



Thiago Fernando Mota Gonsalves

**Estudo numérico da dispersão de gases inflamáveis em
plataformas de petróleo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof^a. Angela Ourivio Nieckele
Coorientador: Prof. Wellington Campos

Rio de Janeiro
Julho de 2021



Thiago Fernando Mota Gonsalves

**Estudo numérico da dispersão de gases inflamáveis em
plataformas de petróleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela
Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Angela Ourivio Nieckele

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Wellington Campos

Coorientador

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Eduardo Rangel Braga

Det Norske Veritas - DNV

Rio de Janeiro, 08 de julho de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Thiago Fernando Mota Gonsalves

Formado em Engenharia Química (2012) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Desenvolve diversos trabalhos como especialista técnico no Instituto Tecgraf PUC-Rio, atuando diretamente no ambiente Petrobras de forma a apoiar equipes de engenheiros onshore e offshore na melhoria de seus processos.

Ficha Catalográfica

Gonsalves, Thiago Fernando Mota

Estudo numérico da dispersão de gases inflamáveis em plataformas de petróleo / Thiago Fernando Mota Gonsalves; orientador: Angela Ourivio Nieckele ; coorientador: Wellington Campos. – 2021.

95 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Dispersão de gases. 3. Plataformas de petróleo. 4. CFD. 5. Gás metano. 6. TNT equivalente. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Campos, Wellington. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Dedico esse trabalho a Deus, a meus familiares e amigos, em especial à minha mãe Cláudia Mota, por toda educação e ensinamentos que me fizeram ser quem eu sou hoje... e à minha querida avó Benedita (*in memoriam*).

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, que é o autor e consumidor de minha fé. Fé essa que tem me mantido de pé e sempre confiante diante das adversidades e tempos difíceis.

À minha família, em especial à minha mãe Claudia Silvina Mota e avó Benedita Aparecida (*in memoriam*) por terem sonhado os meus sonhos junto comigo, e por todo apoio ao longo da vida.

Aos meus professores orientadores, Angela Ourivio Nieckele e Wellington Campos pela confiança e parceria na realização de um trabalho tão desafiador.

Aos meus colegas de trabalho do Instituto Tecgraf PUC-Rio coordenados por Thadeu Corseliun, por todo apoio e incentivos ao longo do curso.

A todos os colegas da UN-RIO/BUZIOS/PCM/PROJM gerenciada por Luiz Felipe e coordenada por Denyson Lima, por todo apoio e incentivos ao longo dessa jornada.

Aos colegas engenheiros Msc. João Alves, Dr. Norman Neumann, Dr. Eduardo Braga e Msc. Javier Aliaga pelos valiosíssimos conselhos técnicos para a realização e conclusão desse trabalho.

Aos professores que participaram da comissão examinadora.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Gonsalves, Thiago Fernando Mota; Nieckele, Angela Ourivio (Orientador); Wellington Campos (Coorientador). **Estudo numérico da dispersão de gases inflamáveis em plataformas de petróleo.** Rio de Janeiro, 2021. 95p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As atividades realizadas em estruturas Onshore e Offshore, relacionadas a exploração e produção de petróleo estão associadas ao risco iminente de vazamento de gás ou óleo, que encontrando qualquer tipo de ignição, pode causar incêndios e explosões com o potencial de causar perdas financeiras substanciais e mortes. No presente trabalho, a metodologia em CFD foi utilizada para analisar o vazamento de gás natural em um ponto localizado no módulo de compressão de gás em uma plataforma offshore. A turbulência do escoamento foi modelada com a metodologia RANS, empregando o modelo de duas equações κ - ϵ . Considerando a situação crítica, o vazamento foi analisado em regime permanente, e modelado como uma fonte pontual. Foram consideradas duas intensidades de vento: 0,5 m/s representando a condição de calmaria e 6,5 m/s representando a velocidade mais frequente, e uma única direção no sentido PROA-POPA. Para cada condição de vento, foram estudadas quatro direções de vazamentos distintos (direção de liberação do gás), ou seja, a partir da junção entre o bocal do compressor e o flange da tubulação de alimentação do sistema (localizados imediatamente acima do compressor) tem-se vazamentos nas direções norte, sul, leste e oeste. A partir dos resultados de sobrepressão (ΔP) (diferença entre a pressão ambiente (P_0) e a pressão máxima de onda de choque ($P_{m\acute{a}xima}$) obtida, pontos críticos foram identificados. O volume da nuvem foi determinado para cada cenário e, posteriormente, um cálculo de TNT equivalente (comparação do potencial da mistura explosiva com a massa de TNT necessária para produzir efeitos semelhantes) foi realizado para identificação dos potenciais riscos a estrutura offshore em caso de ignição do material gasoso disperso. Os resultados obtidos coincidiram com medidas experimentais de sobre pressão em situações semelhantes.

Identificou-se como o pior cenário, vazamento no flange do compressor na direção sul, correspondente a direção contrária ao vento, com alta concentração de gás natural numa grande região da plataforma.

Palavras-chave

Dispersão de gases; plataformas de petróleo; CFD; gás metano; TNT equivalente.

Abstract

Gonsalves, Thiago Fernando Mota; Nieckele, Angela Ourivio (Advisor); Wellington Campos (Co-advisor). **Numerical study of flammable gases dispersion in oil platforms**. Rio de Janeiro, 2021. 95p. MSc. Disserttion – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Oil exploration and production activities in Onshore and Offshore structures are associated with the imminent risk of gas or oil leakage, which encountering any type of ignition, can cause fires and explosions with the potential to cause substantial financial losses and deaths. In the present work, the CFD methodology was used to analyze the leakage of natural gas at a point located in the gas compression module on an offshore platform. The flow turbulence was modeled with the RANS methodology, using the two-equation κ - ε model. Consider the critical situation, the leak was analyzed in steady state, and modeled as a point source. Two wind intensities were considered: 0.5 m / s represents the calm condition and 6.5 m / s represents the most frequent speed, and a single direction in the PROA-POPA direction. For each wind condition, four distinct leakage results (direction of gas release) were studied, i.g., from the junction between the compressor nozzle and the system supply piping flange (driven above the compressor) there are leaks in the north, south, east and west directions. From the results of overpressure (ΔP) (the difference between the ambient pressure (P_0) and the maximum shock wave pressure ($P_{maximum}$) obtained, points obtained were separated. The cloud volume was determined for each scenario and, subsequently, a calculation of equivalent TNT (comparison of the potential of the explosive mixture with the mass of TNT necessary to produce similar effects) was performed to identify potential risks to the offshore structure in case of ignition make dispersed gaseous material. The results obtained coincided with experimental pressure measurements under similar conditions. It was identified as the worst scenario, a leak in the compressor flange in the south direction, corresponding to the direction against the wind, with a high concentration of natural gas in a large region of the platform.

Keywords

Gas dispersion; oil platforms; CFD; methane gas; TNT equivalent.

Sumário

1.	Introdução.....	20
1.1.	Principais Etapas de Processamento	23
1.2.	Revisão Bibliográfica	27
1.3.	Objetivo do Trabalho	30
1.4.	Estrutura do Trabalho	30
2.	Conceitos Básicos sobre Dispersão de Gases.....	32
2.1.	Fenômeno da Dispersão de Gases	32
2.2.	Modelos de Pluma e de Puff.....	32
2.3.	Modelos de Jatos.....	34
2.3.1.	Escoamentos Gasosos Através de Orifícios.....	38
2.4.	Fatores que Afetam a Dispersão	40
2.5.	Vazamentos (Recomendações de HSE)	43
2.5.1.	Análise Preliminar de Risco	44
2.5.2.	Identificação dos Pontos de Vazamentos	44
2.5.3.	Vazamentos Ocasionalmente – Taxa de Falha	45
2.6.	Deteção de Gases	47
2.6.1.	Limites Inflamabilidade e Níveis de Ação	48
2.6.2.	Modelo TNT Equivalente	49
3.	Modelagem Matemática	53
3.1.	Definição das Condições Meteorológicas.....	55
3.2.	Equações de Conservação.....	57
3.3.	Condições de Contorno	59
3.3.1.	Condição ao Longe (“Farfield”).....	59
3.3.2.	Superfícies Sólidas e Piso da Plataforma.....	60
3.3.3.	Fonte de Vazamento (“Source Point”)	60
4.	Modelagem Numérica.....	63
4.1.	Malha.....	64
4.2.	Teste de Sensibilidade de Malha.....	64
4.3.	Definição do Tamanho do Domínio	67
4.4.	Condição Inicial	70
5.	Estudo de Casos	73

6.	Considerações Finais	83
6.1.	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	85
	Referências Bibliográficas	86
	ANEXO A - Validação de um Jato.....	91

Lista de figuras

Figura 1-1 - Módulos de processamento do FPSO P-75. (Petróleo Brasil e Energia).....	20
Figura 1-2: Imagem dos FPSO's P74, P75, P76 e P77 que operam no campo de Búzios. (Imagem extraída de informativo externo Petrobras, acessado em 11/11/19).	21
Figura 1-3 - (a) Incêndio na Plataforma Piper Alpha, (b) Plataforma P-36 após acidente, (c) FPSO Cidade São Matheus. (Tammy Karas-Griggs, Folha online, Click Petróleo e Gás).	22
Figura 1-4: Visão geral do processamento de petróleo (Petrobras S/A, adaptado).	24
Figura 1-5: Diagrama simplificado do processamento da fase óleo (Petrobras S/A, adaptado).	25
Figura 1-6: Diagrama simplificado do processamento da fase gás (Petrobras S/A, adaptado).	26
Figura 1-7: Diagrama simplificado do processamento da fase água (Petrobras S/A, adaptado).	26
Figura 2-1: Pluma formada por um vazamento contínuo (Crowl et al., 2002, adaptado).	33
Figura 2-2: Puff formado por um vazamento instantâneo (Crowl et al., 2002).	33
Figura 2-3: Zonas de um jato (Benintendi, 2010).	34
Figura 2-4: Jato sônico sub-expandido (M - número de Mach) (Lees, 2012, adaptado).	37
Figura 2-5: Escoamento crítico de gás através de orifício (Adaptado de Birch, 1987).	37
Figura 2-6: Altura versus velocidade do vento acima do solo (os números dentro da figura são as percentagens de velocidade de velocidade máxima ao longo da altura (Lees, 2012, apud Fiates, 2015).	41
Figura 2-7: Aumento da altura de liberação diminui a concentração do solo (Crowl et al., 2002, adaptado).	42

Figura 2-8: Relação entre a velocidade do vento a 10 metros de altura e o delta de temperatura para cada inverso do comprimento de <i>Monin-Obukhov</i> (Bakkum e Duijm, 2005, adaptado).	42
Figura 2-9: Tipo de liberação em vazamentos (HSE, 2002, adaptado).	44
Figura 2-10: Taxa de falhas em sistemas (vazamento / Sistema ano) (HSE, 2002).	45
Figura 2-11: Taxa de falhas em equipamentos (vazamento / equipamento ano) (HSE, 2002).	45
Figura 2-12: Gráfico de efeitos normalizados em função da distância normalizada do método TNT (Lees, 1996).	51
Figura 3-1: Geometria 3D baseado em um FPSO	53
Figura 3-2: Geometria simplificada de uma plataforma do tipo FPSO, com destaque para o módulo de compressão de gás.	54
Figura 3-3: Geometria inscrita no volume de controle (farfield).	54
Figura 3-4: Rosa-dos-Ventos da plataforma	56
Figura 3-5: Direções possíveis no vazamento do flange do compressor .	61
Figura 4-1: Ilustração da nuvem de gás natural. Linhas 1, 2 e 3 de monitoramento. (a) Vista superior; (b) Vista Lateral.	65
Figura 4-2: Teste de refino de malha. Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo das linhas de monitoramento. (a) linha 1; (b) linha 2; (c) linha 3.	66
Figura 4-3: Malha gerada no ICEM 21 com refinamento especial.	67
Figura 4-4: Teste de tamanho de domínio (<i>farfield</i>) a) $D = 2L$, b) $D = 5L$ e c) $D = 10L$	68
Figura 4-5: Ilustração da nuvem de gás natural. Linhas 1 e 2 para monitoramento da concentração.	69
Figura 4-6: Teste de tamanho de domínio (<i>farfield</i>). Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo da linha 1.	69
Figura 4-7: Teste de tamanho de domínio (<i>farfield</i>). Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo da linha 2	69
Figura 4-8: Vetores velocidade, para um vento de 0,5 m/s na direção X (plano x-z a uma elevação y de 8m do nível da plataforma) – Vista superior.	70

Figura 4-9: Isolinhas de magnitude de velocidade para um vento de 0,5 m/s na direção X (plano x-y em z=8m) – Vista lateral.....	71
Figura 4-10: Vetores velocidade, para um vento de 6,5 m/s na direção X (plano x-z a uma elevação y de 8m do nível da plataforma) – Vista superior.	71
Figura 4-11: Isolinhas de magnitude de velocidade para um vento de 6,5 m/s na direção X (plano x-y em z=8m) – Vista lateral.	72
Figura 5-1: Vista superior de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.....	76
Figura 5-2 - Vista superior de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.....	77
Figura 5-3 - Vista lateral de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.	78
Figura 5-4 - Vista lateral de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.	78
Figura 5-5 - Contorno em Y da nuvem entre 0% e 100% do L.I.I, ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.	79
Figura 5-6 - Contorno em Y da nuvem entre 0% e 100% do L.I.I, ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.	80
Figura 5-7 - Nuvens de gás natural na condição de vento de 0,5 m/s: Isosuperfície na concentração do L.I.I - Cenários 1, 2, 3 e 4.	81
Figura 5-8 - Nuvens gás natural na condição de vento de 6,5 m/s: Isosuperfície na concentração do L.I.I - Cenários 5, 6, 7 e 8.	82
Figura A-1: (a) Geometria; (b) malha utilizadas no estudo do jato.	91
Figura A-2: Ângulo de espalhamento do gás metano.	92
Figura A-3: Perfil de velocidade do metano em diferentes alturas.	93
Figura A-4: Decaimento da velocidade na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial; D = diâmetro do furo).	94
Figura A-5: Decaimento da velocidade na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial; D = diâmetro do furo).	94

Figura A-6: Decaimento da fração molar na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial, D = diâmetro do furo).94

Figura A-7: Decaimento da fração molar na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial, D = diâmetro do furo)95

Lista de Tabelas

Tabela 2-1: Sistema de classificação de vazamento de hidrocarboneto (HSE, 2000, apud Fleck, 2008).	44
Tabela 2-2: Alguns efeitos de danos produzidos por uma onda de choque (Lees, 1996).	52
Tabela 3-1: Composição do Gás Natural e seus respectivos limites inferior e superior de inflamabilidade.....	57
Tabela 4-1: Teste de sensibilidade de malha – Parâmetro das simulações.	65
Tabela 5-1: Volumes da nuvem de gás inflamável e cálculo de TNT equivalente (na concentração do L.I.I).	74

Lista de símbolos

A	Área transversal ao orifício
C_μ	Parâmetro do modelo $k - \varepsilon$
$C_{1\varepsilon}$	Parâmetro do modelo $k - \varepsilon$
$C_{2\varepsilon}$	Parâmetro do modelo $k - \varepsilon$
C_1	Metano
C_2	Etano
C_3	Propano.
C_4	Butano.
C_5^+	Pentano e hidrocarbonetos mais pesados
g	Vetor gravidade
P	Pressão
m	Massa, kg ou vazão mássica do fluido
U	Vetor velocidade
L	Comprimento de Monin-Obukhov
u_*	Velocidade de atrito
T	Temperatura
z_0	Comprimento rugoso
\bar{x}	Vazamento de gás na direção \bar{x}
^+x	Vazamento de gás na direção x
^+z	Vazamento de gás na direção z
\bar{z}	Vazamento de gás na direção \bar{z}

Letras Gregas

γ	Relação entre os calores específicos a pressão e volume constantes (C_p / C_v)
δ	Delta de Kroenecker
Φ	Variável ou propriedade do escoamento num instante t
κ	Energia cinética turbulenta
ρ	Massa específica
μ	Viscosidade absoluta
μ_T	Viscosidade turbulenta
σ_κ	Parâmetro do modelo $k - \varepsilon$
σ_ε	Parâmetro do modelo $k - \varepsilon$
τ	Tensor Tensão, kg/m.s^2
ψ_0	Variável utilizada no cálculo da vazão mássica inicial de gás de um orifício

Lista de abreviações

CCPS	Center for Chemical Process Safety
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional.
FPSO	Floating, Production, Storage and Offloading
GLP	Gás liquefeito de petróleo
HSE	Health & Safe Executive
L.I.I	Limite inferior de Inflamabilidade
L.S.I	Limite Superior de Inflamabilidade
LES	Simulação de Grandes Escalas
<i>RANS</i>	Equações de Médias de Reynolds
<i>DNS</i>	Simulação Numérica Direta

Operadores

$\nabla \cdot \odot$	Operador Divergente
$\nabla \odot$	Operador Gradiente.
$\overline{\odot}$	Grandeza Média
$\int_a^b \odot$	Operador Integral
$\frac{\partial \odot}{\partial \odot}$	Derivada
$\odot \otimes \odot$	Produto Escalar

1. Introdução

A maioria das reservas de petróleo do Brasil encontram-se em campos marítimos e muitas das vezes em águas ultra-profundas. Para operar esses campos unidades de processamento de petróleo e gás natural, são necessárias, como ilustrado na Figura 1-1, unidades de produção do tipo FPSO (Floating, Production, Storage and Offloading), sigla em inglês para Navio Flutuador de Produção, Estocagem e Bombeio de óleo. Estas possuem capacidade de produzir aproximadamente 24.000 m³/dia (aprox. 150 mil bpd), podendo atingir um pico de produção de 95.000 m³/dia de óleo equivalente (aproximadamente 600 mil boed), a depender de sua localização.



Figura 1-1 - Módulos de processamento do FPSO P-75. (Petróleo Brasil e Energia)

Recentemente, a empresa Petrobras lançou diversos novos sistemas de produção que entraram em operação para dar suporte aos novos campos descobertos, como as plataformas do tipo FPSO (Floating Production Storage and Offloading – sigla em inglês para Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência de Petróleo) P-74, P-75, P-76 e P-77, ilustradas na Figura 1-2 no campo de Búzios. (Petrobras S/A).



Figura 1-2: Imagem dos FPSO's P74, P75, P76 e P77 que operam no campo de Búzios. (Imagem extraída de informativo externo Petrobras, acessado em 11/11/19).

Pupe e da Silva (2006) ressaltam que as atividades offshore relacionadas à exploração e à produção de petróleo e gás oferecem alto risco à saúde e à vida dos trabalhadores, pois estes estão expostos a possíveis liberações acidentais de gás tóxico ou inflamável. Além disso, o trabalho em regime de confinamento, muitas vezes, pode dificultar a logística de atendimentos mais especializados, devido às grandes distâncias que se encontram da costa.

Acidentes em plataformas de petróleo envolvendo gases inflamáveis e/ou tóxicos podem aumentar significativamente o nível de risco ao meio ambiente e aos trabalhadores. E o fato da unidade offshore estar a quilômetros de distância da costa torna crucial a realização, em larga escala, de estudos e de cenários de falha a fim de estimar medidas de proteção e mitigação de acidentes, tal como a adequação de detectores de gás e fumaça e o reforço de estruturas devido a explosões causadas por liberações de gases e outros (Fiates, 2016).

Em 6 de julho de 1988, na plataforma Piper Alpha (Figura 1-3a), localizada no Mar do Norte, a aproximadamente 200 km a noroeste de Aberdeen, Escócia, uma série de falhas sistêmicas causou uma explosão,

que evoluiu para um incêndio de grandes proporções, culminando na morte de 167 pessoas e na perda de bilhões de dólares, além da destruição total da unidade (HSL – *Health and Safety Laboratory*, 2002). Após esse acidente, análises de riscos passaram a ser obrigatórias nas unidades offshore.

Dentre os acidentes ocorridos no Brasil, os mais conhecidos e graves ocorreram em águas dos litorais fluminense e capixaba: o primeiro acidente, ocorrido em 15 de março de 2001, envolveu a P-36 (Figura 1-3b), a maior plataforma de produção de petróleo do mundo na época, localizada no campo de Roncador, no litoral norte fluminense. Problemas relacionados ao sistema de água do tanque de drenagem de emergência da coluna de popa bombordo desencadeou uma série de duas explosões, que resultou na morte de 11 funcionários e a perda total da unidade (ANP, 2001).

Outro acidente, de grande repercussão nacional, ocorreu com o FPSO Cidade de São Mateus (Figura 1-3c), em 11 de fevereiro de 2015, vitimando 9 pessoas, deixando outras 26 feridas. O evento aconteceu com o navio de bandeira panamenha operado pela norueguesa BW Offshore, e foi provocado por uma série de erros técnicos e procedimentais. De maneira geral, a apuração identificou que um dos flanges instalados na casa de bombas encontrava-se fora do padrão, o que posteriormente provocou um vazamento de gás seguido de uma grande explosão. A falta de planejamento e de procedimentos de análises de riscos agravaram a situação, uma vez que brigadistas foram enviados ao local do acontecimento, ainda com os alarmes de gás acionados (ANP, 2015).



Figura 1-3 - (a) Incêndio na Plataforma Piper Alpha, (b) Plataforma P-36 após acidente, (c) FPSO Cidade São Matheus. (Tammy Karas-Griggs, Folha online, Click Petróleo e Gás).

Devido à alta possibilidade de acidentes, a realização de análises como por exemplo a análise preliminar de risco (APR), estudo de perigo e operacionalidade (HAZOP) e a identificação de perigo (HAZID) se tornaram

fundamentais, ajudando a prevenir e minimizar impactos destes acidentes. Para realizar essas análises de risco é necessário compreender quais as etapas envolvidas no processamento de petróleo e gas, realizados no interior de um FPSO.

1.1. Principais Etapas de Processamento

Os processos de um FPSO são organizados de forma modular. Eles vão desde os módulos responsáveis pelo recebimento e tratamento do primeiro óleo, passando pela fase de exportação, remoção de gases contaminante (CO_2 , H_2S), até a geração de energia para a unidade e o casario.

Os *risers* são tubulações especiais construídas para suportar as pressões exercidas pela imensa lâmina d'água. Esses tubos são responsáveis por elevar o petróleo do piso marinho até a superfície. Chegando à plataforma, os *risers* são conectados a um conjunto de válvulas e instrumentos de controle, chamados *manifolds*, que proporcionam flexibilidade na operação da plataforma.

Localizados no mesmo módulo dos *manifolds*, os lançadores de PIG são os equipamentos responsáveis pela limpeza das linhas de elevação e de equipamentos submarinos, que, por ação mecânica, removem parafinas e outras substâncias que aderem às paredes internas das tubulações. O óleo proveniente do *manifold* é imediatamente alinhado aos dutos principais de grosso calibre chamados *headers*, que se incumbem da coleta do óleo proveniente dos diversos poços produtores de petróleo.

Após alinhado, o petróleo é direcionado aos pré-aquecedores, onde a ele é incrementado uma temperatura cerca de 5°C . Depois da etapa prévia de aquecimento, o petróleo, então, segue para o aquecedor de produção. Nele, são encontrados trocadores de calor do tipo casco tubo, permitindo que a água quente, sob pressão, percorra a estrutura interna do trocador, constituída por vários tubos de pequeno calibre, possibilitando a máxima troca de temperatura entre a água e o petróleo. Através desse processo, a água sede calor latente ao petróleo a uma temperatura de 180°C ,

aquecendo-o a 80°C – temperatura considerada ótima para o início do processo de separação do óleo.

Após ser enquadrado nessa temperatura, o petróleo é encaminhado para o separador de produção, que também é conhecido como separador de primeiro estágio. Na Figura 1-4, encontra-se representada a visão geral do processamento de petróleo, conforme descrito:

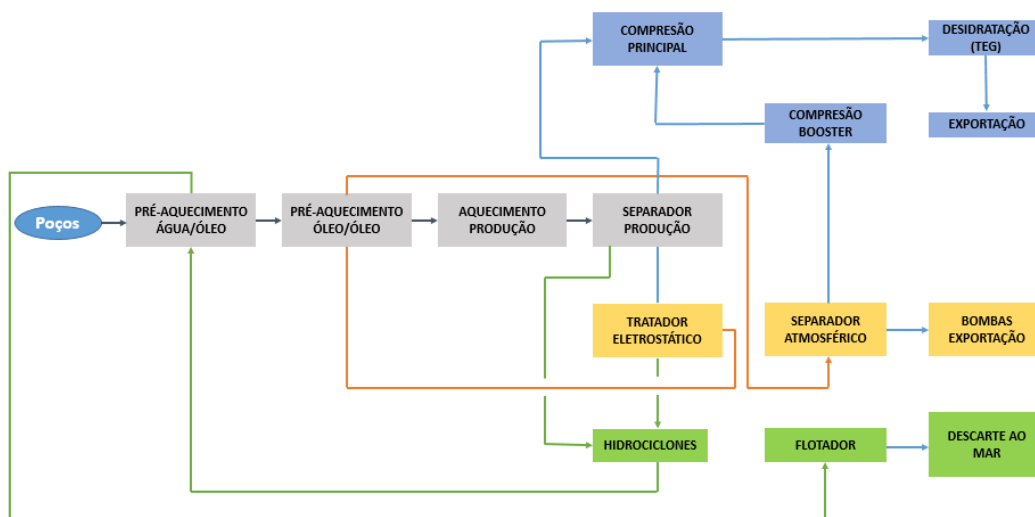


Figura 1-4: Visão geral do processamento de petróleo (Petrobras S/A, adaptado).

