. P.).

Modelos matemáticos e simulações computacionais são ferramentas fundamentais para prever o perfil de pressão e a taxa de produção. Adicionalmente, a logística associada à manutenção de operações em ambientes remotos e hostis aumenta a complexidade da gestão de escoamentos multifásicos (VILLELA, M. J. R., 2005).

3.2 Escoamento multifásico

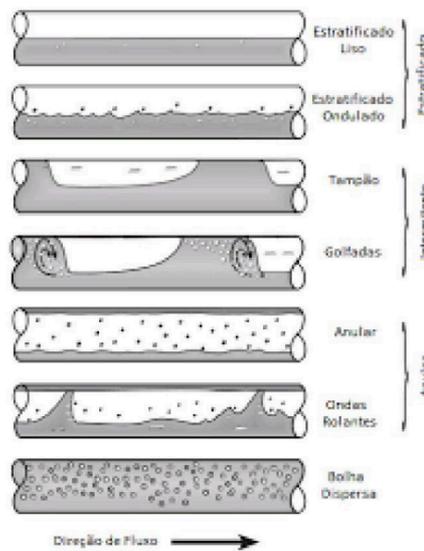
Na composição de fluidos vindos de reservatórios de petróleo, há a presença de uma mistura de hidrocarbonetos, além de água e alguns sedimentos. Durante o escoamento desse fluido, tem-se a presença de óleo, água e gás, formando um sistema multifásico. No entanto, geralmente, para avaliar o comportamento do escoamento, considera-se que a velocidade da água e do óleo é igual, formando uma única fase líquida. Dessa forma, é possível considerar o escoamento como bifásico, onde a água e o óleo constituem a fase líquida e o gás, a fase gasosa, havendo assim apenas duas fases no escoamento. (Rocha, D. B., 2020; Nascimento, J. C. S., 2013).

3.2.1 Padrões de escoamento

Os diversos arranjos espaciais que as fases encontradas no fluido podem apresentar durante o escoamento nos trechos verticais, inclinados ou horizontais fazem com que o escoamento apresente diferentes características a depender das interações entre as fases líquidas e o gás. Os diferentes arranjos das fases são chamados de padrões de escoamentos e dependem das condições operacionais do escoamento, do sistema de transporte de fluidos e das propriedades físicas dos fluidos (Rocha, D. B., 2020; Nascimento, J. C. S., 2013).

Os padrões de escoamento multifásico horizontal mais comuns, segundo Shoham, 2005, citado em Rocha, D. B. (2020), são os apresentados na Figura 4. Os diferentes padrões de escoamento em tubos horizontais são agrupados em categorias que incluem: escoamento estratificado, que se divide em estratificado liso e estratificado ondulado, intermitente, que pode ser bolhas alongadas e golfadas, anular e bolhas dispersas.

Figura 4 - Padrões de escoamento em tubos horizontais.



Fonte: Rocha, D. B., 2020.

As definições e aspectos específicos de cada uma dessas classificações de escoamento em tubos horizontais são descritas abaixo:

- Escoamento Estratificado: As duas fases são separadas totalmente pela diferença entre as fases. Para escoamentos horizontais é comum a separação pela ação da gravidade, nela a parte líquida escoam pela parte inferior da tubulação enquanto a fase gasosa pela parte superior (Rocha, D. B., 2020; Nascimento, J. C. S., 2013).
- Escoamento Intermitente: É o escoamento no qual tem-se uma alternância do escoamento do líquido e do gás. Nele ocorre a formação de bolhas que escoam normalmente na parte superior da tubulação separando o líquido que ocupa todo o diâmetro da tubulação (Rocha, D. B., 2020; Nascimento, J. C. S., 2013; Nascimento, J. C. S., 2013).
- Escoamento Anular: Ocorre geralmente quando se tem elevadas velocidades superficiais de gás, logo a fase gasosa concentra-se na parte central com gotículas formadas pelo líquido que escoam na mesma velocidade do gás enquanto uma parte da fase líquida escoam em forma de filme na parede do tubo (Rocha, D. B., 2020; Nascimento, J. C. S., 2013).
- Bolhas Dispersas: É similar ao escoamento anular, sendo que com relação ao líquido. Ocorre geralmente em elevadas velocidades superficiais do líquido, a fase líquida

concentra-se na parte central com bolhas discretas no interior de uma fase líquida contínua (Rocha, D. B., 2020).

3.2.2 Equação do gradiente de pressão multifásico

O gradiente de pressão descreve a perda de pressão por unidade de comprimento do duto. Pela lei de conservação do momento, o gradiente de pressão pode ser descrito pela soma das quedas de pressão devido a mudança de energia potencial (elevação), mudança por energia cinética (aceleração) e perda por atrito, como mostra a Eq. 1 (Nascimento, J. C. S., 2013; Beggs, DH e JP Brill, 1973).

$$\frac{dP}{dL}_{total} = \left(\frac{dP}{dL}\right)_{atrito} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{elevação} + \left(\frac{dP}{dL}\right)_{aceleração} \quad - \quad \text{Eq. 1}$$

A equação 1 pode ser reescrita segundo Frez, Gabriel, et. Al. (2017) como:

$$\frac{dP}{dL}_{total} = -f \frac{\rho v^2}{2D} + \rho g \sin(\theta) + \rho v \frac{dv}{dL} \quad - \quad \text{Eq.2}$$

Onde dp/dL representa o gradiente de pressão ao longo do duto, f o fator de atrito, ρ a densidade, v a velocidade de escoamento, D o diâmetro do duto, g a aceleração da gravidade, θ a inclinação do duto e dv/dL o gradiente de velocidade ao longo do duto.

Para o escoamento multifásico utiliza-se correlações da equação do gradiente de pressão monofásico com ajuste para expressar, através do fator de atrito e da massa específica, as propriedades da mistura água-óleo-gás. Desta forma, a equação que expressa o gradiente de pressão é dada conforme a Eq. 3 (Nascimento, J. C. S., 2013):

$$\frac{dP}{dL} = -f_{bi} \frac{\rho_{bi} v^2}{2D} + \rho g \sin(\theta) + \rho v \frac{dv}{dL} \quad - \quad \text{Eq.3}$$

Onde ρ_{bi} a densidade da mistura bifásica e f_{bi} representa o fator de atrito bifásico calculado pela equação descrita no trabalho de Frez, Gustavo et. Al. (2017), o fator de atrito de Colebrook, dada pela Eq. 4, com a estimativa inicial de Miller, dada pela Eq. 5.

$$f_{bi} = \left[-2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f_{bi}}} \right) \right]^{-2} \quad - \quad \text{Eq.4}$$

$$f_{bi} = \left[-2 \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} + \frac{2,51}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad - \quad \text{Eq.5}$$

Onde ε é a rugosidade do duto flexível, D é o diâmetro do duto e Re é o número de Reynolds da mistura conforme a Eq. 6.

$$Re = \frac{\rho_{bi} \cdot v D}{\mu_{bi}} \quad - \quad \text{Eq.6}$$

Sendo D o diâmetro do duto, ρ_{bi} a densidade da mistura bifásica, v a velocidade e μ_{bi} a viscosidade da mistura bifásica, calculados através das equações 7 e 8.

