



Dispersão de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo *Offshore*: Posicionamento de Detectores.

João Phelipe Martins Barcelos

PROJETO FINAL DE CURSO

Orientadores

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Escola de Química – Departamento de Engenharia Química
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Setembro de 2013

DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*: POSICIONAMENTO DE DETECTORES

João Phelipe Martins Barcelos

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Graduado em Engenharia Química.

Aprovado por:

Norman Adrian Millan Neumann, D.Sc.

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

Heloísa Lajas Sanches, D.Sc.

Orientado por:

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Setembro de 2013

Barcelos, João Phelipe Martins.

Dispersão de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo *Offshore*:
Posicionamento de Detectores / João Phelipe Martins Barcelos. Rio de Janeiro:
UFRJ/EQ, 2013.

xiii, 125 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientador(es): Ricardo de Andrade Medronho e Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva.

1. Dispersão de Gases. 2. Posicionamento de Detectores. 3. Fluidodinâmica
Computacional (CFD). 4. Projeto Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo
de Andrade Medronho, Ph.D. e Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

Dedico esta conquista aos meus familiares, amigos e a Deus. Aos meus pais, Volmir e Sandra, e meu irmão, Guilherme, pelo incentivo, paciência e amor presentes em todos os dias. Aos meus amigos que me apoiaram e dispersaram minha atenção durante a faculdade proporcionando momentos inesquecíveis e engraçados. À minha namorada Michelle pelo carinho, atenção e motivação constantes.

*“Nem você, nem eu, nem ninguém baterá tão forte quanto a vida.
Mas isso não se trata de quão forte pode bater.
Trata-se de quão forte pode ser atingido e continuar seguindo em frente.
Quanto você pode receber e continuar seguindo em frente.
É assim que a vitória é conquistada!”.*

Sylvester Stallone em Rocky Balboa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado criando oportunidades, expandindo meus horizontes e mostrando que nossos objetivos devem ser conquistados com esforço e determinação.

À minha família pelo incentivo, amor e por acreditarem em mim investindo todos os esforços nas minhas conquistas.

Aos meus amigos e a minha namorada por serem pessoas especiais e amáveis.

Agradeço aos meus orientadores Ricardo de Andrade Medronho e Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva pelo conhecimento passado, experiências trocadas, ideias, sugestões e pela paciência depositada durante a graduação. Agradeço não somente pela orientação acadêmica, mas por esses excelentes professores terem influenciado minhas escolhas e me direcionando profissionalmente, abrindo portas e oportunidades na expansão dos meus conhecimentos e por estarem sempre disponíveis para dialogar com bom humor e críticas que engrandeceram o carinho que sinto pela UFRJ.

Agradeço a todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, em particular aos meus colegas do LabCFD e em especial à Bureau Veritas que disponibilizou o conteúdo bibliográfico e a experiência adquirida para engrandecer o estudo.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Graduado em Engenharia Química.

DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE*: POSICIONAMENTO DE DETECTORES

João Phelipe Martins Barcelos

Setembro de 2013

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc.