O separador de primeiro estágio é um vaso responsável pela troca primária entre água, gás e óleo. Utilizando agentes desmulsificantes adequados e realizando o controle de algumas variáveis – tais como temperatura e pressão, como também nível de interfaces óleo/água e gás/óleo –, o separador de produção garante que as fases óleo, gás e água, sejam tratadas separadamente. Em seguida, cada uma das fases é tratada de forma separada, conforme os itens a seguir:

Fase óleo: Após passar pelo separador de primeiro estágio, o óleo segue para o tratador, onde são enquadrados os teores de salinidade de BSW (água e sedimentos). O óleo que sai do tratador é resfriado em um trocador do tipo placas paralelas, em que o fluido de resfriamento é a água do mar. Antes de entrar no separador atmosférico, o processo de resfriamento diminui a temperatura do petróleo de 80°C para em torno de 60°C.

No separador atmosférico ocorre a estabilização do óleo, e, de forma paralela, são efetuados procedimentos de recuperação dos gases

separados nessa etapa, de forma a maximizar toda a produção de gás. Na Figura 1-5, pode-se observar o processo representativo de recuperação da fase óleo.

A partir desse ponto, o óleo é encaminhado para os tanques de carga do navio, e segue seu destino até chegar à refinaria.

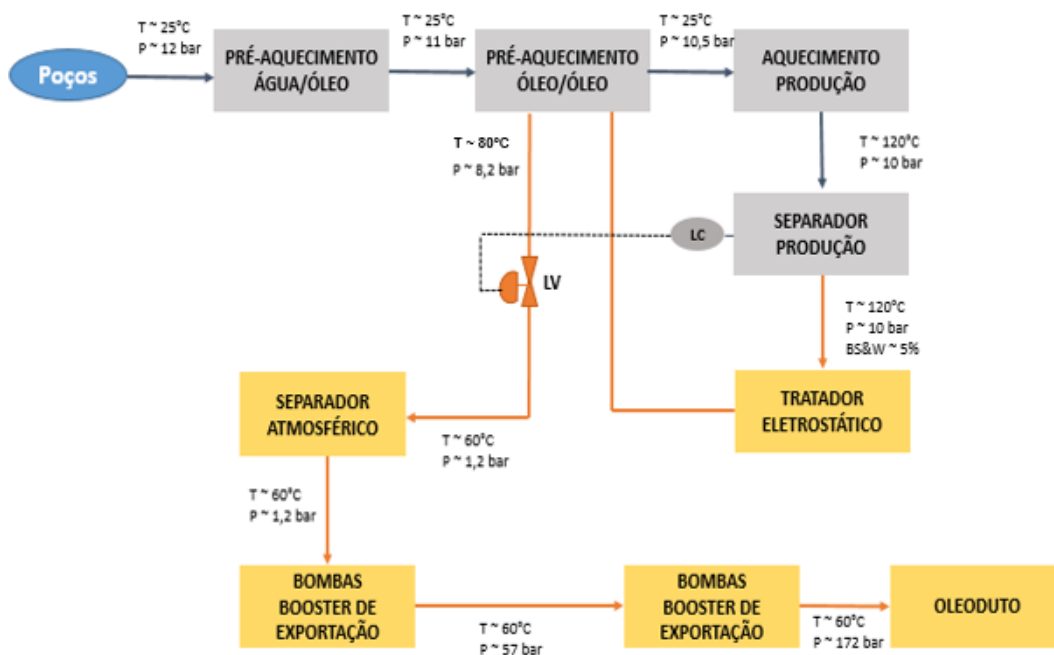


Figura 1-5: Diagrama simplificado do processamento da fase óleo (Petrobras S/A, adaptado).

Fase gás: Em seguida à saída do separador de primeiro estágio, o gás precisa ser desidratado e comprimido para que esteja pronto para o uso. Ao sair do separador de produção, o gás traz consigo quantidades consideráveis de líquido, que são retiradas através do vaso chamado *Safety* antes da chegada ao compressor. Os vasos *Safety* cumprem com a função de separação líquido/gás, minimizando o arraste de líquidos aos compressores, evitando danos.

O compressor é uma máquina operatriz acionada por motores de alta potência, compostos por um resfriador de gás e por um vaso para separação do condensado, que é formado após a compressão e ao resfriamento do gás. O gás comprimido segue, então, para seu último estágio de compressão: a torre de TEG, que utiliza o etileno glicol como fluido de absorção. A operação é maximizada pelo aumento da pressão e

pela redução da temperatura. Na Figura 1-6, observa-se a representação simplificada do processo para a recuperação da fase gás.

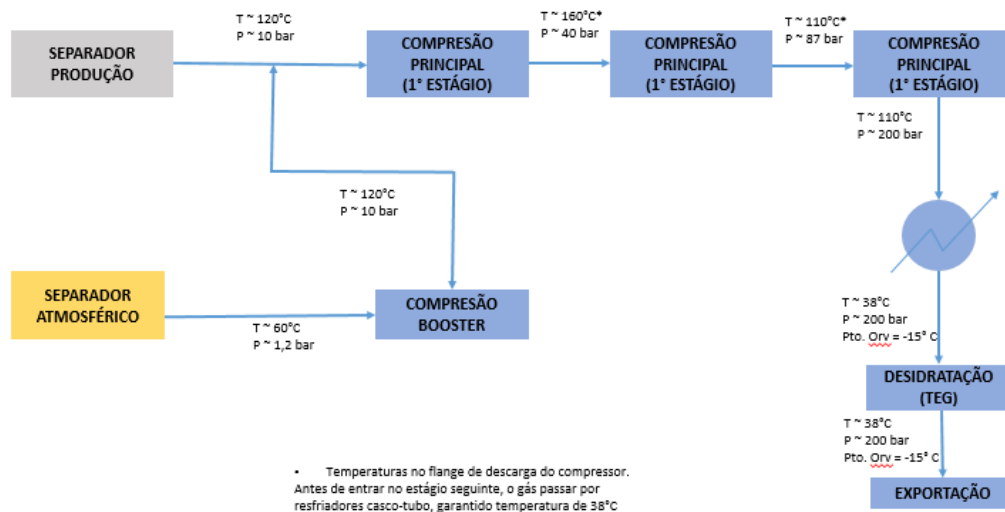


Figura 1-6: Diagrama simplificado do processamento da fase gás (Petrobras S/A, adaptado).

Fase água: A água – oleosa a 80°C – proveniente do separador trifásico entra numa bateria de hidrociclones que, através da força centrípeta, separam parte do óleo da água, enviando cada fase para seu respectivo processo de reciclo. Isenta de óleos e graxas, a água passa novamente pela etapa de pré-aquecedores, antes de entrar no flotador, para enquadramento final, de acordo com as normas técnicas, e é descartada para o mar (Figura 1-7).

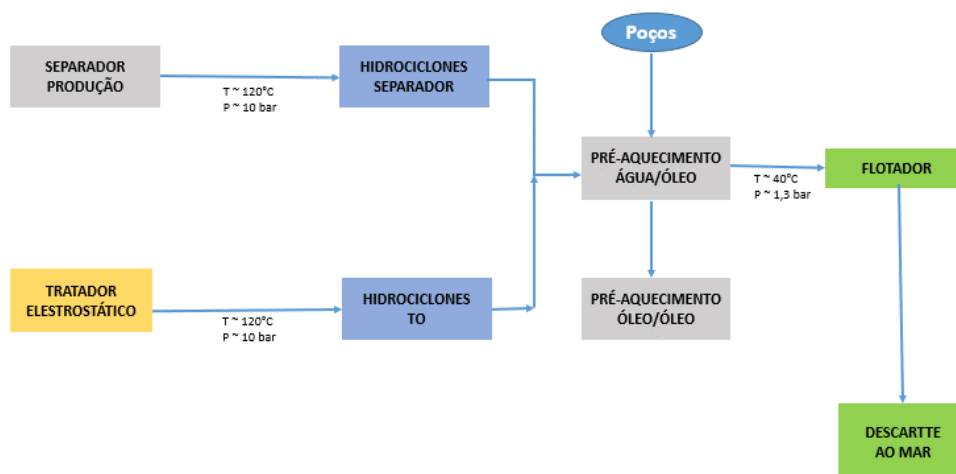


Figura 1-7: Diagrama simplificado do processamento da fase água (Petrobras S/A, adaptado).

Em seguida, após passar por todas as suas etapas de separação e tratamento, o óleo é encaminhado para os tanques da embarcação, que, além de serem utilizados para sua estocagem, são empregados para manter a estabilidade da plataforma.

Depois de aproximadamente 7 dias de produção, o óleo estocado nos tanques internos é submetido a uma manobra conhecida como *Offloading*, na qual o óleo é bombeado para um navio aliviador.

A água que não é descartada é condicionada em tanques, que também recebem água tratada do mar, que é empregada no processo conhecido como “injeção de água”. Esse processo, que ocorre no poço de petróleo, tem como principais objetivos a manutenção da pressão do reservatório e o deslocamento do óleo na direção dos poços produtores (Cordeiro *et al.*, 2007). Todas as etapas envolvendo a extração e produção de petróleo são altamente complexas, sendo assim devem ser executadas seguindo os mais rigorosos processos de segurança e qualidade, de forma a atender a todas as exigências dos órgãos de controle.

1.2. Revisão Bibliográfica

Na década de 80, Birch *et al.* (1984, 1987) realizaram experimentos nos quais se pretendia realizar a avaliação do campo de concentração e o decaimento da velocidade do gás natural, na faixa de pressão de 2 a 70 bar. Para obtenção dos seus resultados, o autor utilizou um equipamento com um orifício de 2,7 mm de diâmetro, liberando gás metano como gás natural, considerando o peso molecular médio de 17,32. O conhecimento desses dois parâmetros fornece bons indicativos sobre a posição em que o gás atinge sua condição de inflamabilidade.

Segundo Cullen (1990), o Executivo de Saúde e Segurança Mundial (HSE – *Health & Safety Executive*) começou a coletar em banco de dados e disponibilizar para as operadoras informações sobre vazamentos de hidrocarbonetos em instalações offshore, devido ao acidente ocorrido no Mar do Norte com a plataforma de produção de petróleo Piper Alpha, citado anteriormente.

Cleaver *et al.* (1994) investigaram a influência da ventilação natural no interior de uma plataforma offshore, tendo em vista os movimentos de ar interno no interior das unidades, que não permitem que vazamentos menores se acumulem, formando misturas inflamáveis. Para realização de seus experimentos, os autores lançaram mão da modelagem matemática, do túnel de vento, assim como medições em campo. Por fim, eles ressaltam a importância da manutenção da taxa de ventilação de fundo, em uma unidade offshore, e propõem estudos mais detalhados a respeito do comportamento de misturas multicomponentes.

Em seus estudos, Santiago (2003) pesquisou sobre os processos de dispersão e combustão de uma mistura gasosa, de modo a estimar os resultados da explosão, em caso de ignição da nuvem inflável. Para estimar os campos de sobrepressão, resultantes das explosões de nuvens de GLP, o autor fez uso do método Multienergi. Áreas congestionadas pela presença de árvores, hortos e florestas foram considerados para a geração da turbulência. Para avaliação dos efeitos das sobrepressões, distâncias de 10 a 100 m foram consideradas.

Várias simulações de dispersão de gases foram realizadas por Fleck (2008), que utilizou a abordagem em CFD, tendo como parâmetro uma unidade offshore. Através dos resultados adquiridos, o autor pôde analisar as nuvens de gás geradas e, assim, aplicando a estratégia de alocar linhas perpendiculares ao piso da unidade, de forma a permitir o acompanhamento da variação da concentração de gás ao longo das mesmas. Desse modo, obteve informações suficientes para propor um sistema de detecção de gases relacionados (quantidade e posicionamento dos instrumentos).

Já Qiao *et al.* (2010) valeram-se da ferramenta FLACS para realizar uma série de simulações e análises em CFD para a quantificação de plumas gasosas, a partir de vazamentos com potencial de formação de nuvens explosivas. As análises foram realizadas tendo como base uma geometria 3D que simula a instalação de processo onshore, que é toda fechada, com suas paredes sendo modeladas como placas. Nesse trabalho, os autores também destacam a importância da modelagem

correta das estruturas, uma vez que elas tendem a criar grandes zonas de recirculação e configurar os principais padrões dentro do módulo.

Estudos de simulação de jatos subsônicos e sônicos utilizando o software OpenFOAM foram realizados por Fiates *et al.* (2016). Para a configuração de seus experimentos, consideraram dois experimentos com pressão a montante de 2,0 e 3,5 bar em um domínio computacional de base igual a 0,1 m x 0,05 m e 1 m de altura, e compararam seus resultados com os dados obtidos por Birch *et al.* (1984, 1987), chegando à conclusão de que seus resultados apresentaram boa concordância com os dados experimentais. Utilizando a mesma configuração acima, os autores também compararam a utilização dos modelos de turbulência $k - \varepsilon$ e $k - \omega$. Através da análise dos resultados, puderam concluir que ambos os modelos utilizados apresentavam, boa concordância com os dados experimentais, sem nenhuma discrepância significativa entre eles.

Li *et al.* (2018) propuseram um estudo a partir da integração de cenários do ambiente offshore. Os autores apresentam uma abordagem pouco comentada na literatura: a simulação de gás e a dispersão e a deflagração de gás acima do nível do mar, a partir de uma liberação submarina, com intuito de se estudar o processo de evolução do cenário, além dos impactos da pluma de gás dispersada nas estruturas das embarcações offshore.

Numa unidade offshore, é de fundamental importância que as análises de riscos de perigo de explosão sejam realizadas, de forma a identificar a concentração e os possíveis caminhos que poderão ser percorridos pelas nuvens de gás. Em uma situação na qual a plataforma está completamente tomada por gás com uma mistura estequiométrica de ar – caracterizando o pior cenário –, não é representativo um estudo de dispersão de gases em que se tem como objetivo a tomada de decisão. Porém, a representação de um cenário realista para dispersão gasosa deve descrever precisamente as condições de vazamento de gás e o campo de ventilação, assim como o detalhamento das áreas de grandes congestionamentos estruturais e pontos de recirculação de ar, como módulos offshore (Barcelos, 2018).

Baseado na revisão da literatura, observa-se que os avanços computacionais e a melhoria na formulação de algoritmos e técnicas numéricas, tais quais as que utilizam a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) como base de seus processos, vêm sendo largamente utilizados na resolução de problemas envolvendo escoamentos de fluidos em unidades offshore. Isso porque seu uso é flexível, além de apresentar boas vantagens econômicas na formulação e resolução de entraves sugeridos. Nota-se ainda que existe muita incerteza nas melhores práticas para minimizar riscos de acidentes.

Dessa forma, no presente trabalho, pretende-se analisar a dispersão de gases inflamáveis, levando-se em conta diferentes parâmetros de vento, velocidade e direção de vazamento. O presente estudo também visa quantificar e comparar com dados da literatura, o potencial de risco e danos, considerando a condição de ignição da nuvem gasosa. Tais riscos possuem implicações tanto econômicas quanto de segurança, dessa forma a metodologia aplicada nesse trabalho tem como objetivo chamar atenção para importância de se manter um sistema de detecção de gases robusto e calibrado, para a rápida identificação e mitigação de situações críticas.

1.3. Objetivo do Trabalho

O presente trabalho propõe o estudo da dispersão de gases inflamáveis a partir de uma plataforma *offshore*. Também é analisado o comportamento das nuvens de gás geradas através de simulações numéricas em CFD, e, posteriormente, é sugerida uma metodologia para a quantificação do potencial de dano causado à unidade, em caso de ignição da nuvem inflamável, através da técnica de TNT equivalente. As simulações levam em consideração parte de um *layout* típico de uma plataforma de produção de petróleo (FPSO), além de condições meteorológicas da região em seu entorno.

1.4. Estrutura do Trabalho

Para o melhor entendimento desse estudo, a estrutura dessa dissertação foi organizada conforme os itens abaixo:

No capítulo 1, é realizada uma breve introdução sobre os riscos associados à indústria de petróleo e gás, assim como a apresentação dos principais eventos causadores de acidentes. Ademais, são exibidas as principais estruturas de um FPSO, além de um detalhamento de seus processos fundamentais. Nesse capítulo também são apresentados a motivação para a realização do referido estudo e uma revisão bibliográfica sobre o tema, de forma a apresentar alguns dos principais trabalhos contidos na literatura relacionados à dispersão de gases.

No capítulo 2 são apresentados todos os conceitos básicos relacionados a dispersão de gases, os principais fatores que afetam a dispersão, e a identificação dos principais sistemas que tendem a falhar numa unidade offshore. Nesse capítulo também são apresentados os conceitos sobre o modelo de TNT equivalente utilizado nesse trabalho, e a definição do problema de engenharia proposto.

No capítulo 3, é apresentado a modelagem matemática, tal como os modelos utilizados para descrever o fluxo de fluido, na resolução de problemas de dispersão. Também é apresentada a discretização das condições de contorno utilizados nesse estudo.

No capítulo 4, mostra-se o estudo de modelagem numérica, onde são realizados os testes de sensibilidade de malha, definição do tamanho do domínio de controle e definição das condições iniciais.

O capítulo 5 exhibe o estudo de caso realizado nesse trabalho, de forma a apresentar todos os resultados e discussões gerados a partir das simulações realizadas.

E por fim, as conclusões, sugestões e recomendações para trabalhos futuros são vistas no capítulo 6.

2. Conceitos Básicos sobre Dispersão de Gases

Neste tópico, são apresentadas as principais causas que levaram o aumento dos estudos de dispersão de gases em ambientes offshore, assim como aplicações diversas de modelamento do fenômeno em unidades de produção de petróleo. Também são expostas as principais etapas que envolvem o processo de dispersão discutidos neste trabalho, desde a produção de óleo, passando pelo vazamento de gás e sua detecção, até seu potencial de destruição, em caso de ignição da nuvem.

2.1. Fenômeno da Dispersão de Gases

Os casos de dispersão de gases começaram a ser estudados a partir das chaminés das indústrias. Ao longo do tempo, a importância de seu estudo foi aumentando e os conhecimentos passaram a ser aplicados nas áreas de segurança de plantas de processo (Lees, 2005). Esse fenômeno é explicado por Ferreira (2014) como sendo a difusão de um material em um outro, numa determinada região ou volume.

Nesse cenário, os estudos dos modelos de dispersão tornaram-se importantes para a disciplina de segurança, tendo em vista que é dessa maneira que se consegue explicar o comportamento e a interação dos gases com os outros tipos de materiais, como também sua complexidade quando em contato com o ar e sua respectiva nuvem gerada, além da determinação de suas concentrações em regiões de interesse.

2.2. Modelos de Pluma e de Puff

Após a liberação, o material tóxico transportado pelo vento pode assumir comportamentos distintos. Dois modelos de dispersão são importantes para melhores entendimento e enquadramento do fenômeno: o modelo de Plumas e o modelo de Puff.

O modelo de Plumas é caracterizado por um perfil de concentração

em estado estacionário, no qual o material é dispersado a partir de um vazamento contínuo de uma fonte pontual, apresentando características de forma cônicas (Figura 2-1). As plumas podem escoar no regime laminar ou transicionar para o regime turbulento. Os perfis de velocidade e de concentrações de médias temporais são semelhantes, e aproximadamente gaussianos (Lees, 2005; Fleck, 2008).

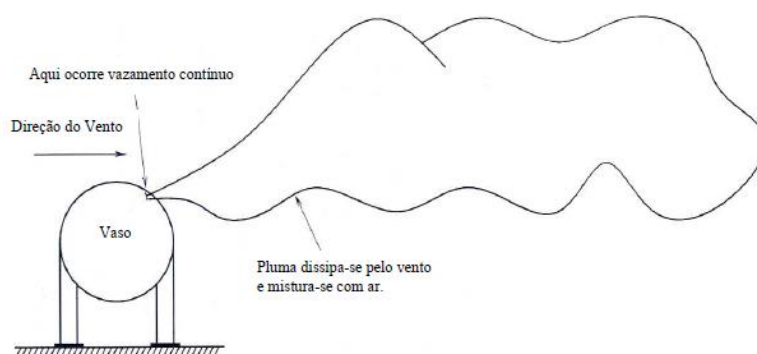


Figura 2-1: Pluma formada por um vazamento contínuo (Crowl et al., 2002, adaptado).

Já o modelo de Puff representa uma nuvem de gás neutra com flutuabilidade positiva, sendo caracterizado por um perfil de concentração em função do tempo de vazamento de um determinado material a partir de uma fonte única, que libera uma quantidade fixa de matéria para o meio. Um exemplo desse modelo seria a liberação repentina de uma quantidade fixa de material gasoso, oriunda de uma ruptura de um vaso de estocagem, gerando uma grande nuvem de vapor, que se afasta do ponto de ruptura (Fleck, 2008), conforme Figura 2-2.

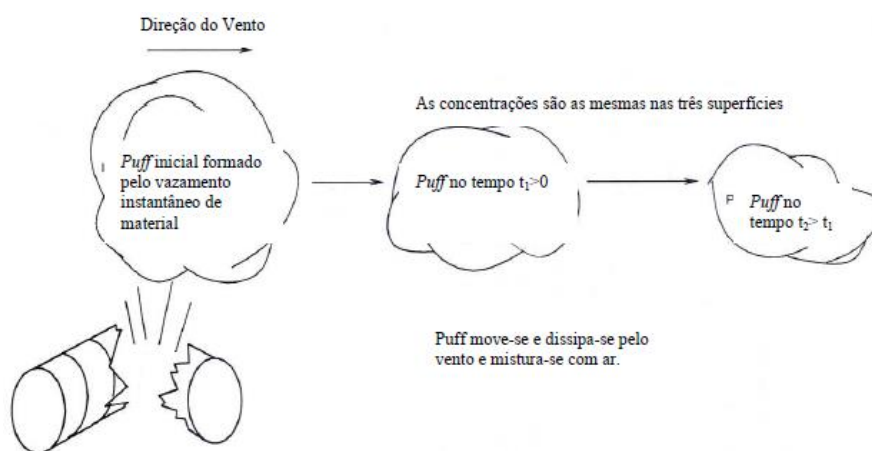


Figura 2-2: Puff formado por um vazamento instantâneo (Crowl et al., 2002).

A condição intermediária pode apresentar características de ambos os casos, dependendo de suas respectivas condições (Fiates, 2015).

2.3. Modelos de Jatos

O principal mecanismo de mistura entre o ar e o gás liberado são as zonas de recirculações, que são formadas nas regiões circunvizinhas aos jatos, nas quais é criada uma extensa penetração de ar (Ferreira, 2014). De acordo com Lees (2012), baseado nos estudos de Ricou e Spalding (1961) e de Cude (1974) as características empíricas de um jato foram definidas. São elas:

- O jato se expande de forma cônica, a partir de uma fonte (ponto virtual) a montante do orifício;
- A diluição ocorre por mistura turbulenta,
- O tempo de velocidade média e os perfis de concentração de tempo são semelhantes após uma distância de aproximadamente 10 vezes o diâmetro do orifício, além de serem aproximadamente gaussianos, sendo o perfil de concentração mais largo que o perfil de velocidade.

A Figura 2-3 indica uma representação esquemática – plano de simetria – de um jato livre turbulento. Através de observações experimentais, verificou-se que, no campo de velocidade turbulenta média, o eixo axial (direção do jato) pode ser dividido em três regiões distintas.

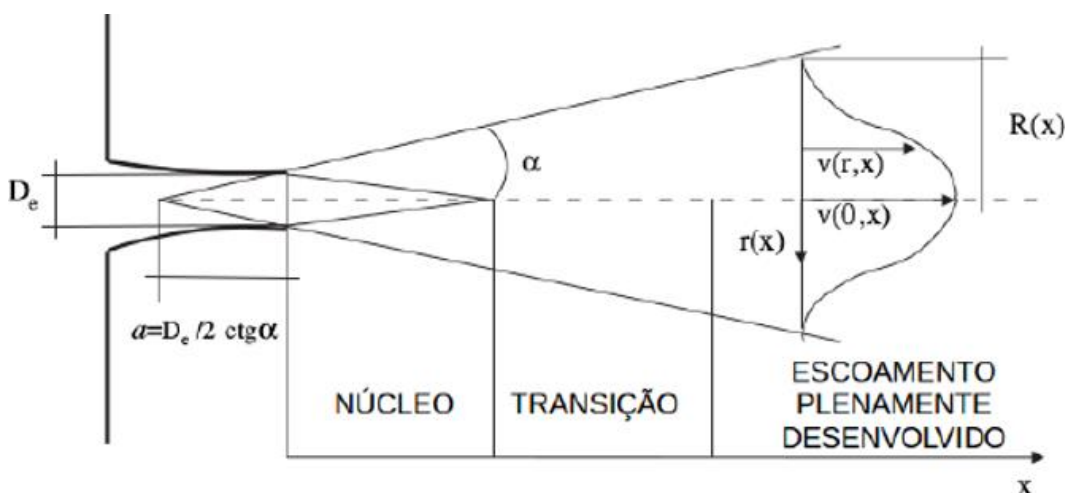


Figura 2-3: Zonas de um jato (Benintendi, 2010).

