

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA & INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL**

Gustavo Santos de Oliveira Marques

**Análise CFD de Defletor de Flange na Dispersão de Nuvens de
Hidrocarbonetos**

Juiz de Fora

2025

Gustavo Santos de Oliveira Marques

**Análise CFD de Defletor de Flange na Dispersão de Nuvens de
Hidrocarbonetos**

Dissertação apresentada ao Pós-Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientadora: Prof. Dr. Patrícia Habib Hallak

Coorientadores: Prof. Dr. José Jerônimo Camata; Nicolas Lima Oliveira

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Marques, Gustavo Santos de Oliveira.

Análise CFD de defletor de flange na dispersão de nuvens de hidrocarbonetos / Gustavo Santos de Oliveira Marques. -- 2025.
82 f. : il.

Orientadora: Patrícia Habib Hallak

Coorientadores: José Jerônimo Camata, Nicolas Lima Oliveira
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 2025.

1. Defletor de flange. 2. CFD. 3. Análise de risco. I. Hallak, Patrícia Habib, orient. II. Camata, José Jerônimo, coorient. III. Oliveira, Nicolas Lima, coorient. IV. Título.

Gustavo Santos de Oliveira Marques

Análise CFD de Defletor de Flange na Dispersão de Nuvens de Hidrocarbonetos

Dissertação
apresentada ao
Programa de Pós-
graduação em
Modelagem
Computacional da Universidade
Federal de Juiz de
Fora como requisito
parcial à obtenção do
título de Mestre em
Modelagem
Computacional. Área
de concentração:
Modelagem
Computacional.

Aprovada em 08 de maio de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Patrícia Habib Hallak - Orientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. José Jerônimo Camata

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Nicolas Lima Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof.^a Dr.^a Yipsy Roque Benito

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Renato Nascimento Elias

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 11/08/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Habib Hallak, Professor(a)**, em 11/08/2025, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jose Jeronimo Camata, Professor(a)**, em 11/08/2025, às 15:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Nícolas Lima Oliveira, Usuário Externo**, em 11/08/2025, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **RENATO NASCIMENTO ELIAS, Usuário Externo**, em 11/08/2025, às 21:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yipsy Roque Benito, Professor(a)**, em 12/08/2025, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2544941** e o código CRC **A1F1620B**.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha mãe, minha vó, meu tio, meu irmão e minha tia, que me permitiram iniciar os estudos nesta universidade e sempre me apoiaram a correr atrás de meus sonhos e objetivos. Sem eles, eu não seria quem eu sou hoje e nada disso seria possível.

Agradeço aos meus colegas de trabalho da empresa onde trabalho, em especial ao meus chefes sempre dispostos a me ajudar e apoiar com questões relacionadas com minha formação profissional. Gostaria de agradecer também a todos os meus colegas do programa, em especial aos meus orientadores, que me ajudaram e incentivaram a seguir com esse tema.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação da eficácia de um defletor ou protetor de flange ("flange deflector") na dispersão de nuvens contendo hidrocarbonetos em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás, utilizando técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) através do software *Ansys Fluent*. A pesquisa visa contribuir para a melhoria das análises de risco e estudos de consequência em cenários de vazamento de gases inflamáveis.

O trabalho consiste em avaliar se um defletor de flange no formato retangular consegue direcionar a nuvem de hidrocarbonetos no sentido oposto ao sentido do vazamento, mesmo com vento no sentido favorável do vazamento. O defletor não possui uma das paredes a fim de evitar o confinamento dos gases explosivos. O vazamento representativo possui seção circular de 1 polegada de diâmetro, sua composição é uma mistura de ar e metano, e os dados de processo da tubulação são pressão de 2 MPa e temperatura de 100 °C.

O estudo inicia-se com uma revisão bibliográfica abrangente sobre riscos operacionais, dispersão de gases em ambientes *offshore* e modelagem CFD aplicada a cenários de segurança industrial. A modelagem matemática e os modelos utilizados para a realização da análise CFD também são abordados.

Em seguida, desenvolve-se uma metodologia do modelo geométrico representativo de uma seção de tubulação típica de plataforma, de um flange, da área de seção do vazamento e do protetor de flange proposto.

A análise dos resultados consiste em avaliar se os contornos de fração mássica de metano e isosuperfícies de 20% do Limite Inferior de Flamabilidade (LFL - *Lower Flammability Limit*) do metano, para as velocidades de vento de 0; 0,5; 1; 2; 3; 4 m/s não são direcionados para a direção do vazamento, visto que o defletor de flange guiou a nuvem na direção contrária.

As conclusões do estudo destacam a importância dos protetores de flange como medida de mitigação de riscos em plataformas *offshore*, quantificando sua eficácia na redução da dispersão de nuvens de hidrocarbonetos.

Por fim, são sugeridas direções para pesquisas futuras, incluindo a investigação de parâmetros geométricos inovadores de protetores de flange, influência dos dados de processo da tubulação (pressão e temperatura), influência de diferentes tipos de vazamentos (posição e formato) e avaliação fluido-estrutural para avaliar impactos no defletor de flange.

Palavras-chave: protetores de flange, dispersão de gases, fluidodinâmica computacional, *Ansys Fluent*, análise de risco, plataformas *offshore*.

ABSTRACT

This work presents an evaluation of the effectiveness of a flange deflector or protector in dispersing clouds containing hydrocarbons on offshore oil and gas production platforms, using computational fluid dynamics (CFD) techniques through the *Ansys Fluent* software. The research aims to contribute to improving risk analyses and consequence studies in scenarios involving flammable gas leaks.

The study investigates whether a rectangular-shaped flange deflector can direct the hydrocarbon cloud in the opposite direction of the leak, even under wind conditions that favor the leak direction. The deflector is designed without one of its walls to avoid the confinement of explosive gases. The representative leak has a circular section with a diameter of 1 inch, consists of pure methane, and the pipeline process data are a pressure of 2 MPa and a temperature of 100 °C.

The study begins with a comprehensive literature review on operational risks, gas dispersion in offshore environments, and CFD modeling applied to industrial safety scenarios. The mathematical modeling and the models used for the CFD analysis are also discussed.

Next, a methodology is developed for the geometric model representing a typical pipeline section on a platform, a flange, the leakage area, and the proposed flange protector.

The analysis of the results assesses whether the methane mass fraction contours and 20% LFL (Lower Flammability Limit) methane isosurfaces, under wind speeds of 0, 0.5, 1, 2, 3, and 4 m/s, are not directed along the leak path, indicating that the flange deflector successfully guided the cloud in the opposite direction.

The study's conclusions highlight the importance of flange protectors as a risk mitigation measure on offshore platforms, quantifying their effectiveness in reducing hydrocarbon cloud dispersion.

Finally, directions for future research are suggested, including the investigation of innovative geometric parameters for flange protectors, the influence of pipeline process data (pressure and temperature), the influence of different types of leaks (position and shape), and fluid-structure evaluation to assess impacts on the flange deflector.

Keywords: flange protectors, gas dispersion, computational fluid dynamics, *Ansys Fluent*, risk analysis, offshore platforms.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de protetor de flange da <i>KLINGER</i>	16
Figura 2 – Modelo geométrico da tubulação e do flange	43
Figura 3 – Modelo geométrico do vazamento	44
Figura 4 – Modelo geométrico do defletor de flange	46
Figura 5 – Modelo geométrico do defletor de flange com corte transversal no plano zx	47
Figura 6 – Modelo geométrico do defletor de flange com tubo e flange	48
Figura 7 – Modelo geométrico do defletor de flange com tubo e flange com corte transversal no plano zx	49
Figura 8 – Domínio computacional gerado a partir do comando <i>enclosure</i>	50
Figura 9 – Domínio computacional gerado para realização das simulações	51
Figura 10 – Domínio computacional gerado para realização das simulações com corte transversal no plano zx	52
Figura 11 – Domínio computacional bidimensional gerado para realização das simulações computacionais	53
Figura 12 – Condições de contorno do modelo bidimensional	56
Figura 13 – Condições de contorno do modelo tridimensional (parte 1)	57
Figura 14 – Condições de contorno do modelo tridimensional (parte 2)	58
Figura 15 – Região de interesse para realização do estudo de malha	62
Figura 16 – Resultados do estudo de malha	63
Figura 17 – Malha do modelo bidimensional	64
Figura 18 – Malha do modelo tridimensional	64
Figura 19 – Malha do modelo tridimensional no plano zx	65
Figura 20 – Contorno de fração mássica do modelo bidimensional	67
Figura 21 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 0 m/s	68
Figura 22 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 0,5 m/s	68
Figura 23 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 1 m/s	69
Figura 24 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 2 m/s	69
Figura 25 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 3 m/s	70
Figura 26 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 4 m/s	70
Figura 27 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 0 m/s	71
Figura 28 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 0,5 m/s	72
Figura 29 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 1 m/s	72
Figura 30 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 2 m/s	73
Figura 31 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 3 m/s	73
Figura 32 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 4 m/s	74

Figura 33 – Contorno de velocidade de vento até 20 m/s com velocidade de vento de 4 m/s	75
Figura 34 – Contorno de velocidade de vento até 100 m/s com velocidade de vento de 4 m/s	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do estudo de malha	62
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LFL	Limite Inferior de Flamabilidade (<i>Lower Flammability Limit</i>)
CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
HC	Hidrocarbonetos
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio

LISTA DE SÍMBOLOS

y	Fração molar do componente na mistura de gases
ρ	Densidade
t	Tempo
∇	Vetor gradiente
v	Velocidade
S	Termo fonte
p	Pressão
τ	Tensor de tensões viscosas
g	Aceleração da gravidade
F	Forças externas
Re	Número de Reynolds
D	Diâmetro
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
k	Energia cinética turbulenta
ω	Taxa de dissipação específica
β	Constantes do modelo de turbulência
x	Componente espacial na direção x
y	Componente espacial na direção y
z	Componente espacial na direção z
σ	Números de Prandtl
P	Produção de energia
S	Magnitude da taxa de deformação
F_1	Função de mistura
T	Temperatura
k	Condutividade térmica
e	Energia interna específica do fluido
h	Entalpia específica do fluido
J	Fluxo difusivo da espécie
Y	Fração mássica da espécie
R_i	Taxa líquida de produção da espécie i por reação química
γ	Razão entre os calores específicos do gás
C_d	Coeficiente de descarga
A	Área
M	Massa molar
R	Constante universal dos gases ideais
\dot{m}	Vazão mássica
c	Velocidade do som

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	RISCOS OPERACIONAIS ENVOLVENDO HIDROCARBONETOS EM PLATAFORMAS MARÍTIMAS	14
1.2	DEFLETOR DE FLANGE ("FLANGE DEFLECTOR")	15
1.3	LIMITE INFERIOR DE FLAMABILIDADE - "LFL"	17
1.4	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL - CFD	19
1.5	OBJETIVOS	20
1.6	ESCOPO DO TRABALHO	20
2	MODELAGEM MATEMÁTICA	22
2.1	EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE - CONSERVAÇÃO DE MASSA	22
2.2	CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO	22
2.3	TURBULÊNCIA - $k-\omega$	23
2.4	ENERGIA	26
2.5	TRANSPORTE DAS ESPÉCIES	27
2.6	DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA NUVEM	29
2.7	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	30
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	33
3.1	ESCOLHA DOS DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO E DA TUBULAÇÃO E FLANGE	33
3.2	CONDIÇÕES DO VAZAMENTO	35
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA	38
3.4	MODELAGEM GEOMÉTRICA	41
3.4.1	Modelo 2D	52
3.5	CONDIÇÕES DE CONTORNO E MODELOS UTILIZADOS	53
3.6	MALHA	59
4	RESULTADOS	66
4.1	MODELO BIDIMENSIONAL	66
4.2	MODELO TRIDIMENSIONAL	67
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

1.1 RISCOS OPERACIONAIS ENVOLVENDO HIDROCARBONETOS EM PLATAFORMAS MARÍTIMAS

A indústria de óleo e gás *offshore* enfrenta desafios significativos relacionados à segurança operacional, especialmente no que diz respeito à dispersão de gases contendo hidrocarbonetos (HC) provenientes de vazamentos em conexões flangeadas. As plataformas *offshore* são ambientes complexos, onde a liberação acidental de gases inflamáveis pode levar a consequências catastróficas, incluindo explosões e incêndios (1). A compreensão dos mecanismos de dispersão desses gases é crucial para a avaliação e mitigação de riscos em instalações *offshore*.

A dispersão de gases contendo hidrocarbonetos em plataformas *offshore* é influenciada por diversos fatores, como condições meteorológicas, geometria da plataforma e propriedades físico-químicas dos gases liberados (2). O vento, em particular, desempenha um papel fundamental na dispersão dos gases, afetando a direção e a velocidade de propagação da nuvem de gás (3).

Os riscos associados à dispersão de gases HC em plataformas *offshore* podem ser categorizados em três principais áreas de preocupação:

1. Formação de atmosferas explosivas: a mistura de gases inflamáveis com o ar pode criar atmosferas explosivas, representando um risco significativo de explosão (4);
2. Asfixia: altas concentrações de gases HC podem deslocar o oxigênio, criando ambientes com deficiência de oxigênio e representando riscos de asfixia para os trabalhadores (5);
3. Toxicidade: alguns gases HC, como o sulfeto de hidrogênio (H₂S), são tóxicos e podem causar efeitos adversos à saúde mesmo em baixas concentrações (6).

Para abordar esses riscos, a indústria *offshore* emprega uma variedade de técnicas de modelagem e simulação, incluindo Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). As simulações em CFD permitem uma análise detalhada da dispersão de gases, levando em consideração a complexa geometria das plataformas e as condições ambientais variáveis (7).

A análise de risco baseada em CFD tem se tornado uma ferramenta essencial para estudos de consequência em plataformas *offshore*. Esses estudos avaliam os potenciais impactos de liberações acidentais de gases, fornecendo informações cruciais para o projeto de sistemas de segurança, planejamento de emergência e tomada de decisões operacionais (8).

Um dos usos da CFD na análise de risco é a avaliação de uma isosuperfície do Limite Inferior de Flamabilidade (LFL - *Lower Flammability Limit*) da nuvem de hidrocarbonetos proveniente do vazamento. Essa técnica permite verificar as regiões afetadas suscetíveis a maiores danos devido ao vazamento e onde há a maior concentração de gases explosivos.

Diante desses cenários de risco, são necessárias medidas mitigadoras. Como medida mitigadora de risco, pode-se realizar a instalação de equipamentos capazes de direcionar a nuvem de hidrocarbonetos para uma região controlada, como defletores ou protetores de flange, por exemplo.

Contudo, avaliar os efeitos dos equipamentos antes de sua instalação é crucial para verificar seus efeitos sobre os possíveis riscos de um vazamento. Uma das formas de realizar análises e validar os efeitos de equipamentos, como o impacto de um defletor de flange na dispersão de nuvens de hidrocarbonetos, é através de análises CFD.

Nesse sentido, é necessário também avaliar cenários conservativos a fim de garantir a segurança das instalações e equipamentos. Uma das formas de avaliar um cenário conservativo, por exemplo, é considerar condições adversas que, por sua vez, contribuem de forma negativa para o impacto o qual deseja minimizar. No cenário de um defletor de flange que possui como função direcionar uma nuvem de hidrocarbonetos na direção contrária à direção do vazamento, um cenário conservativo seria considerar a presença de vento, de forma que este, por sua vez, direcione a nuvem de hidrocarbonetos na direção favorável ao vazamento.

1.2 DEFLETOR DE FLANGE (“*FLANGE DEFLECTOR*”)

A segurança em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás é uma preocupação primordial na indústria petrolífera. Um elemento que pode auxiliar nesse contexto é o defletor de flange, um dispositivo instalado ao redor de conexões flangeadas projetado para mitigar os riscos associados a vazamentos de gases inflamáveis e tóxicos. Este componente desempenha um papel fundamental na prevenção de acidentes e na minimização de consequências potencialmente catastróficas.

Os flanges são conexões mecânicas amplamente utilizadas para unir seções de tubulações, válvulas e outros equipamentos em sistemas de processo. Embora sejam projetados para serem robustos e confiáveis, conexões flangeadas podem ser vulneráveis a diversos fatores ambientais e operacionais, como corrosão, vazamentos e danos mecânicos (9)

O defletor de flange, também conhecido como escudo de flange ou protetor de flange, é uma barreira física instalada ao redor das conexões flangeadas em tubulações e equipamentos que transportam líquidos e gases perigosos. Seu principal objetivo é redirecionar e dispersar qualquer vazamento que ocorra na junta flangeada, evitando assim

a formação de nuvens de gás inflamável ou tóxico que poderiam representar sérios riscos à segurança da instalação e do pessoal (10). Existem diversos tipos de defletores de flange, variando em geometria e material. Na Figura 1 é possível observar um protetor de flange da "KLINGER".

Figura 1 – Exemplo de protetor de flange da *KLINGER*



Fonte: KLINGER | Products | Sealing materials | Flange Protector (2025). Disponível em: <https://rklinger.com.br/en/produtos/materiais-de-vedacao/protetores-de-flange/>

O projeto e a seleção de defletores de flange em cenários reais são influenciados por diversos fatores, incluindo:

- Tamanho e geometria da flange;
- Condições operacionais (temperatura, pressão);
- Compatibilidade química com os fluidos do processo;
- Requisitos de resistência mecânica e térmica;
- Facilidade de instalação e manutenção.

O uso de defletores de flange alinha-se com as práticas de gestão de risco na indústria *offshore*. Ao mitigar potenciais pontos de falha, essas proteções contribuem para a redução da probabilidade de incidentes relacionados a vazamentos e liberações de substâncias perigosas, aspectos cruciais na análise de risco e estudos de consequência em plataformas *offshore* (1).

Os defletores de flange representam um componente fundamental na estratégia de proteção e manutenção de sistemas de tubulação em ambientes *offshore*. Sua aplicação reflete uma abordagem proativa na gestão de riscos e na garantia da integridade operacional, aspectos essenciais para a segurança e eficiência das operações de óleo e gás em alto mar.

1.3 LIMITE INFERIOR DE FLAMABILIDADE - "LFL"

O Limite Inferior de Flamabilidade (LFL - *Lower Flammability Limit*) representa a concentração mínima de um gás ou vapor combustível no ar necessária para propagar uma chama quando exposta a uma fonte de ignição (4). A obtenção do Limite Inferior de Flamabilidade (LFL - *Lower Flammability Limit*) de uma nuvem de metano é um aspecto crucial para a análise de risco em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás.

Para o metano, o LFL é expresso como uma porcentagem em volume no ar. De acordo com a literatura, o LFL do metano é aproximadamente 5% em volume (3). No entanto, é importante ressaltar que este valor pode variar ligeiramente dependendo das condições ambientais, como temperatura e pressão.

Segundo a norma britânica (*British Standard* - BS) e europeia (EN) BS EN 60079-29-2:2015 (11), é recomendado configurar os detectores de gás a uma porcentagem do LFL de forma a manter a concentração de gás inflamável abaixo do LFL. A norma recomenda que o nível do alarme principal deve ser configurado para detectar LFL inferior ou igual a 20%.

O termo "20% do LFL" é frequentemente utilizado em análises de segurança e estudos de dispersão de gases em ambientes industriais, como plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Quando se menciona "20% do LFL", refere-se a uma concentração de gás ou vapor que corresponde a 20% do valor do limite inferior de explosividade para aquela substância específica. Essa medida é frequentemente utilizada como um limiar de segurança em sistemas de detecção e alarme em ambientes industriais, incluindo plataformas *offshore*, de acordo com o item 4.5.1.1 da norma BS EN 60079-29-2:2015 (11).

Por exemplo, se o LFL do metano é aproximadamente 5% em volume no ar, 20% do LFL corresponderia a uma concentração de 1% de metano no ar. Esta abordagem proporciona uma margem de segurança significativa, permitindo que ações preventivas sejam tomadas antes que a concentração do gás atinja níveis potencialmente perigosos (3).

Em simulações CFD voltadas para a dispersão de gases em plataformas *offshore*, o valor do LFL é frequentemente utilizado como um critério de aceitação em estudos de consequência. Por exemplo, uma isosuperfície representando 20% do LFL para metano seria configurada para uma concentração de 1% (0,01 em fração volumétrica) de metano no ar (12).

Os estudos de consequência avaliam a extensão das áreas afetadas por uma possível liberação de gás, considerando diferentes cenários de vazamento e condições ambientais (13). A utilização deste critério em análises de risco e estudos de consequência permite aos engenheiros e gestores de segurança:

- Estabelecer zonas de segurança adequadas;

- Dimensionar sistemas de ventilação e exaustão;
- Posicionar estrategicamente detectores de gás;
- Desenvolver procedimentos de emergência eficazes.

É importante ressaltar que, embora 20% do LFL seja um valor comumente adotado, a escolha do limiar específico pode variar dependendo das regulamentações locais, políticas corporativas e análises de risco específicas, por dizer respeito à filosofia de segurança de cada instalação. Para fins deste trabalho, foi selecionado o valor de 20% a fim de realizar análises conservadoras ao trabalhar com concentração de gás inflamável abaixo do limite de inflamabilidade.

No caso da mistura de gases inflamáveis, o LFL da mistura pode ser obtido a partir da Lei de *Le Chatelier*, também conhecida como Lei das Misturas. No entanto, quando aplicada a somente um gás inflamável, como o metano sem a presença de outros hidrocarbonetos (como apresentado neste trabalho), a fórmula simplifica-se significativamente, resultando no próprio LFL do gás em questão (14).

É importante notar que, embora a Lei de *Le Chatelier* não seja necessária para determinar o LFL de um vazamento contendo apenas metano, sua compreensão é crucial em simulações CFD e análises de risco em ambientes industriais, como plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Isso porque, na prática, raramente se lida com gases puros em situações de vazamento ou dispersão. Geralmente, encontram-se misturas de hidrocarbonetos ou outros gases combustíveis (4).

A avaliação do LFL através da CFD pode ser realizada através da definição de uma isosuperfície representando 20% do LFL para uma nuvem de metano, um procedimento importante em simulações voltadas para análise de risco e estudos de consequência em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Este processo envolve a compreensão das propriedades do metano, a configuração adequada do problema e a interpretação correta dos resultados da simulação.

De acordo com Crowl (4), o LFL do metano é aproximadamente 5% em volume no ar. Portanto, 20% do LFL corresponde a 1% de metano no ar (0,01 em fração volumétrica).