$$\rho_{bi} = \rho_L H_L + \rho_G (1 - H_L) \quad - \quad \text{Eq.7}$$

$$\mu_{bi} = \mu_L H_L + \mu_G (1 - H_L) \quad - \quad \text{Eq.8}$$

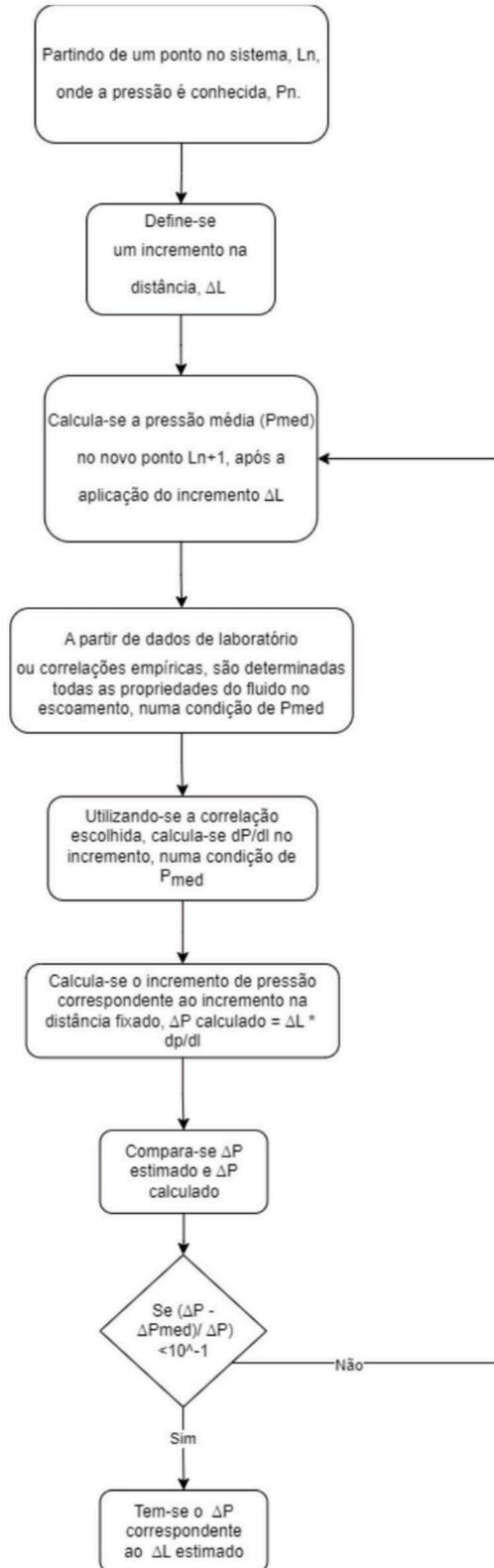
Onde os índices L e G representam as fases líquida e gasosa, respectivamente e H_L corresponde ao número de *holdup* da fase líquida, que é a fração de um elemento de volume na região de escoamento ocupado por líquido. O *holdup* de líquido varia de zero (quando há apenas a presença de gás na tubulação) a um (quando só há o escoamento de líquido) (Frez, Gustavo et. Al., 2017).

3.2.3 Procedimento de cálculo de perda de carga no escoamento multifásico

A perda de carga no escoamento multifásico ou bifásico, considerando o óleo e a água uma única fase, não é constante, o que faz com que haja a necessidade de se calcular a perda de pressão total em etapas, segmento a segmento. Este cálculo pode ser feito através de iteração na pressão, no qual fixa-se ΔL e estima-se ΔP (VILLELA, M. J. R., 2005).

Villela, Marcos Jose Rei (2005), descreve o seguinte método de iteração na pressão para calcular a perda de carga:

Figura 5 – Método de iteração para cálculo da pressão por perda de carga.



Fonte: Autora, 2024.

3.3 Desenvolvimento WEB

Atualmente, o desenvolvimento de aplicativos web está em alta devido ao avanço das tendências tecnológicas e à crescente dependência da internet. O termo ‘Desenvolvimento Web’ refere-se ao processo de criação e manutenção de aplicações para sites na rede, em outras palavras, é a arte de construir e manter sites e aplicações online. Isso envolve a utilização de diversas tecnologias, linguagens de programação e ferramentas para desenvolver e hospedar websites que podem ser acessados por meio de navegadores web. Normalmente, o desenvolvimento web envolve duas partes principais: o *frontend* (lado do cliente), que é o código que interage com o usuário através do navegador, e o *backend* (lado do servidor), que é o código executado no servidor web e que abriga a lógica de negócios da aplicação. A utilização dessa ferramenta é ideal para desenvolver uma interface gráfica de aplicação de métodos, pois permite uma interação intuitiva e acessível para os usuários através da web (Santiago C. P. et. al. 2020).

3.3.1 Frontend

O *frontend* se refere à parte visível de um site ou aplicação web. É o que os usuários veem e interagem diretamente, representando a identidade visual do site por meio de elementos como menus, textos e imagens. No desenvolvimento *frontend*, o programador transforma a ideia de design da aplicação em realidade, concentrando-se no layout, design e interatividade da aplicação web. Para tanto, são utilizadas linguagens de programação como HTML (linguagem de marcação), CSS (linguagem de estilo) e *JavaScript* (linguagem de script/programação) (Santiago C. P. et. al. 2020).

Segundo Santiago C. P. et. al. 2020 uma breve descrição dessas linguagens de programação para desenvolvimento *frontend* seria:

- HTML (*HyperText Markup Language*): é a linguagem de programação básica para desenvolvimento Web *frontend*. Fornece a estrutura para o conteúdo de um site e define palavras, títulos, parágrafos, imagens etc. O HTML consiste em um conjunto de tags pré-definidas, representando funções diferentes que “convertem” o conteúdo em um formato legível na tela.
- CSS (*Cascading Style Sheets*): é uma “folha de estilos” que descreve como os elementos HTML aparecerão em uma página da Web. Usa-se o CSS para controlar a apresentação, o estilo e a formatação dos elementos HTML em um site, configurando cores, bordas,

imagens de fundo etc. Os arquivos CSS declaram um conjunto de regras, que definem propriedades e seus respectivos valores para os elementos HTML.

- *JavaScript*: refere-se ao controle do comportamento de uma página Web. É uma das linguagens de programação mais populares e difundidas no mundo. O uso do *JavaScript* torna os sites interativos, manipulando as especificidades dos elementos HTML e CSS. Com *JavaScript*, um usuário pode clicar em um botão e disparar uma ação, fazer o site rolar para a parte inferior ou exibir fotos aleatórias, por exemplo.

3.3.2 Backend

O *backend* como o nome sugere (lado do servidor) se relaciona com o que está por trás das aplicações desenvolvidas na programação do site. É responsável por escrever programas que garantam que o servidor, a aplicação Web e o banco de dados funcionem bem juntos. Em outras palavras, tudo que dá estrutura e apoio às ações do usuário da máquina é chamado de *backend*. Uma das linguagens de programação mais utilizadas para este tipo de desenvolvimento é o *python* (Santiago C. P. et. al. 2020).

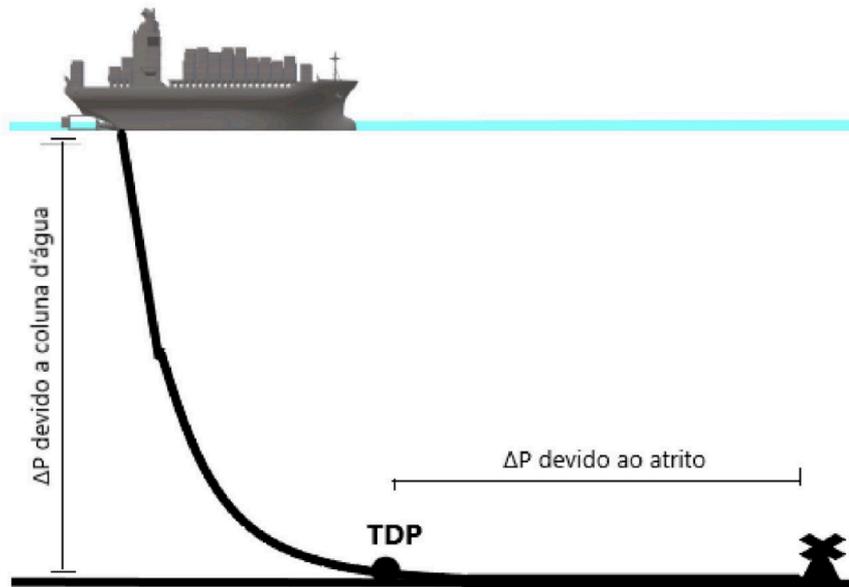
O *Python* é uma linguagem de alto nível, com o propósito geral de garantir um desenvolvimento fácil de programação. É uma linguagem simples e muito poderosa, utilizada principalmente em áreas como *Data Science*, *Data Analytics*, Inteligência Artificial, *Deep Learning*, Desenvolvimento Web e aplicações de forma geral. Além disso, possui diversas bibliotecas que permitem o reuso de funcionalidades no desenvolvimento de *software* (Santiago C. P. et. al. 2020).

4 METODOLOGIA

4.1 Modelo Matemático

O modelo desenvolvido neste trabalho, leva em consideração que o escoamento multifásico presente no duto flexível possui dois comportamentos distintos divididos pelo TDP (*touch down point*), onde a perda de carga partindo da cabeça do poço até o TDP é dada predominantemente pelo atrito dos fluidos com as paredes do duto, e do TDP até a válvula de conexão com a plataforma a perda de carga é oriunda da variação de pressão dada pela coluna de água, a Figura 6 demonstra de forma resumida este comportamento.

Figura 6 – Comportamento estimado da perda de carga no duto.



Fonte: Autora, 2024.

Para representar este comportamento matematicamente o modelo desenvolvido neste trabalho divide o cálculo da variação de pressão de duas formas.