A primeira é chamada de região de desenvolvimento do fluxo e também é conhecida por região do núcleo potencial (*potential core*), pois a velocidade média é aproximadamente constante. À medida em que o escoamento se desenvolve na direção do eixo da linha central do jato, tem-se a segunda zona, chamada de zona de transição, onde começam a aparecer pequenos vórtices turbulentos. Finalmente, tem-se a terceira zona, conhecida como região de escoamento totalmente desenvolvido, a qual é marcada pela distribuição Gaussiana de perfil de velocidade (Benintendi, 2010).

Benintendi (2010) obteve através de seus estudos um procedimento simples e confiável, que permite o cálculo de jatos através do dimensionamento do volume da mistura de ar-gás. Essa pode ser aplicada para classificação de áreas perigosas, de forma a evitar o superdimensionamento das zonas, melhorando a confiabilidade dos resultados.

A determinação das condições de saída tais como pressão, temperatura e velocidade – são os principais itens a serem analisados quando o assunto é simulação de jatos.

O escoamento compressível depende do número de Mach, $\mathcal{M} = V/c$, onde V é a velocidade do escoamento e c é a velocidade do som. $\mathcal{M} = 1$ é denominado escoamento sônico ou crítico. Se $\mathcal{M} < 1$, temos escoamento subsônico e $\mathcal{M} > 1$, supersônico.

Considerando o gás como um gás ideal, tem-se

$$\rho = \frac{P M}{R T} \quad (2.1)$$

onde ρ é a massa específica, M é a massa molecular do gás, T sua temperatura e R é a constante universal dos gases.

No caso de gases ideais a velocidade do som é

$$c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T} \quad \text{ou} \quad c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (2.2)$$

Sendo γ a relação entre os calores específicos à pressão constante e à

volume constante (C_p / C_v). Esta razão também é conhecida como coeficiente isentrópico, e para a maioria dos gases encontra-se na faixa de $1,1 < \gamma < 1,4$.

As propriedades críticas (subscrito c) podem ser relacionadas com as propriedades de estagnação isentrópicos (subscrito 0) de acordo com (Fox *et al.*, 2006)

$$T_c = T_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right) \quad (2.3)$$

$$P_c = P_0 \left(\frac{T_c}{T_0} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \text{ou} \quad P_c = P_0 \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (2.4)$$

Assumindo o orifício como um bocal convergente, a condição de saída do orifício é crítica quando razão entre a pressão do ambiente externo P_a e a pressão de estagnação P_0 for menor ou igual a razão entre a pressão crítica P_c e P_0 . Assumindo que o reservatório é grande, com velocidade nula, a pressão reinante em seu interior é a pressão de estagnação. Considerando que a pressão do ambiente é a pressão atmosférica, a pressão de estagnação P_0 do tanque corresponde a máxima pressão, associada ao início do vazamento, correspondendo a máxima vazão.

$$\frac{P_0}{P_a} \geq \frac{P_0}{P_c} \quad (2.5)$$

onde γ é a razão dos calores específicos. Com a redução da pressão de estagnação devido ao vazamento, o escoamento na saída do orifício será subsônico.

De acordo com Lees (2012) e Fleck (2008), conforme ilustrado na Figura 2.4, considerando $\mathcal{M} = 1$ na saída do jato, ondas de expansão podem ocorrer levando a um aumento da velocidade, resultando em valores de Mach acima de 1, caracterizando o escoamento como supersônico. A seguir, “ondas de choque” são formadas, causando uma desaceleração violenta e recompressão, transformando o escoamento em subsônico.

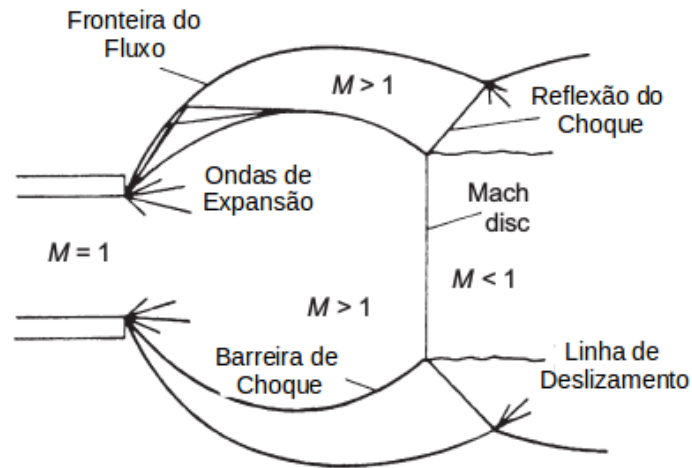


Figura 2-4: Jato sônico sub-expandido (M - número de Mach) (Lees, 2012, adaptado).

Barcelos (2018) propõe simplificar a solução do problema, representando o vazamento por uma fonte de massa (fonte sônica resolvida - *pseudo-source* ou tronco de cone) na região após a ocorrência das ondas de choque, delimitada pela região do “Mach disc” na Figura 2-4, de forma a considerar o escoamento como subsônico. Para isso, a fonte de massa é introduzida na região correspondente ao “Nível 2”, ilustrado na Figura 2-5, desprezando qualquer interação entre o gás do reservatório e o ar ambiente.

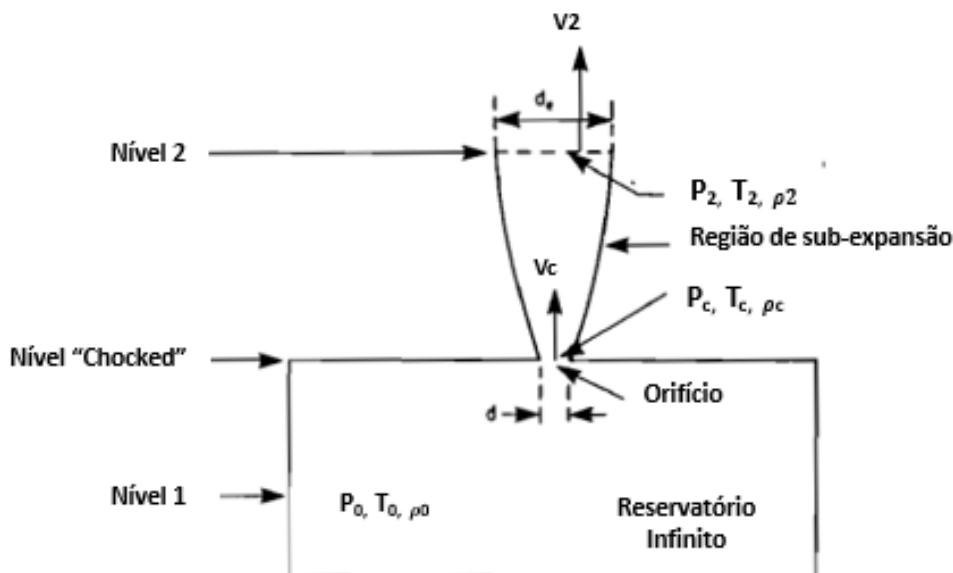


Figura 2-5: Escoamento crítico de gás através de orifício (Adaptado de Birch, 1987).

Segundo Birch *et al.* (1987), desprezando a variação da massa específica entre o orifício e Nível 2, no ponto em que o escoamento passa a ser subsônico, tem-se.

$$\rho_c A_c V_c = \rho_2 A_2 V_2 \quad (2.6)$$

O subscrito “c” significa condição crítica, i.e., $\mathcal{M} = 1$. O subscrito 2, conforme comentado acima, é o local onde de fato o escoamento passa a ser subsônico, onde as condições atmosféricas são consideradas. Aplicando-se a equação de conservação de quantidade de movimento entre os dois planos, considerando a inexistência de qualquer reação, pode-se determinar a velocidade de saída da *pseudo-source* como sendo igual a:

$$V_2 = V_c + \frac{P_c - P_2}{\rho_c V_c} \quad (2.7)$$

Para escoamentos considerados críticos, a velocidade do gás V_c na abertura da descarga é igual a velocidade do som no gás, e pode ser calculado por:

$$V_c = c = \sqrt{\gamma \frac{R}{M} T_c} \quad (2.8)$$

Rescrevendo a velocidade do som em função das propriedades de estagnação isentrópicas, tem-se:

$$V_c = \sqrt{\frac{R}{M} T_0 \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)} \quad \text{ou} \quad V_c = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0} \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)} \quad (2.9)$$

Através de seus experimentos, Birch (1987) demonstra que após a região de sub-expansão, o gás retorna imediatamente a sua temperatura de estagnação original, de forma que $T_2 \cong T_0$. Segundo Fleck (2008), essa simplificação adotada em relação a *pseudo source* não implicou em nenhuma alteração dos perfis estudados.

2.3.1. Escoamentos Gasosos Através de Orifícios

A vazão mássica (m_0) inicial de gás ou vapor através de um orifício é dada pela abaixo:

$$m_0 = C_D A \psi \left[P_o \rho_o \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma} \right)} \right]^{0,5} \quad (2.10)$$

em que C_D é de coeficiente de descarga, podendo ser definido como 0,61, de acordo com recomendação de Fleck (2008). As propriedades de estagnação isentrópica correspondem as propriedades no reservatório, a montante do vazamento.

Para escoamento sônico, o valor de ψ é dado por:

$$\psi = 1 \quad (2.11)$$

Para escoamento subsônico, o valor de ψ é dado pela seguinte equação (TNO Yellow Book, 2005):

$$\psi^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right)} \left(\frac{P_a}{P_o} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_o} \right)^{\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} \right) \quad (2.12)$$

Para as condições operacionais da plataforma, tipicamente as pressões são acima de 150 kgf/cm² na sessão de compressão, encontrando-se uma significativa diferença entre a pressão do equipamento e a pressão ambiente. Com isso, de acordo com a Equação (2.4) as condições do vazamento se tornam críticas. De acordo com Fleck, (2008), o escoamento para o metano passa a ser supersônico, e a seguir ocorre o choque, passando a ser subsônico, conforme explicado. Porém, a estratégia descrita acima (Barcelos, 2018) e recomendada por Ferreira (2009) é frequentemente adotada para os estudos de dispersão gasosa, considerando velocidade abaixo da velocidade do som, simplificando a análise do problema.

Schefer *et al.* (2007) apresenta para o hidrogênio a 27 °C (300 K) em diferentes pressões, o fator de compressibilidade, para corrigir o desvio da equação de gás ideal para gás real. Porém, em seus estudos, Gomes (2012) apud Schefer *et al.* (2007), afirma que para vazamentos em tanques a baixas pressões (pressões de até 172 bar), o gás pode ser considerado com boa aproximação, como ideal, podendo ser adotado um valor de compressibilidade (Z) igual a 1,0.

2.4. Fatores que Afetam a Dispersão

O ponto de liberação de gás é a região na qual ocorre a máxima concentração de material. A favor do vento, as concentrações tendem a ser menores, devido a mistura turbulenta da substância tóxica com o ar (Crowl *et al.*, 2002). Muitos fatores podem afetar a dispersão do material inflamável na atmosfera; de acordo com Lees (2005), os principais são:

- Velocidade do vento
- Estabilidade atmosférica
- Condições do solo (Construções, água, árvore)
- Altura do vazamento acima do nível do solo
- Momento e densidade do material liberado

Com o aumento da velocidade do vento, a trajetória da nuvem gasosa torna-se mais longa e sua dispersão vertical mais compacta, permitindo o transporte mais rápido do material, o que favorece a mistura com o meio.

A estabilidade atmosférica está relacionada à dispersão vertical e à temperatura atmosférica ao longo do dia, período em que a temperatura do ar diminui rapidamente com a altura, ocasionando movimentos verticais. À noite, a diferença de temperatura diminui consideravelmente, resultando em menos movimentos verticais. Essas possíveis condições são afetadas pela predominância do empuxo em relação à turbulência atmosférica, podendo ser classificada como instável, neutra ou estável. Nas condições instáveis, o sol tende a aquecer o solo mais rápido para que esse calor possa ser removido, deixando a temperatura próxima ao solo maior que a do ar em regiões mais elevadas.

Essa instabilidade pode ser geralmente observada nas primeiras horas da manhã, em que o ar de menor densidade encontra-se abaixo do ar de maior densidade, sendo fortemente influenciado pela flutuabilidade, aumentando, assim, a turbulência mecânica atmosférica.

Na estabilidade neutra, o ar em regiões mais elevadas é aquecido, aumentando a velocidade do vento e reduzindo, conseqüentemente, o efeito de entrada de insolação e/ou energia solar no meio.

Em condições atmosféricas estáveis, o sol não pode aquecer o solo tão rápido quanto esse se esfria, resultando numa menor temperatura na

região mais próxima ao solo, quando comparado a locais mais elevados. Essa situação é denominada estável pelo fato de o ar de maior estabilidade se posicionar abaixo do de menor densidade, permitindo que a influência da densidade suprima a turbulência mecânica.

Conforme a Figura 2-6, em centros urbanos com maiores concentrações de árvores e edifícios, a velocidade máxima do vento é atingida a grandes alturas. Em contrapartida, em regiões abertas e de lagos, o vento atinge sua velocidade máxima mais próximo do solo.

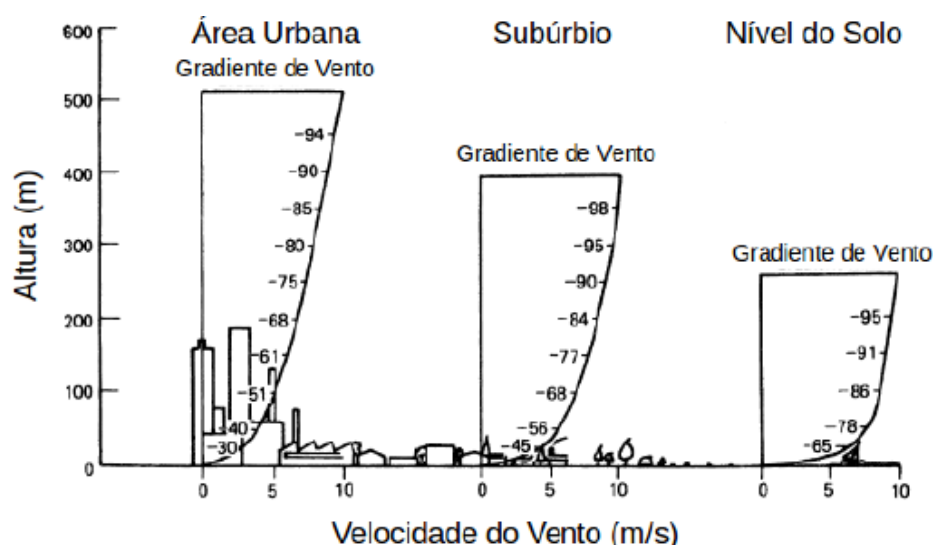


Figura 2-6: Altura versus velocidade do vento acima do solo (os números dentro da figura são as percentagens de velocidade de velocidade máxima ao longo da altura (Lees, 2012, apud Fiates, 2015)).

A altura de liberação do vapor afeta diretamente a dispersão vertical da pluma e sua trajetória, de modo que as concentrações no nível do solo são menores quanto maior for a altura de liberação da fonte, pois permite que a pluma seja dispersada numa maior distância vertical, como observado na Figura 2-7.

O momento e a alta velocidade de saída do jato carregarão o gás mais alto que seu ponto de liberação. Tendo o gás menor densidade que o ar atmosférico, esse inicialmente subirá. Nessa lista, são incluídos os gases de baixo peso molecular e os gases quentes (Fiates, 2009).

Caso o gás em questão dispuser de uma densidade maior que a densidade do ar, ele tenderá a se deslocar para baixo, e cairá em direção ao chão. Esses gases também são conhecidos como gases pesados; como exemplos, podemos citar o GLP e o CO₂.

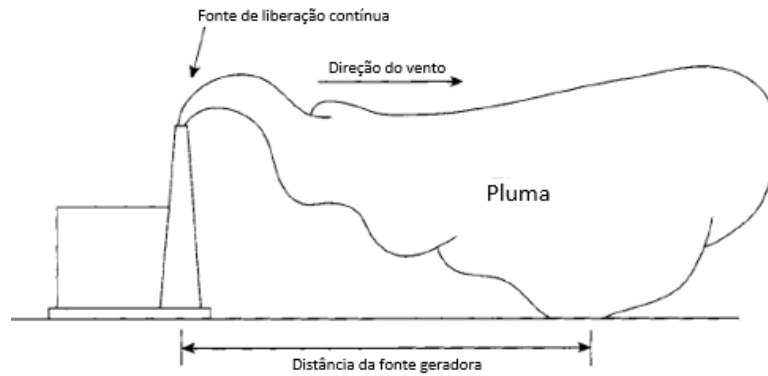


Figura 2-7: Aumento da altura de liberação diminui a concentração do solo (Crowl et al., 2002, adaptado).

O perfil de velocidade do vento, pode ser representado em uma grande gama de condições estáveis, e algumas condições instáveis (Lees, 2012) como:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\left(\ln \frac{z}{z_0} \right) + \alpha \frac{z}{L} \right] \quad (2.13)$$

em que $u_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ representa a velocidade de atrito, sendo τ_w a tensão cisalhante em $z = 0$, k a constante de von Karmán com valor igual a 0,4, z_0 o comprimento rugoso, L o comprimento de Monin-Obukhov e α o coeficiente de Monin-Obukhov.

De acordo com Bakum e Duijm (2005), o comprimento de *Monin-Obukhov* pode ser predito pelos gráficos contidos na Figura 2-8, na qual são consideradas uma condição marítima de até 5km de distância da costa e uma profundidade maior que 1m.

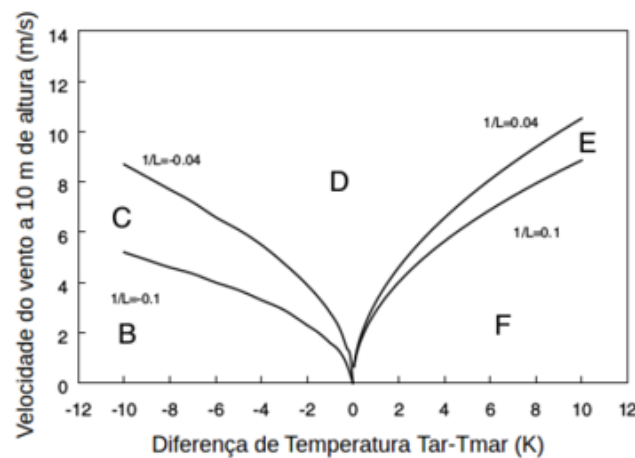


Figura 2-8: Relação entre a velocidade do vento a 10 metros de altura e o delta de temperatura para cada inverso do comprimento de *Monin-Obukhov* (Bakum e Duijm, 2005, adaptado).

Para condições consideradas neutras, o comprimento $L \simeq \infty$, logo, o perfil de velocidade pode ser obtido com:

$$u = \frac{u_*}{k} \left[\left(\ln \frac{z}{z_0} \right) \right] \quad (2.14)$$

Para a área offshore, Cleaver *et al.* (1994) mostraram em seus estudos como um ambiente parcialmente congestionado influencia na geração da nuvem de gás inflamável. Em sua pesquisa, foi ponderada a dispersão de gás natural de alta pressão.

Já Qiao (2010) ressalta a importância da modelagem correta das estruturas dos módulos das plataformas de petróleo, tendo em vista que o fluxo de ar dentro de um módulo é frequentemente controlado pela presença de grandes estruturas, e que essas acabam criando grandes zonas de recirculação, definindo os fluxos principais.

2.5. Vazamentos (Recomendações de HSE)

Os significativos riscos associados aos vazamentos de hidrocarbonetos em uma planta de processo impactam diretamente a segurança da unidade. A frequência de tais vazamentos pode ter grande influência nos riscos estimados, afetando justamente o gerenciamento de riscos e de futuras tomadas de decisões (Spouge, 2006).

Antes do acidente com a Piper Alpha, no Mar do Norte, no final da década de 80 (1988), já antes citado neste trabalho, não haviam dados de frequência de vazamentos disponíveis para a área offshore. Foi partir do inquérito do referido acontecimento que no HSE foi recomendada a coleta e a criação de um banco de dados de vazamentos de hidrocarbonetos em instalações offshore e sua disponibilização para as operadoras (Cullen, 1990). Para a determinação da frequência de cada vazamento e suas respectivas avarias, o HSE levou em consideração uma estimativa da população exposta aos itens de cada equipamento. A classificação dos tipos de vazamentos é dada em escalas descritas como menor, significativo e maior (HSE, 2000, apud Fleck, 2008), segundo a Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Sistema de classificação de vazamento de hidrocarboneto (HSE, 2000, apud Fleck, 2008).

Classificação	Critérios	
	Qde de material vazado	Vazão e tempo de vazamento
Menor	< 1 Kg	< 0,1 kg/s por < 2min
Significativo	0,1 a 1 kg/s, durante 2 a 5 min	
Maior	< 300 kg	1 kg/s por > 5 min

2.5.1. Análise Preliminar de Risco

Para a produção da análise preliminar de risco, assim como a determinação dos principais pontos de vazamentos de gás em uma unidade offshore, é de suma importância a realização de reuniões com a participação de todas as disciplinas envolvidas no projeto, tais como profissionais das disciplinas de processo, de segurança, de estrutura, de tubulação e outros. Para cada planta estudada, deve ser efetuada uma análise de risco individualizada, objetivando a identificação dos principais sistemas e seus respectivos potenciais de riscos de vazamentos.

2.5.2. Identificação dos Pontos de Vazamentos

A geometria 3D utilizada nesse trabalho é uma adaptação baseada nos módulos de um FPSO. Porém, pela impossibilidade de utilização dos dados reais de tais unidades, recorreu-se aos dados estatísticos de vazamentos reportados pelo HSE (2002), que mostra que os vazamentos de gás em uma unidade offshore correspondem ao maior montante dos vazamentos, de 1150 (55,5%), os outros tipos de vazamentos são de óleo 347 (16,8%), sistemas fora do processo 239 (11,5%), bifásicos 184 (8,9%) e condensados 151 (7,3%) (Figura 2-9).

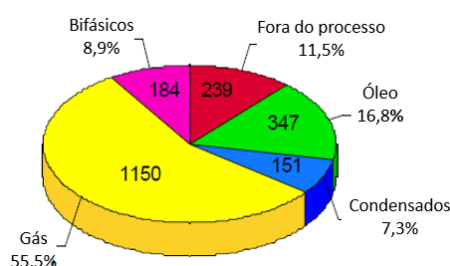


Figura 2-9: Tipo de liberação em vazamentos (HSE, 2002, adaptado).

2.5.3. Vazamentos Ocasionados – Taxa de Falha

A fim de se identificar a severidade das consequências e suas respectivas frequências, diversos cenários de vazamentos foram considerados para a determinação da taxa de falha.

Entre os itens estudados, o sistema com maior taxa de falha é o sistema de compressão de gases, com uma taxa de $3,00 \times 10^{-1}$ vazamentos por ano. Os efeitos relacionados a altas temperaturas e a pressões operacionais afetam diretamente itens vulneráveis desses equipamentos, tais como selos, instrumentos e pequenos itens de tubulação, conferindo ao sistema o primeiro lugar entre os maiores índices de falha, de acordo com a Figura 2-10.

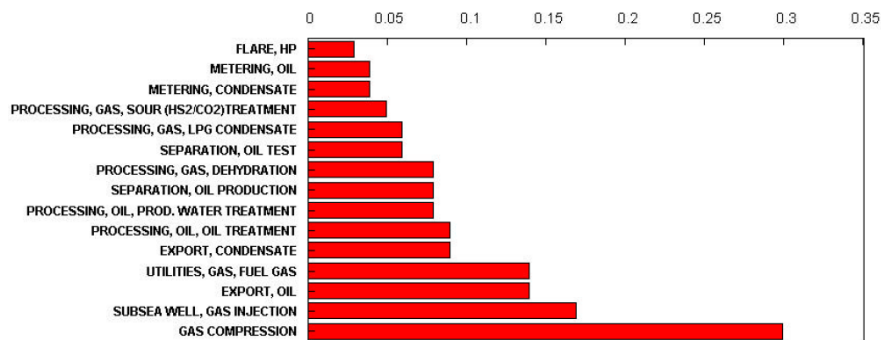


Figura 2-10: Taxa de falhas em sistemas (vazamento / Sistema ano) (HSE, 2002).

No que diz respeito aos itens avaliados pelo HSE (2002), os dois principais equipamentos com as maiores taxas de falhas são as turbinas de combustível duplo e os compressores recíprocos com taxas de $7,24 \times 10^{-2}$ e $6,50 \times 10^{-2}$ vazamentos por ano, respectivamente, conforme a Figura 2-11.

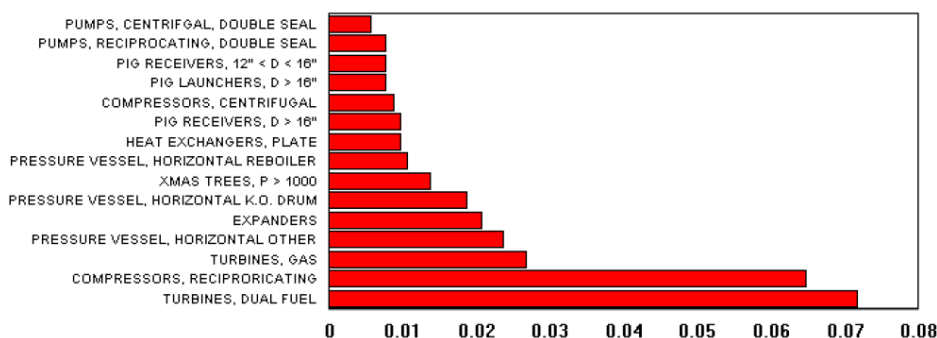


Figura 2-11: Taxa de falhas em equipamentos (vazamento / equipamento ano) (HSE, 2002).