Ao realizar análises de risco e estudos de consequência envolvendo dispersão de metano, é crucial considerar que:

- O LFL do metano é relativamente baixo comparado a outros hidrocarbonetos, o que significa que mesmo pequenas concentrações podem representar riscos significativos;
- As propriedades físicas do metano, como sua baixa densidade em relação ao ar, afetam significativamente seu comportamento de dispersão, especialmente em ambientes abertos como plataformas *offshore* (6);

- Fatores ambientais como temperatura, pressão e umidade podem influenciar ligeiramente o valor exato do LFL, embora estas variações sejam geralmente pequenas para o metano em condições típicas de operação *offshore*;

O entendimento e obtenção do LFL da mistura de hidrocarbonetos no vazamento é fundamental para análises envolvendo gases inflamáveis, elemento comum em cenários reais de vazamento e dispersão em ambientes industriais (4).

1.4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL - CFD

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*) é uma área da mecânica dos fluidos que utiliza métodos numéricos e algoritmos para analisar e resolver problemas que envolvem escoamentos de fluidos. Nas últimas décadas, a CFD tem-se tornado uma ferramenta essencial em diversos campos da engenharia, incluindo a indústria de óleo e gás, onde é amplamente utilizada para simular e prever o comportamento de fluidos em plataformas *offshore* (15).

A aplicação da CFD na análise de dispersão de gases em plataformas *offshore* permite prever a trajetória e concentração de gases liberados acidentalmente, considerando fatores como a velocidade e direção do vento, a geometria complexa das estruturas e os efeitos de flutuabilidade dos gases (13). Estas informações são cruciais para o dimensionamento de sistemas de detecção de gases, planejamento de rotas de fuga e avaliação de zonas de segurança.

A complexidade das simulações CFD em ambientes *offshore* requer considerar diversos fenômenos físicos, incluindo turbulência, transferência de calor, transporte das espécies, reações químicas e interações multifásicas. Para abordar estes desafios, diferentes modelos matemáticos e técnicas numéricas são empregados, como o modelo $k - \omega$ para turbulência e o método dos volumes finitos (*Finite Volume Method*) para discretização espacial (16).

Na indústria *offshore* de óleo e gás, a CFD é aplicada em diversos cenários, como a análise da dispersão de gases tóxicos ou inflamáveis (tema deste trabalho), além de simulações de incêndios e a modelagem de explosões (13). Estas simulações são fundamentais para a realização de estudos de consequências, componentes essenciais na análise de risco de instalações *offshore* (2).

A CFD tem se tornado uma ferramenta essencial na análise e projeto de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados (15). Dentre as diversas ferramentas disponíveis no mercado, o *Ansys Fluent*, que trabalha com o Método dos Volumes Finitos destaca-se como um dos códigos mais amplamente utilizados e reconhecidos na indústria e na academia para simulações CFD (17).

A CFD representa o estado da arte e uma ferramenta poderosa e versátil para a análise de segurança em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Sua capacidade de simular cenários complexos de dispersão de gases fornece informações valiosas para a tomada de decisões em projetos de engenharia e para a elaboração de estratégias de mitigação de riscos (13).

1.5 OBJETIVOS

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar o impacto e a eficácia de um defletor de flange no redirecionamento adequado da nuvem de hidrocarbonetos resultante de um vazamento em flange de tubulação em plataformas marítimas. Essa avaliação consiste em verificar se o defletor é capaz de direcionar a nuvem para uma região controlada, oposta à direção do vazamento, considerando diferentes velocidades do vento no sentido favorável à direção inicial do vazamento.

Para se alcançar este objetivo principal da pesquisa, os objetivos secundários envolvem:

- Desenvolvimento de um modelo geométrico representativo de um defletor de flange, que inclui a tubulação que transporta o hidrocarboneto, bem como o próprio flange.
- Desenvolvimento de um modelo computacional robusto em CFD para simular escoamentos turbulentos e, também, para simular a equação de transporte de espécies, que representa a nuvem de hidrocarbonetos resultante de um vazamento em tubulação flangeada.
- Estudo e avaliação de simplificações geométricas dos modelos, visando reduzir o custo computacional. Para isso, são analisadas duas abordagens de modelagem geométrica: uma bidimensional e outra tridimensional.
- Os dados de entrada das simulações para a representação de um vazamento dependem de dados operacionais, como dados de pressão e de temperatura. Desta forma, é também objetivo da pesquisa avaliar o impacto destes na geometria do defletor de flange.

Por fim, vale destacar que a função do defletor estudado neste trabalho não está relacionada ao processo de detecção da nuvem, mas sim ao redirecionamento adequado da nuvem para uma região segura.

1.6 ESCOPO DO TRABALHO

A seção subsequente apresenta a modelagem matemática, a qual fornece os fundamentos teóricos necessários à descrição dos fenômenos físicos envolvidos. Em seguida,

na Seção 3, é desenvolvida a modelagem computacional, contemplando a formulação pelo método dos volumes finitos, bem como a definição da geometria e a seleção dos parâmetros de processo. Posteriormente, na Seção 4, são discutidos os resultados obtidos por meio das simulações de fluidodinâmica computacional e, por fim, são apresentadas as conclusões relativas à análise conduzida neste estudo.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática em CFD para gases ideais envolve um conjunto de equações fundamentais que descrevem o comportamento do fluido e o transporte das espécies em diferentes condições. Estas equações são baseadas nos princípios de conservação de massa, momento e energia, e são adaptadas para lidar com as características específicas dos gases ideais.

2.1 EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE - CONSERVAÇÃO DE MASSA

A equação de continuidade, também conhecida como equação da conservação de massa, é uma das equações fundamentais na modelagem de fluidos. Para um fluido compressível, como um gás ideal, a equação de continuidade é expressa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.1)$$

onde:

- ρ : densidade do fluido (kg/m^3);
- t : tempo (s);
- v : velocidade (m/s);
- S_m : termo fonte de adição/subtração de massa.

Essa equação descreve a conservação de massa a partir do campo de velocidades e, nos casos de escoamentos compressíveis, pela variação da densidade (15). Para fins deste trabalho, o fluido é tratado compressível.

2.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

As equações que descrevem a conservação da quantidade de movimento em um fluido, para um fluido newtoniano compressível, são:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.2)$$

onde:

- p : pressão;
- τ : tensor de tensões viscosas;

- g : aceleração da gravidade;
- F : forças externas

Estas equações são cruciais para modelar o comportamento dinâmico dos gases, incluindo a dispersão e o movimento em ambientes complexos como plataformas *offshore* (18).

2.3 TURBULÊNCIA - $k-\omega$

A modelagem matemática de turbulência desempenha um papel crucial na simulação de escoamentos complexos, especialmente em aplicações industriais como a dispersão de gases e combustão de hidrocarbonetos em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás, onde a grande maioria dos vazamentos de tubulações é do tipo turbulento.

O número de *Reynolds* (Re) é uma grandeza adimensional que caracteriza o regime de escoamento, sendo utilizado para distinguir entre escoamentos laminares, de transição e turbulentos (19). É definido pela Equação 2.3.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.3)$$

onde D é o diâmetro hidráulico ou característico (m) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($\text{Pa} \cdot \text{s}$). A viscosidade dinâmica (μ) do metano depende das condições de processo, mais especificamente da temperatura e pressão. Na seção de modelagem computacional é apresentado qual o valor da viscosidade dinâmica para os dados de processo do problema abordado.

A determinação do regime de escoamento turbulento segundo *Dimotakis* (20) é um número de Reynolds na faixa de 10^4 . As técnicas de modelagem de turbulência são fundamentais para simulações de CFD em estudos de dispersão de gases de hidrocarbonetos em plataformas *offshore*. Três abordagens principais são amplamente utilizadas: *Large Eddy Simulation* (LES), *Direct Numerical Simulation* (DNS) e *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS).

A simulação de grandes escalas (LES) é uma técnica que resolve as grandes escalas de turbulência diretamente, enquanto modela as menores escalas. O custo computacional do LES está diretamente relacionado à sua capacidade de resolver as grandes escalas de turbulência explicitamente, enquanto modela somente as menores escalas. Isso requer uma resolução de malha significativamente mais fina do que a típica em simulações RANS, resultando em um aumento substancial no número de células da malha computacional (21). Conseqüentemente, o tempo de processamento e os requisitos de memória aumentam drasticamente.

Por outro lado, a simulação numérica direta (DNS) resolve todas as escalas de turbulência, desde as maiores até as menores escalas dissipativas. Embora seja a abordagem mais precisa, seu custo computacional é proibitivo para a maioria das aplicações práticas em engenharia, especialmente em geometrias complexas como plataformas *offshore* (22).

Os modelos de turbulência baseados nas equações médias de Reynolds (RANS - *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) são amplamente utilizados em simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para aplicações industriais, incluindo a análise de dispersão de gases em plataformas offshore. Esses modelos oferecem um equilíbrio entre precisão e custo computacional, tornando-os adequados para simulações complexas em larga escala (15). A abordagem RANS será empregada neste trabalho.

A abordagem RANS baseia-se na decomposição de Reynolds, que separa as variáveis do fluxo em componentes médios e flutuantes. Esta decomposição, quando aplicada às equações de *Navier-Stokes*, resulta em termos adicionais conhecidos como tensões de Reynolds. Estes termos representam os efeitos da turbulência no fluxo médio e necessitam de modelagem adicional para fechar o sistema de equações (23).

Dentre os modelos da classe RANS, destaca-se o modelo $k - \epsilon$, que baseia-se no transporte da energia cinética turbulenta k e da taxa de dissipação da energia cinética ϵ . Este é especialmente útil em escoamentos internos (como em dutos e tubulações) e em situações onde o escoamento está longe das paredes. Todavia, prevê níveis excessivos de tensão de cisalhamento turbulenta, particularmente na presença de gradientes de pressão adversos (15). Para contornar essa limitação, tem-se o modelo de turbulência, também na categoria RANS, denominado $k - \omega$, que resolve, além da equação de transporte de k , a de transporte da frequência de turbulência ω (23). Todavia, o modelo $k - \omega$, além de ser sensível as condições de contorno de ω , tende a superestimar a turbulência no escoamento livre.

O modelo $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*), por sua vez, é um modelo importante da família de modelos RANS. Foi proposto por Menter (1994) (24) para combinar as vantagens dos modelos $k - \epsilon$ e $k - \omega$. Este modelo é particularmente eficaz em situações que envolvem gradientes de pressão adversos e separação de fluxo, características comuns em simulações de dispersão de gases em ambientes *offshore* complexos, oferecendo uma solução robusta para uma ampla gama de problemas de engenharia (25, 26).

O modelo $k - \omega$ SST foi desenvolvido para superar as limitações dos modelos $k - \epsilon$ e $k - \omega$ padrões. Ele utiliza o modelo $k - \omega$ na região próxima à parede, onde este é mais preciso, e transiciona para o modelo $k - \epsilon$ na região de escoamento livre, onde este apresenta melhor desempenho. Esta abordagem permite uma melhor predição do início e da quantidade de separação do escoamento sob gradientes de pressão adversos (24).

As equações fundamentais do modelo $k - \omega$ SST são baseadas em duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta (k) e outra para a taxa de dissipação

específica (ω). O valor de k é obtido segundo a Equação 2.4.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.4)$$

O valor de ω é dado pela Equação 2.5.

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (2.5)$$

onde:

- ρ é a densidade do fluido
- t é o tempo
- v_j é a componente da velocidade na direção j
- x_j é a coordenada espacial na direção j
- P_k é a produção de energia cinética turbulenta
- β^* e β são constantes do modelo
- μ é a viscosidade dinâmica
- μ_t é a viscosidade turbulenta
- σ_k e σ_ω são números de Prandtl turbulentos
- S é a magnitude da taxa de deformação
- F_1 é uma função de mistura
- $\sigma_{\omega 2}$ é uma constante do modelo

A função F_1 é escolhida de modo que seja nula na parede, tenda à unidade no campo distante e produza uma transição suave em torno de uma distância a meio caminho entre a parede e a borda da camada limite. Dessa forma, o método combina o bom comportamento próximo à parede do modelo $k - \omega$ com a robustez do modelo $k - \epsilon$ na região do escoamento livre, de forma numericamente estável (15).

A implementação do modelo $k - \omega$ SST inclui aprimoramentos adicionais, como correções de baixo número de Reynolds e tratamentos especiais para a transição laminar-turbulenta, tornando-o adequado para uma ampla gama de aplicações em engenharia, incluindo análises de risco e estudos de consequência em instalações *offshore* (12).

2.4 ENERGIA

Ao considerar um defletor de flange para direcionar a nuvem de hidrocarbonetos, as equações de energia ajudam a prever como a temperatura afeta a nuvem com a presença do defletor e como isso pode influenciar a dispersão do gás. Isso é particularmente importante para avaliar a eficácia do defletor em mitigar os riscos associados ao vazamento de metano.

A equação da energia é essencial para modelar processos que envolvem transferência de calor e os efeitos da temperatura sobre os demais parâmetros. Para um gás ideal, a energia é expressa pela Equação 2.6.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right) + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v} \left(h + \frac{v^2}{2} \right) \right) = \nabla \cdot \left((k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + \tau_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (2.6)$$

onde:

- T : temperatura;
- S_h : termo fonte de calor;
- k : condutividade térmica;
- k_{eff} : condutividade efetiva ($k + k_t$);
- k_t : condutividade turbulenta térmica;
- e : energia interna específica do fluido;
- h : entalpia específica do fluido;
- \vec{J}_j : fluxo difusivo da espécie j .

A condutividade efetiva (k_{eff}) é dada pela soma da condutividade (k), e da condutividade térmica turbulenta (k_t) definida conforme o modelo de turbulência utilizado (12).

Para um modelo que considera apenas a dispersão de metano sem combustão, alguns termos da Equação 2.6 podem ser simplificados. Por exemplo, o termo de calor da reação química no S_h seria zero, pois não há reação química ocorrendo.

Os três primeiros termos no lado direito da Equação 2.6 representam transferência de energia devido à condução, difusão de espécies e dissipação viscosa, respectivamente. No entanto, essa fonte de reação não se aplica à equação de entalpia total.

A entalpia da Equação 2.6 para gases ideais é definida segundo a Equação 2.7.

$$h = \sum_j Y_j h_j \quad (2.7)$$

onde:

- Y_j : fração mássica da espécie j ;
- h_j : calor sensível da espécie j .

O calor específico (h_j) da Equação 2.7 é a parte da entalpia que inclui somente mudanças na entalpia devido ao calor específico. É definido pela Equação 2.8.

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,T} dT \quad (2.8)$$

O valor da temperatura de referência (T_{ref}) depende do tipo de solucionador utilizado. O solucionador utilizado neste trabalho é o baseado em pressão (*pressure-based*, que será abordado em mais detalhes na Seção 3.3) e para ele o valor da temperatura de referência é 298,15 K.

A energia interna presente na Equação 2.6 (e_q) é definida como:

$$e = h - \frac{p_{op} + p}{\rho} \quad (2.9)$$

onde:

- p : pressão manométrica;
- p_{op} : pressão de operação.

2.5 TRANSPORTE DAS ESPÉCIES

A equação de transporte das espécies químicas para o caso de um gás ideal é uma equação fundamental na modelagem de escoamentos reativos e na dispersão de gases em simulações CFD. Esta equação descreve o transporte advectivo e difusivo da fração mássica para cada espécie química presente no sistema, considerando os processos de convecção, difusão e reação química (15).

A forma geral da equação de transporte das espécies para um gás ideal é dada pela Equação 2.10:

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (2.10)$$

onde:

- ρ é a densidade da mistura
- t é o tempo
- \vec{v} é o vetor velocidade
- \vec{J}_i é o fluxo de difusão da espécie i
- R_i é a taxa líquida de produção da espécie i por reação química
- S_i é a taxa de adição da espécie i a partir de fontes dispersas

O escoamento deste trabalho não apresenta reações químicas e nem fontes dispersas, devido a isso, os termos R_i e S_i são descartados da Equação 2.10.

A difusão mássica (\vec{J}_i) para escoamentos turbulentos é dada pela Equação 2.11

$$\vec{J}_i = - \left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_i - D_{T,j} \frac{\nabla T}{T} \quad (2.11)$$

onde μ_t é a viscosidade turbulenta e Sc_t é o número de *Schmidt* turbulento, obtido pela Equação 2.12.

$$Sc_t = \frac{\mu_t}{\rho D_t} \quad (2.12)$$

onde D_t é a difusividade turbulenta.

Para um modelo que considera apenas a dispersão de metano sem combustão, alguns termos da Equação 2.10 podem ser simplificados. Por exemplo, a taxa líquida de produção por reação química (R_i) seria zero, pois não há reação química ocorrendo.

Esta equação é crucial para a modelagem de dispersão de gases em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Ela permite a simulação precisa do comportamento das diferentes espécies químicas presentes no sistema, considerando os efeitos de transporte e reações químicas (12).

A modelagem matemática do transporte de gases ideais em cenários de dispersão em plataformas *offshore* envolve um sistema complexo de equações diferenciais parciais acopladas. A solução numérica destas equações, considerando as condições de contorno e iniciais apropriadas, permite a simulação detalhada dos fenômenos físicos e químicos relevantes para a análise de risco e estudos de consequência (12).

A aplicação desta equação em simulações CFD permite uma avaliação detalhada dos riscos associados a diferentes cenários de acidente em plataformas *offshore*. Por exemplo, é possível determinar a extensão de uma nuvem de gás inflamável resultante de um vazamento, ou prever a concentração de gases tóxicos em diferentes pontos da plataforma após um incidente, fornecendo informações valiosas para o projeto de sistemas de segurança e a elaboração de planos de emergência. (3).

2.6 DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA NUVEM

Apresentam-se nesta seção as equações necessárias para o cálculo de parâmetros importantes que ditam o comportamento da nuvem de hidrocarbonetos, como vazão mássica (\dot{m}), velocidade (c) e densidade (ρ), que servem para validar os resultados da análise CFD. Essa é uma prática comum em estudos de consequência envolvendo dispersão de gases (4).

O cálculo da vazão mássica, velocidade e densidade, depende diretamente do modelo utilizado para representar o fluido (gás ideal), das condições de processo (pressão, temperatura e composição) e do vazamento (área de vazamento). O cálculo da vazão mássica é importante pois determina a quantidade de massa por unidade de tempo decorrente do vazamento, de forma que quanto maior a vazão mássica, maior a nuvem de hidrocarbonetos.

Para fins deste trabalho, o fluido é tratado como gás ideal compressível. Esta abordagem é comumente utilizada em análises de dispersão de gases em estudos de consequências (4).

Para determinar se o metano pode ser tratado como gás ideal, é preciso avaliar o fator de compressibilidade (Z), que por sua vez, depende das condições de processo. Se Z estiver próximo de 1 (tipicamente entre 0,95 e 1,05), a aproximação de gás ideal é considerada válida (27). O fator de compressibilidade pode ser estimado utilizando diagramas de compressibilidade generalizados, que relacionam a pressão e temperatura reduzidas (27).

A densidade segundo o modelo de gás ideal compressível, importante para a equação de continuidade e obtenção do número de Reynolds, é dada pela Equação 2.13.

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (2.13)$$

O cálculo da vazão mássica e da velocidade ao tratar o metano como gás ideal depende se o escoamento é do tipo estrangulado (*choked*) ou não estrangulado. Um escoamento é do tipo estrangulado se a pressão de operação (P) é superior à pressão de estrangulamento (P_{choked}), definida pela Equação 2.14. A pressão de estrangulamento depende da pressão de operação e da razão de calores específicos (γ), que é aproximadamente 1,32 para o metano (4).

$$\frac{P_{choked}}{P} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (2.14)$$

A vazão mássica depende de fatores relacionados às condições de processo da tubulação (como pressão e temperatura); da composição da nuvem de hidrocarbonetos, como massa molar (M) e razão entre calores específicos (γ); do modelo utilizado, como a

constante universal dos gases ideais (R); e ao vazamento, como área de vazamento e do coeficiente de descarga (C_d). A vazão mássica pode ser calculada usando a equação para escoamento crítico (estrangulado) segundo a Equação 2.15 (4):

$$\dot{m} = C_d \cdot A \cdot P_1 \cdot \sqrt{\frac{\gamma M}{RT} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (2.15)$$

sendo \dot{m} a vazão mássica e A a área do orifício de vazamento.

onde:

- $M \approx 16,04 \text{ g/mol}$ (28)
- $R \approx 8,314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ (29).

Para um vazamento do tipo estrangulado, a velocidade do vazamento é definida como a velocidade do som (c), obtida através da Equação 2.16 (4):

$$c = \sqrt{\gamma RT/M} \quad (2.16)$$

A partir dos cálculos demonstrados nessa seção, é possível validar os resultados das simulações CFD ao comparar os valores calculados analiticamente com as simulações.

2.7 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

O princípio fundamental da CFD baseia-se na resolução numérica das equações governantes da mecânica dos fluidos, que incluem as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Estas equações, conhecidas como equações de *Navier-Stokes*, são um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares que descrevem o movimento dos fluidos (18).

O método dos volumes finitos (MVF) é uma técnica numérica amplamente utilizada na resolução de problemas de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), especialmente em aplicações envolvendo a dispersão de gases de hidrocarbonetos em plataformas offshore de produção de óleo e gás. Este método é particularmente adequado para a simulação de fenômenos de transporte, como a dispersão de gases, devido à sua capacidade de garantir a conservação das propriedades físicas ao nível discreto (15).

O MVF baseia-se na discretização do domínio computacional em um conjunto de volumes de controle, nos quais as equações governantes são integradas. Essa abordagem permite uma representação física direta dos princípios de conservação, como massa, quantidade de movimento e energia, em cada volume de controle (18). A discretização espacial resultante leva a um sistema de equações algébricas que pode ser resolvido

numericamente. Complementam as equações diferenciais parciais as condições de contorno e as condições iniciais, incorporadas na solução do sistema de equações algébricas.

A qualidade da malha é um aspecto fundamental na aplicação bem-sucedida da CFD. A malha, também conhecida como *grid* ou *mesh*, é a representação discretizada do domínio computacional sobre o qual as equações governantes são resolvidas. A precisão e a estabilidade das simulações CFD dependem significativamente da qualidade da malha utilizada (30).