Para o trecho entre a cabeça do poço e o TDP, a variação de pressão no duto é calculada pela equação 9, obtida através da integração da equação 3, onde a variação de pressão devida à aceleração é desconsiderada

$$\Delta P = f_{bi} \frac{\rho_{bi} v^2}{2D} \cdot L \quad - \quad \text{Eq.9}$$

Neste trabalho, o cálculo da densidade bifásica e da viscosidade bifásica, apresentados nas equações 7 e 8, respectivamente, considera as interações entre as fases ao longo do

escoamento horizontal utilizando um *Holdup* líquido fixo de 0,75. Embora essas interações sejam levadas em conta, elas não refletem as condições operacionais reais do escoamento, resultando nas expressões para o cálculo dessas variáveis apresentadas nas equações 10 e 11.

$$\rho_{bi} = \rho_L(0,75) + \rho_G(1 - 0,75) \quad - \quad \text{Eq.10}$$

$$\mu_{bi} = \mu_L(0,75) + \mu_G(1 - 0,75) \quad - \quad \text{Eq.11}$$

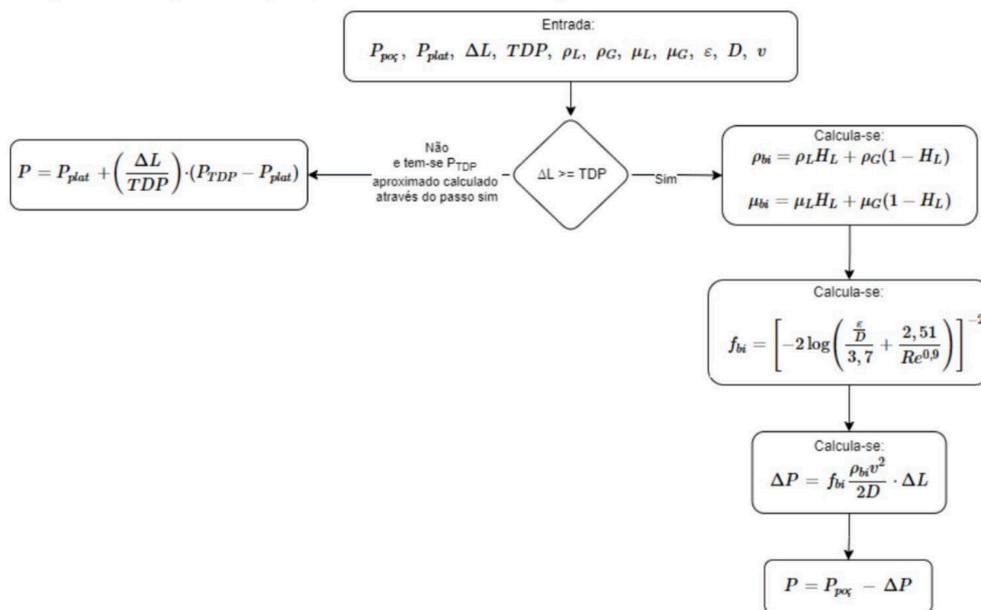
Para o trecho do TDP até a válvula de conexão com a plataforma a variação de pressão é calculada através da interpolação linear da pressão conhecida da válvula de conexão com a pressão calculada na etapa anterior no TDP, como mostra a equação 12.

$$P = P_{plat} + \left(\frac{\Delta L}{TDP}\right) \cdot (P_{TDP} - P_{plat}) \quad - \quad \text{Eq.12}$$

Onde ΔL é o trecho onde se deseja obter a pressão no duto, levando em consideração que o comprimento 0 será considerado como sendo o ponto de conexão do duto com a plataforma.

Se espelhando no método de iteração para o cálculo da perda de carga no duto apresentado na Figura 5, tem-se na Figura 7 a representação gráfica do algoritmo do método simplificado desenvolvido neste trabalho para o cálculo da variação de pressão em cada ponto do duto.

Figura 7 - Representação gráfica do método simplificado desenvolvido neste trabalho.



Fonte: Autora, 2024.

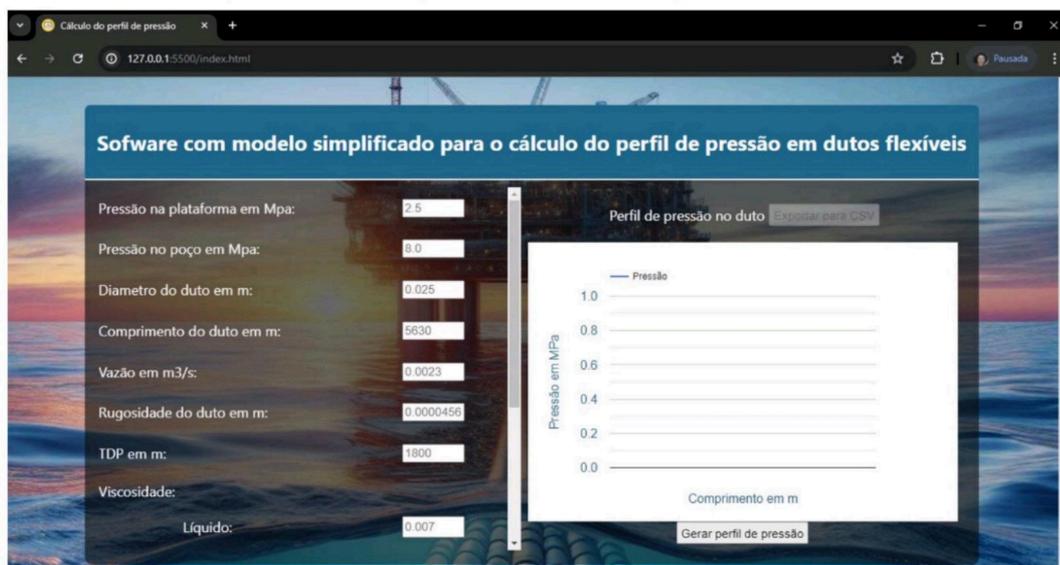
Como entradas, têm-se a pressão na plataforma (P_{Plat}), a pressão no poço ($P_{\text{Poço}}$), os pontos do duto onde se deseja obter a pressão (ΔL), o comprimento do TDP, a densidade e viscosidade do líquido e do gás, a rugosidade do duto, o diâmetro do duto e a velocidade do fluido.

Com os dados de entrada, realiza-se uma verificação: considerando que o ponto de comprimento zero corresponde à plataforma, verifica-se se o ponto do comprimento no qual se deseja obter a pressão está localizado no trecho do duto onde predomina a variação de pressão pelo atrito com a parede do duto. Ou seja, se o comprimento do ponto desejado for maior que o TDP, a variação de pressão é calculada pela equação 9; caso seja menor que o TDP, significa que o ponto está no trecho onde a variação de pressão é predominante pela coluna d'água, e, portanto, a pressão é calculada pela equação 12.

4.2 Desenvolvimento da Interface Gráfica

Para viabilizar a utilização do modelo simplificado de cálculo do perfil de pressão em dutos flexíveis desenvolvido neste trabalho, foi criada uma interface gráfica de Cálculo de Perfil de Pressão. Essa implementação *full-stack* integra um algoritmo no *backend* com uma interface simples e intuitiva no *frontend*, como mostra a Figura 8, permitindo a geração de gráficos e planilhas que representam o perfil de pressão em dutos flexíveis em catenária livre.

Figura 8 - Visualização inicial da interface gráfica do modelo.

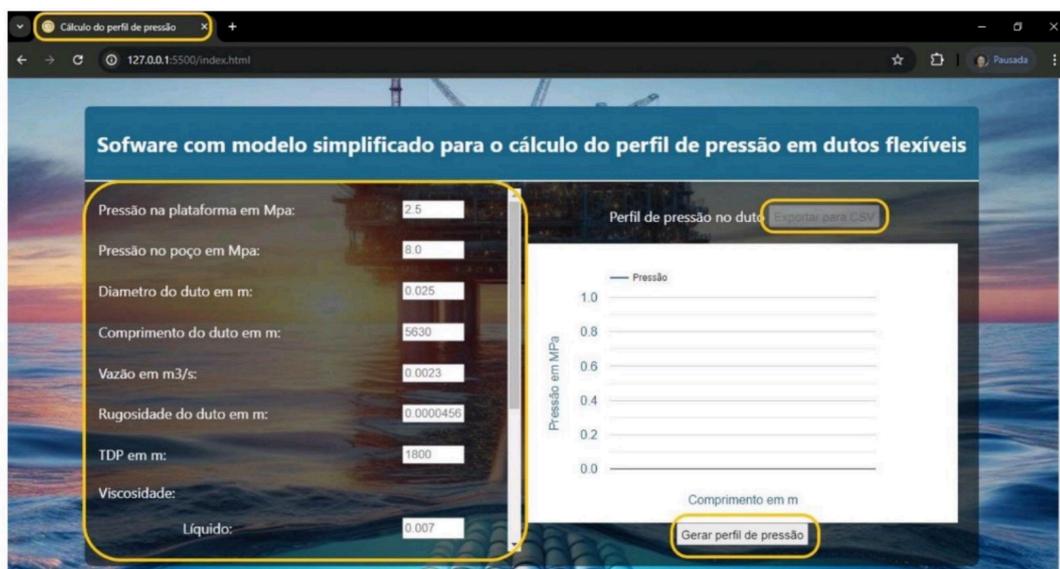


Fonte: Autora, 2024.