Em análise de vazamentos de gás através de uma fonte geradora, deve-se levar em consideração, na definição do diâmetro do orifício de

vazamento de gás, aspectos de continuidade e vazão, bem como os meios de detecção deles, de modo a reproduzir com maior realidade as condições de uma planta de processo.

Vazamentos de gás ocasionados por falhas de operação, rupturas de linhas e rompimento de válvulas de segurança são eventos, muitas das vezes, classificados como liberação instantânea, que ocorrem num curto espaço de tempo, ocasionando a liberação de grande quantidade de material para o ambiente. A partir disso, formam-se nuvens de maiores proporções, que são facilmente identificadas pelo sistema de detecção da planta, ou através dos operadores – considerando os sentidos humanos de visão, olfato e audição –, possibilitando a rápidas atuações como o bloqueio de fluxo, a interrupção das fontes geradoras, e, em casos extremos, a depressurização e abandono da unidade (Barcelos, 2018).

Em análise de riscos, as liberações nas quais são permitidas ações de contenção, ou seja, vazamentos que persistem no tempo, são geralmente representadas por taxas de vazamento constantes, isto é, que não variam no tempo. Dessa forma, estamos interessados na modelagem e identificação dos vazamentos com os maiores potenciais de risco, em que há formação de nuvens explosivas imperceptíveis ao ser humano, que poderão se movimentar pela plataforma, tendo o potencial para causar explosões (Fleck, 2008).

Em seu trabalho, Strøm et al. (1999) realizaram simulações nas quais a taxa de gás vazado era de 0,7 kg/s em algumas condições de ventilação. Através de seus estudos, foi possível observar que o gás vazado foi rapidamente disperso para concentrações abaixo do L.I.I (Limite Inferior de Inflamabilidade), mesmo em caso de baixa ventilação. Contudo, vazamentos pequenos são considerados mais críticos em uma plataforma de produção de petróleo do ponto de vista da detecção, uma vez que esses dependerão somente do sistema instrumentado para serem percebidos, enquanto que os grandes vazamentos poderão ser mais facilmente reconhecidos através das redes de detectores existentes na unidade, ou através dos sentidos humanos.

Conforme observado nas pesquisas de Barcelos (2018), Gomes (2012) e Fleck (2008), não existe um critério universalmente aceito para a

determinação dos tamanhos dos orifícios de vazamento. Porém, o HSE (1997 e 1999) apresenta um estudo relacionando o número total de vazamentos ao diâmetro do furo. A faixa de distribuição dos diâmetros foi dividida em seis níveis: < 10 mm, $10 < 25$ mm, $25 < 50$ mm, $50 < 75$ mm, $75 < 100$ mm e ≥ 100 mm. Contudo, no ano de 1992, o HSE registrou um total de 4656 vazamentos gasosos, sendo que 80% desse montante – aproximadamente 3.743 dos vazamentos – foi registrado com diâmetro de orifício equivalente de até 10mm.

2.6. Detecção de Gases

Como já discutido em capítulos anteriores, a atividade de exploração e produção de petróleo está associada ao risco eminente de vazamentos de gás, que, encontrando qualquer tipo de ignição, podem causar incêndios de grandes proporções, ocasionando mortes e prejuízos financeiros. Para evitar que pequenos eventos dessa natureza se tornem acidentes maiores, é de grande relevância que a plataforma de petróleo tenha um sistema robusto de detecção de gás, de maneira a permitir a elaboração de um plano de emergência capaz de auxiliar operadores em situações críticas.

De modo geral, os sistemas de detecção de gases têm como objetivos principais a segurança das pessoas e a proteção da propriedade, gerando um alerta quando concentrações limites de gases inflamáveis ou tóxicos são detectados, o que permite a rápida tomada de decisão em situações de emergência. Porém, vale ressaltar que, por melhor que sejam os estudos de dispersão de gases e posicionamento de detectores, é fundamental que o referido sistema seja operado juntamente com um bom arranjo de planta, aliado à correta manutenção dos equipamentos para redução dos impactos de riscos.

Em unidades de exploração e produção de petróleo, os sistemas de detecção são formados por dois subsistemas: um para detecção de gases inflamáveis, e outro para detecção de gases tóxicos, tal como o gás sulfídrico (H_2S). Esses eficazes subsistemas são largamente utilizados no monitoramento das concentrações desses gases, de modo a preservar a

vida humana e a minimizar os danos à estrutura e aos equipamentos (Crowl et al., 2002).

2.6.1. Limites Inflamabilidade e Níveis de Ação

Por via de regra, as misturas inflamáveis de ar e vapor (ou gás) somente serão formadas a ponto de sofrerem ignição ou queima se estiverem enquadradas dentro de limites bem definidos de composição, conhecidos como Limite Inferior de Inflamabilidade (L.I.I.) e Limite Superior de Inflamabilidade (L.S.I.). O L.I.I. é a menor concentração do gás combustível no volume total da mistura com o ar, que permite a propagação da chama, enquanto o L.S.I. é a maior concentração. Essas misturas são expressas em porcentagem, em relação ao volume de gás ou vapor no ar. Uma margem de segurança deve ser incorporada a esses limites de inflamabilidade, a fim de levar em conta a ventilação em pontos considerados "mortos", nos quais os vapores poderiam se acumular.

Uma opção é definir o limite inferior o mais baixo possível, de modo que ele atue como aviso de um potencial problema que requer investigação.

O conhecimento dos padrões e recomendações do setor em questão, do L.I.I. do gás ou vapor, do tamanho do potencial vazamento, do tempo de se chegar a uma situação de perigo, assim com o conhecimento da toxicidade do gás ou vapor em questão estão expostos nas diretrizes.

A Petrobras traz em sua Norma Técnica N-2914 a descrição dos dois níveis de detecção:

- Nível de alerta em 20% do L.I.I. - atuação de alerta de um possível problema em potencial que requer investigação.
- Nível de alarme ou gás confinado em 60% do L.I.I. - detecção de presença de gás, de modo a acionar medidas mitigadoras como a evacuação da unidade, o desligamento ou ambos.

Os sistemas de detecção de gás offshore em unidades Petrobras são dotados de sistemas de emergência intertravados que, havendo confirmação de gás na área, sistemas de mitigação são acionados automaticamente, visando interrupção segura do processo e demais

equipamentos. Um sistema de votação entre sensores geralmente é adotado, de forma a evitar uma evacuação desnecessária da planta.

2.6.2. Modelo TNT Equivalente

O 2,4,6 – Trinitrotolueno, comercialmente conhecido como TNT, é um composto altamente explosivo que, ao longo dos anos, tem atingido um importante status na economia mundial devido ao seu extenso uso, principalmente em períodos marcados por grandes guerras.

O modelo de TNT equivalente consiste na comparação do potencial da mistura explosiva estudada com a massa de TNT necessária para produzir efeitos semelhantes. Os modelos para a realização desses cálculos foram os pioneiros na previsão dos efeitos de explosões em nuvens. Ao longo do tempo, foram coletados dados maciços de resultados destrutivos de bombardeios realizados durante as guerras, assim como em diversos testes de armas militares.

Para realização do cálculo, apenas a parcela da nuvem de gás que se encontra entre os limites de inflamabilidade é considerada, e é imprescindível a determinação da eficiência de TNT relativa a explosão, que posteriormente é transformada em sobrepressão. Tendo em vista que a eficiência das explosões envolvendo nuvens de hidrocarbonetos são bem menores quando comparadas as explosões de TNT, o valor da eficiência tende a ficar entre 1 e 10%.

Diversos modelos para o cálculo do TNT equivalente são apresentados na literatura, e uma das grandes dificuldades relatada por Harris e Wickens (1989) apud Lees (1996), é a superestimação da sobrepressão em nuvens de vapor a distâncias próximas ao centro do ponto analisado. Para compensar os efeitos da sobrepressão excessiva a curtas distâncias, recomendam-se o uso da distância normalizada, adicionada de uma parcela fixa, que fará com que o valor da sobrepressão próxima ao centro, seja menor. Outro problema apontado pelos autores leva em conta a duração da fase positiva da onda explosiva, que, para o caso do TNT, tem uma menor duração, fazendo com que os efeitos

analisados a pequenas distancias por equivalência de TNT sejam subestimados.

Na expectativa de correção de tais desvios, Pritchard (1989) recomenda o uso de distâncias maiores que dez vezes o diâmetro da nuvem analisada, contados a partir de seu centro, resultando numa menor diferença entre a sobrepressão real e a estimada.

A aplicação do método do TNT equivalente apresentado por Casal (2007) consiste no cálculo da massa equivalente de TNT (W_{TNT}), definindo como base uma eficiência em TNT (η) e aplicando a seguinte equação:

$$W_{TNT} = \frac{\eta m \Delta H_c}{E_{TNT}} \quad (2.15)$$

onde m é a massa em kg do gás que efetivamente contribui para a explosão, avaliado entre os limites inferior e superior de inflamabilidade; ΔH_c é a energia de combustão da mistura de hidrocarbonetos contidos na nuvem, dado em kJ/mol, e a constante de energia liberada por 1 kg de TNT (E_{TNT}), que é igual a 4686 kJ/kg. Com a massa equivalente em mãos, é possível calcular a distância relativa de explosão (d_n), em que r representa a distância até o eixo explosivo dada em metros.

$$d_n = \frac{r}{W_{TNT}^{1/3}} \quad (2.16)$$

com d_n calculado, é possível encontrar o valor correspondente de sobrepressão relativa P_s por meio do gráfico da Figura 2-12.

De acordo com Casal (2007), a sobrepressão também pode ser calculada de forma analítica através da Equação (2.17), em que pequenas variações entre os métodos gráfico e analítico podem ser encontradas.

$$\frac{\Delta P}{P_a} = \frac{1}{d_n} + \frac{4}{d_n^2} + \frac{12}{d_n^3} \quad (2.17)$$

P_a representa a pressão atmosférica dada em kPa.

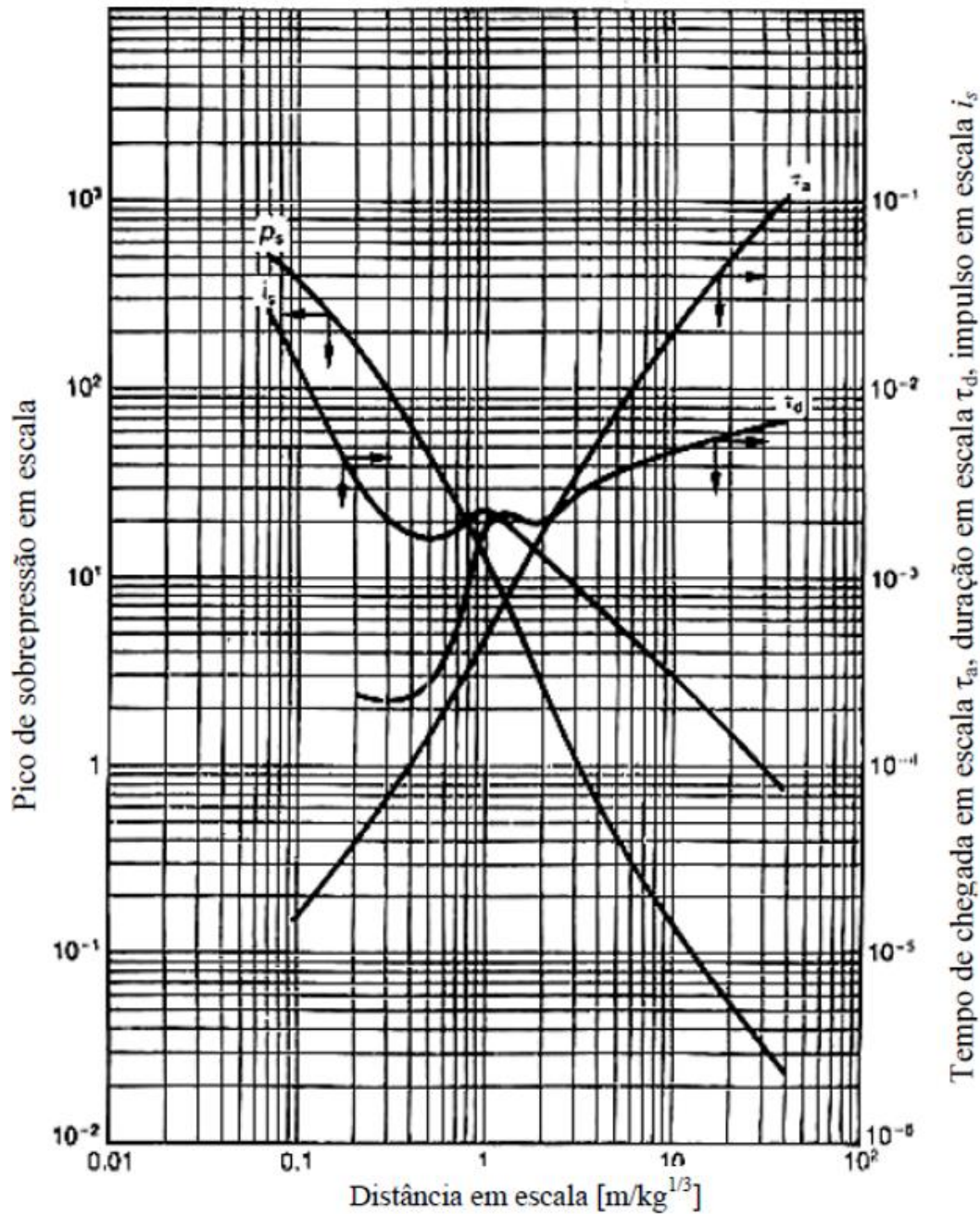


Figura 2-12: Gráfico de efeitos normalizados em função da distância normalizada do método TNT (Lees, 1996).

Lees (1996) apresenta uma relação entre a sobrepressão causada pela ignição da nuvem explosiva e o seu potencial de destruição, conforme apresentado na Tabela 2-2: Alguns efeitos de danos produzidos por uma onda de choque (Lees, 1996).. A sobrepressão ΔP é dada por: $\Delta P = P_s \times P_a$.

Tabela 2-2: Alguns efeitos de danos produzidos por uma onda de choque (Lees, 1996).

	<i>Peak side-on overpressure</i>	
	(psi)	(kPa ^a)
Annoying noise (137 dB), if of low frequency (1–15 Hz)	0.02	
Occasional breaking of large glass windows already under strain	0.03	0.2
Loud noise (143 dB). Sonic boom glass failure	0.04	
Breakage of windows, small, under strain	0.1	0.7
Typical pressure for glass failure	0.15	1.0
'Safe distance' (probability 0.95 no serious damage beyond this value)	0.3	2.0
Missile limit		
Some damage to house ceilings; 10% window glass broken		
Limited minor structural damage	0.4	2.8
Large and small windows usually shattered; occasional damage to window frames	0.5–1.0	3.5–6.9
Minor damage to house structures	0.7	4.8
Partial demolition of houses, made uninhabitable	1.0	6.9
Corrugated asbestos shattered	1–2	6.9–13.8
Corrugated steel or aluminium panels, fastenings fail, followed by buckling		
Wood panels (standard housing), fastenings fail, panels blown in		
Steel frame of clad building slightly distorted	1.3	9.0
Partial collapse of walls and roofs of houses	2	13.8
Concrete or cinder block walls, not reinforced, shattered	2–3	13.8–20.7
Lower limit of serious structural damage	2.3	15.9
50% destruction of brickwork of house	2.5	17.3
Heavy machines (3000 lb) in industrial building suffer little damage	3	20.7
Steel frame building distorted and pulled away from foundations		
Frameless, self-framing steel panel building demolished	3–4	20.7–27.6
Rupture of oil storage tanks		
Cladding of light industrial buildings ruptured	4	27.6
Wooden utilities poles (telegraph, etc.) snapped	5	34.5
Tall hydraulic press (40 000 lb) in building slightly damaged		
Nearly complete destruction of houses	5–7	34.5–48.3
Loaded train wagons overturned	7	48.3
Brick panels, 8–12 in. thick, not reinforced, fail by shearing or flexure	7–8	48.3–55.2
Loaded train boxcars completely demolished	9	62.1
Probable total destruction of buildings	10	69.0
Heavy (7000 lb) machine tools moved and badly damaged		
Very heavy (12 000 lb) machine tools survived		
Limit of crater lip	300	2000

3. Modelagem Matemática

Para a análise numérica de diferentes cenários de vazamento em uma plataforma de petróleo, uma geometria 3D foi construída a partir de um FPSO típico utilizado pela Petrobras no campo de Búzios. Como pode ser observado na Figura 3-1, todos os módulos da área de processo acima do *maindeck* foram representados, obtendo-se as dimensões aproximadas 320 m x 60 m.

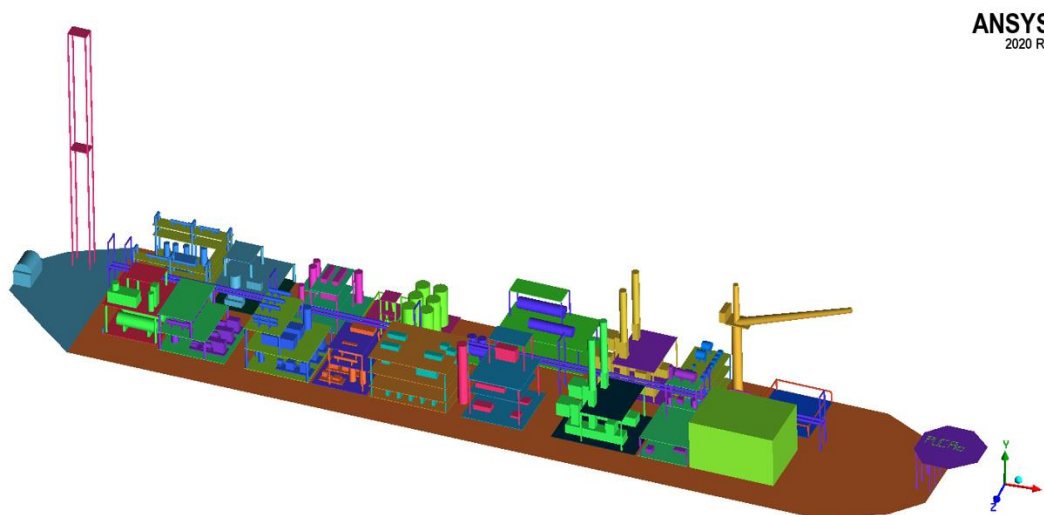


Figura 3-1: Geometria 3D baseado em um FPSO

Com o intuito de otimizar o tempo e os recursos computacionais disponíveis, foi proposta a utilização de somente os 6 primeiros módulos de processo de um FPSO (Módulo-01, Módulo-02, Módulo-03, Módulo-04, Módulo-05 e Módulo-06) para realização das simulações (Figura 3-2.b). No entanto, foi utilizado uma estrutura base representando a estrutura do *maindeck* de 7m altura.

Nesse conjunto, destaca-se o módulo de compressão de gases (Figura 3-2.c), que, como discutido anteriormente, é o módulo com maior probabilidade de vazamento de gás numa unidade offshore. Dentro desse módulo de compressão, tem-se em destaque o compressor e a posição do furo adotados nas simulações realizadas nesse trabalho (Figura 3-2.d).

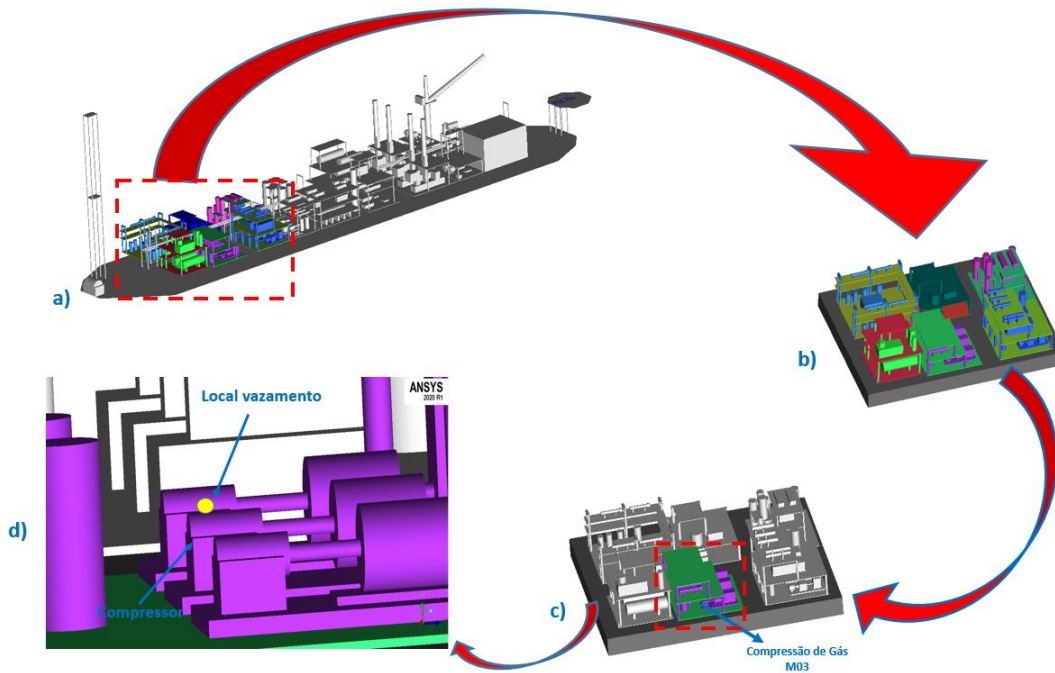


Figura 3-2: Geometria simplificada de uma plataforma do tipo FPSO, com destaque para o módulo de compressão de gás

Uma vez que a plataforma se encontra em mar aberto, torna-se necessário definir o tamanho do domínio de simulação, para que as condições de escoamento ao longe não perturbado possam ser definidas de forma adequada. Dessa forma, foi adicionado ao modelo da plataforma uma calota hemisférica, chamado de “*farfield*” (Figura 3-3). Para a definição do tamanho do *farfield*, é importante garantir que a fronteira não esteja afetando os resultados de interesse.

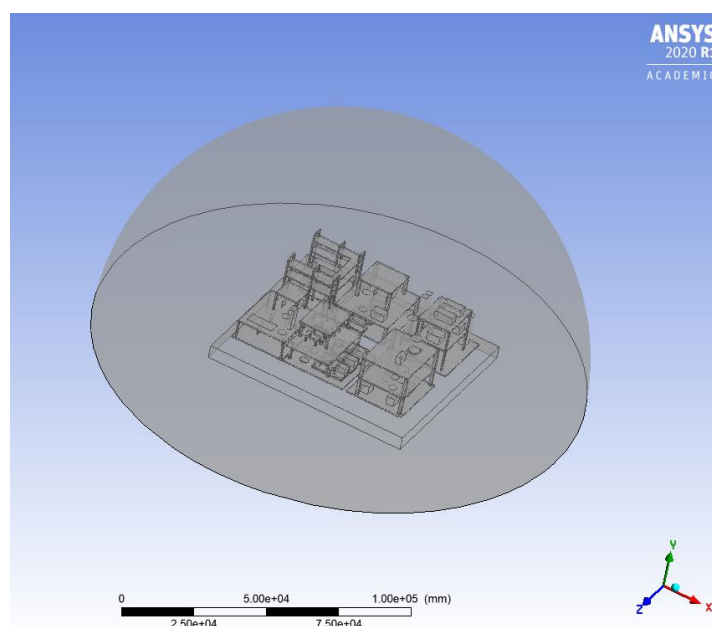


Figura 3-3: Geometria inscrita no volume de controle (*farfield*).

3.1. Definição das Condições Meteorológicas

No desenvolvimento de resposta confiável em análise de risco, o interesse maior está na identificação do pior cenário. Muitas das vezes, esses são diretamente influenciados pelo tipo de ventilação ocorrida no local da análise, tendo em vista que pequenos fluxos de ar permitem o escoamento e o desenvolvimento de determinadas nuvens inflamáveis.

Para determinação dos cenários listados nas Análises Preliminar de Riscos (APR), faz-se uso das porcentagens de ocorrência dos ventos, coletados segundo as condições meteorológicas do local de estudo.

Em seus estudos, Fleck (2008) e Barcelos (2018) fizeram o levantamento das velocidades mais frequentes, levando em conta a região da bacia de Campos, e chegaram a valores médios de 8,23 m/s e 6,5 m/s a Nordeste. Assim sendo, neste trabalho, duas velocidades de vento na direção +X (Figura 3-4), no sentido popa-proa foram consideradas: a de 0,5 m/s, que representa bem a condição de calmaria, e a de 6,5 m/s, conforme descrito por Barcelos (2018).

Considerando que a plataforma utilizada nesse estudo foi idealizada a partir de uma plataforma do tipo FPSO, não foi possível prever seu real posicionamento em relação à Rosa - dos - Ventos. Assim sendo, foi considerado que a referida plataforma possui o seu Norte de Projeto alinhado com o Norte Verdadeiro, coincidindo com a nomenclatura +X utilizada nesse estudo (Figura 3-4). Também é importante salientar que a única direção de vento considerada é de Norte para Sul, ou seja na direção +X.

Para analisar o problema de dispersão de gás natural sob uma plataforma offshore é necessário determinar os campos de velocidade \vec{u} , pressão P , temperatura T e concentração molar das espécies y_i . Para tanto, é necessário resolver as equações de conservação de massa, quantidade de movimento linear, energia e de espécies químicas.