As malhas podem ser classificadas em três categorias principais: estruturadas, não estruturadas e híbridas. As malhas estruturadas são caracterizadas por uma conectividade regular entre os elementos, geralmente formando um padrão retilíneo. As malhas não estruturadas, por outro lado, apresentam uma conectividade irregular entre os elementos, oferecendo maior flexibilidade para representar geometrias complexas. As malhas híbridas combinam características de ambas, utilizando malhas estruturadas em algumas regiões e não estruturadas em outras (26).

A qualidade da malha é avaliada por meio de diversos parâmetros, cada um refletindo diferentes aspectos da discretização espacial. Alguns dos principais parâmetros de qualidade de malha incluem:

- Razão de aspecto (*Aspect Ratio*): É a razão entre a maior e a menor dimensão de um elemento da malha. Idealmente, esta razão deve ser próxima de 1, especialmente em regiões de alto gradiente;
- Assimetria (*Skewness*): Mede o desvio de um elemento em relação à sua forma ideal (equilateral ou equiangular). A obliquidade varia de 0 (excelente) a 1 (inaceitável);
- Qualidade ortogonal (Ortogonalidade): Avalia o ângulo entre as faces dos elementos adjacentes ou entre uma face e a linha que conecta os centroides dos elementos vizinhos. Valores próximos a 1 indicam melhor qualidade;

Os parâmetros de qualidade da malha influenciam diretamente a precisão e a estabilidade das simulações CFD. Por exemplo, elementos com alta obliquidade podem levar a erros de discretização e problemas de convergência. Isto ocorre porque a obliquidade afeta a interpolação e o cálculo de gradientes, podendo resultar em aproximações imprecisas das equações governantes (30)

A ortogonalidade da malha é particularmente importante em simulações que envolvem escoamentos próximos a paredes, como é comum em estudos de dispersão de gases em plataformas *offshore*. Uma malha com baixa ortogonalidade próximo de paredes pode comprometer a precisão dos modelos de turbulência e das funções de parede utilizadas (30)

Em aplicações *offshore*, como a simulação de dispersão de gases ou combustão de hidrocarbonetos, a qualidade da malha é crucial para capturar adequadamente os fenômenos físicos relevantes. Por exemplo, em análises de dispersão de gases, é necessário um refinamento adequado da malha nas regiões próximas às fontes de liberação e em áreas onde se esperam altos gradientes de concentração (16).

A qualidade da malha é um aspecto crítico na aplicação do CFD para análise de riscos em plataformas *offshore*. Uma malha bem projetada e de alta qualidade é essencial para garantir resultados precisos e confiáveis em simulações de dispersão de gases e combustão de hidrocarbonetos, fundamentais para estudos de consequências e análises de risco neste setor.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Esta seção descreve as etapas da construção do modelo computacional para as simulações pretendidas na pesquisa, cujo objetivo é analisar o efeito da instalação de um defletor no flange, posicionado de modo a direcionar a nuvem de hidrocarbonetos resultante de um possível vazamento para uma região de menor risco, mesmo sob efeito do vento que tenta direcionar a nuvem para o sentido inicial do vazamento.

O defletor de flange é posicionado no centro do flange e possui formato retangular, permitindo uma folga entre as paredes do defletor e o flange. O defletor possui uma abertura em uma de suas faces laterais, de forma a não confinar a nuvem de hidrocarbonetos (potencialmente explosiva).

Cabe ressaltar que toda a modelagem computacional foi desenvolvida ao utilizar as ferramentas do *Ansys Workbench*. O processo de modelagem seguiu as seguintes etapas principais:

1. Escolha dos dados de processo e vazamento;
2. Escolha da tubulação e flange representativos;
3. Modelagem numérica;
4. Modelagem geométrica;
5. Condições de contorno e modelos utilizados;
6. Malha.

3.1 ESCOLHA DOS DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO E DA TUBULAÇÃO E FLANGE

A seleção adequada de parâmetros de condições de contorno ou iniciais é fundamental para a realização de simulações representativas e confiáveis, especialmente no contexto de análises de risco e estudos de consequência em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. As condições iniciais empregadas na simulação correspondem aos parâmetros operacionais da tubulação analisada, abrangendo a temperatura, a pressão e a composição do fluido transportado.

Para os propósitos deste estudo, adotam-se as condições de processo utilizadas no trabalho de Siqueira (31):

- Pressão (P1): 20 bar = 2 MPa;
- Temperatura (T): 100 °C = 373,15 K;

- Diâmetro de vazamento: 1 polegada = 0,0254 m;
- Composição: Metano e ar.

Como este estudo está preocupado com a dispersão da nuvem de hidrocarbonetos sem considerar efeitos de combustão, o vazamento pode ser composto inteiramente de metano, sem a presença de algum comburente, como o oxigênio, por exemplo.

Primeiramente, é importante considerar que o metano é o principal componente do gás natural, representando tipicamente entre 70% e 90% de sua composição (32). A escolha de uma corrente de metano para a simulação representa uma simplificação conservadora, que permite focar nos efeitos do componente mais crítico em termos de inflamabilidade e explosividade, sem a complexidade adicional de uma mistura multicomponente.

A pressão de 20 bar (aproximadamente 2 MPa) é representativa de condições que podem ser encontradas em sistemas de pressão moderada em plataformas *offshore*. Esta pressão está acima da pressão atmosférica, o que é típico em muitos cenários de vazamento, mas não tão elevada a ponto de resultar em efeitos de expansão extremos que poderiam complicar a modelagem (4).

A temperatura de 100 °C (373,15 K) é igualmente significativa. Primeiramente, esta temperatura é igual ao ponto de ebulição da água à pressão atmosférica, o que é comum em muitos processos industriais. Além disso, para o metano, que tem uma temperatura crítica de -82,6 °C, esta condição assegura que o gás esteja no estado supercrítico, simplificando a modelagem ao evitar considerações de mudança de fase (27).

A escolha de uma pressão de 20 bar, temperatura de 100 °C e composição metano para simulações CFD em estudos de dispersão de gases e análise de risco em plataformas *offshore* representa um conjunto de parâmetros realista, conservador e adequado para a modelagem. Estes parâmetros permitem uma análise robusta dos fenômenos de interesse, mantendo a complexidade do modelo em um nível gerenciável, ao mesmo tempo em que fornecem informações valiosas para a avaliação de cenários de risco e o desenvolvimento de medidas de segurança. O metano tem um limite inferior de inflamabilidade (LFL) de aproximadamente 5% em volume no ar, e nestas condições, uma liberação acidental poderia rapidamente formar uma nuvem inflamável (33).

Na indústria de óleo e gás *offshore*, a seleção adequada de diâmetros de tubulações e flanges é crucial para garantir a eficiência e segurança das operações, especialmente quando se trata do transporte de metano em condições específicas de pressão e temperatura. Para o cenário descrito, com metano a uma pressão de 2 MPa (aproximadamente 20 bar) e temperatura de 373 K (100°C), é importante considerar os padrões da indústria e as características do fluido.

De acordo com Mokhatab (34), os diâmetros de tubulação comumente utilizados em plataformas *offshore* para o transporte de gás natural (composto majoritariamente por

metano) variam de 2 a 48 polegadas, dependendo da vazão e da pressão de operação. No entanto, para as condições específicas mencionadas, que indicam uma pressão relativamente moderada, os diâmetros mais comuns estariam na faixa de 6 a 12 polegadas (35).

Para flanges, os tamanhos acompanham normalmente os diâmetros das tubulações às quais estão conectados. Segundo Smith e Van Laan (36), os flanges mais utilizados em sistemas de gás natural seguem as normas ASME B16.5 ou API 6A, com classes de pressão que variam de 150# a 2500#. Considerando a pressão de 2 MPa (20 bar), flanges de classe 300# seriam suficientes para esta aplicação (35).

A classificação em classes dos flanges em tubulações é um sistema padronizado que visa estabelecer critérios de projeto, fabricação e seleção de componentes para sistemas de tubulação, considerando as condições operacionais e os requisitos de segurança. Essa classificação é fundamental para garantir a integridade e confiabilidade dos sistemas de tubulação, especialmente em ambientes industriais complexos como plataformas *offshore* de produção de óleo e gás (37).

Considerando uma aplicação típica em uma plataforma *offshore* para transporte de hidrocarbonetos, onde a segurança é primordial, uma escolha conservadora seria optar por um flange de 8 polegadas de classe 300# ou 600#, dependendo das condições específicas de pressão e temperatura do sistema (35).

Para uma tubulação nominal de 8 em ambiente *offshore*, adotou-se um flange classe 300# conforme ASME B16.5 (35), com diâmetro externo de 15 polegadas, adequado para transporte de metano a 20 bar e 100 °C. As dimensões empregadas neste trabalho são as seguintes:

- Diâmetro nominal: 8 polegadas (203,2 mm);
- Diâmetro externo: 15 polegadas (381,0 mm);
- Espessura: aproximadamente 1,25 polegadas (31,75 mm);

Essas dimensões proporcionariam uma conexão robusta e segura para a tubulação de 8 polegadas, adequada para muitas aplicações em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás.

3.2 CONDIÇÕES DO VAZAMENTO

Nesta seção são apresentados cálculos analíticos para a obtenção de parâmetros que determinam o comportamento da dispersão da nuvem de hidrocarbonetos. Esses cálculos serão utilizados para validar os resultados das simulações computacionais.

O vazamento representado neste trabalho utiliza o modelo de gás ideal e os dados de processo descritos na Seção 3.1. Para verificar se essa aproximação é válida segundo as condições de processo consideradas, é preciso avaliar o fator de compressibilidade.

Segundo Smith *et. al.* (38), nas condições de operações utilizadas, o fator de compressibilidade do metano (Z) é próximo de 1, o que implica que as equações de gases ideais predizem de forma suficiente o comportamento do gás.

Os valores das propriedades do metano quando tratado como gás ideal seguem abaixo (4):

- Razão entre calores específicos (γ) $\approx 1,32$;
- Constante universal dos gases ideais (R) $\approx 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;
- Massa molar (M) $\approx 16,04 \text{ g/mol}$

Para representação do vazamento, é avaliado um vazamento circular de 1 polegada de diâmetro através de falha na junta do flange. Segundo *Center for Chemical Process Safety* (33) para tubulações 8 polegadas 25 mm (1 polegada) é um valor comum de diâmetro de vazamento.

Para determinar os valores estimados de vazão mássica, velocidade, densidade e o número de *Reynolds* e obter prever o comportamento da nuvem no vazamento, é preciso obter a área de vazamento. Segundo o diâmetro de vazamento definido, a área de vazamento é dada por:

$$A = \pi \cdot (d/2)^2 = \pi \cdot (0,0254/2)^2 = 5,067 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Os valores de velocidade e vazão mássica dependem diretamente do regime de escoamento, podendo ser do tipo estrangulado ou não estrangulado. Caso a pressão de operação seja maior que a pressão de estrangulamento, considera-se que o escoamento é estrangulado.

A pressão de estrangulamento nas condições fornecidas é calculada segundo a Equação (2.14) e seu resultado é:

$$P_{choked} = 10,83 \text{ bar}$$

Como a pressão de operação (20 bar) é superior a pressão de estrangulamento, isso implica que o vazamento é do tipo estrangulado.

Para o tipo estrangulado, a vazão mássica é calculada através da Equação (2.15):

$$\dot{m} = 0,96 \text{ kg/s}$$

Esse valor de vazão mássica próximo de 1 kg/s representa um vazamento entre pequeno e médio, com isso os efeitos de vento terão maior impacto na nuvem de hidrocarbonetos. Vazamentos com uma vazão mássica menor poderiam acarretar em um maior confinamento da nuvem de hidrocarbonetos no defletor de flange e menor dispersão da nuvem na direção oposta ao vazamento.

Este trabalho consiste em avaliar somente um conjunto de dados de processo (pressão, temperatura e composição de hidrocarbonetos da tubulação) e área de vazamento, o que implica em somente um valor de vazão mássica, que para este trabalho é dado em consequência dos demais parâmetros. Outras condições de processo e área de vazamento serão abordados em trabalhos futuros.

Cabe ressaltar que a utilização do defletor de flange não está associada com a detecção da nuvem de hidrocarbonetos, e sim com o direcionamento da nuvem para uma região pré-estabelecida. Nesse sentido, a avaliação da vazão mássica consistiu em encontrar um equilíbrio entre uma vazão pequena o suficiente para observar os efeitos do vento e grande o suficiente para observar a dispersão da nuvem a uma distância considerável do defletor.

A maneira como o defletor de flange é utilizado em situações práticas vai depender de cada instalação e não é escopo do trabalho avaliar o defletor de flange para o cenário mais crítico possível para cada instalação, e sim avaliar o efeito deste sobre uma nuvem de hidrocarbonetos com vento em direção contrária.

Como o escoamento é do tipo estrangulado, a velocidade do vazamento é igual à velocidade do som. Ao utilizar as condições de processo é possível calcular a velocidade do vazamento pela Equação 2.16:

$$c = 505,28 \text{ m/s}$$

Para obter o número de Reynolds 2.3, é preciso calcular a densidade, que para gases ideais é dada pela Equação 2.13:

$$\rho = 10,34 \text{ kg/s}$$

Para o cálculo do número de Reynolds no vazamento, é preciso do dado de viscosidade dinâmica. Segundo Yaws (39), para a temperatura de operação, a viscosidade dinâmica do metano é aproximadamente $1,34 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Ao utilizar os dados de densidade, velocidade e viscosidade dinâmica, é possível obter o número de Reynolds através da Equação 2.3:

$$Re = 9.903.787$$

Como o número de Reynolds está na faixa de 10^6 (superior a 10^4), o escoamento é do tipo turbulento, sendo necessário tratar os efeitos da turbulência na análise computacional, representada pelo modelo de turbulência $k - \omega SST$.

Os resultados apresentados nesta seção consistem em um cálculo analítico e visam prever o comportamento da dispersão do gás, esses resultados servirão como base para comparação com os resultados das simulações computacionais.

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA

Para este trabalho, foi utilizada a ferramenta *Ansys Fluent*, um software de simulação numérica baseado no método dos volumes finitos, capaz de resolver as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia em geometrias complexas. Sua versatilidade permite a aplicação em uma ampla gama de problemas, desde aerodinâmica e hidrodinâmica até combustão e dispersão de gases, tornando-o particularmente relevante para estudos de segurança em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás (12).

A escolha do programa em detrimento de outros, fundamentou-se principalmente nos seguintes aspectos:

- Conformidade com padrões da indústria: Pode ser necessário em setores regulamentados que exigem o uso de software comercial validado;
- Pós-processamento avançado: Ferramentas de visualização e análise mais sofisticadas integradas ao software;
- Modelos físicos pré-configurados: Inclui uma ampla gama de modelos físicos prontos para uso, economizando tempo na configuração de simulações complexas;
- Integração com outras ferramentas: Permite a importação de geometrias complexas e integração com outros softwares da suíte *Ansys*;
- Capacidade de lidar com geometrias complexas através do uso de malhas não estruturadas;
- Permitir a utilização do modelo de turbulência $k - \omega SST$;
- Permitir realizar uma análise fluido-estrutura robusta (tema para trabalhos futuros);

O software oferece uma variedade de modelos físicos para representar fenômenos como turbulência, reações químicas, transferência de calor e escoamentos multifásicos. No contexto da análise de risco e estudos de consequência em plataformas *offshore*, o *Ansys Fluent* permite a simulação de cenários críticos, como a dispersão de gases inflamáveis ou tóxicos (12).

Uma das características fundamentais do *Ansys Fluent* é sua capacidade de lidar com diferentes geometrias através do uso de malhas não estruturadas. Isso é particularmente vantajoso na modelagem de plataformas *offshore*, que frequentemente apresentam geometrias complexas de equipamentos e de estruturas. A flexibilidade na geração de malhas permite uma representação mais precisa da geometria real, contribuindo para resultados mais confiáveis (12).

O processo de simulação no *Ansys Fluent* envolve geralmente as seguintes etapas:

1. Definição da geometria do problema;
2. Geração da malha computacional;
3. Seleção dos modelos físicos apropriados;
4. Especificação das condições de contorno e iniciais;
5. Configuração dos parâmetros de solução;
6. Execução da simulação;
7. Pós-processamento e análise dos resultados.

Para problemas envolvendo a dispersão de gases em plataformas *offshore*, o *Ansys Fluent* oferece modelos específicos, como o modelo de transporte de espécies químicas, que permite a simulação do movimento e da diluição de gases na atmosfera. Além disso, modelos de turbulência, como o $k - \epsilon$, $k - \omega$ e o $k - \omega SST$, podem ser empregados para representar com precisão o comportamento do escoamento em ambientes complexos (12).

O *Ansys Fluent* representa um avanço significativo na capacidade de modelar e prever fenômenos complexos relacionados à segurança em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás. Sua aplicação em estudos de dispersão de gases e combustão de hidrocarbonetos contribui para uma compreensão mais profunda dos riscos associados a essas operações, auxiliando no desenvolvimento de estratégias mais eficazes de prevenção e mitigação de acidentes.

É importante ressaltar que, embora o *Ansys Fluent* seja uma ferramenta poderosa, a qualidade dos resultados depende significativamente da expertise do usuário na definição do problema, na seleção dos modelos apropriados e na interpretação dos resultados. Além disso, a comparação das simulações com outras metodologias de cálculo é fundamental para garantir a confiabilidade das análises de risco baseadas em CFD (40).

A versão utilizada para realizar as análises deste trabalho foi a *Ansys Student 2025 R1*. Isso implica em uma limitação de 1.000.000 de elementos de malha, que por sua vez vai exigir a aplicação de técnicas de refinamento de malha e simplificação computacional.

O solucionador utilizado é o *"pressure-based"* acoplado (*"coupled"*), um algoritmo que pertence a uma classe geral de métodos denominados métodos de projeção (41). Nesse método, a restrição de conservação de massa (continuidade) do campo de velocidade é alcançada pela resolução de uma equação de pressão (ou correção de pressão). A equação de pressão é derivada das equações de continuidade e quantidade de movimento de tal forma que o campo de velocidade, corrigido pela pressão, satisfaça a continuidade. Como as equações governantes são não lineares e acopladas entre si, o processo de solução envolve iterações em que todo o conjunto de equações governantes é resolvido repetidamente até que a solução convirja (12).

No método acoplado baseado em pressão, as equações de momento e a equação de continuidade (formulada em função da pressão) são resolvidas simultaneamente num único sistema. Dessa forma, elimina-se a sequência de etapas segregadas, concentrando-se em uma única etapa de solução do sistema acoplado. As demais equações de transporte continuam sendo tratadas de forma desacoplada ao conjunto pressão-velocidade (12).

A discretização espacial utilizada foi a *Second Order Upwind*, de segunda ordem. Esse método de discretização foi escolhido devido a uma maior precisão ao comparar com métodos de primeira ordem, que introduzem erros de difusão numérica. Ele também possui uma melhor estabilidade no cálculo de gradientes quando comparado com o método das diferenças centrais, e pode ser aplicado à malhas não-estruturadas.

O *Second Order Upwind* é utilizado quando deseja-se precisão de segunda ordem, as grandezas nas faces das células são calculadas utilizando uma abordagem de reconstrução linear multidimensional. Nessa abordagem, a precisão de ordem superior é alcançada nas faces das células por meio de uma expansão em série de Taylor da solução centrada na célula em torno do centroide da célula (12).

A avaliação dos gradientes é feita através do *Least Square Cell Based*. Neste método, assume-se que a solução varia linearmente. O objetivo do método é determinar o gradiente da célula resolvendo o problema de minimização para o sistema da matriz de coeficientes não quadrada no sentido de mínimos quadrados. O sistema linear de equações é sobredeterminado e pode ser resolvido decompondo a matriz de coeficientes usando o processo de *Gram-Schmidt*. Essa decomposição produz uma matriz de pesos para cada célula. Assim, para o esquema centrado na célula, isso significa que os três componentes dos pesos são produzidos para cada uma das faces da célula (12).

O método Least Squares Cell-Based foi adotado em vez de abordagens como o Green-Gauss, pois apresenta maior precisão em malhas não estruturadas — ao passo que o Green-Gauss é sensível à qualidade e ortogonalidade dos elementos. Além disso, o Least Squares Cell-Based é compatível com esquemas de discretização de segunda ordem (ou superiores), como o Second Order Upwind, e tende a oferecer soluções mais estáveis.

O parâmetro de convergência dos resultados das simulações é um resíduo inferior

a 10^{-3} de uma iteração para outra. A simulação é do tipo estacionária que utiliza um pseudo-passo de tempo ("*pseudo-time step*"), visto que, a pretensão da análise é avaliar somente o estado da nuvem já desenvolvida, além do fato da simulação estacionária ser muito mais rápida quando comparada com a transiente.

Para as simulações, foi utilizada a formulação global do passo de tempo (*global time step method*) que utiliza o método de pseudotempo (*pseudo-time*), uma forma avançada de sub-relaxamento implícito que ajusta o fator de relaxamento dinamicamente durante a simulação de acordo com o comportamento do campo de fluxo. Ela utiliza um único tamanho de passo de pseudotempo para todo o domínio e para as simulações deste trabalho o *Ansys Fluent* calcula esse passo automaticamente (12).

A formulação temporal foi adotada por converter o problema estacionário em um processo transiente artificial, o que permite o emprego de integradores explícitos — como *Euler* e *Runge-Kutta*. Essa estratégia acelera a convergência e confere maior robustez e estabilidade ao solver, em comparação com a resolução direta do sistema estacionário.

A máquina utilizada para realizar as simulações dispõe das seguintes configurações:

- Processador: Intel(R) Core(TM) i5-8265U CPU @ 1.60GHz, com 4 núcleos, e 8 processadores lógicos;
- GPU: Intel(R) UHD Graphics 620, com memória de 4 GB,
- Memória RAM de 8GB;
- Armazenamento: SSD NVMe, HDD SATA

3.4 MODELAGEM GEOMÉTRICA

O objetivo desse trabalho é avaliar como o defletor de flange impacta na dispersão de nuvem de hidrocarbonetos. Para tal, foi confeccionado um defletor de flange em torno de uma tubulação, de forma que o defletor impeça a nuvem de hidrocarboneto de atingir uma determinada região, classificada como uma região de alto risco.

A geometria foi desenvolvida no software *SpaceClaim*, do *Ansys Workbench*. Esse software permite a confecção de *scripts* que permite a parametrização do modelo geométrico e já importa um modelo totalmente compatível com as ferramentas de confecção de malha do *Ansys Workbench*.