A interface gráfica na Figura 9 destaca os detalhes da página, incluindo um ícone ao lado do título da aba na web, uma entrada para cada variável necessária para o cálculo do perfil de pressão e um botão que faz a requisição para o *backend* e gera o gráfico do perfil de pressão.

Além disso, possui funcionalidades adicionais para aprimorar a experiência do usuário. Por exemplo, após a geração do gráfico do perfil de pressão através do botão designado, torna-se disponível um botão para exportar os dados do gráfico juntamente com os dados inseridos do duto para uma planilha. Ademais, o gráfico gerado é interativo, permitindo que, ao passar o mouse sobre um ponto calculado, sejam exibidas as informações desse ponto.

Figura 9 - Interface gráfica com destaque nos detalhes.



Fonte: Autora, 2024.

Para utilizar o site e calcular o perfil de pressão no duto, é necessário seguir os seguintes passos:

- Pressão na cabeça do poço: Insira o valor da pressão na cabeça do poço em MPa.
- Pressão na plataforma: Adicione o valor da pressão na plataforma em MPa.
- Diâmetro do duto: Digite o diâmetro do duto em metros.
- Comprimento do duto: Informe o comprimento total do duto em metros.
- Vazão do poço: Coloque a vazão do poço em m^3/s .
- Rugosidade: Entre com o valor da rugosidade em metros.
- TDP: Defina o TDP em metros.
- Viscosidade: Forneça a viscosidade do líquido e do gás em kg/ms .
- Densidade: Insira a densidade do líquido e do gás em kg/m^3 .
- Liste os comprimentos: insira os pontos ao longo do duto onde deseja calcular os pontos de pressão, separados por vírgula.

Após preencher todos os campos listados acima, clique no botão para gerar o perfil de pressão. Desta forma, um gráfico será gerado com os dados do perfil de pressão calculado através do modelo desenvolvido neste trabalho. Após isso, será possível também exportar os dados do perfil de pressão gerado, junto com as informações inseridas do duto. A Figura 10 mostra um exemplo do site depois de gerar o gráfico com o perfil de pressão.

Figura 10 - Visualização da interface gráfica após a requisição.

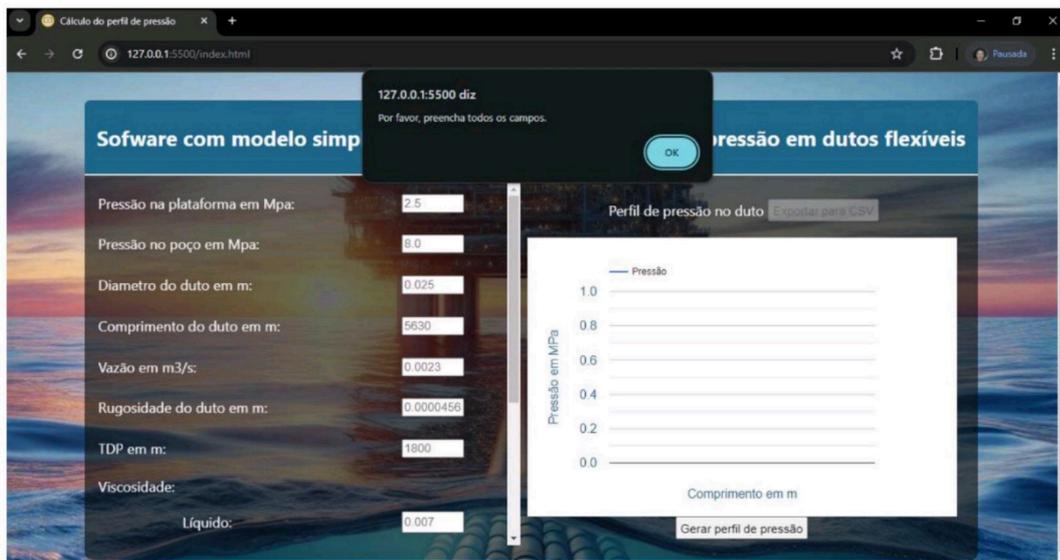


Fonte: Autora, 2024.

Para garantir a integridade dos dados e a usabilidade da aplicação, foram implementados bloqueios de requisições:

- Não é possível inserir letras ou vírgulas nos campos de requisição de dados únicos, exceto na lista de dados.
- Se todos os campos necessários não forem preenchidos, um alerta é exibido no *front-end* solicitando o preenchimento completo dos dados, com a mensagem: "Por favor, preencha todos os campos", como mostra a Figura 11.

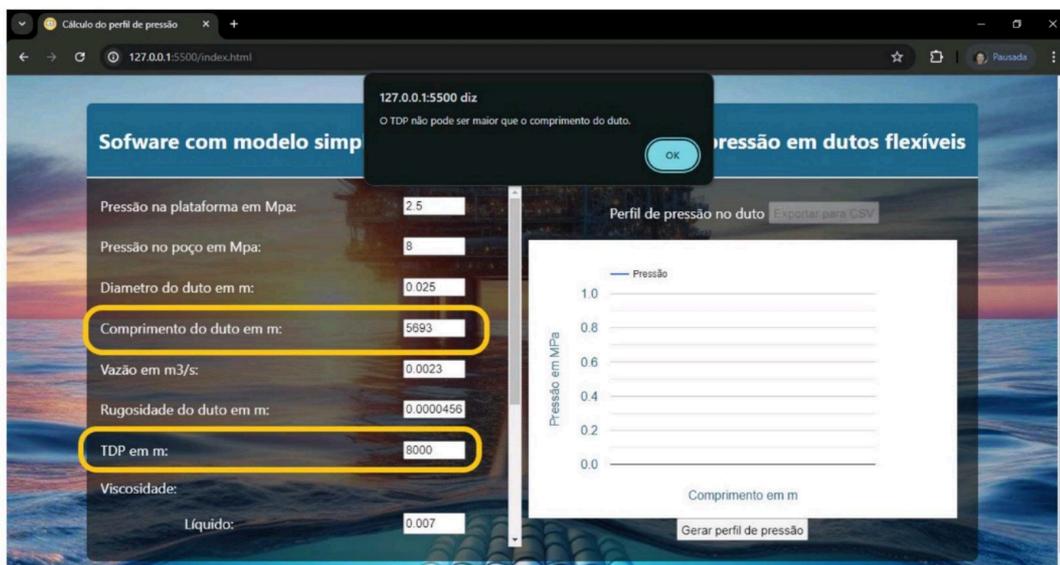
Figura 11 - Demonstração de alerta para preencher os campos de dados.



Fonte: Autora, 2024.

- Se for inserido um TDP na requisição que exceda o tamanho do duto, um alerta será gerado informando: “O TDP não pode ser maior que o comprimento do duto”, exposto na Figura 12.

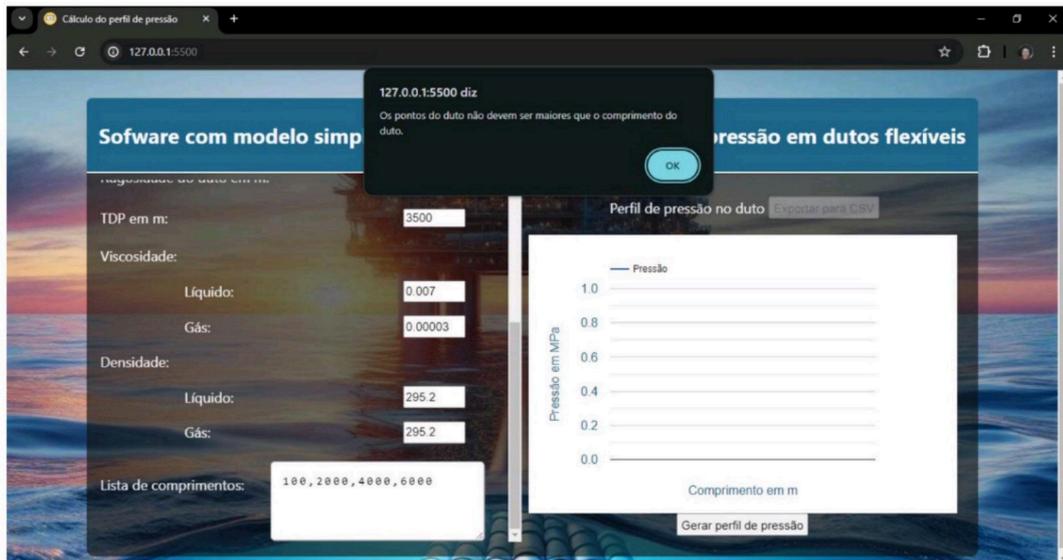
Figura 12 - Demonstração de alerta para TDP maior que o comprimento do duto.