Devido às altas velocidades, o escoamento encontra-se no regime turbulento, e a metodologia para resolver o escoamento empregada neste trabalho é baseada na média de Reynolds (RANS). Para avaliar a viscosidade turbulenta μ_t selecionou-se o modelo $\kappa - \varepsilon$ com a utilização de lei de parede padrão próximo às superfícies sólidas, de acordo com a

recomendação de Fiates et. al., (2016), que analisaram diferentes modelos de dispersão de gases. Dessa forma, duas equações adicionais de transporte precisam ser resolvidas para determinar a energia cinética turbulenta κ e a dissipação da energia cinética turbulenta ε .

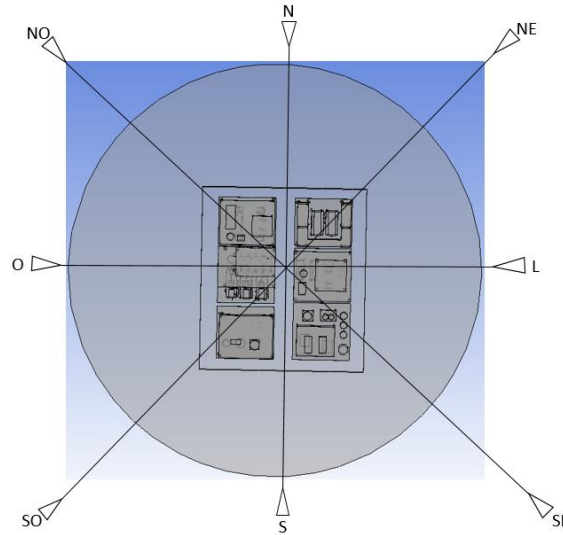


Figura 3-4: Rosa-dos-Ventos da plataforma

As hipóteses consideradas nesse estudo são de escoamento de fluido Newtoniano, com viscosidade molecular μ constante, assim como as propriedades termofísicas constantes como condutividade térmica k e calor específico a pressão constante c_p . Para determinar a massa específica ρ , considerou a mistura gasosa formada de duas espécies, gás natural e ar, e a mistura foi modelada como gás ideal. O gás natural foi modelado como uma única espécie, assim com o ar ambiente

$$\rho = \frac{P \bar{M}}{R T} \quad (3.1)$$

em que R é a constante universal dos gases igual a 8314 J/(kmol K), e \bar{M} é a massa molecular da mistura gás natural/ar, obtida combinando a massa molar de cada espécie M_i com a concentração molar y_i de acordo com

$$\bar{M} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{M_i}} \quad (3.2)$$

Para determinar a massa molecular do gás natural, assim como os limites de inflamabilidade, considerou-se uma composição típica de gás

natural conforme indicado Tabela 3-1: Composição do Gás Natural e seus respectivos limites inferior e superior de inflamabilidade. A massa molar resultante para o gás natural é igual a 18,64 g/mol.

Tabela 3-1: Composição do Gás Natural e seus respectivos limites inferior e superior de inflamabilidade.

Componente	Fração Molar	LII, % vol.	LSI, % vol.	$\Delta H, kJ mol^{-1}$
C_1	0,861	5,3	15	-818,7
C_2	0,071	3,3	19	-1468,7
C_3	0,03	2,3	9,5	-2110,3
C_4	0,013	1,9	8,5	-2750,2
C_5^+	0,01	1,5	7,8	-3389,8
CO	0,05	12,5	74,2	-
N_2	0,01	-	-	-

Nota: Segundo Ferreira, (2014) a composição acima é representativa para o caso.

Para o cálculo dos limites de inflamabilidade da mistura LII_i , deve se utilizar a equação a seguir:

$$LII_{Mis} = \frac{100}{\sum_i^n \frac{y_i}{LII_i}} \quad (3.3)$$

A massa molar do ar é 28,96 g/mol.

Visando simplificar a análise, considerou-se o escoamento do gás em regime permanente, correspondendo a condição de vazamento crítico no compressor.

Considerando que o escoamento não envolve altas velocidades, sendo a energia térmica dominante em relação a energia cinética, a dissipação viscosa é desprezada.

A seguir as equações de conservação são apresentadas de acordo com as hipóteses descritas acima.

3.2. Equações de Conservação

A equação de conservação de massa, também conhecida como

equação da continuidade, para regime permanente é

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.4)$$

Essa equação indica que o fluxo líquido de massa por unidade de volume se conserva.

A equação de quantidade de movimento linear nada mais é do que a 2ª Lei de Newton, De acordo com a média de Reynolds, para regime permanente é

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \vec{u} + \nabla^T \vec{u})] - \nabla \tilde{p} + \rho \vec{g} \quad (3.5)$$

onde \vec{g} é o vetor aceleração da gravidade, μ é a viscosidade molecular e μ_t é a viscosidade turbulenta, definida de acordo com o modelo $\kappa - \varepsilon$ como

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

onde $c_\mu = 0,09$ é uma constante empírica, κ é a energia cinética turbulenta e ε a taxa de dissipação de κ .

\tilde{p} é a pressão modificada, sendo definida como

$$\tilde{p} = P + \frac{2}{3}(\rho \kappa + \mu_t \nabla \cdot \vec{u}) \quad (3.7)$$

A equação da energia baseada na média de Reynolds é

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} T) = \frac{\vec{u} \cdot \nabla P}{c_p} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla T \right] \quad (3.8)$$

onde o primeiro termo do lado direito representa o trabalho de compressão. $Pr = \mu c_p / k$ é o número de Prandtl e Pr_t é o número de Prandtl turbulento (empírico).

Uma vez que somente duas espécies são consideradas, e sabendo que $\sum_i y_i = 1$, torna-se necessário resolver a equação de conservação de massa de somente uma espécie, a qual é apresentada abaixo:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} y_{GN}) = \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla y_{GN} \right] \quad (3.9)$$

onde $Sc = \mu / (\rho D)$ é o número de Schmidt, sendo D o coeficiente de difusão de massa entre as espécies. Sc_t é o número de Schmidt turbulento (empírico). O subscrito GN refere-se a gás natural.

As equações de transporte para as variáveis turbulentas:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \kappa) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \nabla \kappa \right] + P_\kappa - \rho \varepsilon + P_{b_\kappa} \quad (3.10)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{u} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + (C_{1\varepsilon} P_\kappa + C_{1\varepsilon} P_{b_\varepsilon}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (3.11)$$

onde a produção de κ devido as tensões de Reynolds P_κ e empuxo P_{b_κ} são:

$$P_\kappa = \mu_t \left[\nabla \vec{u} + \nabla^T \vec{u} - \frac{2}{3} (\rho \kappa + \mu_t \nabla \cdot \vec{u} \mathbf{I}) : \nabla \vec{u} \right] \quad (3.12)$$

sendo \mathbf{I} a matriz identidade. A produção de ε devido ao empuxo é:

$$P_{b_\varepsilon} = \max(0, P_{b_\kappa}) \quad (3.13)$$

3.3. Condições de Contorno

Para definir as condições de contorno, considerou-se três tipos de fronteiras: condição ao longe (na superfície da calota hemisférica), superfícies sólidas e orifício de vazamento de gás natural, a saber.

3.3.1. Condição ao Longe (“Farfield”)

A condição ao longe é definida na calota hemisférica que circunda toda a plataforma. Ao longe só existe ar, com temperatura igual a 25° C e pressão atmosférica. Para representar a existência de um vento, conforme proposto por (Lees, 2012), um perfil logaritmo é imposto nesta fronteira para o componente x de velocidade, $u_x = (u_* / k) \ln(y / y_o)$, onde y é a coordenada vertical. A rugosidade para a superfície do mar foi fixada em $y_o = 0.001$ m, correspondendo a um dia com calmaria. Já para determinar

a velocidade de atrito u_* considerou-se os valores de velocidade u_x 6,5 m/s e 0,5 m/s, considerados a partir da coordenada vertical (y) convencionada de 10 m.

A fronteira da calota, é denominada de “*farfield*”, e nessa região o fluido pode entrar ou sair do domínio, uma vez que o mesmo perfil de velocidade é imposto em toda a periferia da calota.

3.3.2. Superfícies Sólidas e Piso da Plataforma

Nas regiões sólidas tais como estruturas, equipamentos e chão da plataforma não apresentam deslizamento, o que consiste em dizer que o vetor velocidade é zero em todas as direções, porém, uma função de parede escalonável foi empregada para ser acoplada ao modelo $\kappa - \varepsilon$ (ANSYS, 2020).

Com relação à temperatura e concentração de gás natural, as superfícies sólidas foram consideradas adiabáticas e impermeáveis, i.e., gradiente nulo foi imposto para essas duas grandezas.

3.3.3. Fonte de Vazamento (“*Source Point*”)

Conforme já discutidos em tópicos anteriores, a aplicação de uma análise preliminar de perigo na plataforma auxilia na identificação de potenciais pontos de vazamentos. Conforme Capítulo 2, o diâmetro de 10 mm adotado para o orifício de vazamento utilizado nesse estudo, foi determinado a partir de dados estatísticos publicados por HSE (2002), em que também apresenta os compressores de gás, presentes geralmente no módulo de compressão, com a maior probabilidade de ocorrência de vazamentos.

Para definir o vazamento de gás, utilizou-se o conceito de “*Source Point*”, i.e., uma fonte de massa pontual, sendo o fluxo de massa imposto na temperatura de 253 K. Em seus estudos, Gomes (2012) afirma que o “*source point*” (termo fonte) pode ser utilizado como condição de contorno para a entrada de gás no domínio computacional, desde que seja realizado um refinamento adequado na região de vazamento.

A identificação dos sentidos dos vazamentos foi realizada com auxílio da orientação “*Workbench 2020 R1*”, ou seja, o eixo X contém os vazamentos nas direções Norte (\hat{X}) e Sul (\hat{X}), e o eixo Z contém os vazamentos na direção Leste (\hat{Z}) e Oeste (\hat{Z}). As direções Cima (\hat{Y}) e Baixo (\hat{Y}) não foram analisadas nesse estudo (Figura 3-5), devido a posição do vazamento considerado..

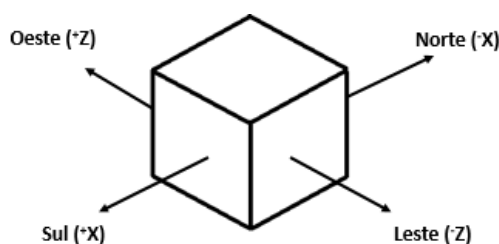


Figura 3-5: Direções possíveis no vazamento do flange do compressor

Em seus trabalhos, Strøm et al. (1999) sugerem que todas as seis direções ortogonais de um vazamento de gás devem ser avaliadas sempre que possível. Para se obter um balanceamento entre as condições e um melhor enquadramento de prazos e recursos de projeto, Fleck (2008) e Barcelos (2018) sugerem a realização de uma análise preliminar de perigo da unidade de forma a identificar os pontos críticos. Os pesquisadores também recomendam dar preferência para vazamentos direcionados ao piso e/ou a alguma outra estrutura, para que seja viável um aumento da mistura inflamável contendo hidrocarboneto e ar.

O compressor modelo utilizado nesse experimento é de segundo estágio, que possui uma compressão média de 150 kgf/cm^2 . Ao nos atentarmos a Equação (2.7), observamos que o vazamento seria sônico. Contudo, levando em conta o evento de vazamento real, o gás sofreria grandes alterações em suas temperatura e massa, o que afetaria diretamente sua compressibilidade. Todas essas condições juntas aumentariam de forma significativa a complexidade da solução numérica. Uma boa simplificação para a solução desse problema é assumir um fluxo mássico constante, com escoamento subsônico, de maneira a não ter em consideração a região imediatamente próxima ao vazamento, passando a contar apenas com a parte subsônica do escoamento (Ferreira, 2014; HSL, 2003).

Portanto, valendo-se da área transversal do orifício de 10 mm (em concordância com o item (2.5.3), da massa específica do gás nas condições do compressor de $\rho = 129 \text{ kg/m}^3$ e da relação entre os coeficientes específicos do gás de $\gamma = 1,29$, e utilizando a Equação (2.10), chega-se a vazão mássica de 1,42 kg/s. Para expressar essa fonte de massa, no CFX-PRE foi utilizado o recurso de “*source point*”, que permite a criação e configuração de vários furos, na etapa de construção da geometria, proporcionando uma economia considerável de tempo. Essa região foi modelada como “*inlet*”, significando que o fluxo do gás modelado, entrará no volume de controle.

4. Modelagem Numérica

Os códigos em CFD desenvolvidos para a solução de problemas de escoamento de fluidos geralmente se baseiam em três etapas principais: pré-processamento (geração de geometria, malha e definição dos parâmetros do problema); solução propriamente dita das equações de conservação e pós processamento (avaliação e interpretação dos resultados).

No presente trabalho selecionou-se a utilização das ferramentas numéricas fornecidas pela ANSYS, no qual o método numérico utilizado para a discretização das equações de conservação para problemas na área de fenômenos de transporte é o método de Volumes Finitos.

A etapa inicial, associada ao *WorkBench*, consiste na definição da geometria de interesse, e discretização do domínio. Nesse momento, também são selecionados os objetos da geometria que serão ignorados pelo *grid* do CFD, assim como aqueles que serão resolvidos.

Ainda na etapa de pré-processamento, o usuário seleciona os fenômenos físicos e químicos que serão resolvidos, e define as condições de contorno e de propriedades dos materiais. Deve definir ainda todos os parâmetros numéricos necessários para a obtenção da solução. Aqui a ferramenta numérica da ANSYS, CFX foi selecionada.

Uma vez definido todos os parâmetros que governam o problema, as equações de conservação discretizadas podem ser resolvidas numericamente para obter todos os campos desejados do problema de interesse. O método de volumes finitos utilizado pela ferramenta CFX, consiste em subdividir o domínio computacional em volumes de controle e associar um ponto nodal a cada volume. As equações de conservação são integradas em cada volume de controle, gerando um sistema algébrico que garante conservação global de todas as grandezas de interesse no domínio computacional.

O pós-processamento utiliza o software de visualização CFD-Post

para avaliar os resultados, permitindo a exibição da malha geométrica, dos gráficos vetoriais e das plotagens em superfícies 2D e 3D, assim como animações e visualização de resultados dinâmicos.

O esquema utilizado para discretização do problema, assim como o critério de convergência foram *Upwind*, e RMS dos resíduos menores que 10^{-8} respectivamente.

4.1. Malha

A construção da chamada malha computacional (*grid* ou *mesh*) leva em consideração a discretização do espaço físico, que, por sua vez, se refere à aproximação de um problema em um domínio contínuo por elementos discretos.

A grande maioria dos métodos numéricos de solução de equações de transporte envolvem cálculos a nível de subdomínios, por isso necessita-se da divisão do domínio em elementos menores (Gomes, 2012).

Para se evitar o subdimensionamento e/ou o superdimensionamento da malha, o teste de sensibilidade é comumente realizado. Tal estudo constitui-se na redução gradual do tamanho dos elementos (refinamento), efetuando o acompanhamento contínuo das variáveis de interesse, até o momento em que elas deixam de variar significativamente, ou seja, quando os resultados se tornam independentes da malha.

4.2. Teste de Sensibilidade de Malha

Para a definição da malha a ser utilizada no presente trabalho, realizou-se um teste de sensibilidade da malha, visando definir o número mínimo de elementos que não altere a solução obtida. Nessa etapa do processo, foi utilizado a malha do não estruturada.

Através da geometria utilizada neste trabalho, um refinamento de malha médio chamado de *Malha_Refino_Médio* contendo 882.258 nós e 5.032.379 elementos foi proposto, e um vento de 6,5 m/s na direção do eixo -Z foi considerado. Subsequentemente, após o término da simulação, 3 linhas de monitoramento foram traçadas dentro da nuvem gerada para

análise do comportamento do gás vazado, e posterior comparação com outras configurações, conforme a Figura 4-1.

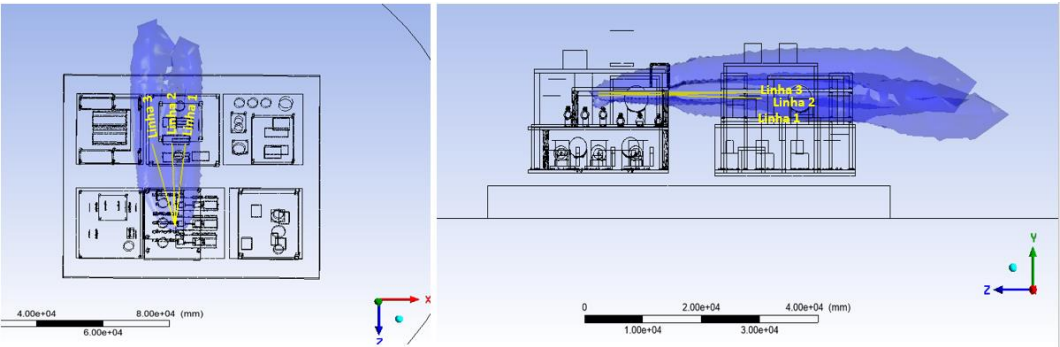


Figura 4-1: Ilustração da nuvem de gás natural. Linhas 1, 2 e 3 de monitoramento. (a) Vista superior; (b) Vista Lateral.

De forma similar ao caso exposto acima, outras três configurações de malhas, Malha_Grosseira, Malha_Refino_Geral e Malha_Refino_Local (refinamento especial na região do vazamento) foram propostas. Os resultados e os parâmetros utilizados nas respectivas análises podem ser verificados na Tabela 4-1. Os perfis de concentrações obtidos com cada malha foram traçados aos longo das linhas de monitoramento e os dados puderam ser comparados, de acordo com a Figura 4.2.

Tabela 4-1: Teste de sensibilidade de malha – Parâmetro das simulações.

Parâmetros das			
Malha	Nº de nós	Nº de elementos Total	Tempo de Simulação
Malha_Grosseira	97.436	569.855	21 min
Malha_Refino_Medio	882.258	5.032.379	8h e 52min
Malha_Refino_Geral	2.034.816	11.578.556	13h e 27min
Malha_Refino_Local	711.301	4.024.123	6h e 39min

*Malha utilizada: Tetraédrica não estruturada

Conforme discutido no Capítulo 2, quanto maior o grau de refinamento da malha, mais precisa é a solução. Entretanto, conforme afirma Fleck (2008), os recursos computacionais e o tempo de simulação são variáveis que devem ser otimizados no processo. A partir dessas afirmações, e ao verificar os perfis da Figura 4-2, pôde-se concluir que a malha com refino especial Malha_RefEsp (com refinamento especial na região do

vazamento) é a mais indicada a ser utilizada nesse experimento, quando comparada à malha composta pelo maior número de elementos, a Malha_Ref (refinamento geral). Pois a malha contendo refinamento especial, além de apresentar resultados similares aos da malha com refinamento geral, também utiliza menores números de nós e elementos, além do tempo de simulação ser de aproximadamente 50% menor (Tabela 4-1). Dessa maneira a malha computacional teve um espaçamento mínimo de 1 cm na posição do vazamento, e máximo de 1 m próximo as fronteiras externas do domínio, na região de *farfield*, conforme Figura 4-3.

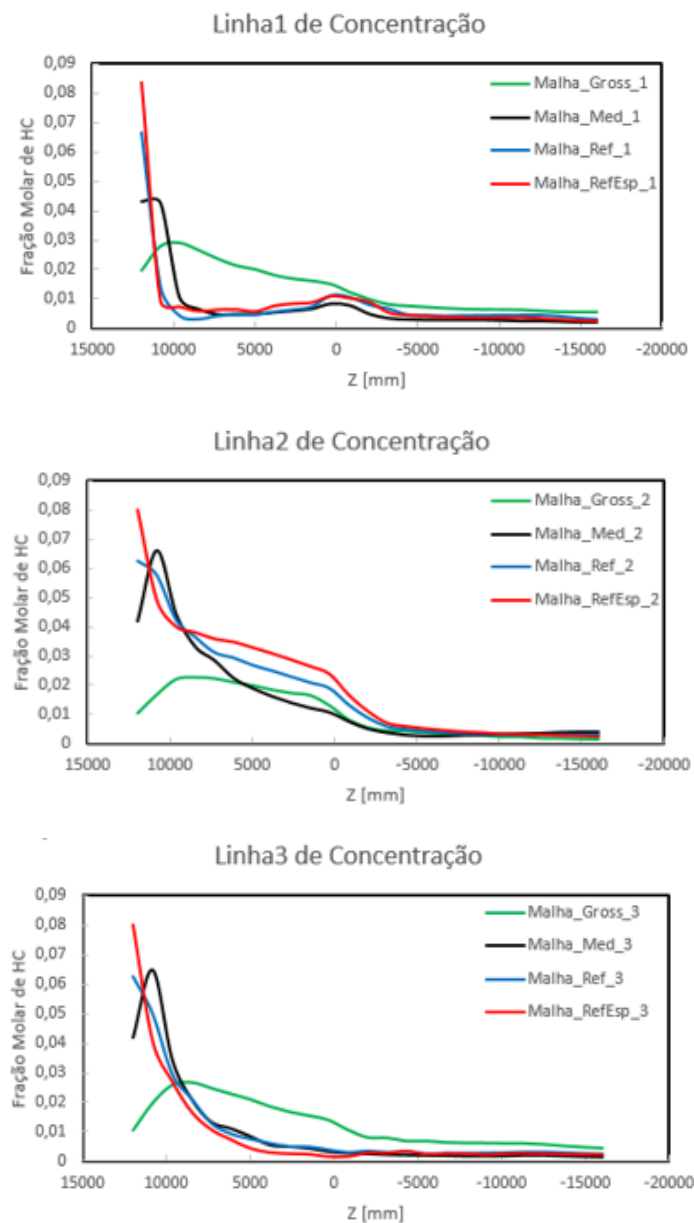


Figura 4-2: Teste de refino de malha. Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo das linhas de monitoramento. (a) linha 1; (b) linha 2; (c) linha 3.

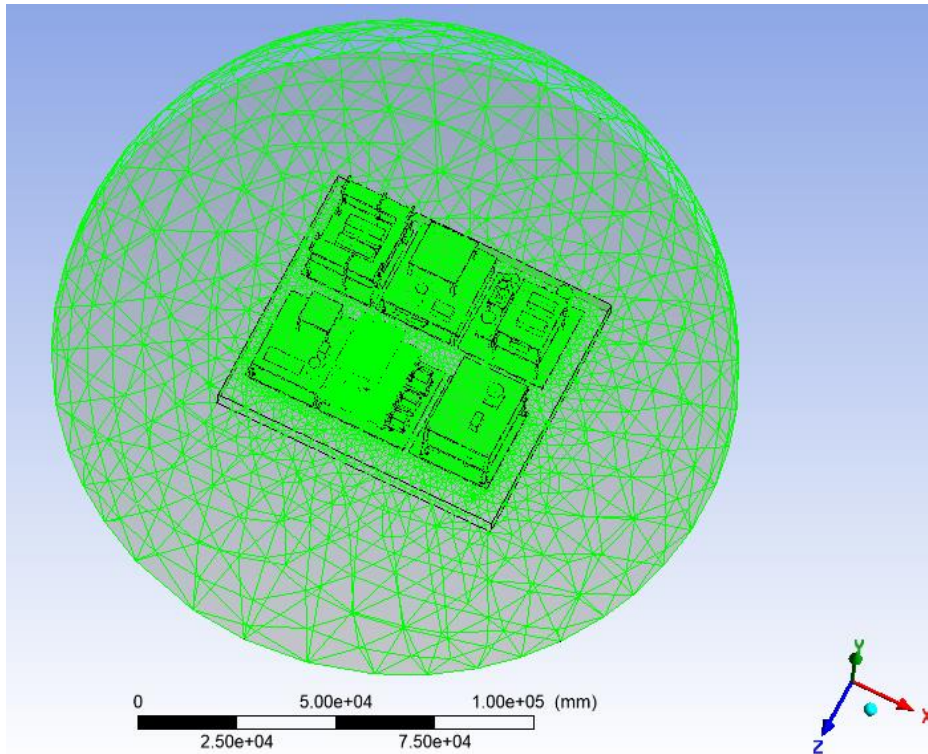


Figura 4-3: Malha gerada no ICEM 21 com refinamento especial

4.3. Definição do Tamanho do Domínio

A definição do tamanho do domínio computacional, i.e., da calota hemisférica, está diretamente associada às condições de contorno e recursos computacionais disponíveis (Santos, 2007). Conforme já discutido no Capítulo 3, a geometria simplificada utilizada nesse estudo, foi modelada a partir de um FPSO padrão, utilizando uma plataforma reduzida com somente 6 módulos de um FPSO. A essa geometria foi adicionado um contorno chamado de “*farfield*” com formato de uma calota hemisférica, com diâmetro D . Para verificar se o tamanho do domínio adotado, interferiria nos resultados das simulações, três diâmetros diferentes foram testados: (1) 2 vezes o maior lado da plataforma L , i.e., $D = 2L$, (2) $D = 5L$ e (3) $D = 10L$, conforme Figura 4-4.

Após as simulações, duas linhas de concentração foram traçadas no interior das nuvens (Figura 4-5), de forma a facilitar a comparação entre os resultados.

Os resultados dos testes relacionados ao tamanho do domínio (*farfield*) foram gerados utilizando o padrão de malha selecionado no teste de sensibilidade de malha, conforme os resultados apresentados na Figura 4-2.