A modelagem geométrica para este estudo é dividida nas seguintes etapas:

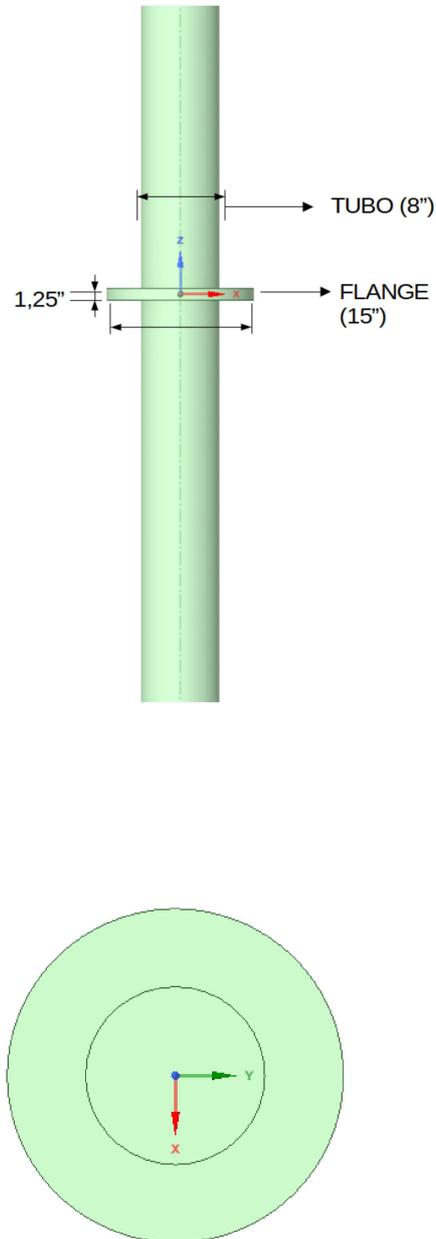
1. Modelagem da tubulação e do flange;
2. Modelagem do vazamento;

3. Modelagem do flange;
4. Modelagem do domínio computacional;

As dimensões utilizadas seguem abaixo. Ressalta-se que a espessura do tubo já está incorporada no valor do diâmetro informado. A altura não foi informada pois depende do tamanho do domínio computacional, que por sua vez será detalhado a seguir. A Figura 2 ilustra a geometria da tubulação e do flange, conforme as dimensões estabelecidas.

- Diâmetro do tubo: 8 polegadas;
- Diâmetro do flange: 15 polegadas;
- Espessura do flange: 1,25 polegadas.

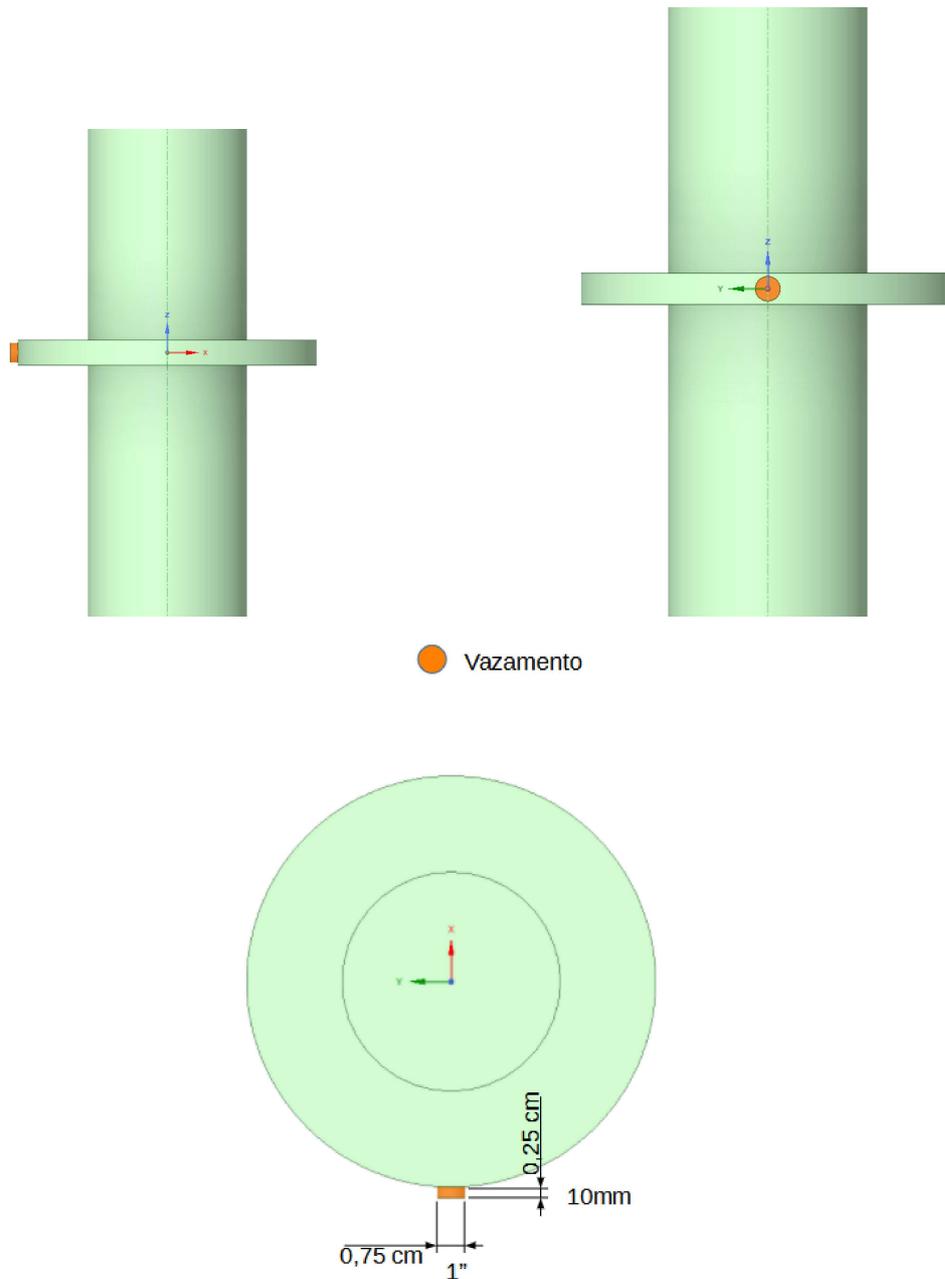
Figura 2 – Modelo geométrico da tubulação e do flange



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

O vazamento foi modelado como uma seção circular no flange, como demonstrado pela região destacada em laranja na Figura 3. O vazamento, por sua vez, ocorre de fato na seção circular perpendicular ao eixo x , no sentido negativo; as demais partes do vazamento são necessárias apenas para fins de modelagem.

Figura 3 – Modelo geométrico do vazamento



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

O defletor de flange foi modelado como uma caixa retangular em torno do flange, com uma abertura que permite direcionar a nuvem de hidrocarbonetos para uma região de menor risco, assim como é possível observar na Figura 4. As dimensões do defletor de flange seguem abaixo. Na Figura 5 é possível observar o defletor de flange ao realizar um corte na seção transversal do plano zx .

- Comprimento do defletor de flange: 1,5 m;

- Largura do defletor de flange: 0,9 m;
- Altura do defletor de flange: 1,5 m;
- Espessura do defletor de flange: 30 cm.

Sua função consiste em impedir que a nuvem de hidrocarbonetos atinja uma região de risco, atuando como uma parede de contenção que irá direcionar a nuvem de hidrocarbonetos na direção oposta. A abertura é para impedir o acúmulo de gases inflamáveis em uma região confinada e direcionar essa nuvem para uma região de menor risco e aberta, minimizando os riscos de uma explosão em uma região de alto risco.

Figura 4 – Modelo geométrico do defletor de flange

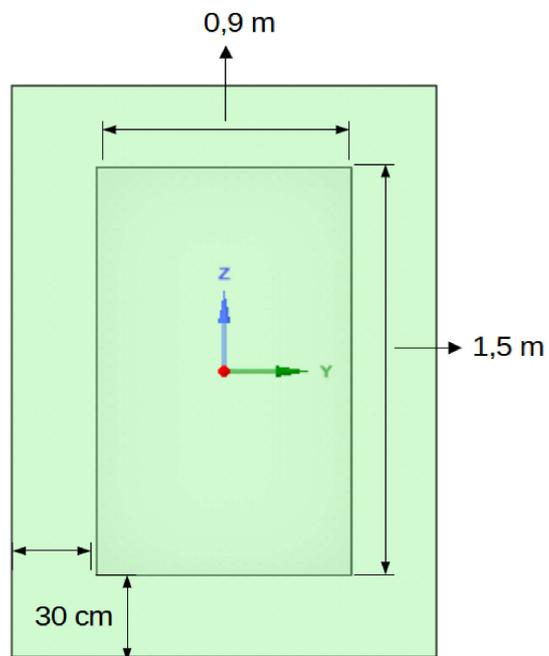
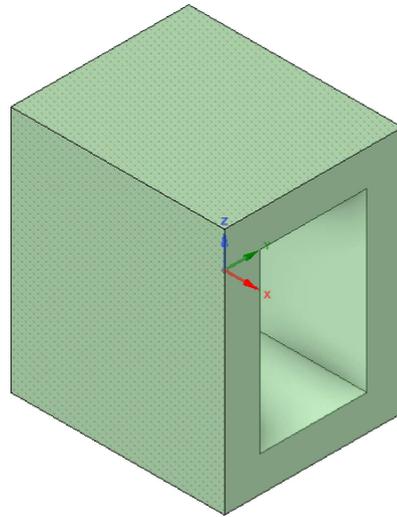
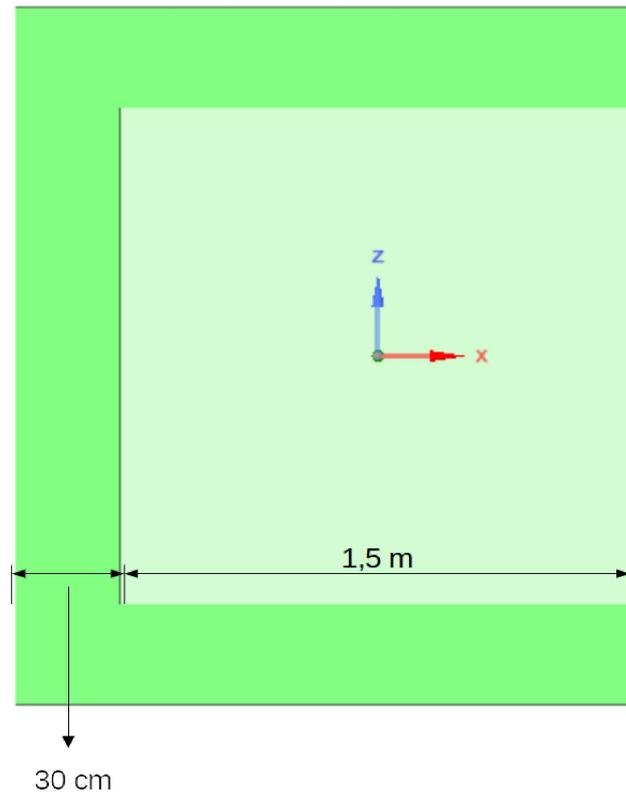


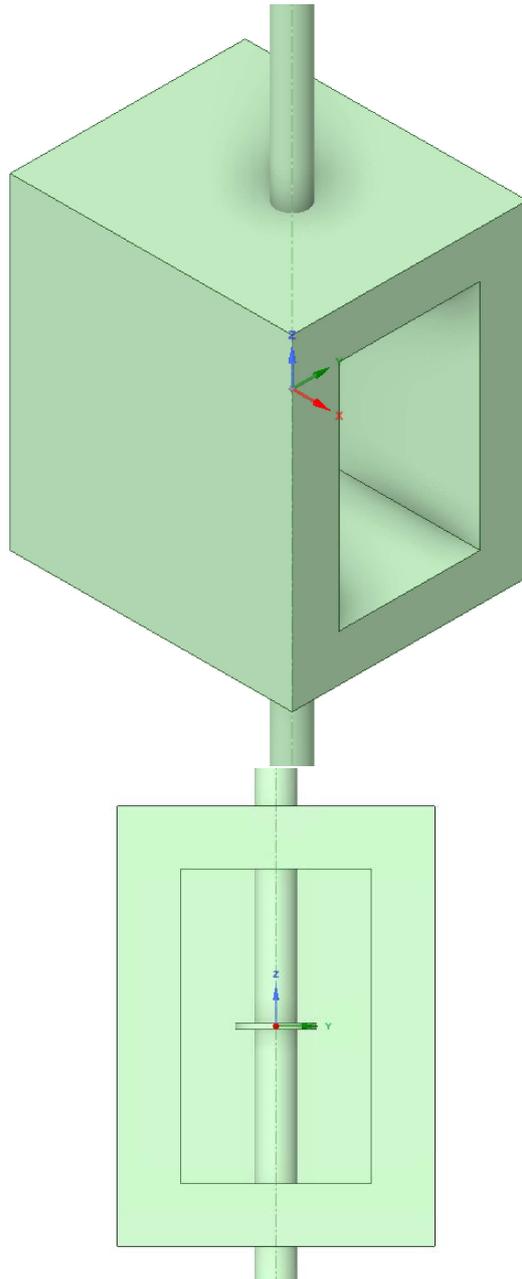
Figura 5 – Modelo geométrico do defletor de flange com corte transversal no plano zx



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

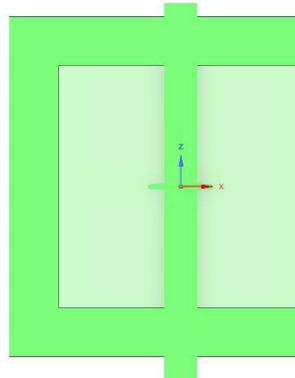
Na Figura 6 é possível observar o modelo geométrico contendo todas as partes, a tubulação, o flange, o vazamento e o defletor. Na Figura 7 têm-se o defletor de flange com a tubulação e o flange ao realizar um corte na seção transversal do plano zx .

Figura 6 – Modelo geométrico do defletor de flange com tubo e flange



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 7 – Modelo geométrico do defletor de flange com tubo e flange com corte transversal no plano zx

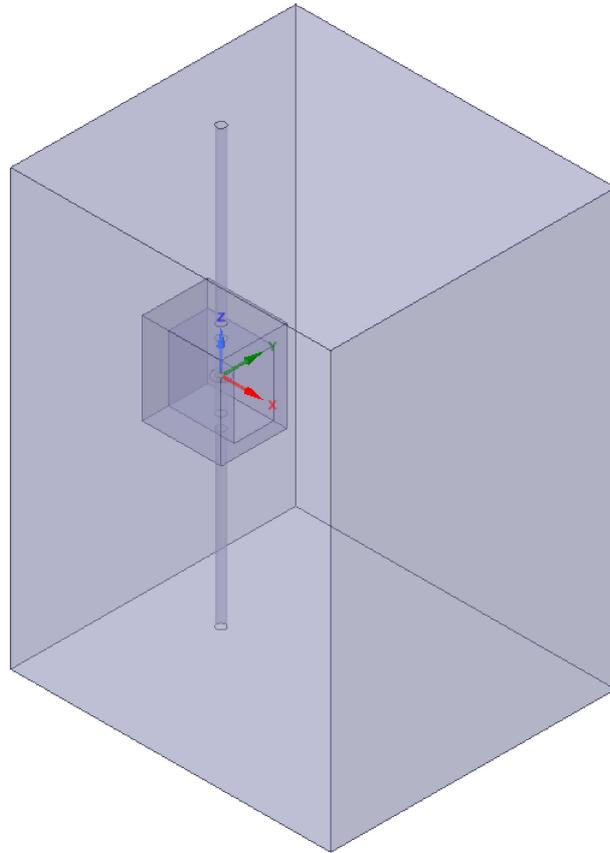


Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Cabe ressaltar que para uma simulação CFD, é necessário o domínio externo a tubulação e o flange, que é onde de fato o fluido será transportado. O domínio para este estudo é desenvolvido a partir de uma ferramenta do *SpaceClaim* denominada *Enclosure*, que constrói o domínio de forma automática, sendo necessário apenas informar qual a distância das paredes do domínio em relação ao modelo geométrico. Na Figura 8 é possível observar uma vista em perspectiva e lateral (plano zx) do domínio utilizado para realizar as simulações.

As dimensões são definidas como o espaçamento a partir da última entidade de geometria, ou seja, caso seja definido um tamanho de *enclosure* de 5 m da direção $-x$ significa que essa distância se dá somente a partir do final da parede do defletor de flange. Ressalta-se que, para as direções z e $-z$, a altura em cada uma das direções é equivalente a metade do comprimento da tubulação. As dimensões externas ao domínio (*enclosure*) utilizadas seguem abaixo:

- $x = 5$ m;
- $-x = 0,5$ m;
- $y = -y = 2,5$ m;
- $z = -z = 0$ m;
- Comprimento do tubo após o defletor: 10 m.

Figura 8 – Domínio computacional gerado a partir do comando *enclosure*

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

A versão estudantil do *Ansys* limita o número máximo de elementos na malha. Uma das maneiras de diminuir a quantidade de elementos na malha de forma a não prejudicar os resultados é através de um plano de simetria. Para este trabalho, gerou-se um plano de simetria na direção y , visto que os resultados da direção $+y$ podem ser replicados para a direção $-y$.

Outra maneira de diminuir a quantidade de elementos sem prejudicar os resultados é reduzir o domínio na direção $-z$, visto que a densidade de uma nuvem de hidrocarbonetos de metano no estado gasoso é inferior ao do ar, espera-se que a nuvem siga na direção $+z$, tornando possível a simplificação no plano $-z$.

Como a função do defletor consiste garantir que a nuvem de hidrocarbonetos não é redirecionada para a direção inicial do vazamento, é possível também realizar uma redução do domínio na direção $-x$, visto que a eficácia do defletor é contestada se a nuvem de hidrocarbonetos conseguir ultrapassar a parede do defletor.

Após as modificações citadas, o domínio computacional reduz-se como nas Figuras 9 e 10, e suas dimensões finais (a partir da parede do defletor) são:

- $+x = 5$ m;
- $-x = 0,5$ m;
- $+y = 2,5$ m;
- $+z = 5$ m;
- $-z = 0,5$ m;

Cabe ressaltar que a dimensão na direção $-y$ não foi informada pois o corte para a simetria ocorreu no plano zx com $y = 0$ m, ou seja, o domínio não possui coordenadas na direção $-y$.

Figura 9 – Domínio computacional gerado para realização das simulações

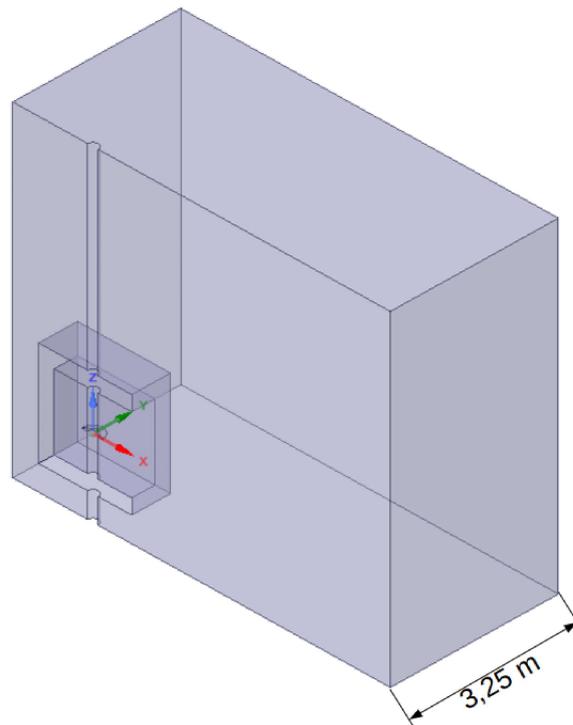
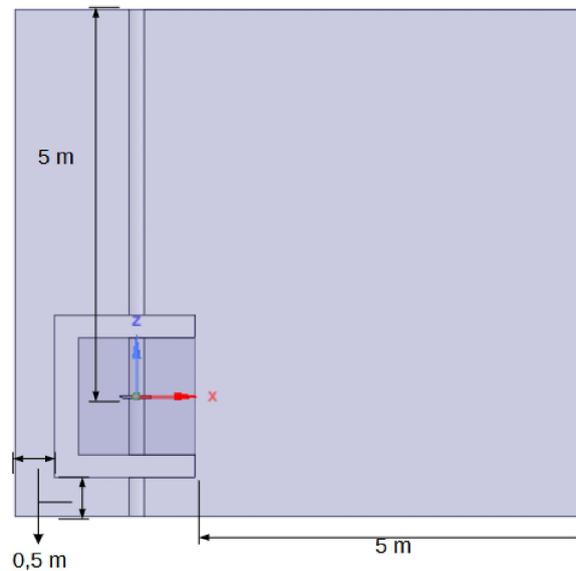


Figura 10 – Domínio computacional gerado para realização das simulações com corte transversal no plano zx



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

3.4.1 Modelo 2D

Visando realizar uma análise preliminar e avaliar os efeitos das condições de processo de maneira mais rápida, foi elaborado um modelo bidimensional. Este consiste na tentativa de representar um modelo simplificado, visto que devido na versão do *Ansys Student*, há uma limitação na quantidade de elementos de malha.