Fonte: Autora, 2024.

- Se algum ponto inserido na lista de pontos que se quer dados do duto for maior que o comprimento do duto um alerta será gerado informando: “Os pontos do duto não devem ser maiores que o comprimento do duto”, como demonstrado na Figura 13.

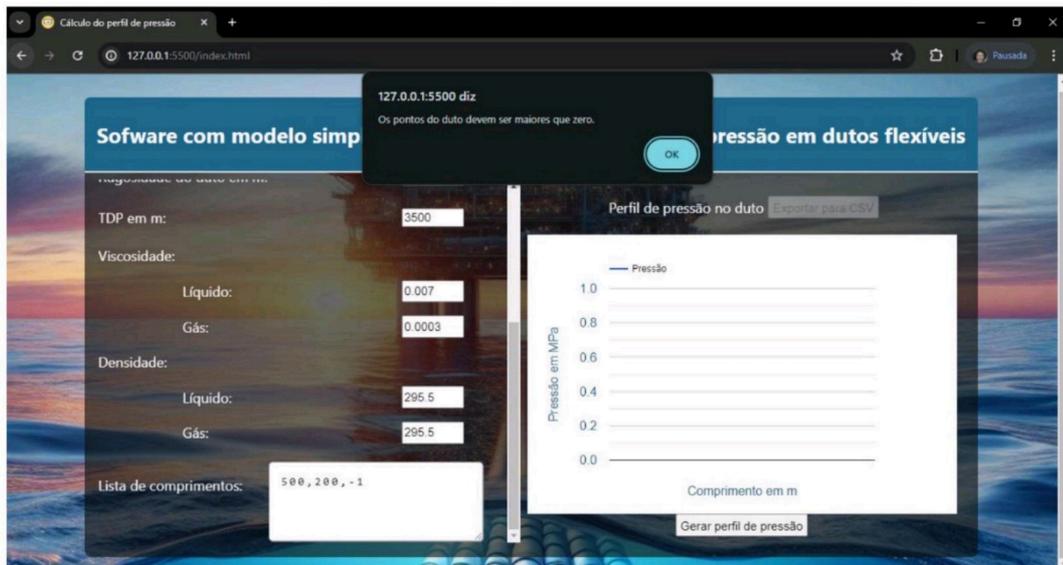
Figura 13 - Demonstração de alerta caso um dos pontos do duto seja maior que o comprimento do duto.



Fonte: Autora, 2024.

- Se algum dos pontos inseridos na lista for menor que zero, um alerta será gerado com a informação: “Os pontos do duto devem ser maiores que zero”, como mostra a Figura 14.

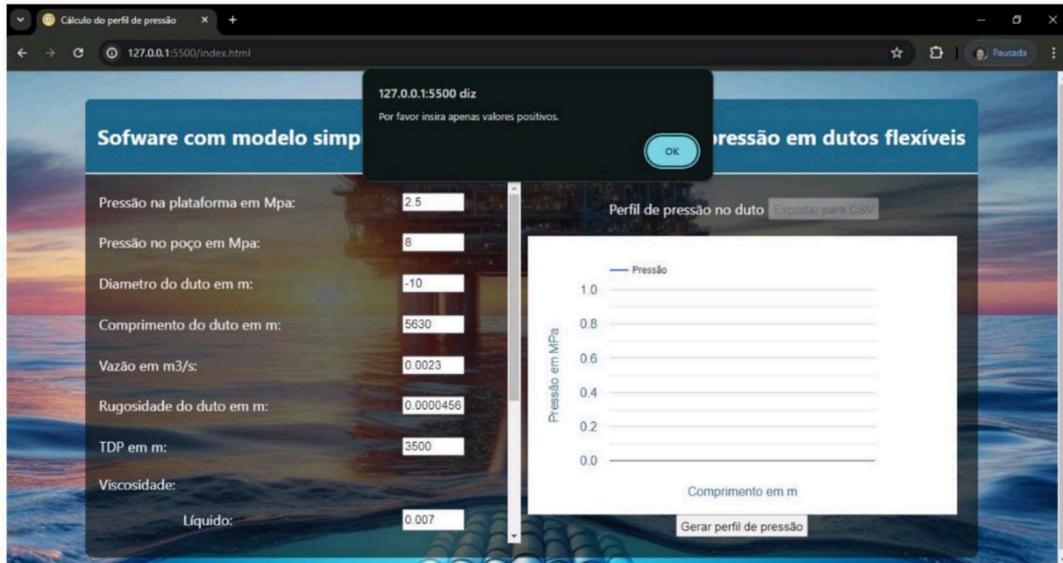
Figura 14 - Demonstração de alerta de pontos do duto com valores menores que zero.



Fonte: Autora, 2024.

- Se algum dos campos de dados for inserido valores negativos, um alerta é gerado com a informação: “Por favor insira apenas valores positivos”, como mostrado na Figura 15.

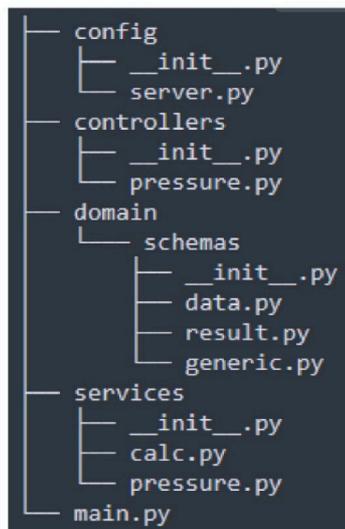
Figura 15 - Demonstração de alerta para inserir apenas valores positivos.



Fonte: Autora, 2024.

No *backend*, a estrutura está modularizada conforme a Figura 16. Na pasta de configuração, encontram-se os arquivos que definem os parâmetros usados pela aplicação *backend*. A camada de *controllers* contém os arquivos responsáveis por lidar com as requisições recebidas e determinar as respostas a serem enviadas de volta ao cliente. Na pasta *domain*, estão os esquemas que representam a formatação das requisições feitas e obtidas pelo algoritmo da aplicação. A pasta *services* contém classes e funções de serviço que encapsulam a lógica dos cálculos. Toda a aplicação funciona através de um arquivo `main.py`, que contém o ponto de entrada para executar o *backend*.

Figura 16 – Arquitetura do *backend* da aplicação.



Fonte: Autora, 2024.

Na pasta do *services* no arquivo de *calc.py* tem-se as funções modularizadas para cada cálculo do método, como mostra as Figuras 17, 18 e 19, onde na Figura 17 tem-se as funções para calcular a variação de pressão no duto para o trecho de escoamento horizontal, da cabeça do poço até o TDP.

Figura 17 - Código para o cálculo da variação de pressão da cabeça do poço até o TDP.

```
async def get_mixture_data(data: Density| Viscosity) -> float:
    """Get mixture data """
    d = ((data.gas)*0.25)+((data.liquid)*0.75)
    return d

async def get_reynolds(desnsity: float, viscosity: float, diameter: float, flow: float)-> float:
    """Get reynolds number"""
    re = (4*desnsity*flow)/(math.pi*viscosity*diameter)
    return re

async def get_friction_factor(roughness: float, reynolds: float, diameter: float) -> float:
    """Get friction factor"""
    f = (-2*math.log10(((roughness/diameter)/3.7)+(2.51/(reynolds)**(0.9))))**(-2)
    return f

async def get_pressure_variation(friction_factor: float, density: float, flow: float,
                                diameter: float, length: float)-> float:
    """Get pressure variation"""
    p = friction_factor*(length/diameter)*(density/2)*((flow/(math.pi*((diameter/2)**2)))**2)
    return p
```

Fonte: Autora, 2024.

Na Figura 18 tem-se a função que verifica em qual trecho do duto está sendo calculada a pressão, chama as funções para o cálculo da variação de pressão para o trecho de escoamento horizontal e formata a saída do código com a variação de pressão calculada no modelo.

Figura 18 - Código que verifica o trecho do duto e chama as funções para calcular a variação de pressão.

```
async def get_pressures_seabed(data: InputSchema, friction: float, density: float):
    """Get local pressure in the section lying on the seabed"""
    pipeline_on_seabed={}
    pipeline_on_seabed[f'{round(data.length)}']=round(data.well_pressure,3)
    pressure = data.well_pressure
    data.points.sort(reverse=True)
    for point in data.points:
        if point >= round(data.tdp):
            length = data.length - point
            variation_calc= await get_pressure_variation(friction,
                                                         density,data.flow,data.diameter,length)
            pressure_calc = pressure - ((10**-6)*variation_calc)
            pressure = pressure_calc
            pipeline_on_seabed[f'{point}']= round(pressure_calc,4)
    if f'{round(data.tdp)}' not in pipeline_on_seabed:
        length = data.length - data.tdp
        variation_calc= await get_pressure_variation(friction,density,
                                                     data.flow,data.diameter,length)
        pressure_calc = pressure - ((10**-6)*variation_calc)
        pipeline_on_seabed[f'{round(data.tdp)}']= round(pressure_calc,4)
    return pipeline_on_seabed
```

Fonte: Autora, 2024

Na Figura 19 tem-se as funções para verificar em qual trecho do duto está sendo calculada a pressão. Neste trecho, chamam-se as funções para o cálculo da variação de pressão para o trecho vertical, do TDP até a plataforma.