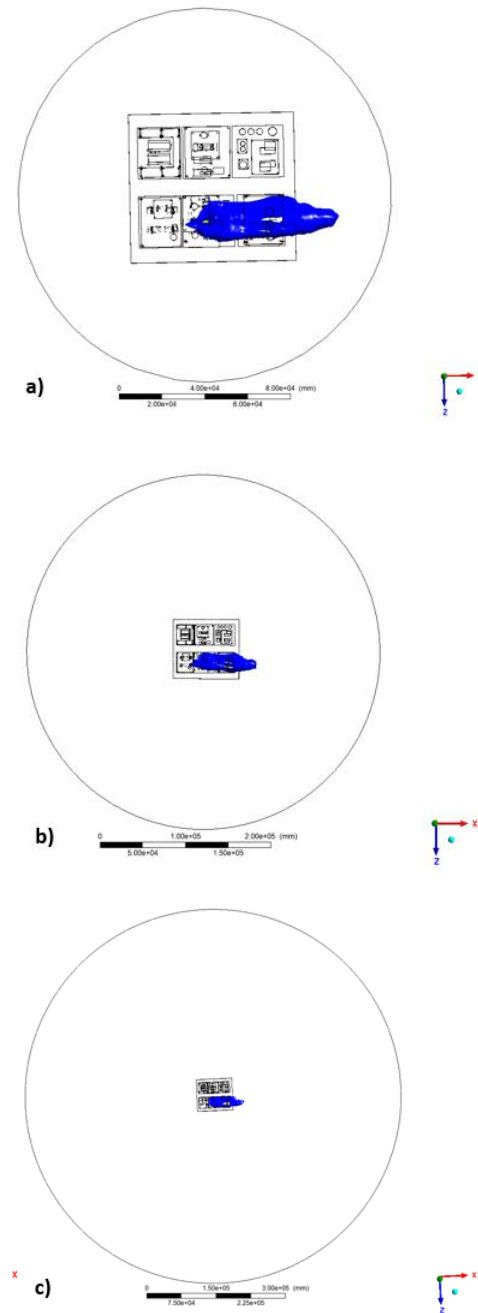


Figura 4-4: Teste de tamanho de domínio (*farfield*) a) $D = 2L$, b) $D = 5L$ e c) $D = 10L$

De acordo com os dados apresentados nas Figura 4-6 e Figura 4-7, pôde-se verificar que os resultados para o tamanho de domínio (*farfield*) de $D = 2L$ apresenta valores similares o tamanho de domínio $D = 5L$ e $D = 10L$, permitindo concluir que o tamanho do domínio $D = 2L$ é adequado e não interfere nos resultados das simulações. Para fins de otimização de recursos, o tamanho do domínio foi definido equivalente a duas vezes o maior lado da plataforma 3D ($D = 2L$), e foi utilizado para realização desse trabalho.

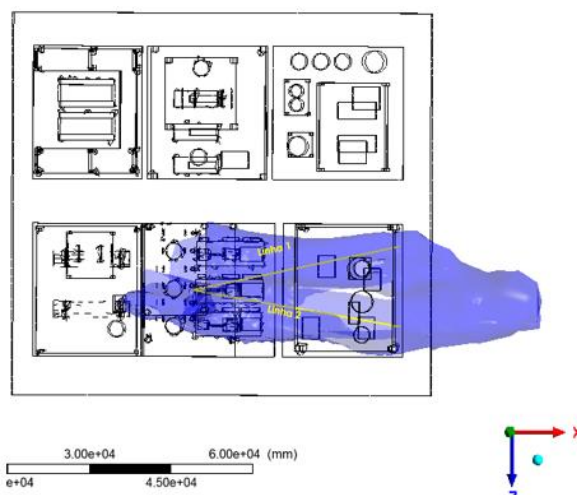


Figura 4-5: Ilustração da nuvem de gás natural. Linhas 1 e 2 para monitoramento da concentração.

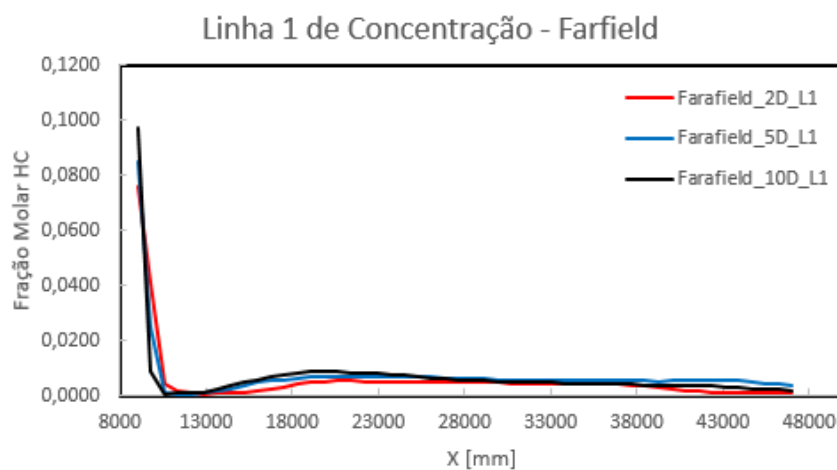


Figura 4-6: Teste de tamanho de domínio (*farfield*). Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo da linha 1.

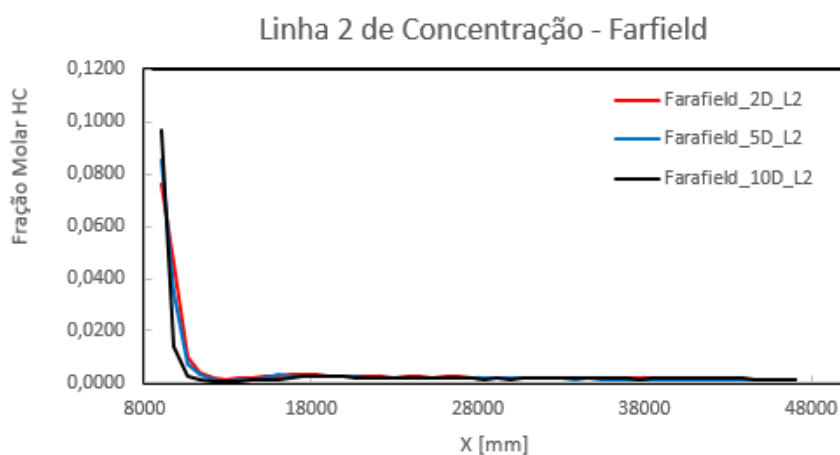


Figura 4-7: Teste de tamanho de domínio (*farfield*). Perfil de concentração de gás natural (hidrocarboneto) ao longo da linha 2

4.4. Condição Inicial

No presente trabalho foi realizada uma modelagem em regime permanente, visando avaliar a condição crítica de vazamento de gás. Porém, devido as não linearidades das equações governantes, o problema precisa ser resolvido de forma iterativa. Como o vazamento depende das condições do vento, as quais precisam ser determinadas no interior de todo o domínio, utilizou-se como condição inicial para avaliar o vazamento de gás, o campo de velocidade obtido ao impor o perfil logaritmo na fronteira da calota hemisférica, na ausência de vazamento. Essa metodologia também foi utilizada por Osenbroch et al. (2002), Wilkening *et al.* (2007) e Fleck (2008). O emprego da solução sem vazamento como condição inicial para as simulações de dispersão de gases, possibilita uma diminuição significativa do tempo computacional, em torno de 20%, correspondendo a uma economia de aproximadamente 1,5 horas em cada simulação.

A Figura 4-8 apresenta uma visão superior do campo de velocidade no domínio de cálculo, utilizando vetores velocidade. A solução foi obtida utilizando o tamanho do domínio $D = 2L$, para um vento de 0,5 m/s na direção X.

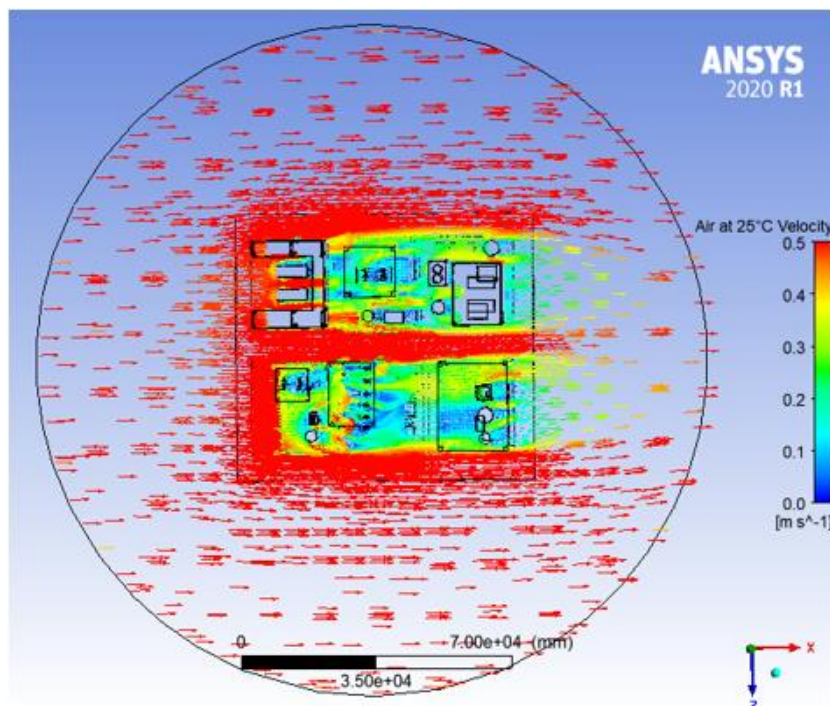


Figura 4-8: Vetores velocidade, para um vento de 0,5 m/s na direção X (plano x-z a uma elevação y de 8m do nível da plataforma) – Vista superior.

Observa-se na Figura 4-8, o escoamento ao longe não perturbado, indicando que o tamanho do domínio é adequado. Nota-se ainda, como esperado uma baixa velocidade na região entre os equipamentos. Uma vista lateral do campo de velocidade sobre a plataforma, utilizando a magnitude do vetor velocidade é apresentada na Figura 4-9, permitindo visualizar a região de esteira atrás dos obstáculos, além de possíveis caminhos preferenciais e regiões de estagnação de ar.

De forma análoga, apresenta-se na Figura 4-10 e Figura 4-11 resultados análogos obtidos para a velocidade do vento de 6,5 m/s. naturalmente que níveis mais altos de velocidades foram obtidos.

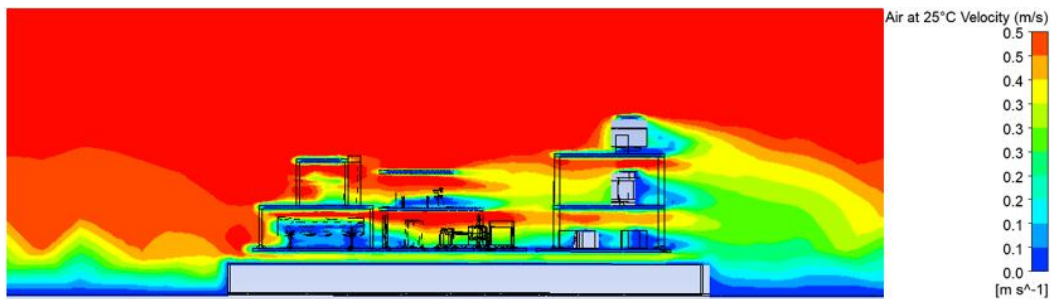


Figura 4-9: Isolinhas de magnitude de velocidade para um vento de 0,5 m/s na direção X (plano x-y em z=8m) – Vista lateral.

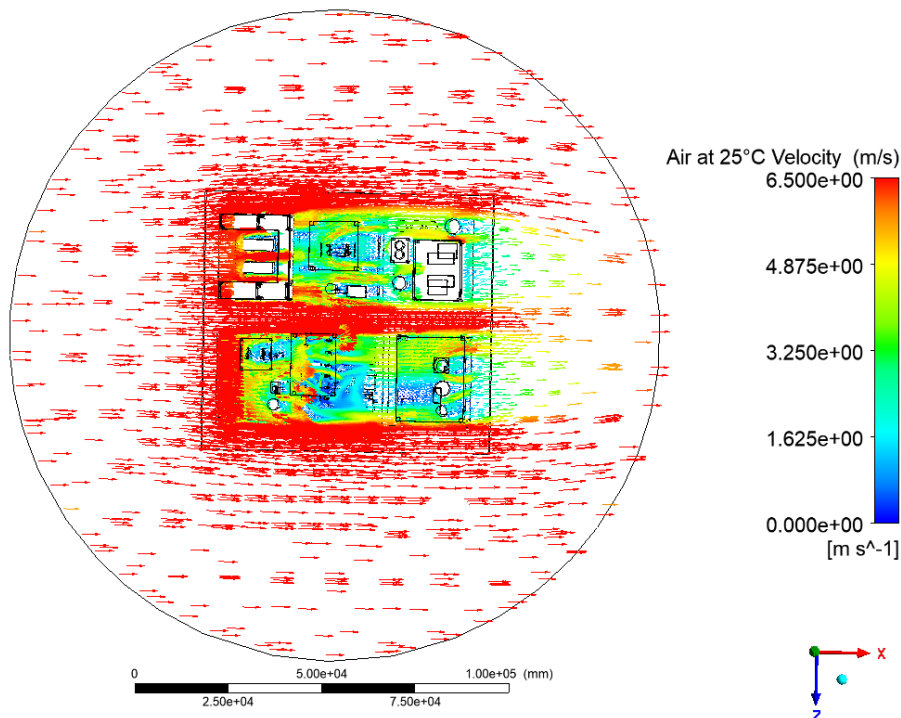


Figura 4-10: Vetores velocidade, para um vento de 6,5 m/s na direção X (plano x-z a uma elevação y de 8m do nível da plataforma) – Vista superior.

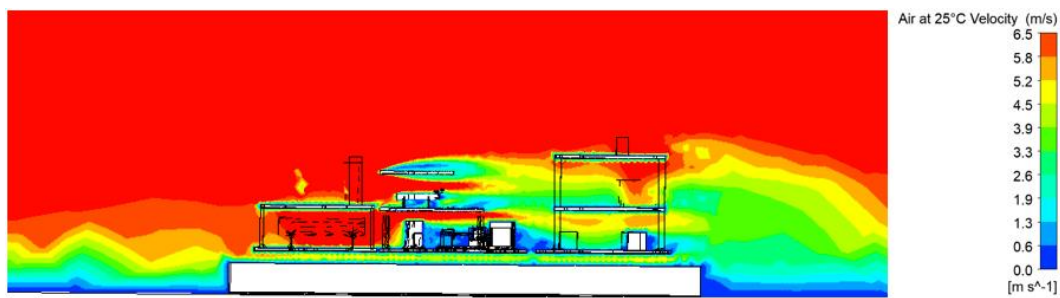


Figura 4-11: Isolinhas de magnitude de velocidade para um vento de 6,5 m/s na direção X (plano x-y em z=8m) – Vista lateral.

5. Estudo de Casos

Os resultados desse trabalho foram obtidos através de simulações numéricas empregando o software de Fluidodinâmica Computacional Ansys CFX 2020 R1, desenvolvido pela Ansys Inc. Para a confecção da geometria 3D e o refinamento da malha computacional, foi usado o software ICEM CFD 2020 R1. O equipamento utilizado para a efetuação das simulações foi um Computador Intel (R) Core™ com processadores i7-7700 CPU com capacidade de 3.60GHz e 16,0 GB de memória RAM. O tempo médio de cada simulação foi avaliado em, aproximadamente, 4h e 40min.

De posse de todas as configurações e condições descritas nas seções anteriores, o problema em questão foi formulado no CFX-PRE, e os arquivos gerados após as simulações foram tratados no CFX-SOLVER para serem posteriormente interpretados.

As variáveis de interesse deste estudo são as mesmas discutidas no Capítulo 2, assim como potenciais situações que afetem o perfil de velocidade, e de concentrações do gás vazado.

De modo a enquadrar esse estudo na faixa de calibração dos detectores pré determinada para uso nesse projeto, a faixa de 20% do L.I.I foi adotada como padrão, de maneira que as faixas volumétricas utilizadas para geração das plumas inflamáveis variaram de 0,009 e 0,0455 a 0,149.

Visando avaliar a metodologia selecionada, assim como o domínio do uso da ferramenta numérica, foi realizado um teste de validação, referente ao escoamento de um jato livre, o qual encontra-se detalhado no Anexo A.

Como já discutido em capítulos anteriores, para a efetuação das simulações, duas condições de vento foram consideradas, utilizando um perfil logarítmico para o perfil de velocidade do vento, de forma a representar o escoamento do ar sobre o oceano, nas proximidades da plataforma: 0,5 m/s, representando a condição de calmaria; 6,5 m/s, representando a maior velocidade já considerada no ambiente.

Baseando-se em dados estatísticos disponibilizados pelo HSE, foi possível identificar os possíveis pontos críticos analisados nesse trabalho. Assim sendo, o compressor de segundo estágio contido no módulo de compressão de gás (Módulo-03) foi escolhido como ponto de partida para esse estudo, devido sua alta taxa de falha. Nesse contexto, duas intensidades de vento na direção $-X$ (direção sul, Figura 3-1) foram selecionados. Utilizou-se um único ponto de vazamento no compressor, avaliando quatro direções de vazamento, nas direções $\mp X$, $\mp Z$ totalizando oito cenários (Figura 3-1).

Tabela 5-1 expõe o resumo de todas as simulações realizadas, onde, a partir das nuvens de gás geradas, e considerando uma distância de 10 m medidos a partir do ponto central da nuvem, pôde-se utilizar o método de TNT equivalente para realizar o cálculo da massa equivalente de TNT (W_{TNT}) e posteriormente realizar o cálculo da sobrepressão e efetuar enquadramento dos possíveis danos a serem causados, em caso de eventual ignição da nuvem de gás.

Tabela 5-1: Volumes da nuvem de gás inflamável e cálculo de TNT equivalente (na concentração do L.I.I.).

Caso	Velocidade do Vento (m/s) ($^{\circ}X$)	Direção do Vazamento	Volume do gás (m ³)	Massa Hidrocarb (kg)	W_{TNT}	dn	Sobrepressão (kPa)
1	0,5	+X	8,68	6,65	1,50	8,73	18,74
2		-X	10,47	8,02	1,81	8,20	20,57
3		+Z	6,93	5,31	1,20	9,41	16,79
4		-Z	6,76	5,18	1,17	9,49	16,59
5	6,5	+X	6,42	4,92	1,11	9,66	16,19
6		-X	31,65	24,24	5,48	5,67	37,10
7		+Z	9,91	7,59	1,71	8,35	20,01
8		-Z	7,6	5,82	1,32	9,13	17,56

Para a interpretação dos resultados da dispersão do gás natural e do cálculo do TNT equivalente, imagens das vistas superiores foram geradas. De modo a facilitar o entendimento, foram concebidas nuvens na forma de iso-superfícies nas concentrações (frações volumétricas), referentes ao limite inferior de inflamabilidade da mistura, e outras como iso-superfície na

concentração de 20% do L.L.I dos sensores comerciais 0,0455 e 0,0091, respectivamente.

Levando em consideração os cenários acima, bem como as questões estritas de segurança, é importante ressaltar o papel essencial que os detectores de gás desempenham nesse processo, além da necessidade de estarem alocados e calibrados apropriadamente, a fim de efetuar a detecção antes da formação da nuvem explosiva. Por meio das Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 e Figura 5-4 têm-se uma boa ideia sobre o comportamento das nuvens gasosas, o que permitiria adotar ações mitigadoras afim de se evitar acidentes.

Ao analisar os casos apresentados na Figura 5-1 e Figura 5-3 em que são considerados 20 % do L.L.I, é possível observar que os vazamentos nas direções +Z e +X produziram nuvens de gás com tendência maior de alongamento e mais compacta verticalmente, com uma pequena diferença em relação a direção +X, que ao iniciar seu movimento, o gás encontra uma pequena barreira, e se espalha um pouco mais sobre a plataforma, quando comparado com a direção +Z. Já os vazamentos nas direções -Z e -X, apresentaram nuvens com configurações diferenciadas. No primeiro caso (direção -Z), ao iniciar o seu movimento, o gás tende a formar uma nuvem alongada e compacta verticalmente, porém ao se deparar com regiões, do outro lado da plataforma, dá-se início ao processo de espalhamento pela unidade, impactando regiões de 3 módulos. O vazamento na direção -X é o mais crítico de todos, pois o fato de o escoamento ser na direção contrária ao vento, e próximo a uma barreira física importante, favorece a criação de zonas de recirculação dos gases, e maior espalhamento da nuvem para outras regiões. As nuvens de gás geradas a partir de velocidades de 6,5 m/s nas mesmas condições, Figura 5-2 e Figura 5-4 tendem a apresentar os mesmos comportamentos, conforme relatados acima.

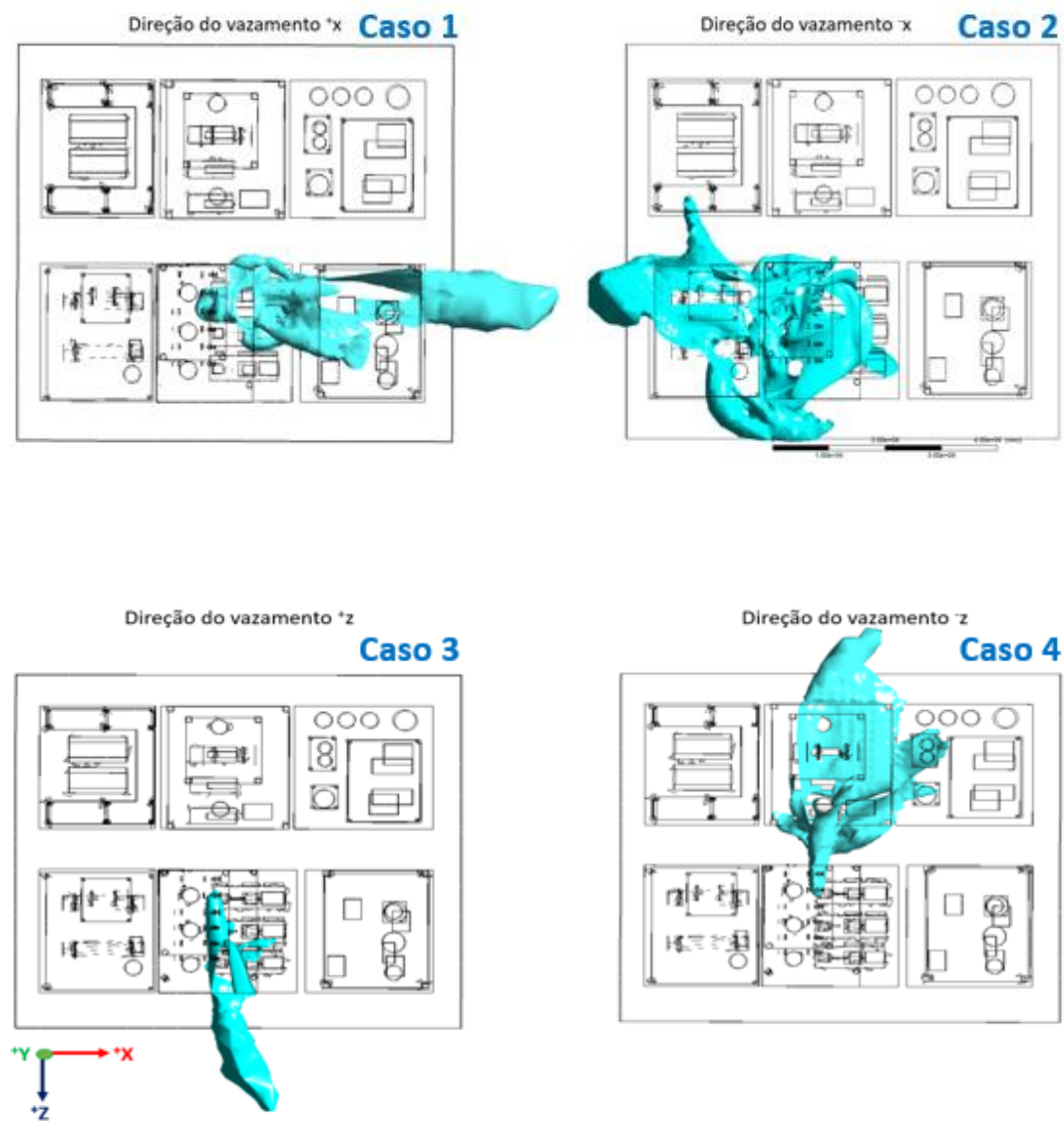


Figura 5-1: Vista superior de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.