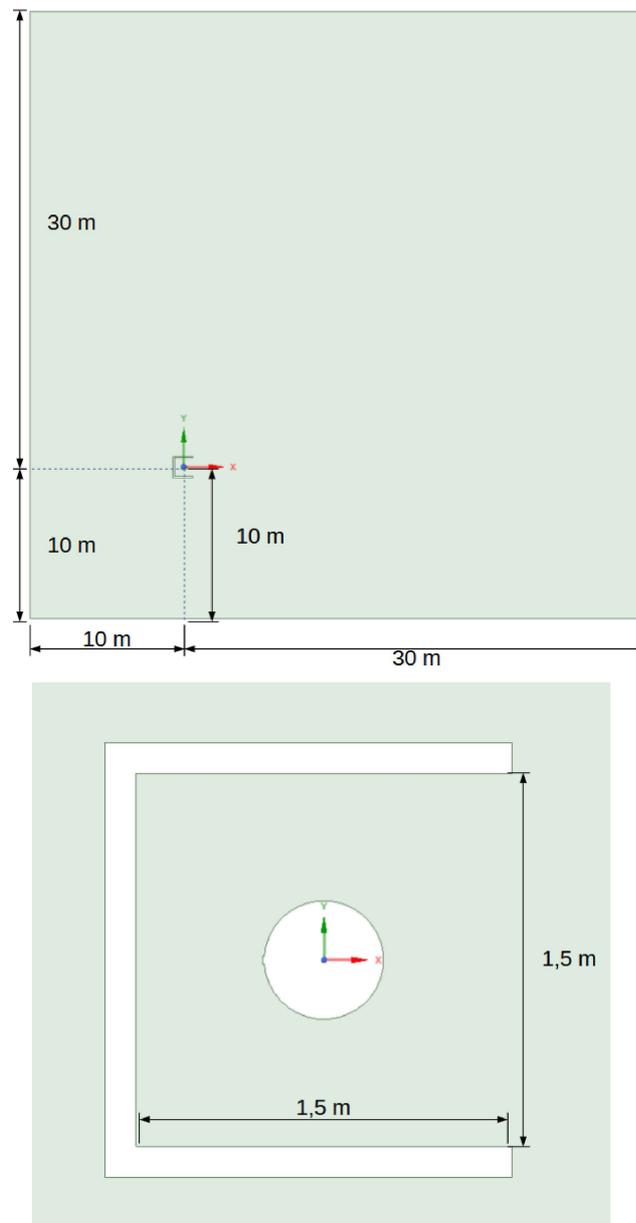
Para garantir que o escoamento da nuvem de hidrocarbonetos não fosse restringido, a tubulação e o flange foram rotacionados em 90° na direção do eixo x , conforme ilustrado na Figura 11. Ressalta-se, ainda que, no *Ansys Fluent*, o domínio bidimensional deve, obrigatoriamente, estar contido no plano xy .

As dimensões do domínio computacional (a partir das paredes do defletor de flange) seguem abaixo:

- $+x = 30$ m;
- $-x = 10$ m;
- $+y = 30$ m;
- $-y = 10$ m;

Em função dos ajustes realizados no modelo bidimensional, a condição de simetria não foi aplicada à geometria considerada.

Figura 11 – Domínio computacional bidimensional gerado para realização das simulações computacionais



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Por se tratar de uma análise complexa e diretamente dependente da área de seção do vazamento, é preciso avaliar se o modelo bidimensional é válido como modelo preliminar. Essa verificação será apresentada mais adiante ao comparar os resultados de uma simulação bidimensional com os teóricos esperados calculados na Seção 3.2.

3.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E MODELOS UTILIZADOS

A definição das condições de contorno e os modelos matemáticos da análise CFD foram feitos dentro do *Ansys Fluent*. Para considerar a temperatura do vazamento e os

efeitos térmicos derivados, foi habilitado o modelo de energia.

As condições de operação do meio foram definidas como:

- Pressão ambiente: 1 atm;
- Temperatura ambiente: 24 °C;
- Densidade do meio: 1,225 kg/m³.

Foi habilitada uma força gravitacional ao modelo, com uma aceleração de 9,81 m/s no sentido $-z$, bem como a equação de energia ao modelo. Isso permite prescrever temperatura nas condições de contorno e faz com que as propriedades da nuvem variem de acordo com o valor de temperatura.

O modelo de viscosidade/turbulência utilizado é o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, descrito na Seção de 2.3.

O modelo de transporte de espécies utilizado foi o modelo de transporte de espécies sem reação. O *Ansys Fluent* modela a mistura e o transporte de espécies químicas resolvendo equações de conservação que descrevem convecção, difusão e fontes de reação para cada espécie componente.

O material utilizado para composição é a mistura metano-ar presente do banco de dados do programa *Ansys Fluent*. Essa mistura é composta pelas espécies de metano (CH_4), oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), vapor de água (H_2O) e nitrogênio (N_2).

O escoamento modelado é do tipo compressível, de forma que a densidade é obtida através do modelo de gases ideais. A escolha do modelo compressível foi feita ao considerar trabalhos que comparam dados experimentais com modelos compressíveis tal como Hansen *et. al* (13) que utilizou o programa *FLACS* (42) que trabalha com modelo de gás ideal compressível para realizar as simulações.

O modelo de gás ideal é selecionado no *Ansys Fluent* na seção de materiais, após habilitar o modelo de transporte de espécies.

O calor específico é dado por uma lei de mistura calculada a partir da média do calor específico das espécies, onde o calor específico de cada espécie é dado por uma função polinomial dependente da temperatura (17). Os valores de massa molar, condutividade térmica, viscosidade e difusividade mássica são dados presentes no banco de dados do programa e seguem abaixo:

- Condutividade térmica: 0,0454 W/(m · K);
- Viscosidade: $1,72 \times 10^{-5}$ kg/m · s;
- Difusividade mássica: $2,88 \times 10^{-5}$ m²/s;

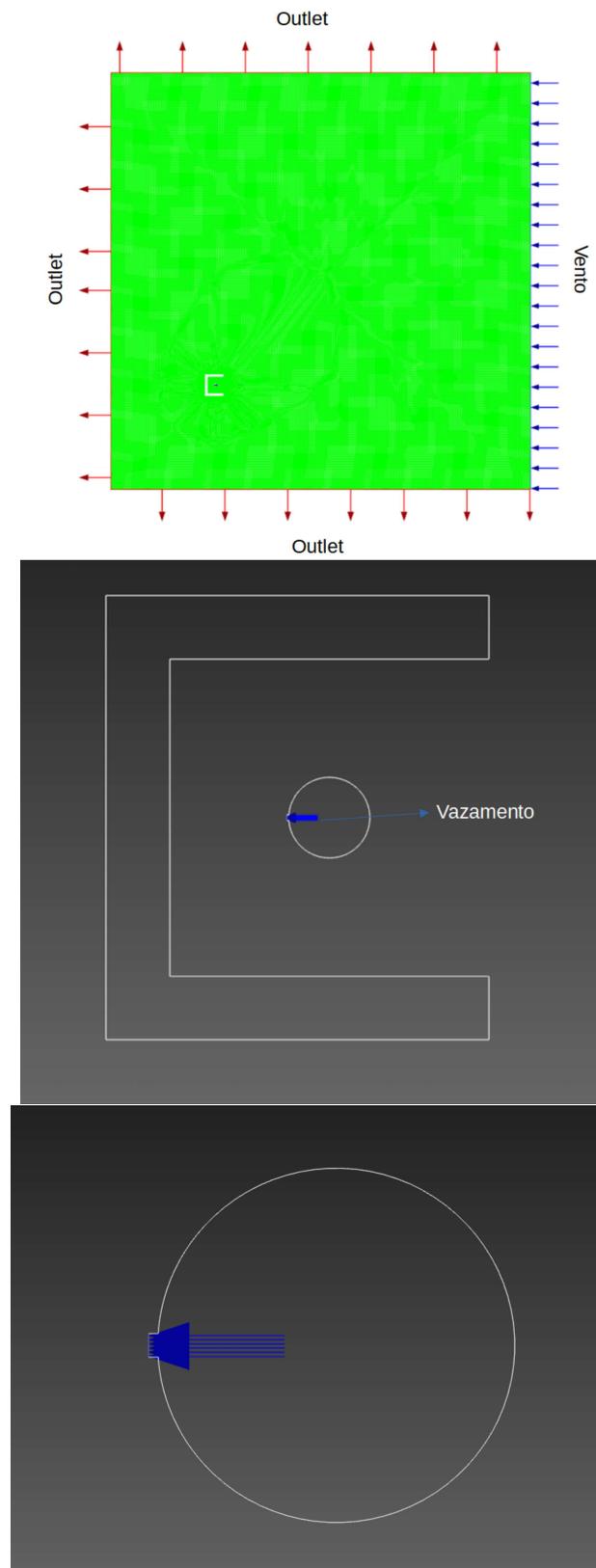
- Massa molar do metano: 16,04303 kg/kmol;
- Massa molar do oxigênio: 31,9988 kg/kmol;
- Massa molar do dióxido de carbono: 44,00995 kg/kmol;
- Massa molar do vapor de água: 18,01534 kg/kmol;
- Massa molar do nitrogênio: 28,0134 kg/kmol.

O modelo possui as seguintes condições de contorno:

- Vazamento (*leak*): definido como uma condição de "*pressure-inlet*";
- Vento (*wind*): definido como uma condição de "*velocity-inlet*";
- Simetria (*symmetry*): definido como condição de "*symmetry*";
- Outlet (*outlet*): definido como condição de "*pressure-outlet*";
- Paredes (*wall*): definido como condição de "*wall*".

Na Figura 12 é possível observar as regiões onde foram aplicadas as condições de contorno no modelo bidimensional. Cabe ressaltar que o modelo bidimensional não possui a condição de contorno de simetria, e que a tubulação em conjunto com o flange encontram-se rotacionados, de forma a não impedir a dispersão da nuvem de hidrocarbonetos. A rotação do modelo bidimensional consiste na rotação do domínio do modelo tridimensional em 90° no eixo x .

Figura 12 – Condições de contorno do modelo bidimensional



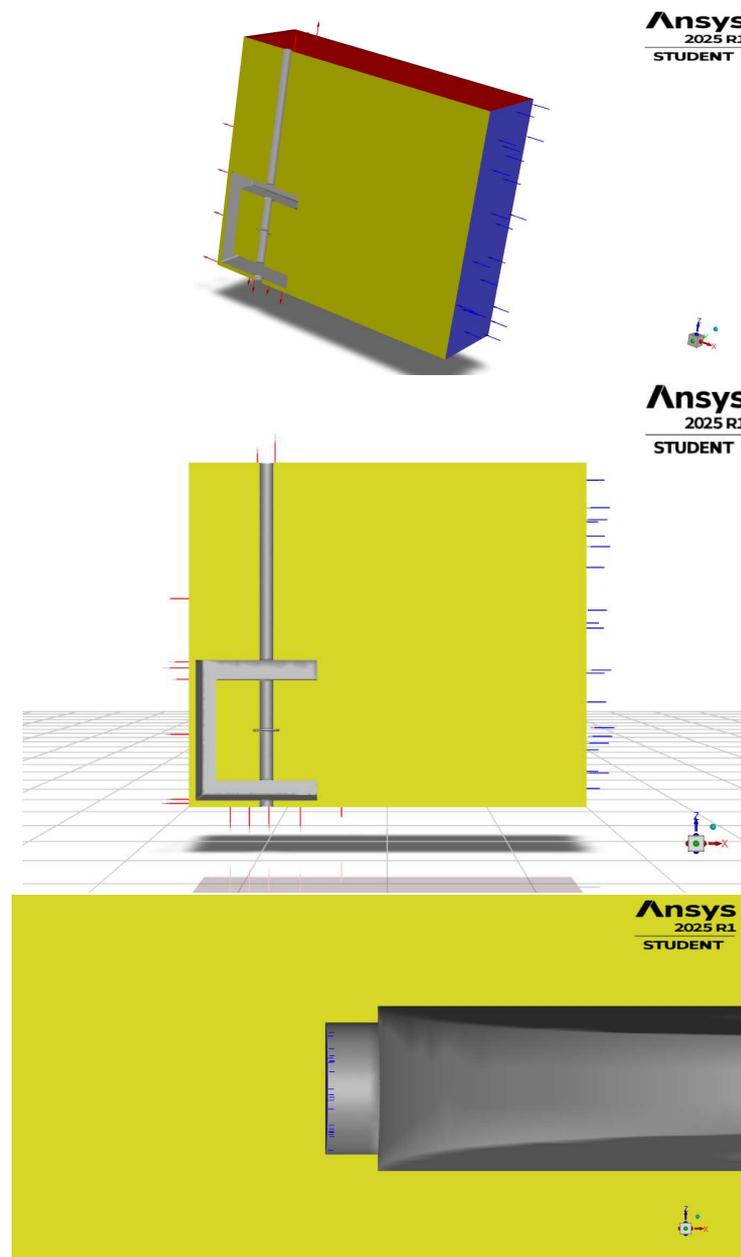
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

As condições de contorno do modelo tridimensional seguem nas Figuras 13 e 14.

Cada superfície representa um tipo de condição de contorno, como segue abaixo:

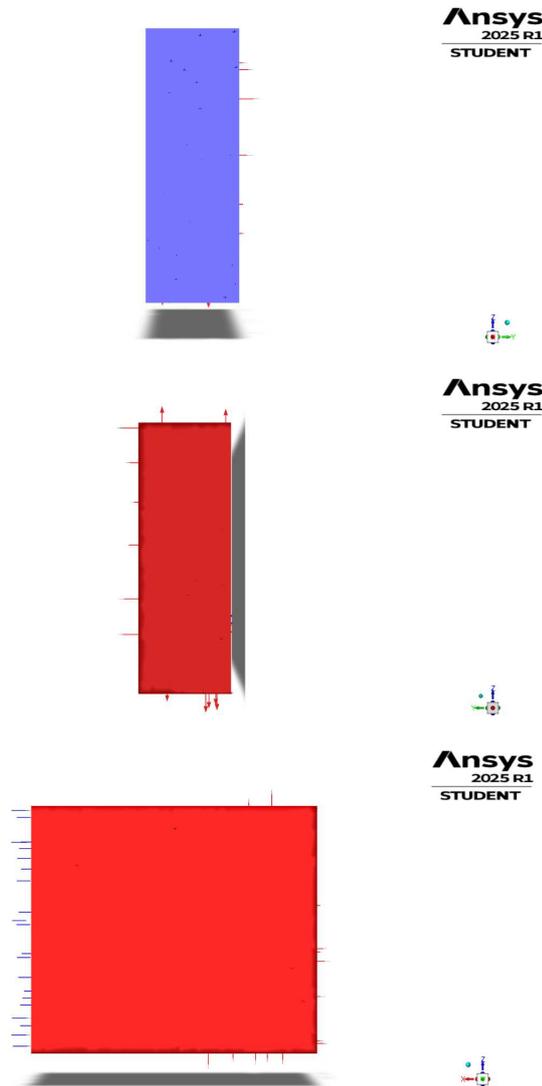
- Vermelho: *outlet*;
- Azul: *inlet*;
- Cinza: parede (*wall*);
- Amarelo: simetria (*symmetry*).

Figura 13 – Condições de contorno do modelo tridimensional (parte 1)



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 14 – Condições de contorno do modelo tridimensional (parte 2)



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Para a condição de contorno de vazamento (*pressure inlet*), os seguintes parâmetros foram utilizados:

- Pressão manométrica: 1.898.675 Pa ou 18,99 bar;
- Temperatura: 373,15 K;
- Fração mássica de metano: 1 (100%).

As condições de contorno de *outlet* e vento apresentam condições referentes ao meio ambiente, que são as seguintes:

- Temperatura ambiente: 24°C;

- Pressão ambiente: 1 atm.

Cabe ressaltar que o objetivo deste trabalho consiste em avaliar a eficácia do defletor de flange em diferentes condições de vento, e não há uma condição real e específica de apenas uma plataforma. Nesse sentido, optou-se por uma variação paramétrica de velocidade de vento, com velocidades variando de 0 até 4 m/s (43). A condição de contorno de vento (*velocity inlet*) apresenta as seguintes velocidades:

- 4 m/s;
- 3 m/s;
- 2 m/s;
- 1 m/s;
- 0,5 m/s;
- 0 m/s.

Como a função do vento nesse modelo consiste em direcionar a nuvem de hidrocarbonetos para a direção contrária ao efeito do defletor de flange, espera-se que cenários com maiores velocidade de vento sejam os mais críticos.

3.6 MALHA

Para simulações de dispersão de gases em plataformas *offshore*, Hanna et. al (44) recomendam atenção especial à resolução da malha próxima às fontes de emissão e em regiões onde se espera gradientes significativos de concentração. As regiões próximas ao vazamento e a parede diretamente oposta a ele necessitam de maior resolução na malha por se tratarem de regiões de maiores gradientes.

A avaliação da qualidade da malha deve ser um processo iterativo. Após a análise inicial, áreas problemáticas devem ser identificadas e a malha refinada ou reconstruída conforme necessário. Este processo pode envolver:

- Refinamento local em áreas de interesse ou alta complexidade do fluxo;
- Suavização da malha para melhorar a transição entre regiões de diferentes resoluções;
- Reconstrução de partes da malha utilizando diferentes técnicas ou algoritmos de geração.

A avaliação rigorosa da qualidade da malha é um passo fundamental na realização de simulações CFD confiáveis no *Ansys Fluent*, especialmente para estudos complexos como dispersão de gases em ambientes *offshore*. Utilizando as ferramentas e métricas disponíveis, em conjunto com uma compreensão profunda dos requisitos específicos do problema em questão, os pesquisadores podem assegurar que suas simulações forneçam resultados precisos e confiáveis para análises de risco e estudos de consequência.

Assim como o modelo geométrico, a malha foi desenvolvida com as ferramentas da *Ansys*, mais especificamente o *Ansys Mechanical 2025 R1 Student*. Por se tratar de uma versão estudantil, o software possui limitações na quantidade de elementos máximos que a malha pode conter; no caso dessa versão, a limitação é de no máximo 1.000.000 de elementos para malha.

Essa limitação no número de elementos impossibilitou realizar análises mais refinadas, principalmente no que diz respeito a análise dos resíduos de turbulência, que não atingiram o critério de convergência estabelecido de 10^{-3} . Mesmo com essas limitações, os resultados apresentados seguem conforme o esperado e atingiram os critérios de qualidade de malha estabelecidos.

É importante notar que os critérios de qualidade da malha podem variar dependendo do tipo de problema e do resolvidor utilizado. Blazek (26) sugere as seguintes diretrizes gerais:

- Assimetria (*Skewness*): $0,8 <$ para a maioria dos fluxos;
- Qualidade ortogonal (*Orthogonal Quality*): $> 0,1$;
- Razão de aspecto (*Aspect Ratio*): < 100 para a maioria dos fluxos; $< 30-40$ para fluxos com fortes gradientes.

Devido a limitação na quantidade de elementos, o processo de avaliação da malha consistiu nas etapas principais:

1. Confecção de uma malha que atenda aos critérios de qualidade estabelecidos e que usufrua da maior quantidade de elementos possível;
2. Realização estudo de malha, para essa malha que atende a todos os critérios, ao avaliar a estabilidade de seus resultados com malhas com menos elementos.

Foram elaborados modelos tridimensionais com malhas estruturadas, visto que essas conteriam uma menor quantidade de elementos e poderiam ser benéficas; contudo, as malhas estruturadas geradas não atingiam os critérios de qualidade estabelecidos e por isso foram descartadas. Segue abaixo as informações de qualidade referentes à malha estruturada:

- Razão de aspecto máxima (*Max aspect ratio*): 575,67;
- Qualidade ortogonal mínima (*Min orthogonal quality*): 5,9e-5;
- Assimetria máxima (*Max skewness*): 1.

Nota-se que, devido a geometria complexa do problema que envolve regiões curvas, a malha estruturada desenvolvida pelo programa não é capaz de atingir os critérios de qualidade estabelecidos.

Ao utilizar a malha não estruturada de forma a atender aos critérios de qualidade com o maior número de elementos disponível, os parâmetros de qualidade da malha do modelo tridimensional foram:

- Razão de aspecto máxima (*Max Aspect Ratio*): 85,922;
- Qualidade ortogonal mínima (*Min Orthogonal Quality*): 0,236;
- Assimetria máxima (*Max Skewness*): 0,75.

Descartou-se a apresentação dos parâmetros de qualidade da malha utilizada no modelo bidimensional pois, como este possui uma maior densidade de elementos devido ao seu caráter plano, este também vai possuir uma malha que atende melhor aos critérios de qualidade.

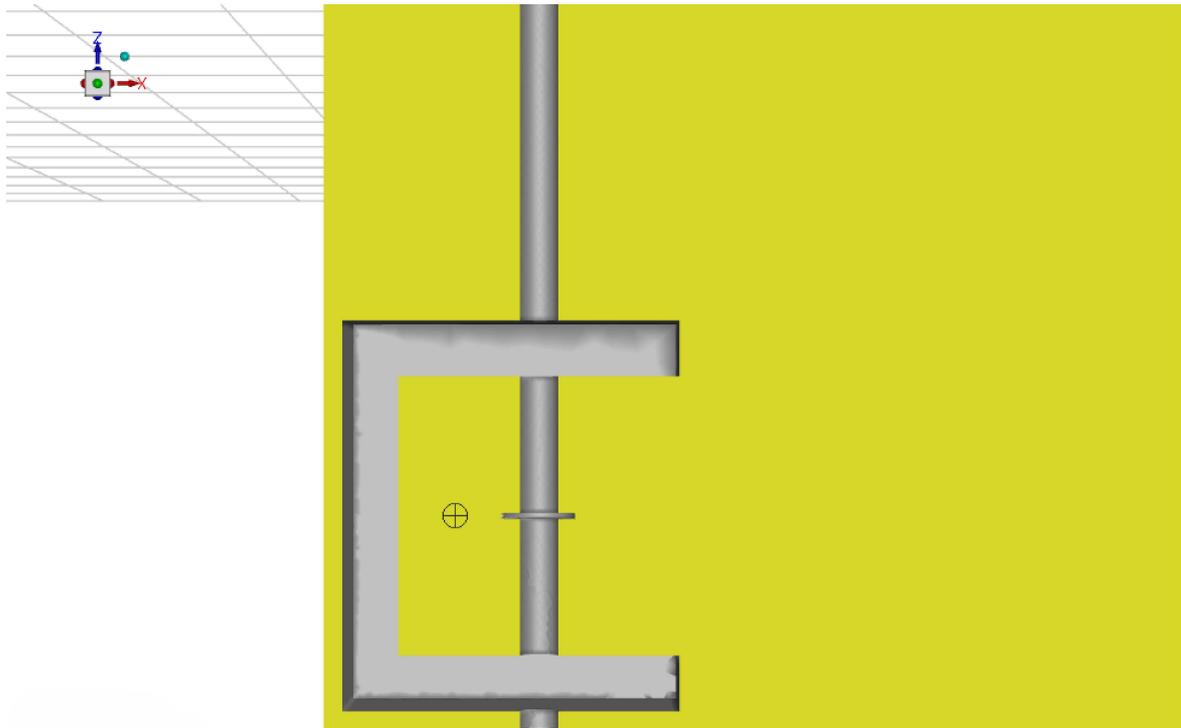
Após o desenvolvimento da malha que atende a todos os critérios de qualidade, o próximo passo consiste em verificar a estabilidade dos resultados ao variar a quantidade de elementos da malha. Esse processo foi utilizado para realizar o estudo de malha.