Figura 19 - Código para o cálculo da variação de pressão do TDP até a plataforma.

```

async def get_pressures_platform(points: list, platform_pressure: float, tdp: float,
                                tdp_pressure: float):
    """Get local pressure in the TDP sections up to the platform"""
    pipeline_at_sea={}
    for point in points:
        if point < tdp:
            pressure = linear(top=platform_pressure,bottom=tdp_pressure,
                             length=point,size=tdp)
            pipeline_at_sea[f'{point}']= round(pressure,3)
    if 0 not in points:
        pipeline_at_sea[f'{round(0)}']=round(platform_pressure,3)
    return pipeline_at_sea

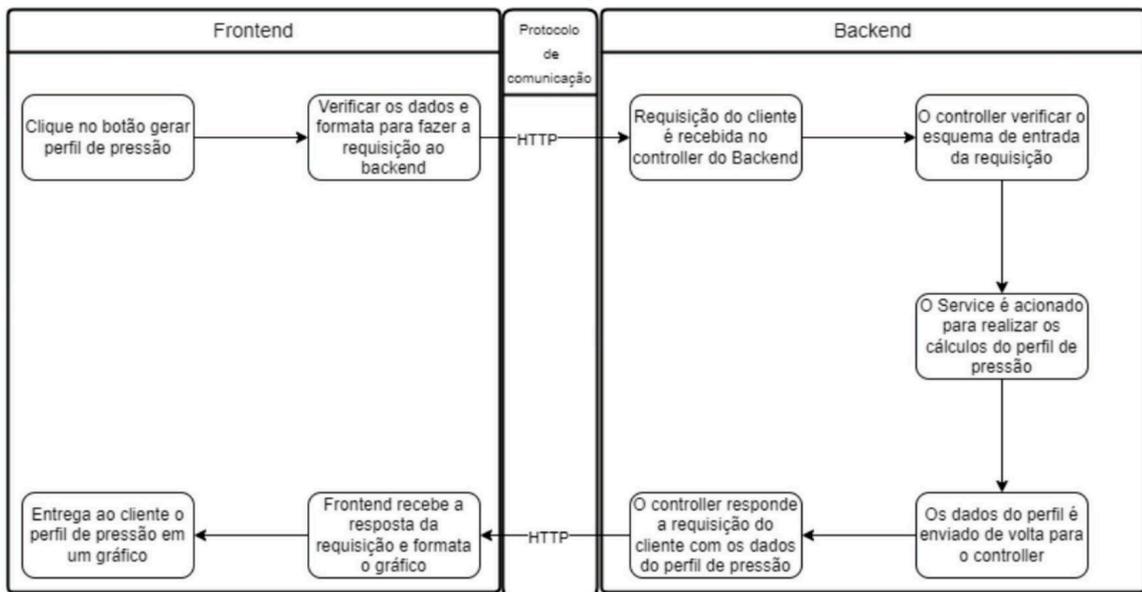
def linear(top: float, bottom: float, length: float, size: float) -> float:
    """Linear interpolation equation"""
    value= top+((length/size)*(bottom-top))
    return value

```

Fonte: Autora, 2024.

De forma resumido, quando o usuário solicita a geração do perfil de pressão no site, a informação é gerada basicamente pelo esquema da Figura 20.

Figura 20 – Resumo do caminho da informação na requisição.



Fonte: Autora, 2024.

5 RESULTADOS

Para validação do modelo matemático simplificado desenvolvido neste trabalho, utilizou-se como base o trabalho de Moreira A. S. 2017, no qual tinha-se como objetivo a analisar da sensibilidade da perda de pressão por meio de simulações utilizando um software comercial. O estudo relaciona correlações de escoamento conhecidas na indústria, onde foi realizada uma análise de sensibilidade de correlações empíricas de escoamento multifásico. Ao decorrer do trabalho, determinou-se por adotar a referência de comparação o modelo empírico com as correlações de fluxo de Hagedorn na vertical e Beggs e Brill na horizontal, o qual será utilizada neste trabalho como referência de validação do modelo.

Com isso em vista, tem-se como entrada para a interface gráfica de aplicação do método desenvolvido neste trabalho os dados hipotéticos condizentes com a realidade apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3 obtidos através de conversões de unidades dos dados do trabalho do Moreira A. S. 2017.

Tabela 1 – Dados de entrada para simulação Parte 1.

Pressão na cabeça do poço (MPa)	6,516
Pressão na plataforma (MPa)	1,521
Vazão (m ³ /s)	0,0435
Rugosidade (m)	0,0000254
Comprimento (m)	2641
Diâmetro (m)	0,2032
TDP (m)	1640

Fonte: Adaptado de Moreira, A. S. 2017.

Tabela 2 – Dados de entrada para simulação Parte 2.

Densidade (kg/m ³)	800	2,5
Viscosidade (kg/ms)	0,00342	0,0000183

Fonte: Adaptado de Moreira, A. S. 2017.

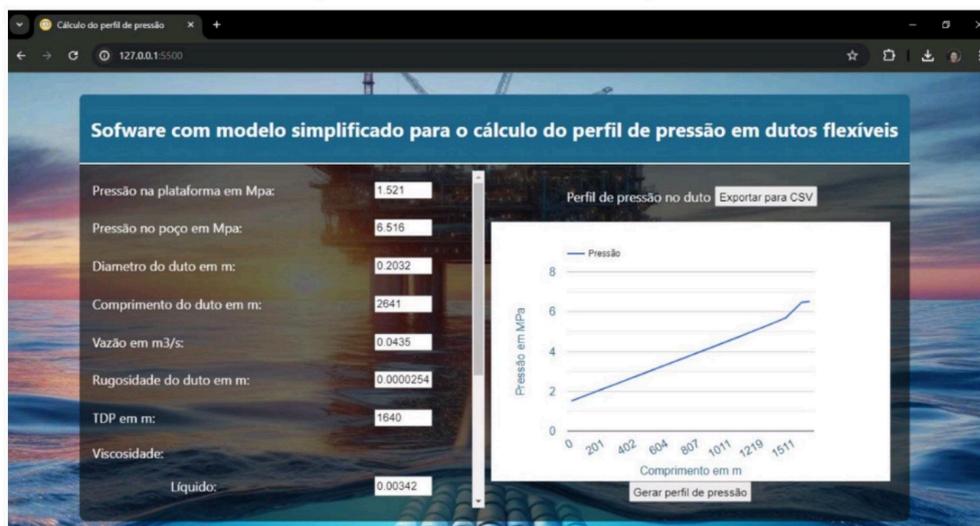
Tabela 3 – Dados de entrada para simulação Parte 3.

1640,2
1511,3
1443,4
1384,5
1327,6
1273,7
1219,8
1167,9
1114,1
1062,11
1011,12
960,13
909,14
858,15
807,16
756,17
705,18
655,19
604,2
554,21
503,22
453,23
402,24
352,25
302,26
251,27
201,28
151,29
100,3
50,31
0

Fonte: Adaptado de Moreira, A. S. 2017.

O resultado da simulação deste poço na interface gráfica do trabalho está apresentado na Figura 21, após gerar o perfil de pressão no gráfico da interface exportou-se os dados para uma planilha para realizar a validação do modelo.