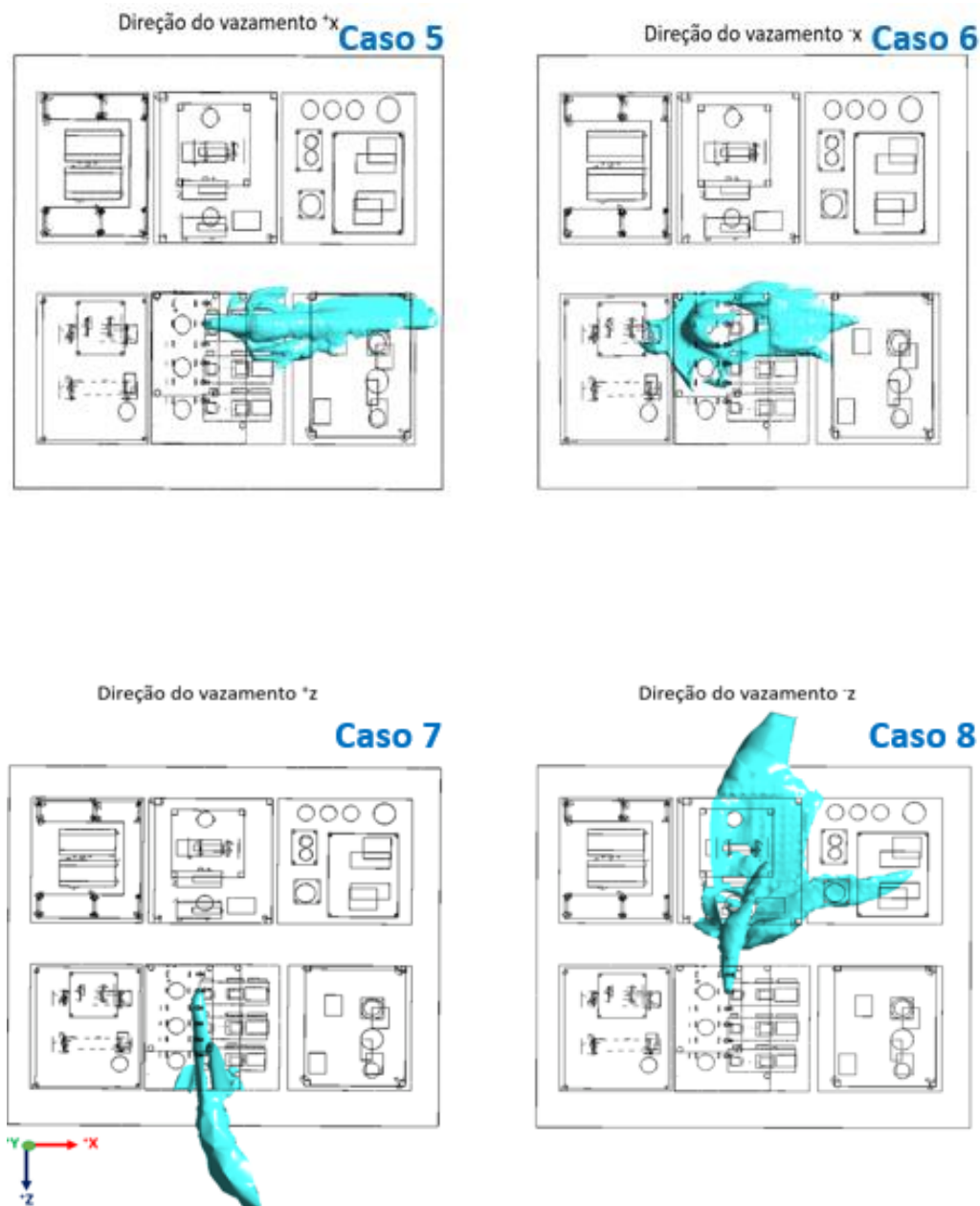


Figura 5-2 - Vista superior de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I., ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.

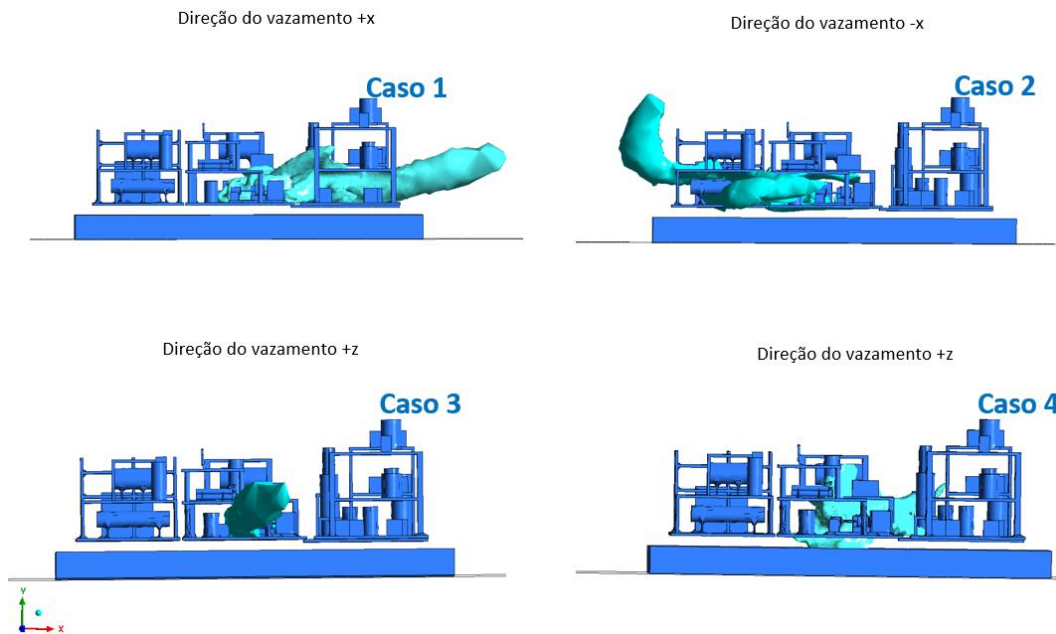


Figura 5-3 - Vista lateral de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.

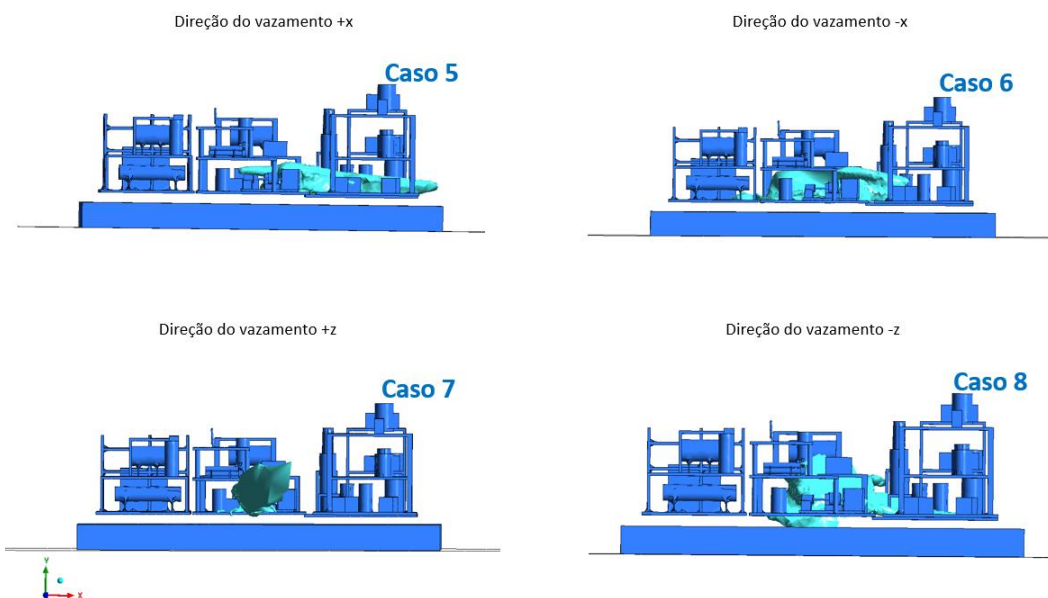


Figura 5-4 - Vista lateral de nuvens gasosas contendo 20 % do L.I.I, ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.

Da mesma maneira, analisando as figuras Figura 5-5 e Figura 5-6 com a representação de contorno de concentração de gás natural na altura correspondendo a coordenada $Y = 4$ m, nas quatro direções consideradas e nas velocidades de 0,5 m/s e 6,5 m/s, na região contendo 100% do L.I.I,

observa-se que plumas mais longas são encontradas na direção + X para o vento calmo e -X na presença de vento forte. O tamanho da pluma na direção + - Z é claramente menor. Estes resultados mostram a grande importância que o projeto de classificação de áreas desempenha nesse procedimento, de modo a não permitir, nas regiões consideradas, a existência de qualquer tipo de equipamento elétrico que não seja apropriado para atmosferas explosivas, já que essas regiões encontram-se nas condições estequiométricas ideais para incêndios e/ou explosão.

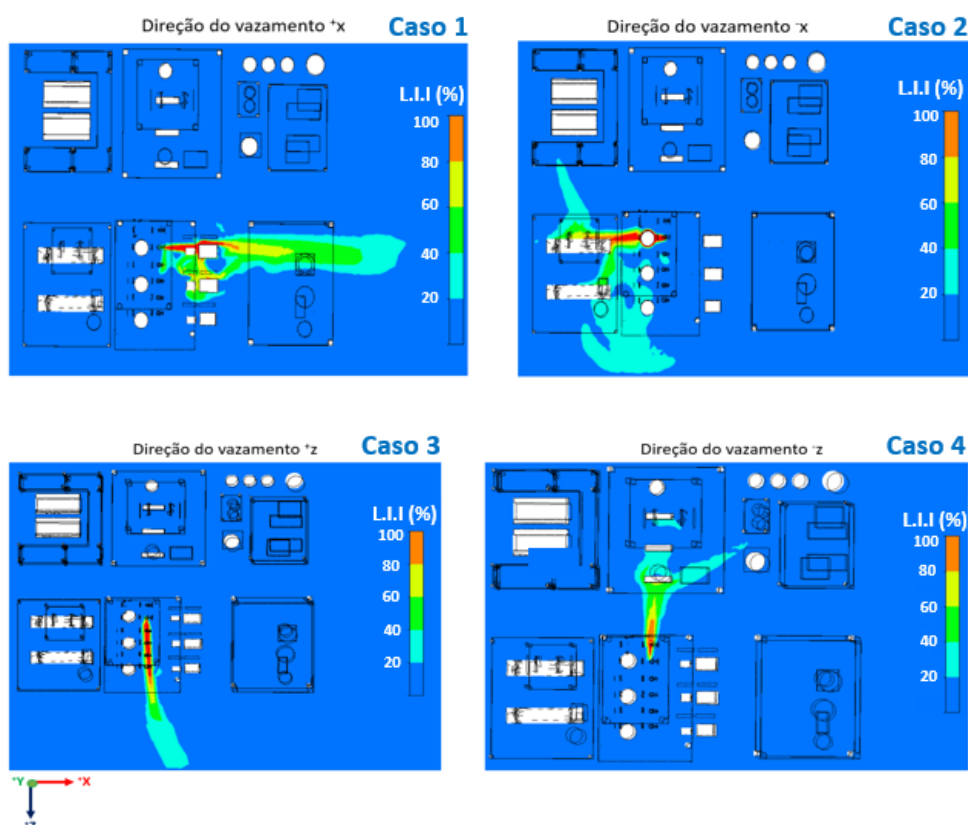


Figura 5-5 - Contorno em Y da nuvem entre 0% e 100% do L.I.I., ventos de 0,5 m/s – Cenários 1, 2, 3 e 4.

Por meio dos dados apresentados na Tabela 5-1, é possível observar que jatos direcionados a alguma estrutura e / ou equipamento tendem a formar grandes acúmulos de gases, aumentando a possibilidade de incêndios e explosões. Os valores de volume de gás inflamável e seus respectivos valores de sobrepressão calculados compreendem a faixa de 6,42 a 31,65 m³ e 16,19 a 37,10 kPa, respectivamente. Também é possível observar, que zonas congestionadas, aliada a um vazamento em direção contrária ao vento, culmina em maiores volumes de gás em condições de

críticas de explosão, conforme os casos 2 e 6 da Tabela 5-1, pois conforme já comentado, permite a criação de zonas de recirculação, que facilita a concentração do gás no ar nessa região.

Investigando todas as simulações de gás natural efetuadas, torna-se evidente que as nuvens consideradas apresentam risco à unidade, não podendo ser descartadas.

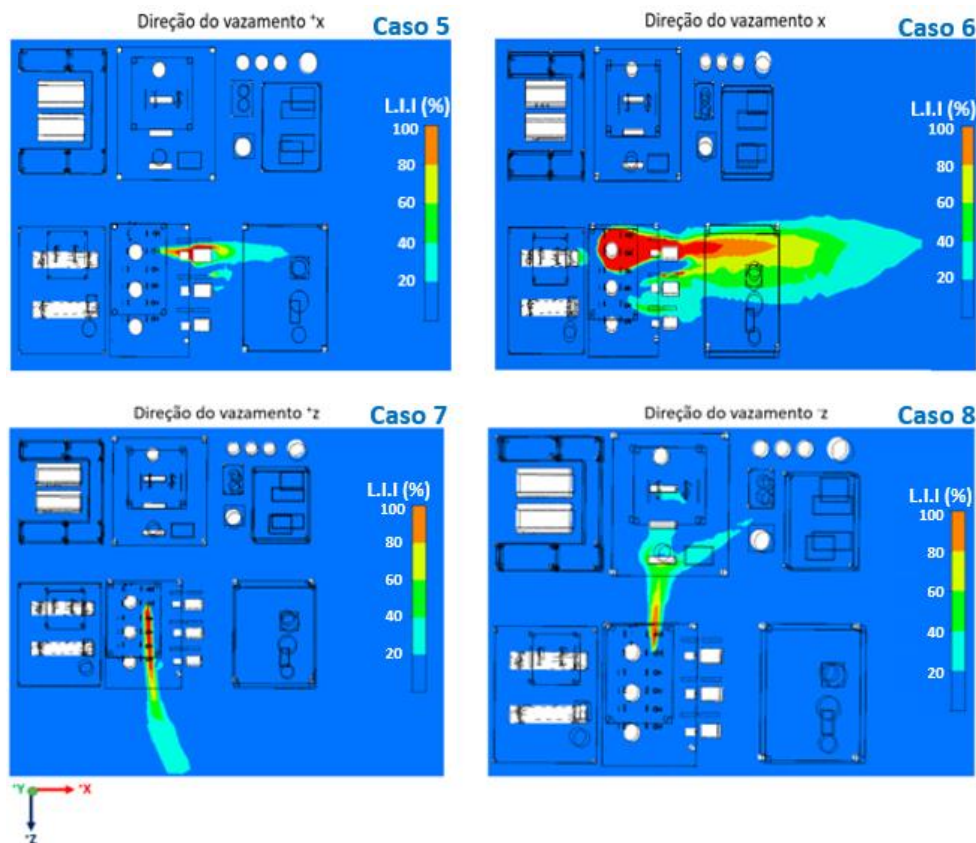


Figura 5-6 - Contorno em Y da nuvem entre 0% e 100% do L.I.I., ventos de 6,5 m/s – Cenários 5, 6, 7 e 8.

As Figura 5-7 e Figura 5-8 retratam as isosuperfícies na posição de 100% do L.I.I., para as quatro direções de vazamento consideradas e às duas velocidades de vento. Como comentado no Capítulo 2.6.2, o cálculo do TNT equivalente se baseia no limite inferior de inflamabilidade, porque é essa parte da nuvem que será responsável pela possível explosão, e a consequente sobrepressão gerada após ignição.

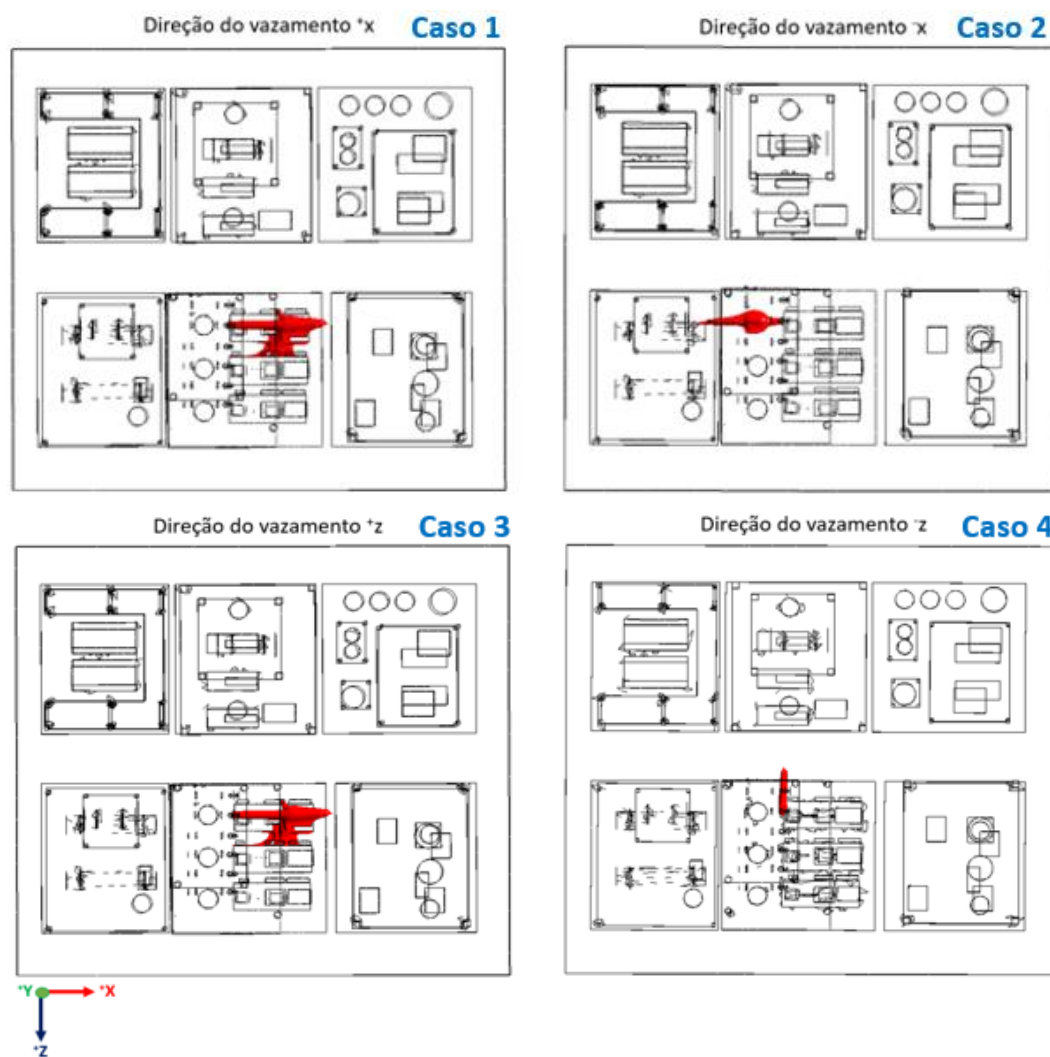


Figura 5-7 - Nuvens de gás natural na condição de vento de 0,5 m/s: Isosuperfície na concentração do L.I.I - Cenários 1, 2, 3 e 4.

O pior cenário corresponde ao vento forte com vazamento na direção $-X$, com alta concentração de gás natural em grande região da plataforma. Este resultado está de acordo com a medida e sobrepressão e listada na Tabela 5-1. Analisando os resultados obtidos após a realização das simulações numéricas, pode-se concluir, que as plumas geradas, na condição de vento em sentido contrário ao vazamento, tendem a ter um maior volume, quando comparadas às simulações a favor do vento, além de se espalharem com mais facilidade por toda a plataforma, visto nos cenários 2 e 6 (vazamentos na direção $-X$), características também constatadas por Fleck (2008) e Gomes (2016). Por meio dos experimentos 4 e 8 (vazamento na direção $-Z$), também pôde-se observar que obstáculos como anteparas e outros equipamentos também induzem a formação de maiores volumes de nuvens, dado que vórtices são formados nas regiões

próximas aos obstáculos, viabilizando uma maior diluição do gás no ar. Essas características foram identificadas no cenário que leva em conta a concentração de 20% do L.I.I.

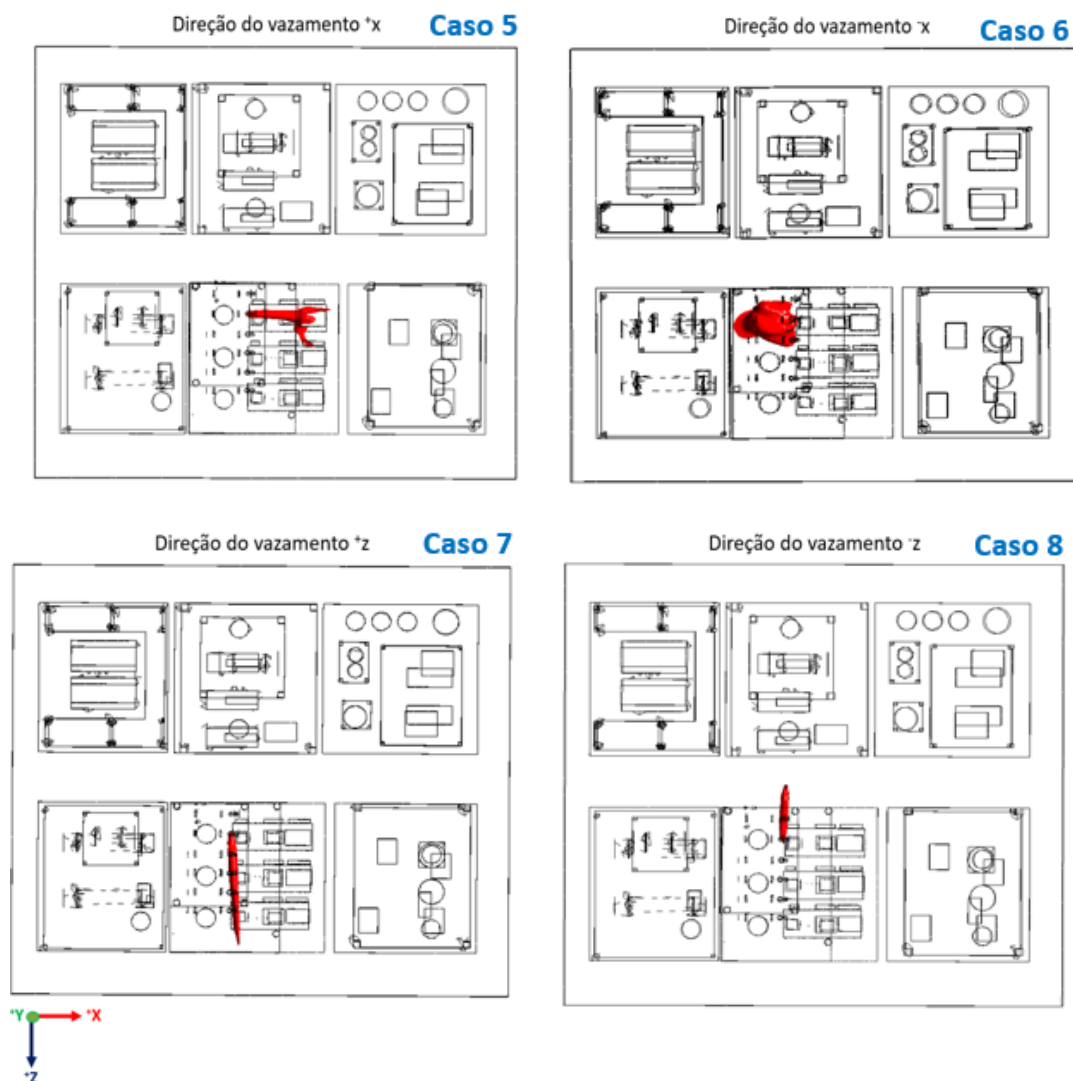


Figura 5-8 - Nuvens gás natural na condição de vento de 6,5 m/s: Isosuperfície na concentração do L.I.I - Cenários 5, 6, 7 e 8.

6. Considerações Finais

Uma análise numérica da dispersão de gases proveniente de acidente em uma FPSO foi analisada, visando identificar, pontos críticos na plataforma de acúmulo de gás nocivo e explosivo.

A primeira etapa do presente trabalho, consistiu na verificação do procedimento de obtenção solução, e de utilização do software CFX. Para essa etapa, analisou-se um jato de metano e realizou-se comparação com dados experimentais. Os resultados mostraram-se bastante satisfatórios, pois foi possível reproduzir os dados experimentais, tanto no que diz respeito ao decaimento da concentração de metano ao longo da distância, quanto ao comportamento da velocidade, além da coleta de dados importantes como o ângulo de espalhamento.

Através dos dados estatísticos de vazamentos do HSE, foi possível observar que os equipamentos responsáveis pela maior taxa de falha dentro de uma unidade offshore são os compressores, presentes nos sistemas de compressão de gás. A partir disso, uma geometria simplificada de um FPSO real foi modelada com o intuito de servir de base para os experimentos de dispersão de gases. Selecionou-se seis dos primeiros módulos considerados representativos do estudo.

Diversos testes foram realizados visando tornar a análise mais eficiente do ponto de vista computacional. A começar pela definição do tamanho do domínio computacional, representando a estrutura 3D em um meio marítimo sem fronteiras. A partir dos testes foi possível definir o tamanho do domínio em duas vezes o tamanho da geometria considerada. A seguir, verificou-se que a utilização de perfis logarítmicos para representar a velocidade dos ventos ao longe mostraram frutos satisfatórios.

Os testes relacionados à malha computacional, bem como a introdução dos efeitos obtidos com as simulações de ventos como condição inicial, se mostraram bastante satisfatórios, pois permitiram a otimização do

número de elementos e de nós considerados, viabilizando uma redução do tempo médio de processamento para, aproximadamente, 20%, quando comparada a situação inicial.

A metodologia de dispersão de gases e as definições de condições de contorno e parâmetros da simulação se mostraram adequadas, uma vez que permitiu a reprodução de resultados coerentes com as informações contidos na literatura.