Uma das formas de realizar o estudo da malha é avaliar a precisão de soluções em malhas sucessivamente refinadas e verificar se, com refinamentos sucessivos, a solução de determinado parâmetro em uma região de interesse não está mudando, satisfazendo alguma precisão predeterminada (45, 46).

Para este trabalho, o parâmetro de interesse é a velocidade em um ponto localizado entre o vazamento e a parede, nas coordenadas $x = -0,45$ m, $y = 0$ m, e $z = 0$ m, conforme indicado na Figura 15.

Devido a restrições no número de elementos que podem ser utilizados, o critério adotado para a análise do estudo da malha baseia-se na verificação da estabilidade dos resultados obtidos com a malha de maior resolução possível — isto é, aquela que possui o maior número de elementos viável, respeitando os critérios de qualidade estabelecidos. Essa malha é então comparada com outras de menor resolução, de forma a assegurar que não haja variações significativas nos resultados, caracterizando a estabilidade da solução em relação ao refinamento da malha.

Figura 15 – Região de interesse para realização do estudo de malha



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Para os fins deste estudo, considera-se que a solução numérica é suficientemente independente da malha quando a variação dos valores de velocidade entre a malha mais refinada e uma malha de menor resolução for inferior a 10%. A malha mais refinada utilizada apresenta 995.898 elementos, enquanto a malha de comparação com menos elementos possui aproximadamente metade dessa quantidade. Os resultados do estudo de malha seguem na Tabela 1 e Figura 16.

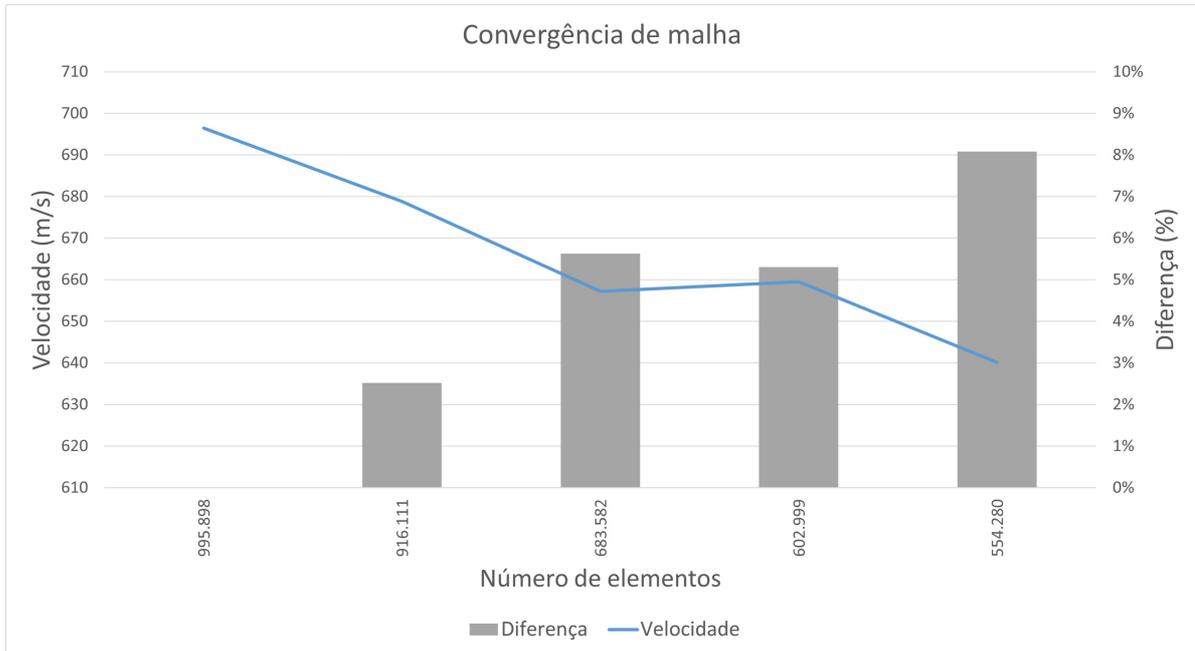
Tabela 1 – Resultados do estudo de malha

Número de elementos	Velocidade (m/s)	Diferença % na velocidade	Diferença % no número de elementos
995.898	696,43	-	-
916.111	678,86	2,52	8,01
683.582	657,24	5,63	31,36
602.999	659,49	5,30	39,45
554.280	640,13	8,08	44,34

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

O critério de variação inferior a 10% foi adotado com base em práticas comuns na validação de simulações numéricas, especialmente em estudos de dinâmica dos fluidos

Figura 16 – Resultados do estudo de malha



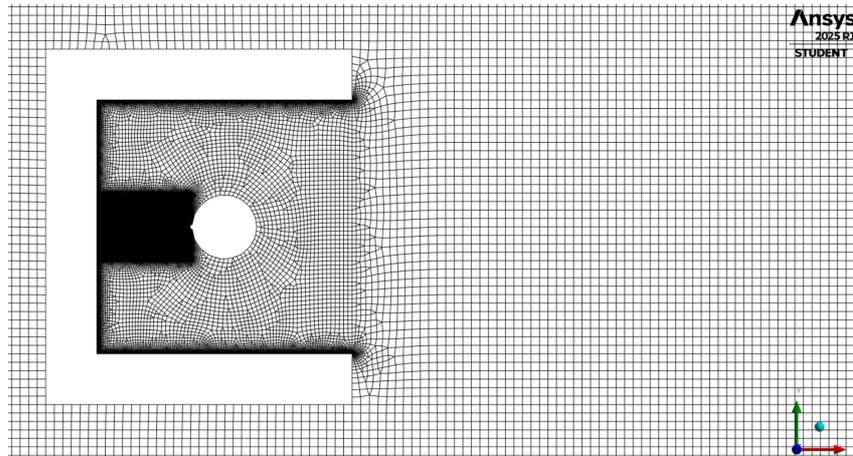
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

computacional (CFD), onde variações abaixo desse limiar são geralmente consideradas aceitáveis para garantir que o refinamento adicional da malha não produza mudanças significativas nos resultados (46). Essa abordagem permite equilibrar precisão e custo computacional, especialmente em simulações de grande porte, como as realizadas neste trabalho. Assim, ao constatar que a diferença nos valores de velocidade entre a malha mais refinada (com 995.898 elementos) e uma malha com aproximadamente metade desse número é inferior a 10%, conclui-se que a solução é suficientemente estável em relação ao refinamento da malha (47).

Após a realização das duas etapas, aferir critérios de qualidade de malha e realizar o estudo de malha, é possível concluir que a malha é válida para realização de simulações CFD.

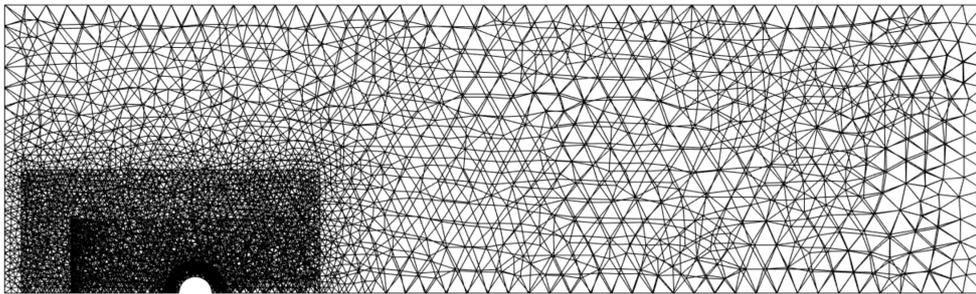
Nas Figuras 17 e 18 estão ilustradas as malhas utilizadas nos modelos bidimensional e tridimensional, respectivamente. A Figura 19 apresenta uma visualização adicional da malha tridimensional, com ênfase nos detalhes do plano zx .

Figura 17 – Malha do modelo bidimensional



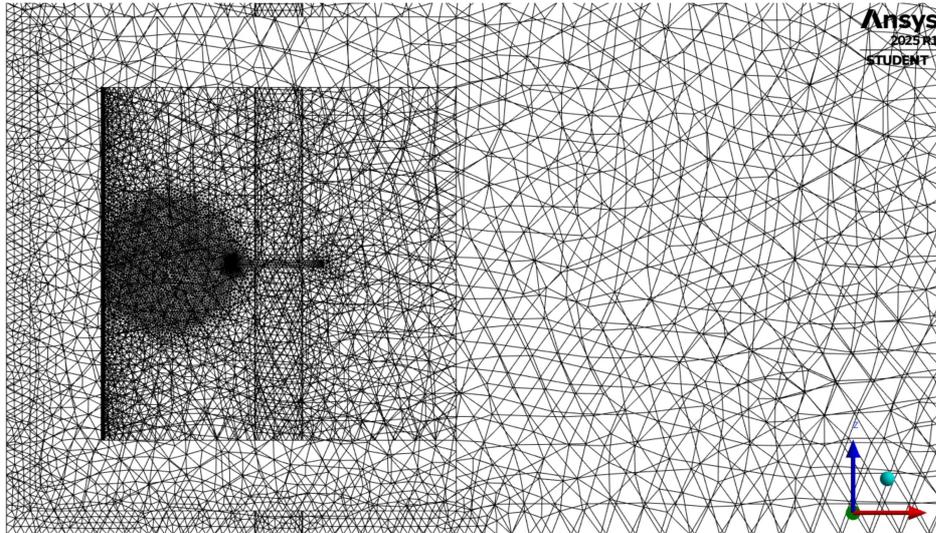
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 18 – Malha do modelo tridimensional



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 19 – Malha do modelo tridimensional no plano zx



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

4 RESULTADOS

As análises CFD foram feitas no software *Ansys Fluent*, a malha foi confeccionada no *Ansys Mechanical* e a geometria desenvolvida no *Ansys SpaceClaim*, de acordo com a descrição detalhada no Capítulo 3.

A principal função do defletor de flange é impedir que a nuvem de hidrocarbonetos siga na direção inicial do vazamento, definida como a direção $-x$ do domínio computacional. Para isso, são empregados diversos valores de velocidade de vento em direções favoráveis à direção do vazamento, no intuito de direcionar a nuvem de hidrocarbonetos na direção oposta à qual o defletor direcionou a nuvem.

A análise dos resultados depende de dois fatores principais, o valor de vazão mássica, que por sua vez depende das condições do vazamento (pressão, temperatura, área de vazamento) e dos modelos utilizados (gases ideais); e os contornos de fração mássica e isosuperfícies, que por sua vez representam a dispersão do metano no domínio. A análise dos resultados é realizada através de contornos de fração mássica, isosuperfícies de 20% do LFL e contornos de velocidade.

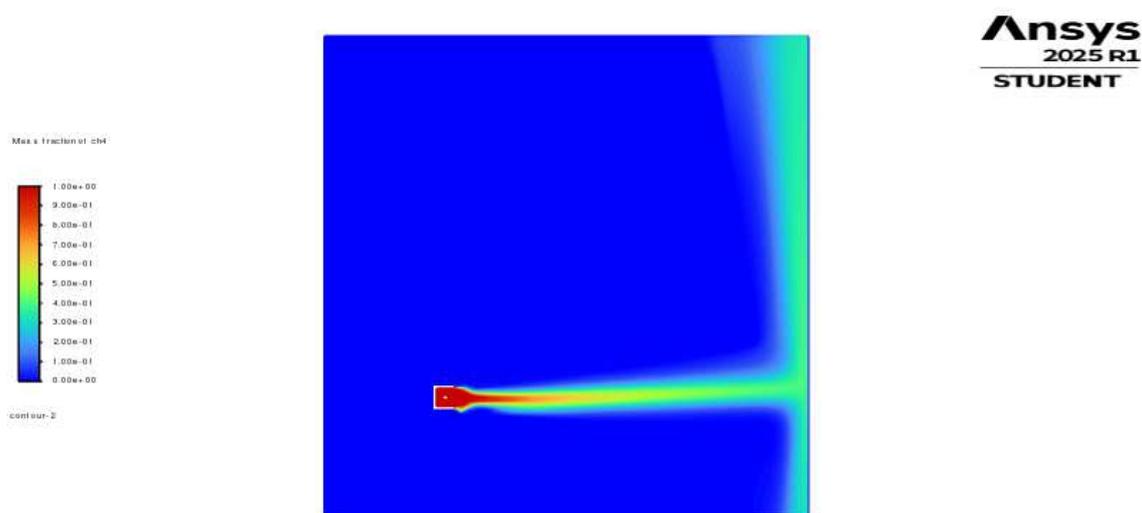
Para avaliar a eficácia do defletor de flange, avalia-se como este impacta a dispersão da nuvem de hidrocarbonetos e direciona a nuvem para direção oposta ao vazamento, de forma que um vento na direção favorável ao vazamento não conseguiria direcionar e fazer com que ultrapasse a região delimitada da parede do defletor de flange.

Foram confeccionados dois modelos, um bidimensional e outro tridimensional. O bidimensional foi desenvolvido no intuito de permitir análises mais rápidas e preliminares, enquanto que o tridimensional é o modelo mais completo, que por consequência leva mais tempo para finalizar as análises. Os resultados de vazão mássica e velocidade no vazamento foram comparados com valores analíticos de referência, calculados segundo a Seção 3.2.

4.1 MODELO BIDIMENSIONAL

A Figura 20 apresenta o contorno de fração mássica de uma simulação estacionária de dispersão da mistura ar e metano nas condições de processo especificadas.

Figura 20 – Contorno de fração mássica do modelo bidimensional



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

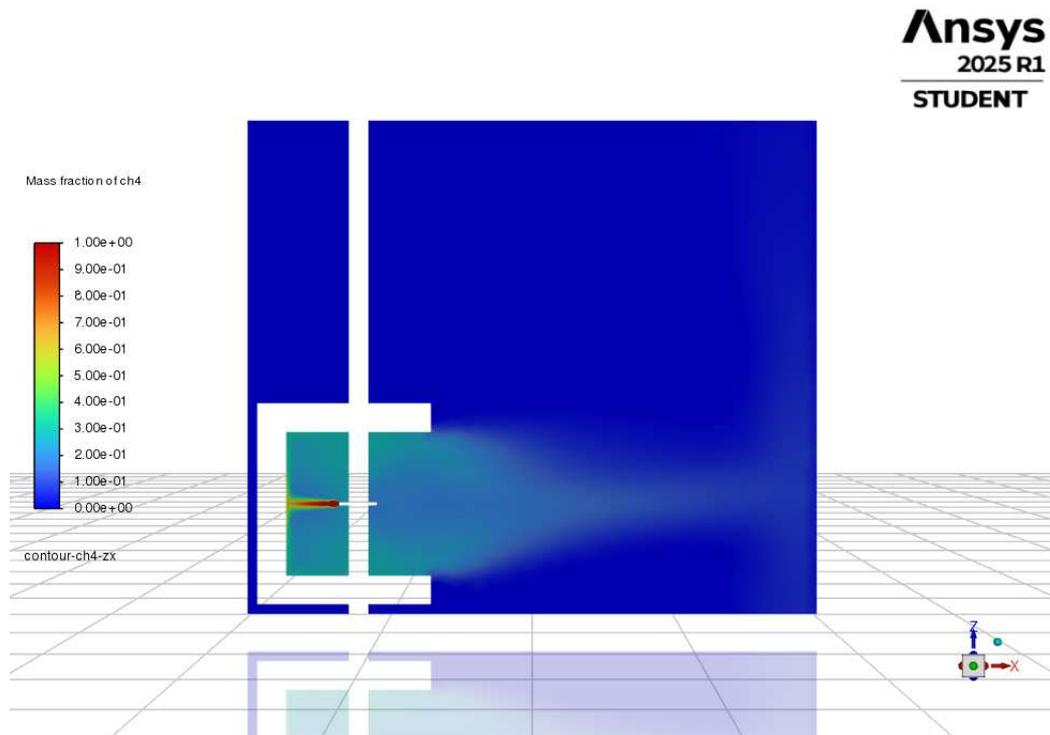
O modelo bidimensional apresentou velocidade no vazamento de 486 m/s, valor próximo da velocidade do metano no ar calculado na Seção 3.2 (505,28 m/s), com uma diferença de 3,82 %. Contudo, o valor de vazão mássica obtido foi de 64,34 kg/s, muito diferente do esperado calculado na Seção 3.2 (0,96 kg/s) com uma diferença percentual de 6.602 %.

Apesar do modelo bidimensional ser um atrativo interessante tendo em vista o custo computacional e sua fácil implementação, ele infelizmente não conseguiu prever com precisão os valores de vazão mássica e velocidade. Devido à seção de vazamento circular, o modelo bidimensional superestimou o valor de vazão mássica no vazamento e, com isso, gerou contornos muito diferentes do esperado e do modelo tridimensional.

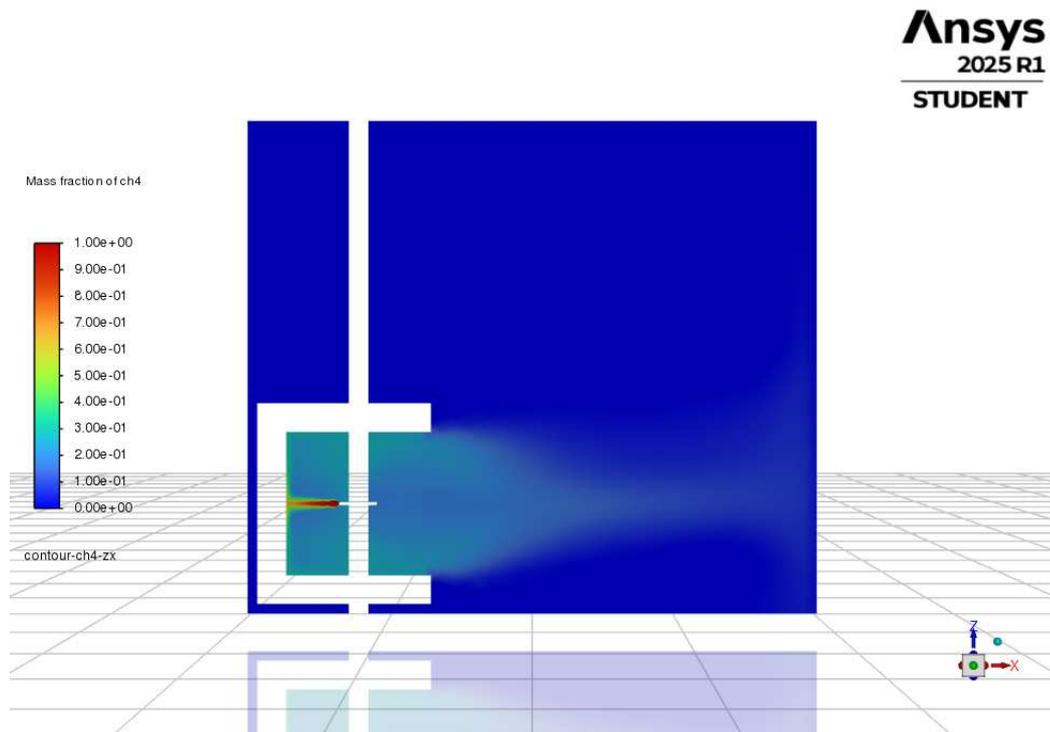
Segundo os cálculos analíticos realizados, o resultado do modelo bidimensional geraria em um contorno de fração mássica com menor concentração de metano na saída do defletor de flange, visto que a vazão mássica seria em torno de 1 kg/s, contudo, como é possível observar na Figura 20, mesmo após uma distância considerável do defletor de flange, a concentração de metano é muito alta e a nuvem estende-se a uma distância de 30 m com uma alta concentração, um resultado inesperado levando em consideração o valor de vazão mássica de 1 kg/s, um valor relativamente baixo.

4.2 MODELO TRIDIMENSIONAL

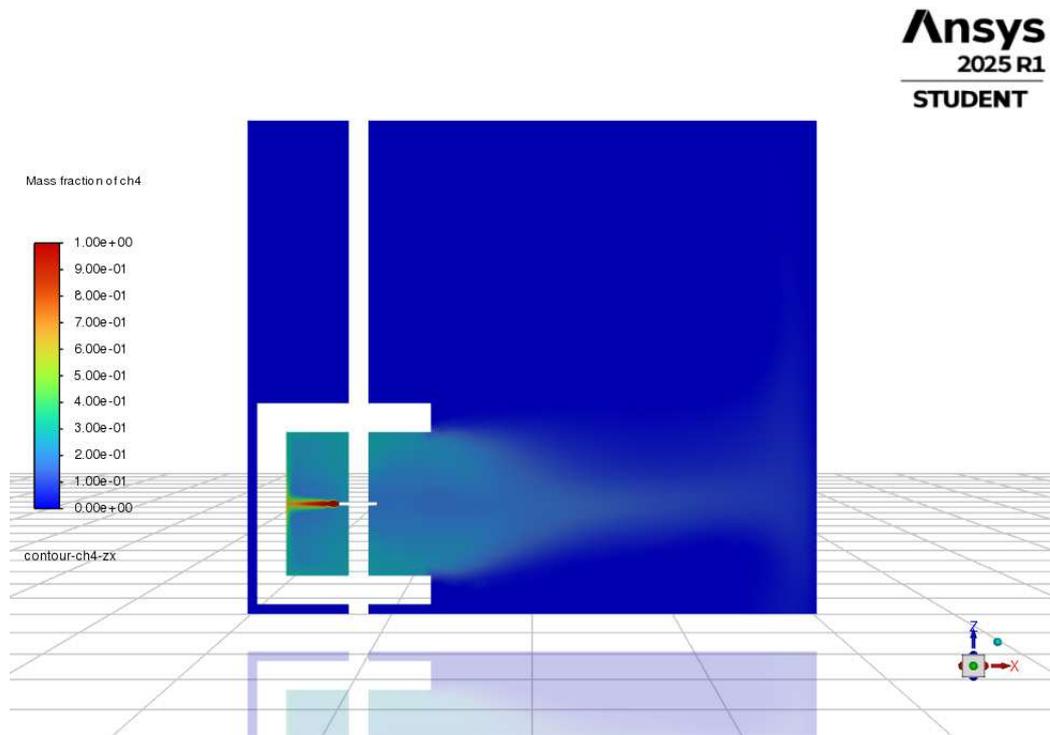
Nas Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26 é possível observar os contornos de fração mássica nas velocidades de vento de 0; 0,5; 1; 2; 3 e 4 m/s, respectivamente.