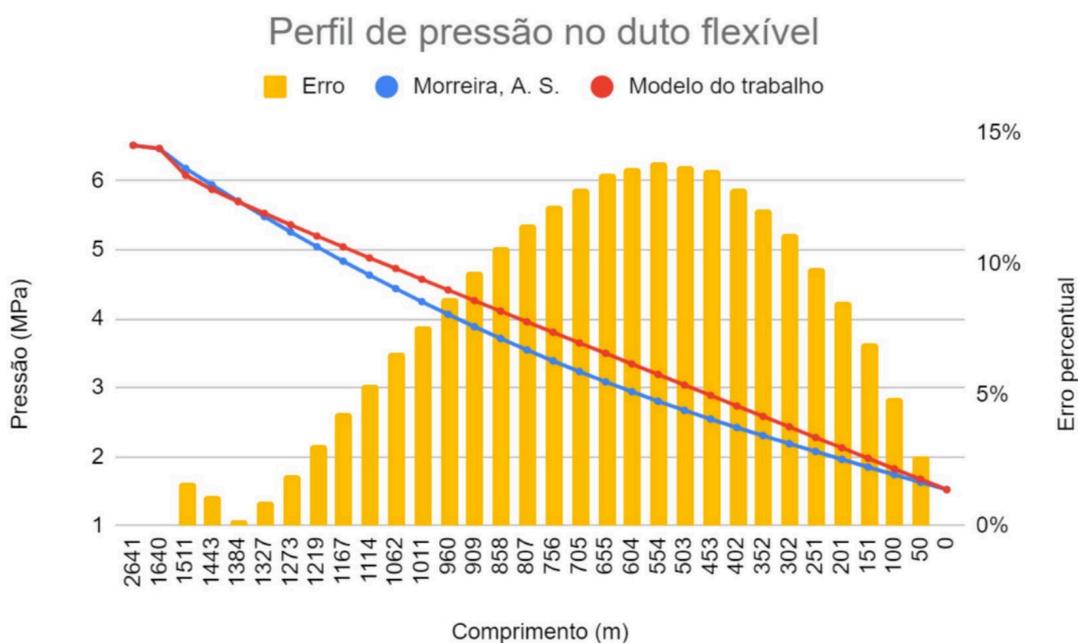
Figura 21 – Resultado da simulação 1.



Fonte: Autora, 2024.

Com os dados exportados do modelo desenvolvido neste trabalho, gerou-se o gráfico apresentado na Figura 22. O gráfico mostra o perfil de pressão calculado através do modelo deste trabalho, o perfil de pressão calculado por correlações empíricas apresentadas no trabalho de Moreira, A. S. (2017) e o erro percentual entre os dois métodos, tendo como parâmetro de comparação o modelo desenvolvido por Moreira, A. S. (2017).

Figura 22 - Validação do perfil de pressão.



Fonte: Autora, 2024.

Observando a Figura 22, é possível constatar uma semelhança entre os perfis de pressão. O erro percentual apresenta um comportamento crescente à medida que se aproxima do meio do comprimento do duto. Isso ocorre porque o perfil de pressão calculado através do modelo simplificado deste trabalho considera um comportamento linear a partir do TDP até a plataforma. Por outro lado, as correlações empíricas, que calculam o perfil ponto a ponto, mostram uma inclinação, ou seja, uma pequena curvatura ao se aproximar do meio do duto flexível. Essa curvatura faz com que o erro em relação a esses pontos seja maior. Segue na Figura 23 os dados ponto a ponto apresentados no trabalho de Moreira S. A. 2017, assim como os dados obtidos neste trabalho.

Figura 23 - Dados para validação do modelo matemático.

Comprimento (m)	Moreira, A. S.	Modelo do trabalho	Erro
2641	6,516	6,516	0,00%
1640	6,47	6,47	0,00%
1511	6,181	6,081	1,62%
1443	5,942	5,876	1,10%
1384	5,708	5,698	0,18%
1327	5,481	5,53	0,89%
1273	5,26	5,363	1,96%
1219	5,045	5,2	3,07%
1167	4,836	5,043	4,27%
1114	4,634	4,883	5,37%
1062	4,438	4,73	6,58%
1011	4,248	4,572	7,63%
960	4,064	4,418	8,72%
909	3,886	4,264	9,73%
858	3,714	4,11	10,66%
807	3,548	3,956	11,50%
756	3,388	3,803	12,25%
705	3,234	3,649	12,85%
655	3,085	3,5	13,46%
604	2,942	3,344	13,68%
554	2,804	3,193	13,87%
503	2,672	3,039	13,75%
453	2,544	2,89	13,59%
402	2,422	2,734	12,88%
352	2,304	2,583	12,09%
302	2,188	2,432	11,13%
251	2,074	2,278	9,85%
201	1,96	2,128	8,55%
151	1,848	1,977	6,96%
100	1,738	1,823	4,91%
50	1,628	1,672	2,67%
0	1,521	1,521	0,00%

Fonte: Autora, 2024.

Entretanto, é válido afirmar que o modelo simplificado desenvolvido neste trabalho se mostrou bastante promissor com erros inferiores a 15% com relação a correlações empíricas utilizadas comercialmente para representar o perfil de pressão ao longo do duto.

Para validação do modelo simplificado para o cálculo do perfil de pressão em dutos horizontais, utilizou-se os dados apresentados no trabalho de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023 do perfil de pressão do escoamento horizontal simulado através do modelo de Beggs e Brill junto do modelo de cálculo do fator de atrito do Samadianfard, o trabalho que teve como objetivo desenvolver simulações computacionais para prever perdas de carga em dutos de petróleo com escoamento multifásico.

Segue nas Tabelas 4, 5 e 6 os dados obtidos através de conversões de unidades dos dados de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023, inseridos para simulação na interface gráfica deste trabalho, onde para simular apenas o escoamento horizontal inseriu-se o ponto de TDP igual ao comprimento do duto.

Tabela 4 – Dados de entrada para simulação Parte 1.

Pressão na cabeça do poço (MPa)	5.516
Pressão na plataforma (MPa)	5.461
Vazão (m ³ /s)	0,1132
Rugosidade (m)	0,0000254
Comprimento (m)	1828,8
Diâmetro (m)	0,0635
TDP (m)	1828,8

Fonte: Adaptado de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023.

Tabela 5 – Dados de entrada para simulação Parte 2.

Densidade (kg/m ³)	772,76	44,08
Viscosidade (kg/ms)	0,0013	0,00000131

Fonte: Adaptado de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023.

Tabela 6 – Dados de entrada para simulação Parte 3.

83,2
166,3
249,4
333,5
416,6
499,7
582,8
665,9
748,1
831,11
914,12
998,13
1081,14
1164,15
1247,16
1330,17
1413,18
1496,19
1579,2
1663,21
1746

Fonte: Adaptado de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023.

O resultado da simulação dos dados das Tabelas 4, 5 e 6 na interface gráfica deste trabalho é apresentado na Figura 24. Após gerar o perfil de pressão, os dados foram exportados para uma análise comparativa com outro modelo.

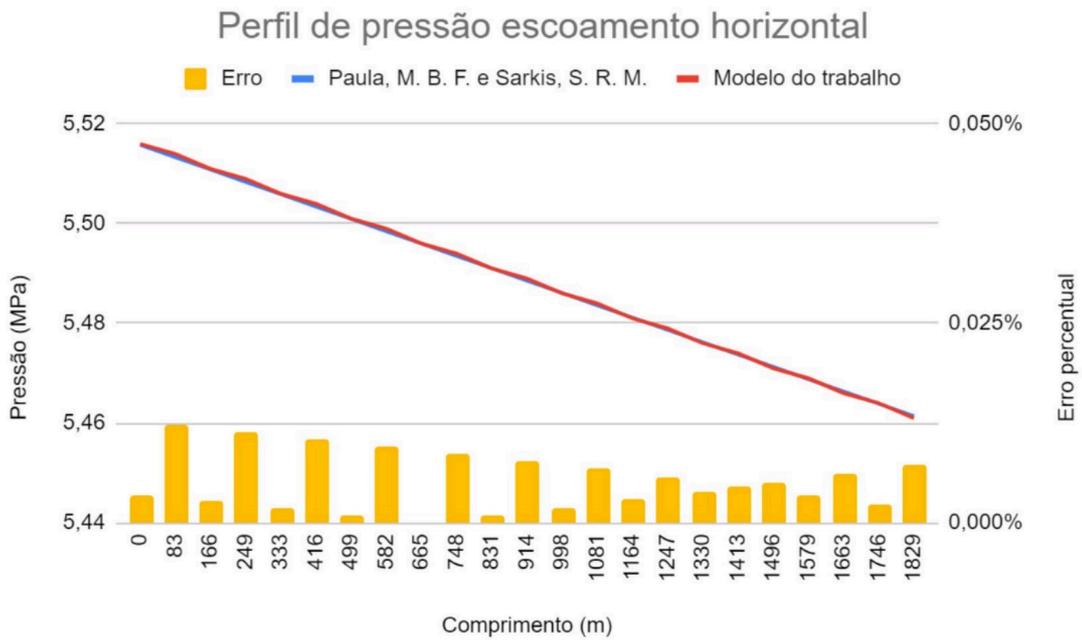
Figura 24 – Resultado da simulação 2.



Fonte: Autora, 2024.

Com os dados exportados do modelo desenvolvido neste trabalho, gerou-se o gráfico apresentado na Figura 25, onde tem-se o perfil de pressão do escoamento horizontal cálculo através do modelo simplificado deste trabalho, o perfil de pressão cálculo através de correlações empíricas apresentados no trabalho de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023 e o erro percentual entre os dois métodos tendo como parâmetro de comparação o modelo desenvolvido no trabalho de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023.

Figura 25 – Validação do perfil de pressão do escoamento horizontal.