Para a feitura desse trabalho, foram levadas em conta quatro direções de vazamentos e uma direção de vento, em que duas intensidades foram consideradas. Uma nuvem de gás foi obtida par cada cenário de dispersão. Através dos resultados, constatou-se que as maiores nuvens inflamáveis são geradas em contracorrente ao vento. Por meio do volume inflamável calculado, foi viável determinar o TNT equivalente, que consiste somente na região da nuvem que se encontra dentro dos limites de inflamabilidade.

Por intermédio dessa técnica, foi possível efetuar os cálculos, em que foi tida uma distância média de 10 m do centro da nuvem explosiva. Os valores das sobrepressões calculadas variaram de 16,19 kP_a a 37,10 kP_a . O pior cenário identificado foi o caso 6, cuja intensidade de vento é igual a 6,5 m/s, e direção de vazamento a 'X (direção sul). Pois através desse experimento foi possível detectar um volume de gás de 31,65 m³, o que teria poder de gerar uma sobrepressão de 37,10 kP_a . Os dados obtidos nesse trabalho, são dependentes da concentração do gás vazado, das condições do vazamento, assim como o grau de complexidade da plataforma em questão.

Os resultados obtidos foram comparados com os dados presentes em Lees (2005), que apresenta uma relação, entre os valores de sobrepressão, com o potencial de danos a serem causados em uma eventual ignição da nuvem explosiva. Através dos dados da análise realizada foi possível verificar que em caso de ignição, as sobrepressões calculadas nesse trabalho poderia gerar danos a unidade offshore que vão desde a quebra de janelas e outras estruturas mais simples, danos consideráveis em equipamentos pesados, a abalos nas estruturas em aço entre outros.

6.1. Recomendações para Trabalhos Futuros

Para complementar, sugere-se a validação da metodologia de TNT equivalente aplicada neste trabalho, com softwares que fazem simulações de explosão, de modo a melhor avaliar o dano gerado ao considerar a ignição da nuvem inflamável.

É importante obter maiores dados da plataforma offshore a ser escolhida para a pesquisa, de forma a reproduzir com maior fidelidade as condições de tubulações e de estruturas na geometria 3D, podendo, assim, identificar todos os principais pontos de recirculação e de estagnação de ar.

Realizando a Análise Preliminar de Perigo, e usando a geometria completa de toda a unidade, deve-se averiguar, todas as possíveis direções de vazamentos, em todas as prováveis direções e intensidades de ventos, de modo a aplicar uma metodologia de otimização de posicionamento de detectores de gás.

Após a identificação dos pontos ótimos de instalação dos detectores, deve-se executar simulações transientes, para a verificação do tempo mínimo de detecção.

Desde que se foi comprovada sua estabilidade e sua robustez, o modelo $\kappa-\varepsilon$ tem sido largamente usado em códigos CFD. Porém, Wilkening et al. (2007) pontuam algumas de suas limitações, especialmente quando é empregado em escoamentos complexos. Assim sendo, como um dos complementos deste trabalho, recomenda-se a realização de estudos comparativos entre os modelos $\kappa-\varepsilon$ e $\kappa-\omega$ SST, visando identificar o impacto nos resultados obtidos da seleção do modelo de turbulência.

Referências Bibliográficas

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Análise do acidente com a plataforma P-36**. In: Relatório da Comissão de Investigação. ANP / DPC, 2001.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Informativo sobre o Relatório de Investigação do incidente de explosão ocorrido no FPSO Cidade de São Mateus**, 2015.

Aliaga, J. R. **Simulação da dispersão de poluentes atmosféricos numa microrregião do Município do Rio de Janeiro em escala real**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2016.

ANSYS CFX-Solver Theory Guide – 2020 R1.

Bakkum, E. A.; Duijm, N. J. **Vapour cloud dispersion**. In: Methods for the calculation of physical effects, Yellow Book. Publicatierieks Gevaarlijke Stoffen, 3rd ed., 2005.

Barcelos, J. P. M. **Comparação de simulações CFD em regimes estacionário e transiente para alocação de sensors de gases inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo Offshore**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Birch, A. D.; Brown, D.R.; Dodson, M.G.; Swaffield, F. **The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas**. Combustion Science and Technology, v.36, p.249-261, 1984.

Birch, A. D.; Huges, D. J.; Swaffield, F. **Velocity decay of high pressure jets**. Combustion Science and Technology, v. 52, p.161-171, 1987.

Benintendi, R. **Laminar jet modelling for hazardous area classification**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v.24, p.123-130, 2010.

Casal, J. **Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants**. Elsevier Science, 1st ed., vol.8, 2007.

Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, New York, 2nd ed., 2000.

Çengel, Y. A.; Cimbala, J. M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications**. Nova York: McGraw-Hill, 1st ed., 2006.

Cleaver, R. P.; Humphreys, C. E.; Robinson, C. G. **Accidental generation of gas clouds on shore process installations**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v.7, n.4, p.273-280, 1994.

_____. **Accidental generation of gas clouds on offshore process installations**. British Gas plc, Research and Technology. Gas Research Centre, Ashby Road, Loughborough, Leicestershire, LE11 3QU, UK, 1994.

Cordeiro, A. F. **Simulação da Injeção de água em Reservatórios Empregando CFD**. Artigo apresentado no 4º PDPETRO, Campinas, São Paulo, outubro de 2007.

Crowl, D.A., Louvar, J. F. **Chemical Process Safety Fundamentals with Applications**. Prentice Hall PTR, 2nd ed., 2002.

Cude, A. L. **The Chemical Engineer**. 1974.

Cullen, W. **The public inquiry into the Piper Alpha Disaster**. Londres: The Stationery Office, 1990.

Ferreira, T. D. **Developing a mathematical model for prediction of flammable gas cloud size based on CFD and response surface methodology**. Dissertação de Mestrado Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

Fiates, Juliane. **Desenvolvimento de uma metodologia para simulação de dispersão de gás inflamável por meio de CFD utilizando OpenFOAM**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP, 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266013>>.

Fiates, J.; Vianna, S. S. V. **Numerical modelling of gas dispersion using openfoam**. Process Safety and Environmental Protection. Science Direct, v.104, part A, p.277-293, 2016.

Fleck, A. B. **Dispersão de Gases Inflamáveis em Plataformas Offshore: Localização de Detectores**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Pritchard, P. J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC Editora, 6ª ed., 2006.

Gomes, E. G. **Dispersão de gases inflamáveis em unidades de processamento de petróleo: otimização de detectores**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

HSE - Health & Safety Executive. **Representative range of blast and fire scenarios**. The Steel Construction Institute for HSE, Offshore Technology Information (OTI), n.92586, London, UK, 1992.

HSE - Health & Safety Executive. **Guidance for NSD on the assessment of CFD simulations in safety cases**, 1997.

HSE - Health & Safety Executive. **Offshore hydrocarbon releases statistics and analysis**. Hid Statistics Report, 2002.

HSE - Health & Safety Executive. **A review of the state-of-the-art in gas explosion modelling**. Fire and Explosion Group, 2002.

HSE - Health & Safety Executive. **Outstanding safety questions concerning the analysis of ventilation and gas dispersion in gas turbine enclosures**. Best Practice Guidelines for CFD. Fire and Explosion Group, 2003.

HSE - Health & Safety Executive. **The Selection and use of flammable gas detectors**, 2004.

HSE - Health & Safety Executive. **Modelling of low pressure jets for area classification**. Fire and Explosion Group, 2005.

Katopodes, N. D. **Free-Surface Flow – Environmental Fluid Mechanics**. Oxford: Butterworth-Heinemann, p.566-650, 2018.

Lees, F.P. **Loss Prevention in the Process Industries**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2nd ed., 1996.

Lees, F.P. **Loss Prevention in the Process Industries**. In: Hazard Identification, Assessment and Control. Oxford: Butterworth-Heinemann, 3rd ed., 2005.

Lees, F.P. **Loss Prevention in the Process Industries**. Hazard Identification, Assessment and Control. Oxford: Butterworth-Heinemann, 4th ed., 2012.

Li, X.; Chen G.; Zhu, H.; Xu, C. **Gas dispersion and deflagration above sea from subsea release and its impact on offshore platform**. Ocean Engineering, n.163, p.157–168, 2018.

Malalasekera, W.; Versteeg, H. K. **An introduction to computational fluid dynamics**. In: The Finite Volume Method. London: Longman, 2nd ed., 1995.

Osenbroch, J.; Hjertager, B.H.; Solberg, T. **Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Gas Dispersion in Offshore Modules**.

17th Annual International Conference and Workshop on Risk, Reliability and Security, Florida, p. 233-246, 2002.

Pritchard, D. K. **A Review of Methods for Predicting Blast Damage from Vapor Cloud Explosions**. Loss Prevention in the Process Ind., Elsevier, v.2, p.187-193, 1989.

Pupe, C. G.; da Silva, A.S. **O uso de CFD na previsão da dispersão de gases em plataformas offshore**. Dissertação de Projeto Final, Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2006.

Qiao, A.; Zhang, S. **Advanced CFD modeling on vapor dispersion and vapor cloud explosion**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, n.23, p.843-848, 2010.

Ricou, F. P.; Spalding, D. B. **Measurements of entrainment by axisymmetrical turbulent jets**. Journal of Fluid Mechanics, Cambridge University Press, Issue 1, p.21-32, 1961.

Rigas, F.; Sklavounos, S. **Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles**. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, A108, p.9-20, 2004.

Rodi, W. **Turbulence models and their application in hydraulics**. CRC Press, 1993.

Santiago, G. F. **Efeito de explosão de nuvem de vapor inflamável**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

Spouge, J. **Leak frequencies from the hydrocarbon release database**. Symposium series, n.151, IChemE, 2006.

Pope, S. B. **Turbulent Flows**. Cambridge University Press, 2000.

Strøm, Ø.; Bakke, J. R. **Gas Detector Location**. Safety on Offshore Installations Conference, 1999.

Tennekes, H.; Lumley, J. L. **A first course in turbulence**. Cambridge: The MIT Press, 1972.

TNO. (2005), The Netherlands Organization of Applied Scientific Research - **Methods for the calculation of physical Effects** (Yellow Book), CPR14E, 3ªEd.

Wakes, S. J. **High aspect ratio orifice jet leaks within a production area of an offshore superstructure**. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, Melbourne, 2003.

Wakes, S. J.; Holdo, A. E.; Meares, A. J. **Experimental investigation of the effect orifice shape and fluid pressure has on high aspect ratio**

cross-sectional jet behavior. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, A89, p.1-27, 2002.

Wilkening, H.; Baraldi, D. **CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines.** International Journal of Hydrogen Energy, 32, 2206-2215, July 2007.

SITES VISITADOS:

<https://petrobras.com.br/pt/> acessado em 10/11/2019.

<https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/> acessado em 11/11/2019.

<https://karasgriggs.com/maritime-lawyers/> acessado em 02/02/2020.

ANEXO A - Validação de um Jato

Através do estudo numérico do jato, é possível analisar seu comportamento e sua influência na dispersão do gás, uma vez que a difusão precede toda pluma gasosa em vazamento através de um orifício (Fleck, 2008).

Para tanto, uma caixa retangular foi construída com o domínio computacional com as seguintes dimensões: 0,1 por 0,1 m de lado e 1 m de altura. O diâmetro do orifício, de 10 mm, utilizado nesse experimento foi baseado no trabalho de Birch *et al.* (1984). A malha utilizada é do tipo tetraédrica, não estruturada, composta por 5.620.051, como mostrado na Figura A-1.

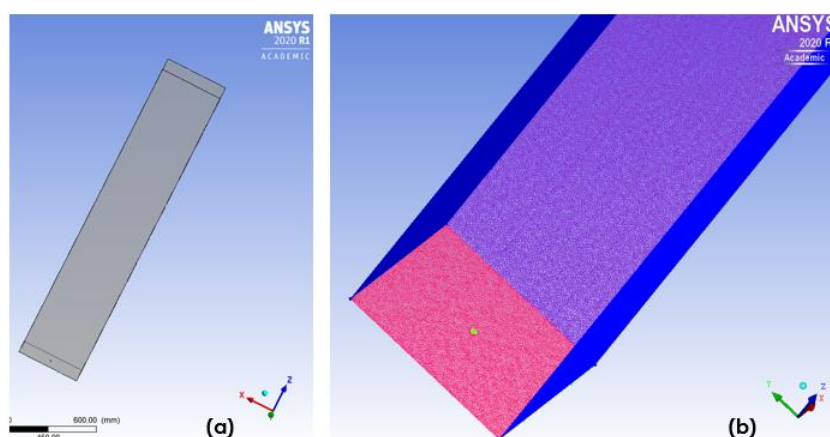


Figura A-1: (a) Geometria; (b) malha utilizadas no estudo do jato.

Para efeitos de simulação, o domínio computacional foi dividido em três partes: orifício (*inlet*), chão (*wall*) e todas as outras regiões 2D foram configuradas como *opening*. A velocidade do gás foi configurada como sendo de 340 m/s, na condição de temperatura ambiente.

Empregando o CFX-POST, foi possível extrair informações importantes da simulação, como o ângulo de espalhamento, o perfil de velocidade no eixo central e a variação da concentração do gás ao longo do escoamento (Figura A-2).

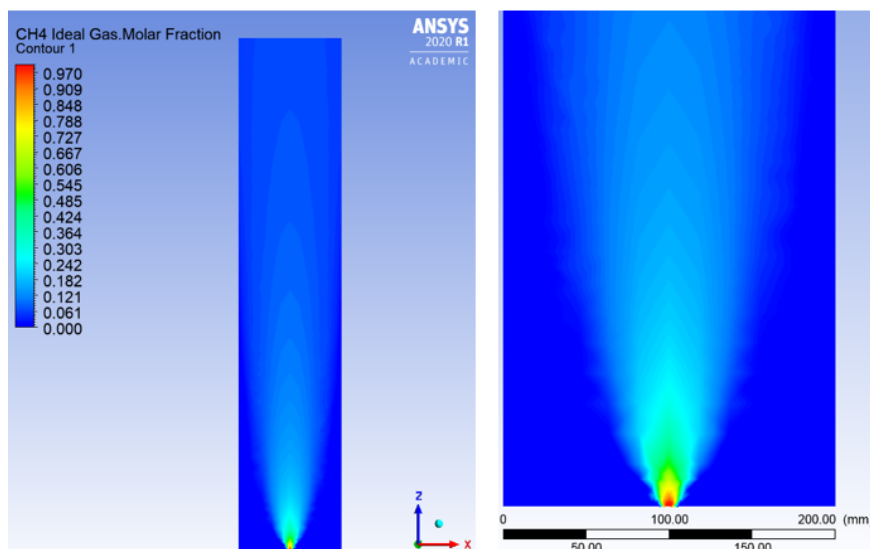


Figura A-2: Ângulo de espalhamento do gás metano.

O ângulo de espalhamento é uma variável importante a ser analisada, já que se relaciona diretamente com o tamanho da nuvem de gás inflamável que será formada. Quanto maior for o ângulo, mais ar irá se misturar ao hidrocarboneto, tornando a nuvem de gás maior, além da concentração de mistura explosiva ser alcançada mais rapidamente.

Lees (2005) sugere a utilização de ângulo de espalhamento de 18°, mas, em seus dados experimentais, Wakes (2003) encontrou valores entre 12° e 16°. Para esse experimento, foi encontrado um ângulo de 17°.

Uma outra importante variável a ser estudada é o perfil de velocidade no eixo central do escoamento. Através desse item, é possível ter uma boa indicação do comportamento do jato. A Figura A-3 apresenta o perfil de velocidade do jato em diferentes alturas, variando de 0,005 m a 1 m. Qualitativamente, o resultado obtido é muito bom, pois claramente se observa o espalhamento ao longo da direção radial e o decaimento na direção axial, comportamento esperado para jatos livres.

Para questões relacionadas à segurança, o decaimento da velocidade em função da distância a partir do ponto de liberação, dá bons indicativos de quão longínquo o jato pode chegar, enquanto se mistura com o ar, tornando-se potencialmente explosivo.

Wakes (2003) sugere a criação de um perfil de velocidade na entrada do gás no domínio, visto que o comportamento do jato depende do seu

perfil de velocidade. Nesse trabalho, o fluxo de massa foi especificado no vazamento, e o perfil foi extraído a partir dele.

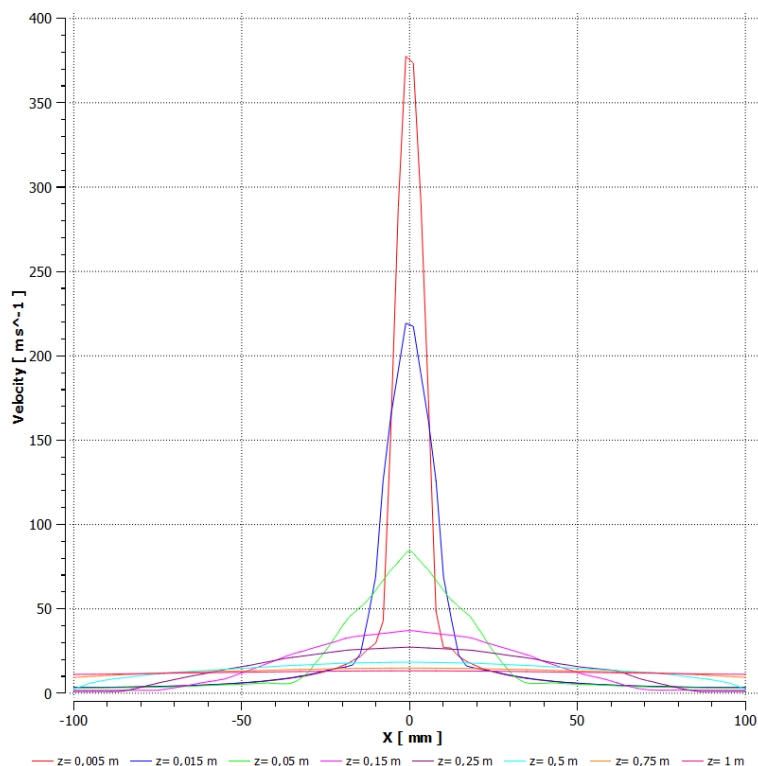


Figura A-3: Perfil de velocidade do metano em diferentes alturas.

A Figura A-4 apresenta o perfil normalizado de velocidade na linha central do jato, pela distância normalizada a partir do diâmetro do orifício de vazamento. A validação foi realizada através de comparação com os dados experimentais obtidos por Birch *et al.* (1987), que utilizaram um orifício de 2,7 mm de diâmetro, com metano sendo liberado na proporção de 92 a 92,4% na forma de gás natural. Como pode ser verificado na Figura A-4, os resultados mostraram-se bem próximos aos valores experimentais.

Fiates (2015) analisou o mesmo problema numericamente, utilizando a ferramenta OpenFOAM. Boa concordância entre os dados obtidos neste trabalho para o componente de velocidade axial ao longo do eixo e os dados de Fiates (2015), pode ser visualizada na Figura A-5, onde um pequeno desvio pode ser observado na região de escoamento potencial.

Uma comparação do decaimento do perfil de concentração do gás metano, na linha central do jato, com os dados experimentais de Birch *et al.* (1987) é apresentada na Figura A-6. Já na Figura A-7, os resultados são comparados com os dados numéricos de ao ser comparado Fiates (2015).

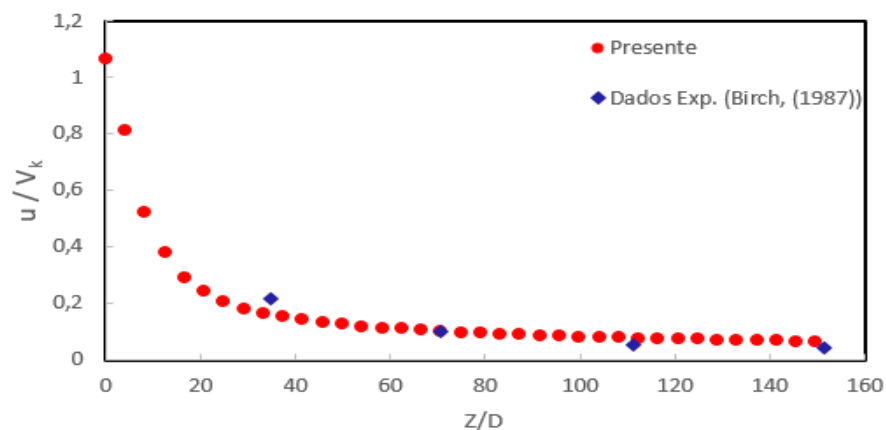


Figura A-4: Decaimento da velocidade na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial; D = diâmetro do furo).

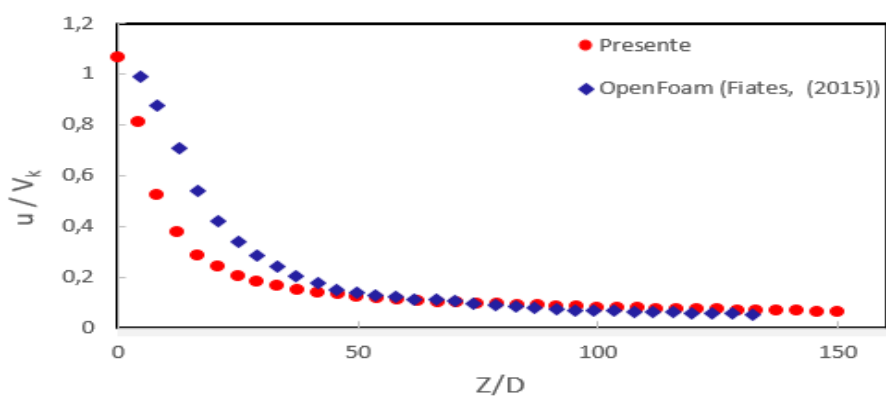


Figura A-5: Decaimento da velocidade na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial; D = diâmetro do furo).

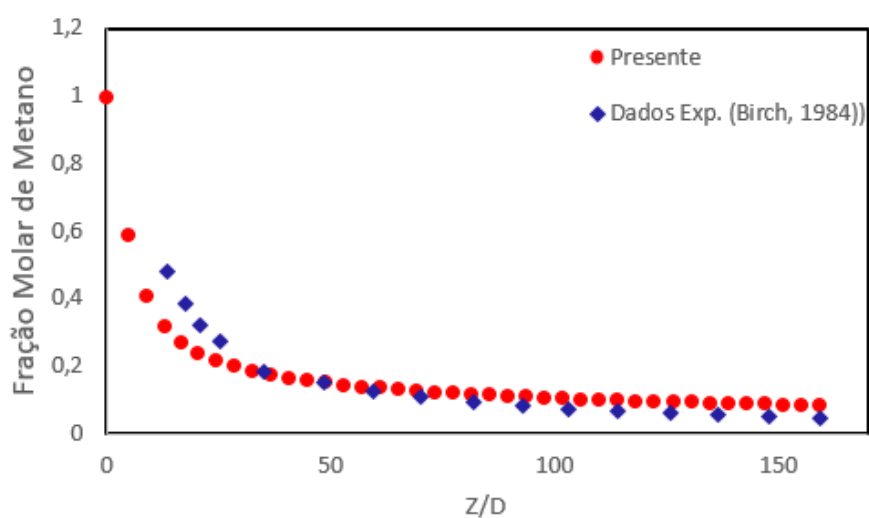


Figura A-6: Decaimento da fração molar na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial, D = diâmetro do furo).

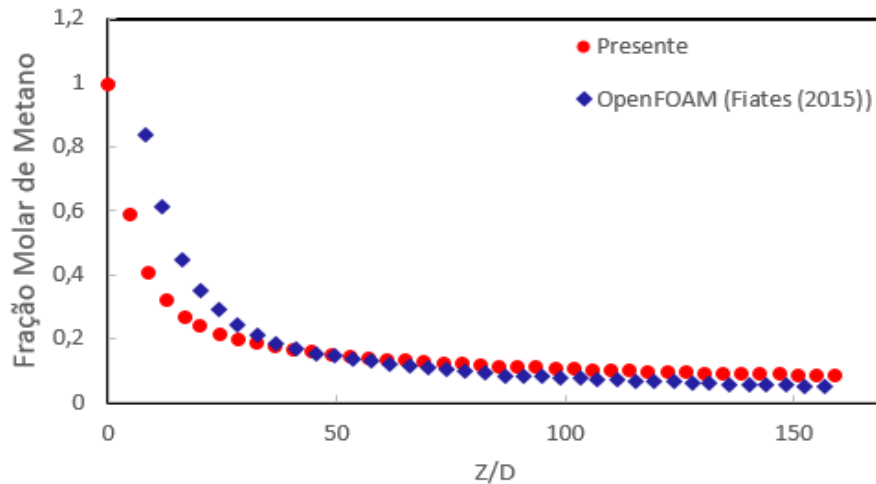


Figura A-7: Decaimento da fração molar na linha central do jato de metano, em razão da distância normalizada com o diâmetro do furo (Z = distancia axial, D = diâmetro do furo)

Como pode ser verificado nas imagens apresentadas, os resultados obtidos mostram boa concordância com os dados experimentais de Birch *et al.* (1984 e 1987), assim como com os dados obtidos através da ferramenta OpenFOAM por Fiates (2015), apresentando uma pequena diferença de deslocamento no eixo x no segundo caso. Apesar disso, os perfis dos resultados apresentaram boa concordância, bem como as posições em que o gás atinge sua condição de inflamabilidade. Isso permite concluir que o modelo aplicado para simular um jato axissimétrico é apropriado.