Figura 21 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 0 m/s

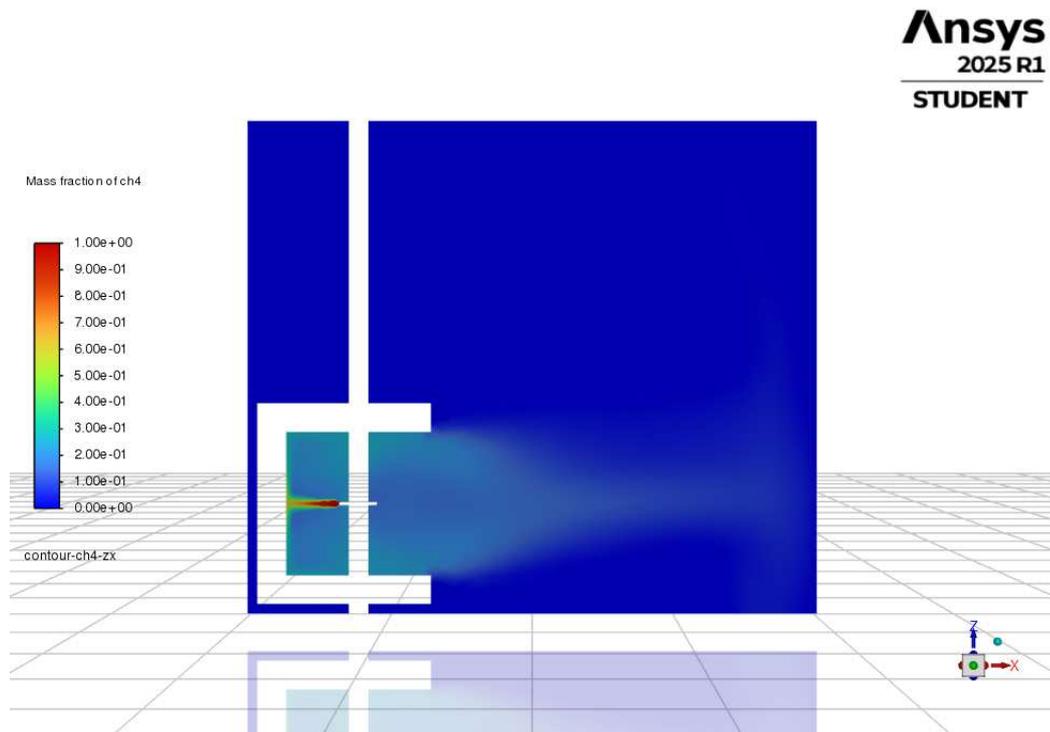
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 22 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 0,5 m/s

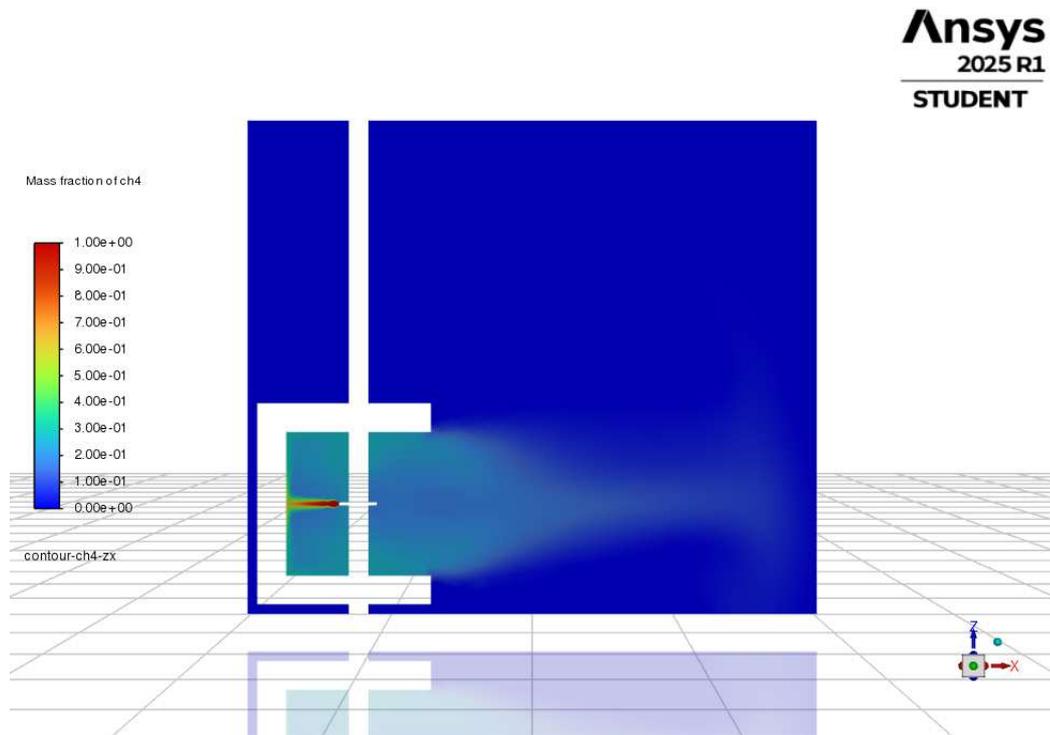
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 23 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 1 m/s

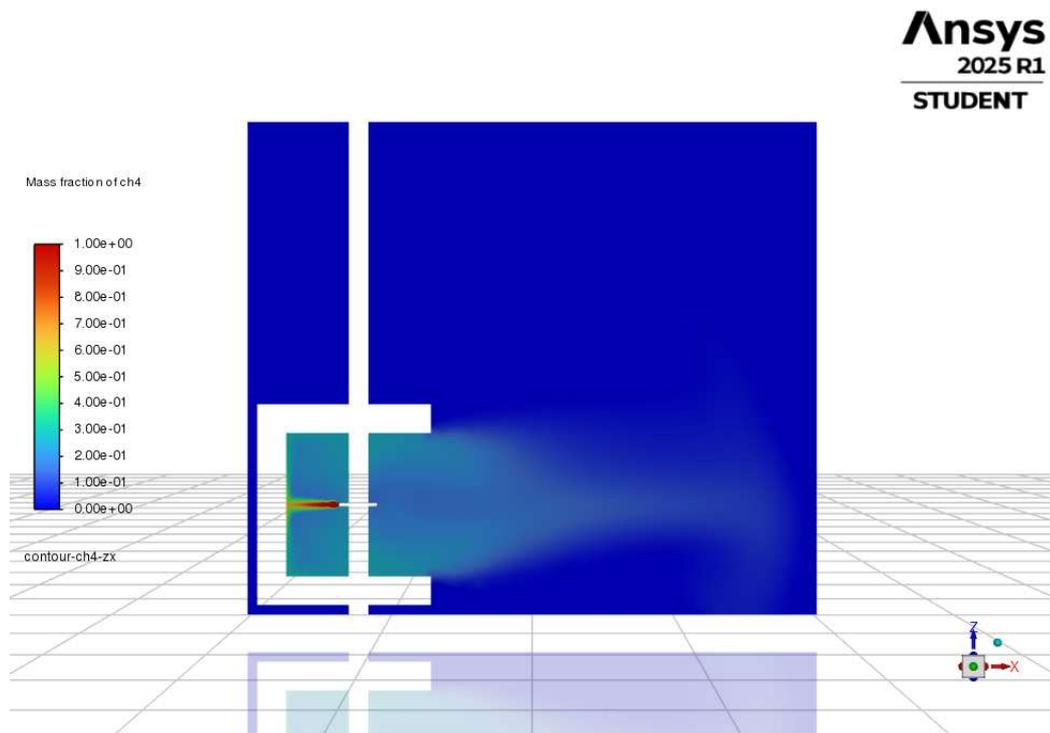
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 24 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 2 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 25 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 3 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 26 – Contorno de fração mássica no plano zx com velocidade de vento de 4 m/s

Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

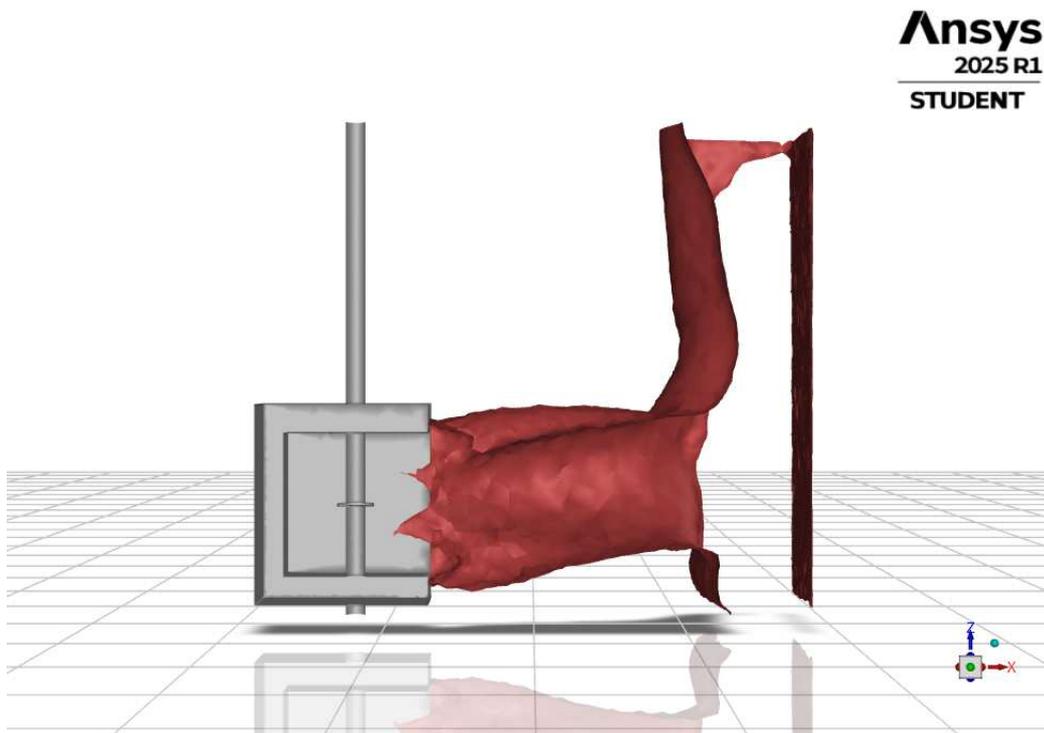
O modelo tridimensional apresentou velocidade no vazamento de 455 m/s, valor

próximo da velocidade do metano no ar calculado na Seção 3.2 (505,28 m/s), com uma diferença de 9,95%. O valor de vazão mássica obtido foi de 0,78 kg/s, próximo do calculado na Seção 3.2 (0,96 kg/s) com uma diferença percentual de 18,75%. Essas discrepâncias são esperadas, uma vez que o *Ansys Fluent* realiza cálculos iterativos baseados em métodos numéricos que consideram aspectos adicionais, como perdas localizadas, gradientes de pressão e efeitos tridimensionais, os quais não são contemplados na abordagem analítica simplificada.

As figuras apresentadas ilustram a dispersão da nuvem de hidrocarbonetos no interior da parede do defletor de flange, evidenciando um aumento significativo do efeito dispersivo na região de saída do defletor.

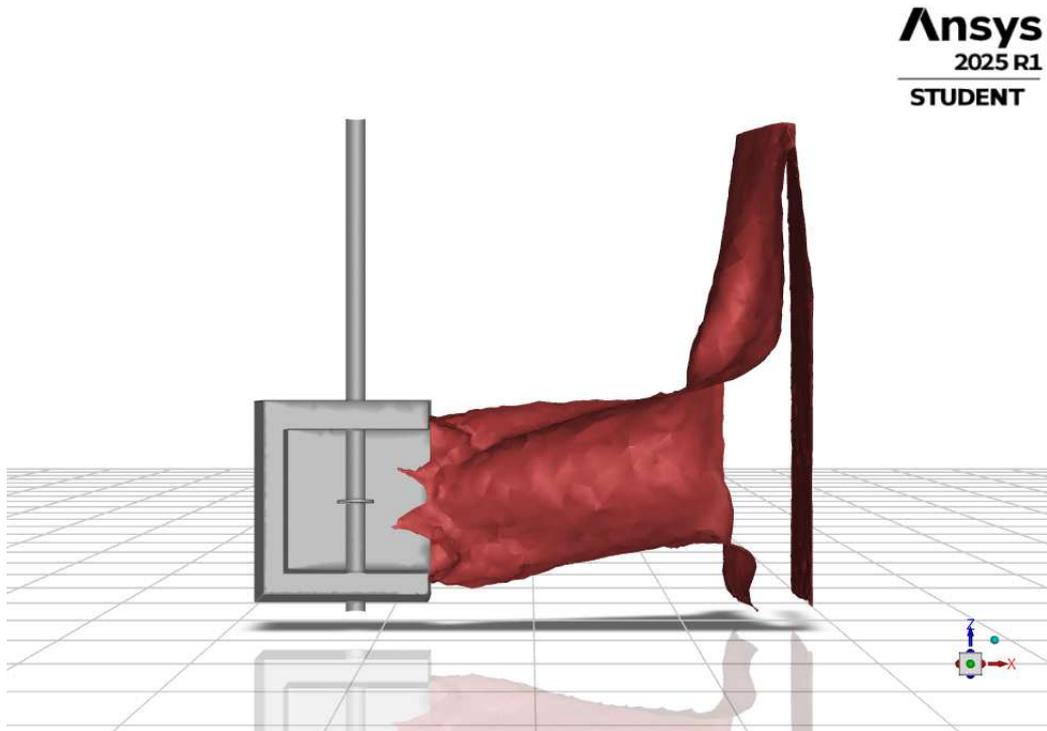
Nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 é possível observar as isosuperfícies de fração mássica de metano no valor de 20% do LFL para as velocidades de vento de 0; 0,5; 1; 2; 3; 4 m/s.

Figura 27 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 0 m/s



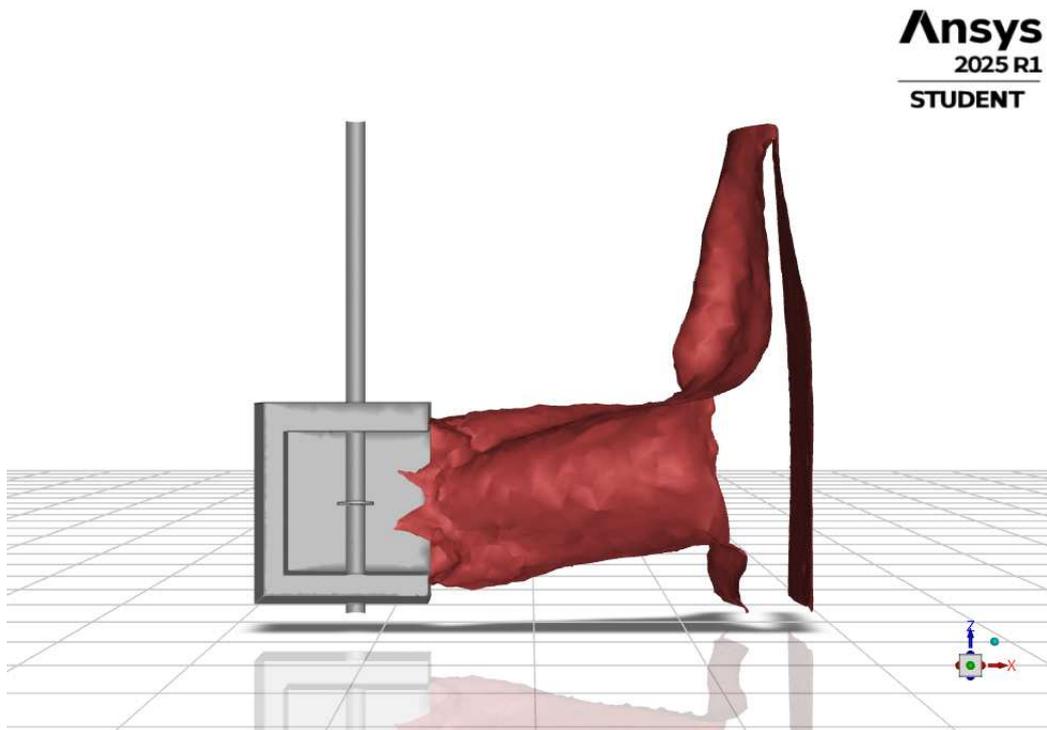
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 28 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 0,5 m/s



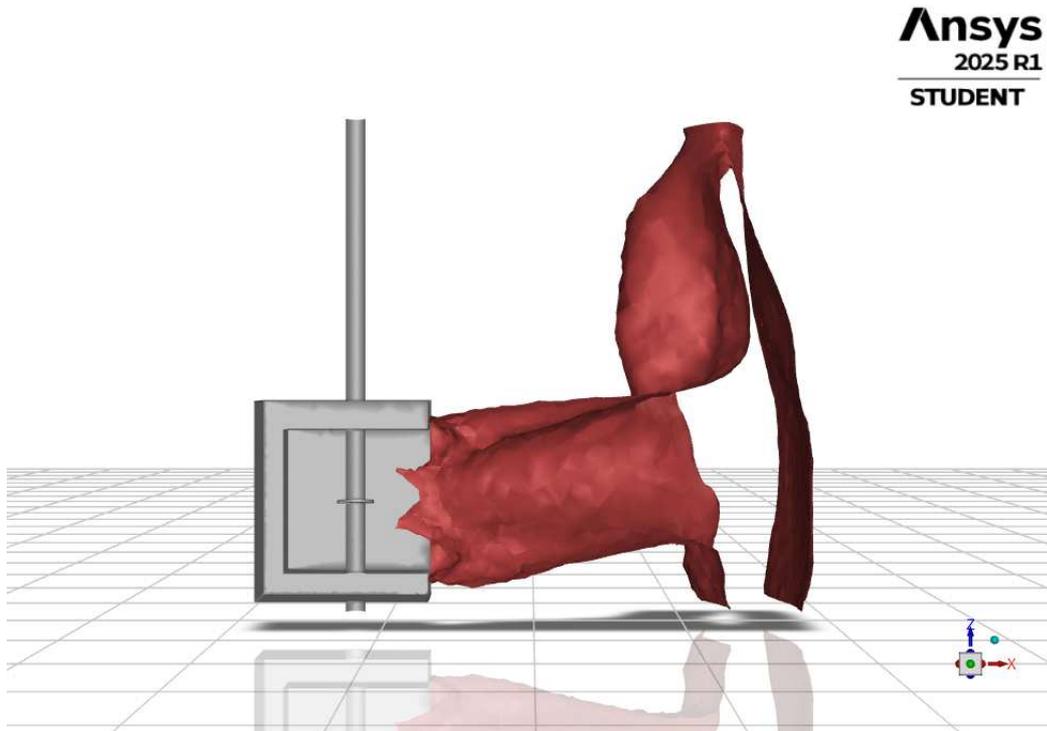
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 29 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 1 m/s



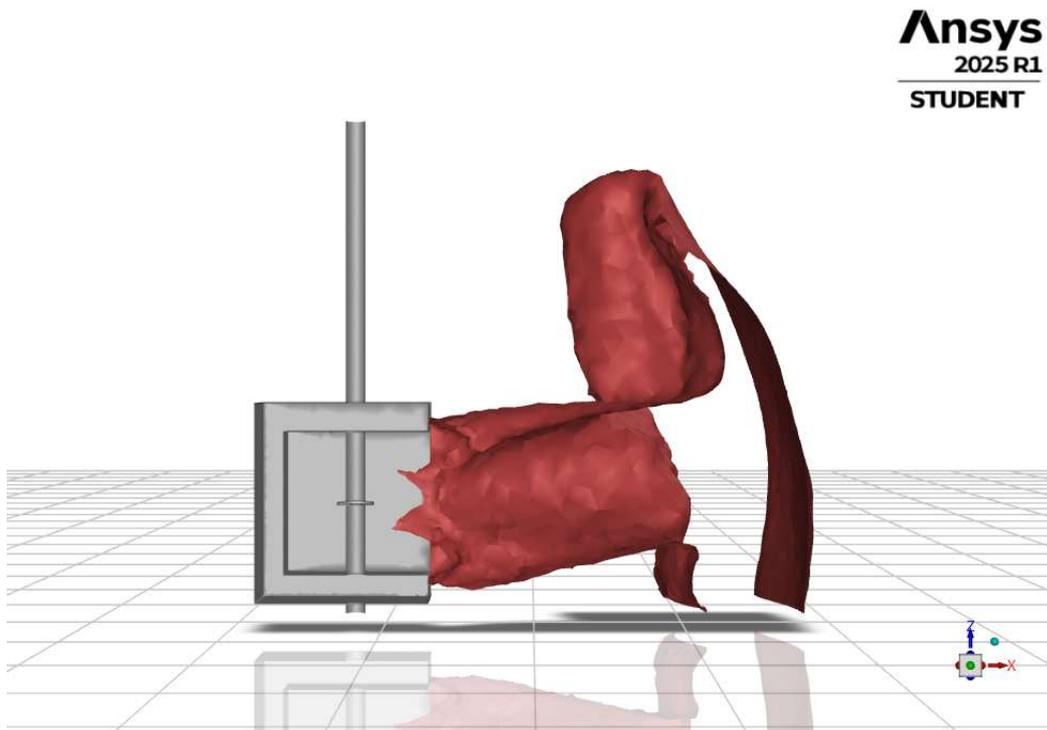
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 30 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 2 m/s



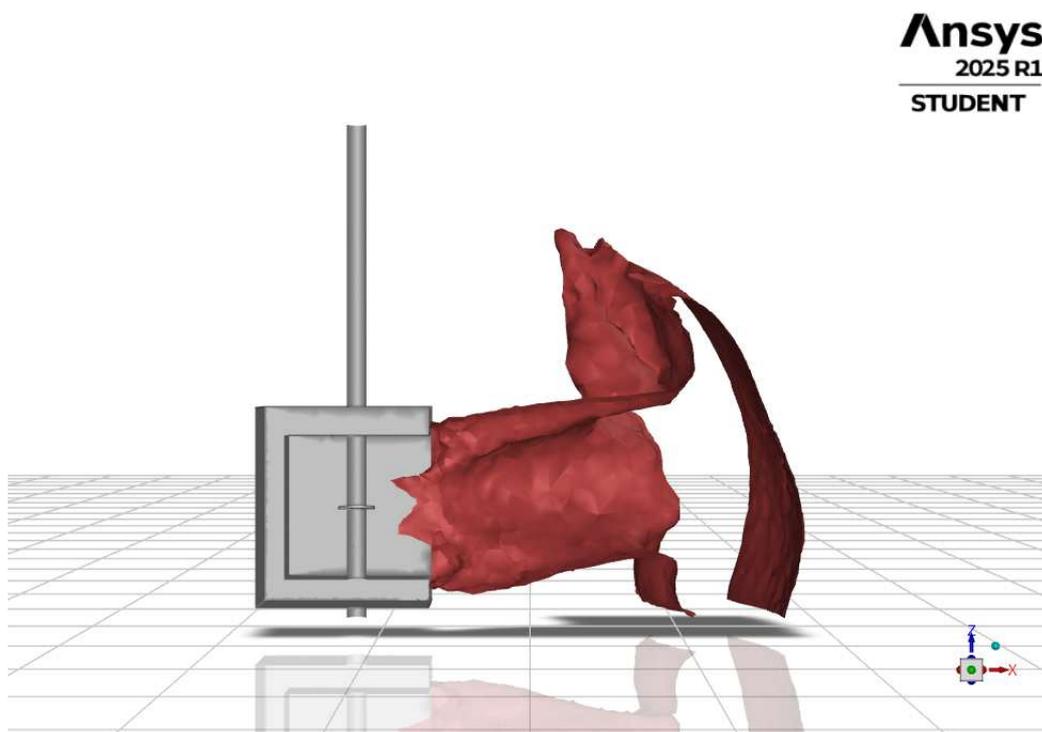
Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 31 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 3 m/s



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Figura 32 – Isosuperfície de 20% do LFL de metano com velocidade de vento de 4 m/s



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

As isosuperfícies apresentadas dizem respeito a 20% do LFL do metano. Isso não implica que nas regiões do domínio onde não há a isosuperfície não exista concentração de metano ou que estão livres de risco. O valor de LFL depende de cada diretriz de segurança e pode ser maior ou menor que o apresentado.