Fonte: Autora, 2024.

Avaliando a Figura 25 é notória a semelhança entre o comportamento dos modelos, apresentando variações inferiores a 10^{-3} , como mostra a Figura 26 com os dados ponto a ponto apresentados no trabalho de Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023, assim como os dados obtidos neste trabalho.

Figura 26 - Dados para validação do modelo de cálculo do trecho horizontal.

Comprimento (m)	Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M.	Modelo do trabalho	Erro
0	5,516	5,516	0,004%
83	5,513	5,514	0,012%
166	5,511	5,511	0,003%
249	5,508	5,509	0,011%
333	5,506	5,506	0,002%
416	5,503	5,504	0,011%
499	5,501	5,501	0,001%
582	5,498	5,499	0,010%
665	5,496	5,496	0,000%
748	5,494	5,494	0,009%
831	5,491	5,491	0,001%
914	5,489	5,489	0,008%
998	5,486	5,486	0,002%
1081	5,484	5,484	0,007%
1164	5,481	5,481	0,003%
1247	5,479	5,479	0,006%
1330	5,476	5,476	0,004%
1413	5,474	5,474	0,005%
1496	5,471	5,471	0,005%
1579	5,469	5,469	0,004%
1663	5,466	5,466	0,006%
1746	5,464	5,464	0,002%
1829	5,461	5,461	0,007%

Fonte: Autora, 2024.

Portanto, o modelo simplificado desenvolvido neste trabalho demonstra uma boa capacidade de representar o comportamento do perfil de pressão em escoamentos multifásicos horizontais, mesmo sem considerar todas as interações entre as fases e as propriedades dos fluidos, como a capacidade térmica. Assim, pode-se afirmar que este modelo é uma ferramenta promissora para a análise de perdas de carga em dutos flexíveis em catenária livre na indústria do petróleo

6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento e a validação do modelo matemático simplificado para o cálculo do perfil de pressão em dutos flexíveis em catenária livre, apresentado neste trabalho, demonstram resultados promissores na representação do escoamento multifásico em diferentes trechos do duto. Conforme apresentado na metodologia, o modelo divide o duto em duas seções distintas - da cabeça do poço até o TDP e do TDP até a plataforma - abordando adequadamente as variações de pressão predominantes causadas pelo atrito e pela coluna de água, respectivamente.

A implementação de uma interface gráfica intuitiva e funcional foi essencial para viabilizar a utilização prática do modelo. A interface permitiu a inserção de variáveis, a geração de gráficos interativos e a exportação de dados para planilhas, facilitando a análise e a validação dos resultados obtidos. A estrutura modularizada do *backend* e as funcionalidades adicionais garantiram a integridade dos dados e aprimoram a experiência do usuário.

Os resultados das simulações, comparados com modelos empíricos amplamente utilizados na indústria, como os trabalhos de Moreira A. S. 2017 e Paula, M. B. F. e Sarkis, S. R. M. 2023, demonstraram que o modelo simplificado apresenta erros percentuais inferiores a 15% no caso do escoamento vertical e variações inferiores a 10^{-3} no escoamento horizontal. Esses resultados indicam que o modelo desenvolvido é capaz de representar com precisão o comportamento do perfil de pressão em escoamentos multifásicos, seja vertical ou horizontal.

Portanto, o modelo simplificado de cálculo do perfil de pressão em dutos flexíveis em catenária livre desenvolvido neste trabalho representa uma ferramenta valiosa para a análise de perdas de carga em dutos de petróleo, proporcionando uma alternativa eficiente para a indústria. As validações realizadas corroboram a eficácia do modelo, destacando seu potencial para aplicações práticas na engenharia de escoamentos multifásicos.

REFERÊNCIAS

ALBINO, J. C. R. **Materiais com Gradação Funcional no Comportamento Dinâmico de Linhas Flexíveis**. 2011. Tese de Doutorado (Doutor em engenharia mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. DOI <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.19447>. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=19447@2&meta=1>>. Acesso em: 21 jan. 2024.

ALMEIDA, A. A. M. et al. **A importância da inspeção de fabricação dos dutos flexíveis submarinos**. Revista esfera acadêmica tecnologia, Vitória, v. 6, n. 1, 1 jan. 2021. Tecnologia, p. 66-88. Disponível em: <https://multivix.edu.br/wp-content/uploads/2022/02/revista-esfera-tecnologia-v06-n01-completa.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

BALDAN, E. L., MACHADO, K. C. **Condicionamento e comissionamento de dutos flexíveis: da fabricação à montagem em campo**. 2010. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Condicionamento e Comissionamento) - Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, [S. l.], 2010. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/ednaldo_kleyser.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.

BARBOSA, A. R. B. **Análise de manuseio de dutos flexíveis com integridade comprometida**. 2022. 129 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenheiro Naval e Oceânico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10036635.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

BEGGS, D.H., Brill J. P. **A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes**. J Pet Technol 25 (1973): 607–617. doi: <https://doi.org/10.2118/4007-PA>.

BRILL, J. P. **Multiphase Flow in Wells**. J Pet Technol 39 (1987): 15–21. doi: <https://doi.org/10.2118/16242-PA>.

CHAVES, T. C. **Operações de lançamento de dutos flexíveis**. 2011. 69 p. Monografia (Carta de Capitão de Cabotagem no Curso de Oficial Superior de Náutica) - Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, RIO DE JANEIRO, 2011. Disponível em: <https://www.repositorio.mar.mil.br/handle/ripcmb/29198>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

CHAVES, T. C. **Corrosão sob tensão em armaduras metálicas de dutos flexíveis utilizados na exploração de petróleo e gás offshore**. 2022. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Grau de Engenheiro Mecânico.) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2022. Disponível

em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/25900/TCC%20-%20Gabriel%20Lemos.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

FREZ, G. V. **Modelagem e simulação do escoamento multifásico com padrões bolhas e estratificado**. Revista de Engenharia e Tecnologia, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 149-157, 15 abr. 2017. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11689>. Acesso em: 25 mar. 2024.

NASCIMENTO, J. C. S. **Simulador de escoamento multifásico em poços de petróleo (SEMPP)**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12980>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. [S. l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2013. 421 p. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1147>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

MOREIRA, A. S. **Análise de Sensibilidade de Correlações Empíricas de Escoamento Multifásico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, 2017. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/4100>>. Acesso em: 30 jun. 2024.

PAULA, M. B. F.; SARKIS, S. R. M. **Estudos e simulação de perdas de cargas em escoamentos multifásicos de petróleo em dutos e poços**. In: RAMOS, J. *et al.* **Ciência do solo: O avanço da ciência no Brasil**. 1. ed. São Paulo: Científica Digital LTDA, 2023. v. 1, cap. 3, p. 35-46. ISBN 978-65-5360-396-7. Disponível em: <<https://www.editoracientifica.com.br/books/ciencia-do-solo-o-avanco-da-ciencia-no-brasil>>. Acesso em: 30 jun. 2024.

ROCHA, D. B. **Estudo teórico sobre escoamento horizontal bifásico**. 2020. 118 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília Engenharia de Energia Faculdade do Gama - FGA, Brasília, 2020. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/28449/1/2020_DanyelleBemficaDaRocha_tcc.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.

SANTIAGO, C. P. *et al.* **Desenvolvimento de sistemas Web orientado a reuso com Python, Django e Bootstrap**. In: Minicursos da ERCEMAPI 2020. Organização Ariel Soares Teles, Dario Brito Calçada e Nécio Lima Veras. DOI: <https://doi.org/10.5753/sbc.311.5>. Cap. 5. 2020. Disponível em: <<https://books-sol.sbc.org.br/index.php/sbc/catalog/book/48>>. Acesso em: 30 mai. 2024.

SANTOS, C. S. *et al.* **Análise da Viabilidade do uso de Manifolds em um Sistema de Produção Submarino.** Unisanta Science and Technology, Published Online, v. 4, ed. 2, p. 42-54, 6 dez. 2015. Disponível em: <<https://periodicos.unisanta.br/index.php/sat/article/view/591>>. Acesso em: 13 jan. 2024.

VASCONCELOS, A.L.M. **40 anos na evolução da tecnologia em árvore de Natal molhada no Brasil.** 2015. 185 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufRJ-peno_upl/THESIS/6000132/2015_mestrando_andre_luiz_moura_de_vasconcelos_20200404222259595.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.

VILLELA, M. J. R. **Análise do Comportamento da Temperatura em Sistemas de Produção de Petróleo: Comparação entre Completação Seca e Molhada.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=6084@1>>. Acesso em: 20 jan. 2024.

XAVIER, M. L. **Instalação de dutos flexíveis em águas ultraprofundas.** 2006. 95 p. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufRJ-peno_upl/THESIS/10001724/2006_mestrado_marcelo_lopes_xavier_20210818222258197.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2024.