Os resultados representam um comportamento dentro do esperado, onde é possível observar o impacto do vento nas nuvens de hidrocarbonetos e que ventos com velocidades maiores tendem a direcionar mais a nuvem no sentido do vazamento. Por se tratar também de um vazamento com um valor de vazão mássica relativamente baixo, é possível ver a dissipação da nuvem a uma curta distância do defletor.

É possível notar que, para a condição sem vento e para as velocidades de vento de 0,5 e 1 m/s (Figuras 28 e 29), os resultados são muito semelhantes. Somente com velocidades acima de 1 m/s (Figuras 30, 31 e 32) é possível observar a possibilidade da nuvem de hidrocarbonetos ser direcionada novamente para a direção do vazamento.

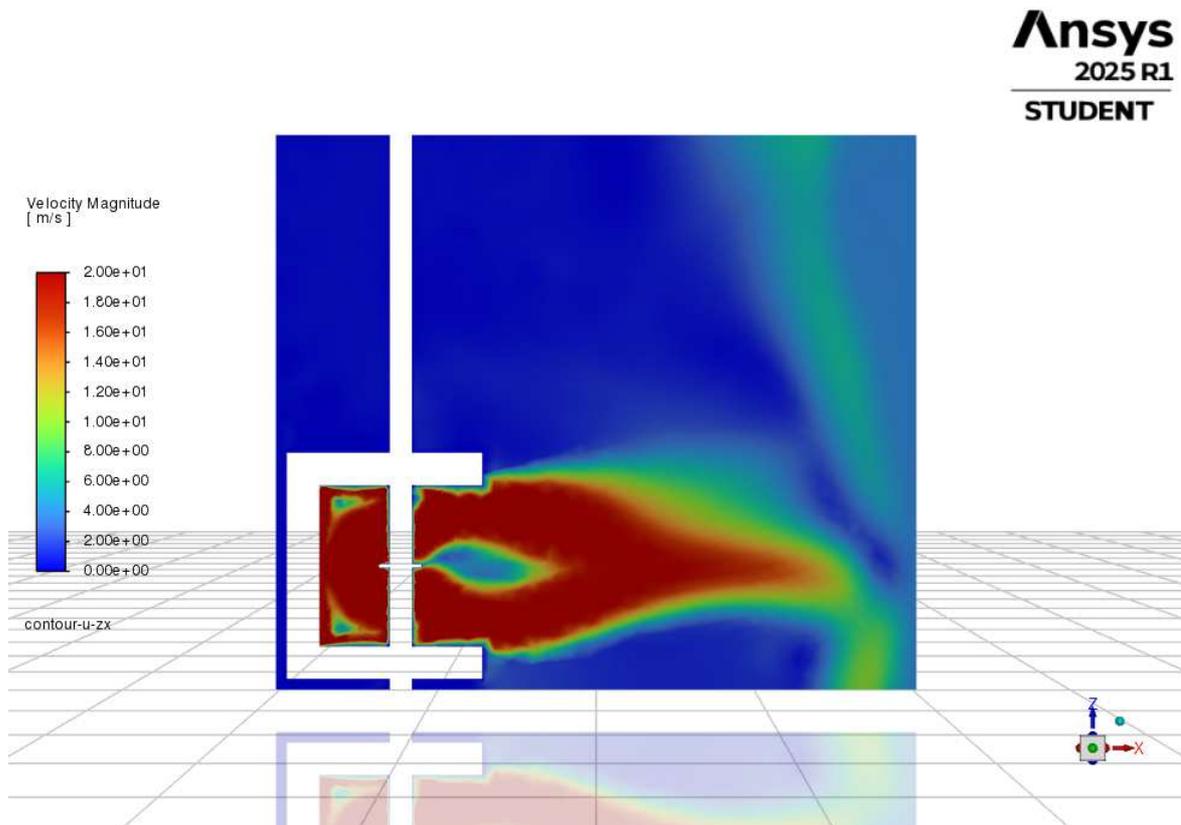
A região interna do defletor não aparece no defletor de flange pois, como é possível observar nos contornos de fração mássica nas Figuras 21, 22, 23, 24, 25 e 26. Nessa região as concentrações são maiores, o que implicaria valores menores de LFL para contemplar essas regiões. O valor de LFL contempla a menor concentração possível de metano a partir do limite de LFL estabelecido (20% para fins deste estudo), ou seja, implica o maior alcance da nuvem de hidrocarbonetos, visto que maiores concentrações localizam-se mais

perto da fonte do vazamento, não contemplando maiores riscos no que diz respeito ao alcance da região que o defletor de flange visa proteger.

Nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 é possível observar a influência do vento na dispersão da nuvem de hidrocarbonetos, e como o aumento da velocidade de vento gera maiores impactos nessa dispersão. Em velocidades menores de vento, a nuvem de hidrocarbonetos é direcionada completamente pelo defletor de flange na direção oposta ao vazamento. Conforme a velocidade do vento aumenta é possível observar que a nuvem é direcionada com intensidade cada vez maior na direção do vazamento.

Na Figura 33 é possível avaliar a influência do vento na nuvem de hidrocarbonetos a partir do contorno de velocidade no plano zx . Para avaliar os eventos do vento, é preciso escolher um valor pequeno de velocidade máxima, visto que a velocidade da nuvem é muito superior à velocidade do vento; nesse caso, 20 m/s de velocidade máxima foram suficientes para avaliar os efeitos do vento.

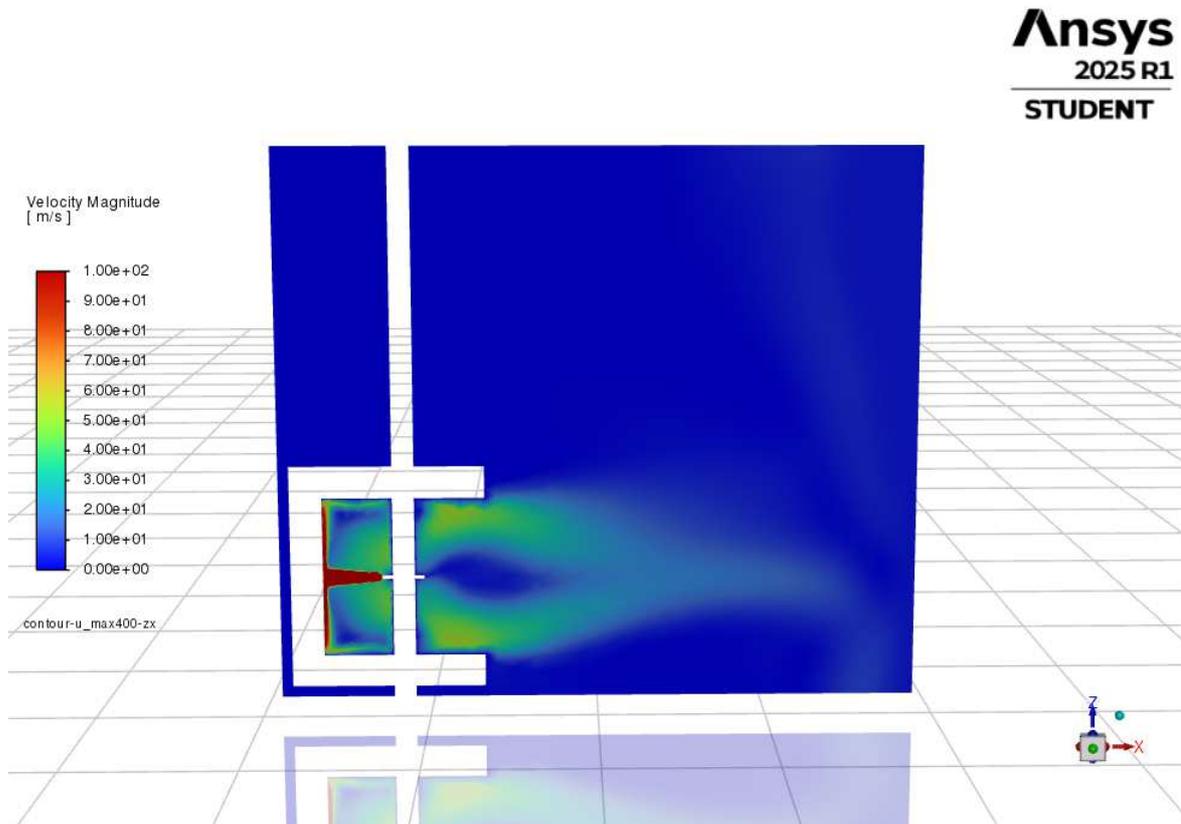
Figura 33 – Contorno de velocidade de vento até 20 m/s com velocidade de vento de 4 m/s



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Na Figura 34 é possível avaliar o contorno de velocidade no plano zx , com velocidade máxima de 100 m/s, que demonstra que mesmo a uma distância de 5 m da origem do vazamento, a velocidade da nuvem de hidrocarbonetos ainda é superior à velocidade do vento.

Figura 34 – Contorno de velocidade de vento até 100 m/s com velocidade de vento de 4 m/s



Fonte: Elaborado pelo autor. (2025).

Ao validar os resultados das simulações computacionais com os resultados calculados analiticamente na Seção 3.2 a partir de comparações com os valores das simulações CFD e os calculados, é possível observar que as simulações tridimensionais apresentaram soluções numéricas dentro do esperado.

Além disso, para todas as velocidades de vento simuladas, o defletor de flange conseguiu cumprir bem seu papel, visto que, a partir das imagens de contorno de fração mássica e isosuperfície de 20% do LFL, não observam-se concentrações de metano na região anterior da parede do defletor.

De uma forma geral as velocidades de vento impostas não foram suficientes para direcionar a nuvem de hidrocarbonetos novamente para o sentido no qual se deu o vazamento.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficácia de um defletor de flange com geometria retangular, contendo uma abertura lateral de 1,5 m de comprimento e altura e 0,9 m de largura, na dispersão de nuvens de hidrocarbonetos geradas por um vazamento em um flange de tubulação contendo metano sob pressão de 2 MPa e temperatura de 100°C. O vazamento considerado possui seção circular com diâmetro de 1 polegada. A avaliação foi conduzida por meio de simulações de fluidodinâmica computacional utilizando o software *Ansys Fluent*, com a geração de contornos de fração mássica e isosuperfícies correspondentes a 20% do LFL, a fim de verificar a eficácia do defletor em desviar a nuvem da direção predominante do vento.

O defletor proposto visa redirecionar a nuvem de hidrocarbonetos para uma região oposta à origem do vazamento, sem, no entanto, contemplar aspectos relacionados à detecção da nuvem, ainda que nada impeça a integração de sensores no dispositivo.

Os resultados indicam que o defletor de flange retangular com uma das paredes abertas demonstrou bom desempenho na condução da nuvem para a região correspondente à abertura, mesmo sob condições críticas de vento, como a velocidade de 4 m/s. Esse comportamento sugere a possibilidade de direcionar a nuvem para zonas de menor risco operacional, como áreas voltadas ao mar aberto.

Observou-se que, embora o modelo bidimensional represente uma alternativa atrativa pelo seu baixo custo computacional e aplicabilidade em estudos preliminares, a falta de precisão inviabilizou seu uso para fins conclusivos. Por outro lado, o modelo tridimensional forneceu resultados coerentes para a fração mássica, isosuperfícies e campos de velocidade. Ainda assim, é importante salientar que tais análises requerem complementações futuras para assegurar sua eficácia em aplicações reais. Estudos adicionais deverão abordar a resistência mecânica do defletor às pressões e temperaturas envolvidas no vazamento, aspectos que extrapolam o escopo deste trabalho e serão explorados posteriormente.

Outro ponto relevante refere-se à escassez de publicações acadêmicas sobre defletores de flange, o que limitou as possibilidades de validação direta dos resultados. Optou-se, então, por utilizar como base trabalhos que analisam a dispersão de hidrocarbonetos na ausência do defletor, tal como o trabalho de *Hansen* (13). Os cálculos analíticos apresentados na Seção 3.2 também serviram como suporte à verificação dos resultados das simulações CFD.

O trabalho de *Hansen* (13), realiza simulações CFD no programa *FLACS* (42) de dispersão e compara com resultados experimentais. As configurações presentes no *FLACS* são semelhantes as configurações utilizadas neste trabalho, o que reforça a escolha dos modelos utilizados. Em trabalhos futuros, a questão da validação será melhor abordada através de comparações cruzadas entre diferentes programas CFD.

Apesar de o estudo focar exclusivamente na dispersão da nuvem, é imprescindível reconhecer que vazamentos de metano também podem culminar em incêndios ou explosões. Para uma aplicação prática do dispositivo, é fundamental verificar sua integridade estrutural frente a tais eventos.

Durante o desenvolvimento do trabalho, algumas limitações foram impostas, principalmente pela versão estudantil do *Ansys Fluent*, que restringiu o número de elementos da malha. Essa limitação comprometeu a convergência dos resíduos de turbulência segundo os critérios estabelecidos e restringiu o domínio simulado a uma extensão de 5 m a partir do vazamento. Espera-se que, em estudos futuros, essas barreiras sejam superadas.

Nesse sentido, os desdobramentos futuros deste estudo incluem:

- Análise da influência de diferentes condições de processo (pressão e temperatura) na dispersão da nuvem;
- Investigação de variações geométricas do defletor e seu impacto na eficácia do desvio da nuvem;
- Estudo de diferentes cenários de vazamento, com variações na área e na posição da origem;
- Aquisição de licença comercial do *Ansys Fluent* para maior refinamento da malha;
- Avaliação fluido-estrutura para determinar as solicitações mecânicas suportadas pelo defletor;
- Inclusão de novos critérios de análise, como diferentes percentuais do LFL;
- Realização de novas validações cruzadas entre diferentes softwares de CFD.

Os resultados obtidos comprovam a aplicabilidade da modelagem computacional em diversas áreas da engenharia. Neste trabalho, sua aplicação foi voltada à análise de risco em plataformas *offshore*, setor de extrema relevância para o Brasil, dada sua expressiva produção de óleo e gás.

Adicionalmente, este estudo proporcionou o desenvolvimento de habilidades fundamentais em CFD e análise computacional, com potencial aplicação prática na indústria. O projeto evidenciou também o papel essencial da pesquisa no aprimoramento técnico-profissional, especialmente em um contexto desafiador de conciliação entre trabalho e formação acadêmica.

REFERÊNCIAS

- 1 J. E. Vinnem, *Offshore risk assessment: principles, modelling and applications of QRA studies*. London: Springer, 3 ed., 2014.
- 2 J. Spouge, *A guide to quantitative risk assessment for offshore installations*. Aberdeen: CMPT Publication, 1999.
- 3 S. Mannan, *Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 4 ed., 2012.
- 4 D. A. Crowl and J. F. Louvar, *Chemical process safety: Fundamentals with Applications*. Boston: Prentice Hall, 3 ed., 2011.
- 5 T. A. Kletz, *What went wrong?: Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 5 ed., 2009.
- 6 F. I. Khan and S. A. Abbasi, "Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 12, no. 5, pp. 361–378, 1999.
- 7 S. Sklavounos and F. Rigas, "Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 108, no. 1-2, pp. 9–20, 2004.
- 8 M. Dadashzadeh, F. Khan, K. Hawboldt, and P. Amyotte, "An integrated approach for fire and explosion consequence modelling," *Fire Safety Journal*, vol. 61, pp. 324–337, 2013.
- 9 M. L. Nayyar, *Piping Handbook*. McGraw-Hill Education, 7 ed., 2000.
- 10 KLINGER Brasil, "Flange protector," 2021.
- 11 BSI Standards Publication, "Explosive atmospheres - part 29-2: Gas detectors - selection, installation, use and maintenance of detectors for flammable gases and oxygen," Tech. Rep. BS EN 60079-29-2:2015, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2015.
- 12 ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Theory Guide*, 2025 r1 ed., 2025.
- 13 O. R. Hansen, F. Gavelli, M. Ichard, and S. G. Davis, "Validation of flacs against experimental data sets from the model evaluation database for lng vapor dispersion," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 6, pp. 857–877, 2010.
- 14 X. K. Chan-Cheng Chen, Shang-Hao Liu, "Evaluating lower flammability limit of flammable mixtures using threshold temperature approach," *Chemical Engineering Science*, 2018.
- 15 H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education, 2 ed., 2007.
- 16 T. Poinot and D. Veynante, *Theoretical and numerical combustion*. RT Edwards, Inc., 2005.
- 17 ANSYS Inc., *ANSYS Fluent User's Guide*, 2025 r1 ed., 2025.

- 18 J. H. Ferziger and M. Peric, *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science Business Media, 2002.
- 19 F. White, *Fluid Mechanics*. McGraw Hill, 7th ed., 2011.
- 20 P. E. Dimotakis, “The mixing transition in turbulent flows,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 409, pp. 69–98, 2000.
- 21 S. B. Pope, *Turbulent flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- 22 P. Moin and K. Mahesh, “Direct numerical simulation: a tool in turbulence research,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 30, no. 1, pp. 539–578, 1998.
- 23 D. C. Wilcox *et al.*, *Turbulence modeling for CFD*, vol. 2. DCW industries La Canada, CA, 1998.
- 24 F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- 25 F. R. Menter, M. Kuntz, and R. Langtry, “Ten years of industrial experience with the sst turbulence model,” in *Turbulence, heat and mass transfer*, vol. 4, pp. 625–632, 2003.
- 26 J. Blazek, *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 3 ed., 2015.
- 27 B. Poling, *The Properties of Gases and Liquids*. McGraw Hill Professional, 5th ed., 2000.
- 28 P. Atkins and L. Jones, *Chemical Principles: The Quest for Insight*. New York: W. H. Freeman and Company, 5 ed., 2010.
- 29 P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, and E. Tiesinga, “Data and analysis for the codata 2017 special fundamental constants adjustment,” *Metrologia*, vol. 55, no. 1, p. 125, 2018.
- 30 J. F. Thompson, B. K. Soni, and N. P. Weatherill, *Handbook of grid generation*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- 31 J. R. P. d. C. F. R. C. Barbara Araujo de Oliveira Siqueira, Flavio de Queiroz Pasqueti, “The influence of pass-flow rate in shutdown valves on the consequences of fires assessed through the integrity of structures on an offshore platform,” *20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 2024.
- 32 A. J. Kidnay and W. R. Parrish, *Fundamentals of Natural Gas Processing*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- 33 CCPS (Center for Chemical Process Safety), *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York: Wiley-AIChE, 2 ed., 2000.
- 34 S. Mokhatab, *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and Practices*. Gulf Professional Publishing, 4th ed., 2019.

- 35 American Society of Mechanical Engineers, *ASME B16.5-2017: Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS 1/2 Through NPS 24 Metric/Inch Standard*. New York: ASME, 2017.
- 36 P. Smith and R. Van Laan, *Piping and Pipe Support Systems: Design and Engineering*. McGraw-Hill Education, 2017.
- 37 American Petroleum Institute, *API Specification 6A: Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment*. Washington, DC: API Publishing Services, 21 ed., 2018.
- 38 J. M. Smith, H. C. Van Ness, and M. M. Abbott, *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. McGraw-Hill, 2005.
- 39 C. L. Yaws, *Yaws' Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Compounds*. Norwich, NY: Knovel, 2003.
- 40 W. L. Oberkampf and T. G. Trucano, "Verification and validation in computational fluid dynamics," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 209–272, 2002.
- 41 A. J. Chorin, "Numerical solution of navier-stokes equations," *Mathematics of Computation*, 1968.
- 42 Gexcon AS, *FLACS-CFD v25.1 User's Manual*, 25.1 ed., 2025.
- 43 N. Hemati Alam, E. Kashi, R. Habibpour, "Computational fluid dynamics simulation of gas dispersion in complex facilities using kit fox field experiments: Validation and statistical evaluation," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020.
- 44 S. R. Hanna, S. Tehranian, B. Carissimo, R. W. Macdonald, and R. Lohner, "Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown manhattan: An application of five computational fluid dynamics models," *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 85, no. 12, pp. 1713–1726, 2004.
- 45 J. Tu, G. H. Yeoh, and C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 3 ed., 2018.
- 46 P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Pub, 0 ed., 1998.
- 47 J. T. O. Ivo Babuska, "Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2004.
- 48 T. H. Michael, *Scientific Computing: An Introductory Survey*. The McGraw-Hill Companies Inc., New York, 2nd ed., 2018.