As novas técnicas utilizadas nas atividades de exploração e produção de petróleo devem estar associadas aos riscos e danos causados por acidentes provocados por vazamentos em equipamentos contendo gases inflamáveis. Nas unidades *offshore*, em especial os FPSO's (Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga), observam-se inúmeras situações com riscos moderados e não toleráveis, cabendo aos engenheiros e suas equipes a manutenção das funções de segurança e confiabilidade do sistema de proteção e alarme. Neste trabalho, empregou-se a Fluidodinâmica Computacional (CFD) como ferramenta na predição do comportamento das plumas de gás aplicando-se, posteriormente, a metodologia de alocação do sistema de alarme composta por detectores de gases inflamáveis em um típico navio FPSO. As simulações numéricas foram conduzidas conforme as condições meteorológicas da região e o *layout* da unidade nos módulos contendo compressão, injeção e exportação dos gases inflamáveis. Foram analisados 96 cenários levando-se em consideração os resultados de 48 cenários simulados, avaliando-se um total de 100 pontos de monitoramento. Dentre os pontos iniciais, apenas 20 deles foram suficientes para capturar todos os cenários. Além disso, a metodologia de posicionamento vertical mostrou-se eficiente na maior parte dos cenários, necessitando de ajustes posteriores na obtenção da menor quantidade de dispositivos. Acredita-se que a metodologia proposta é adequada para avaliar e tornar mais confiável o sistema de detecção de gases de toda a plataforma.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação e Objetivo.....	1
1.2	Estrutura do Estudo de Dispersão de Gás.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Unidade de Processamento Offshore - FPSO.....	7
2.2	Vazamentos.....	9
2.2.1	Modelos de Fonte.....	9
2.2.2	Modelos de Dispersão Atmosférica.....	10
2.2.3	Escoamento Compressível.....	16
2.2.4	Escoamentos Gasosos através de Orifício.....	16
2.2.5	Diâmetro do Orifício de Vazamento.....	20
2.3	Detecção de Gases.....	21
2.3.1	Detecção do Vazamento.....	22
2.3.2	Limites de Inflamabilidade e Níveis de Ação.....	23
2.3.3	Localização dos Detectores.....	24
2.4	Mecânica dos Fluidos.....	29
2.4.1	Conservação da Massa.....	29
2.4.2	Conservação da Quantidade de Movimento.....	30
2.4.3	Escoamentos Turbulentos.....	32
2.5	Fluidodinâmica Computacional.....	36
2.5.1	Etapas da Simulação CFD.....	37
2.5.2	Malha Computacional.....	39
2.5.3	Malhas Adaptativas.....	40
3	METODOLOGIA	42
3.1	Recursos Computacionais.....	42
3.2	Estudo de Dispersão de Gases.....	42
3.2.1	Geometria e Malha Computacional.....	43
3.2.2	Definição das Condições Meteorológicas.....	46
3.2.3	Seleção dos Cenários, Parâmetros e Condições de Contorno.....	49
3.2.4	Teste de Sensibilidade de Malha.....	54
3.2.5	Metodologia do Posicionamento de Detectores.....	56

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1	Teste de Sensibilidade de Malha	59
4.2	Vazamento nos Compressores dos Módulos do FPSO	63
4.2.1	Compressor C-01 com Vento na Direção Norte.....	65
4.2.2	Compressor C-02 com Vento na Direção Oeste.....	77
4.2.3	Compressor C-03 com Vento na Direção Noroeste.....	89
4.2.4	Compressor C-04 com Vento na Direção Nordeste	101
4.3	Aplicação da Metodologia de Alocação de Detectores	113
4.3.1	Determinação da Altura dos Detectores do Sistema de Detecção	117
5	CONCLUSÕES	122
6	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de plataformas utilizadas nos campos de extração no mar	2
Figura 1.2 - Plataforma offshore Piper Alpha antes e durante o acidente	3
Figura 1.3– Estrutura do estudo de dispersão de gases (Fleck, 2008).....	5
Figura 2.1 – Fluxograma típico de unidades de processamento de petróleo.....	8
Figura 2.2– Pluma formada por um vazamento contínuo (Adaptado de Crowl e Louvar, 2002)12	
Figura 2.3 – Modelo de Nuvem formado por um vazamento instantâneo(adaptado de Crowl e Louvar, 2002).....	12
Figura 2.4 – Vazamento em jato (Adaptado de Lees, 1996)	13
Figura 2.5 – Região subexpandida de momento na liberação em jato (Lees, 1996)	14
Figura 2.6 –Jato supersônico simulado com diferentes modelos de turbulência (Novembre, 2006)	15
Figura 2.7– Escoamento crítico de gás através de orifício (Crowl e Louvar, 2002)	19
Figura 2.8 – Balanço material no volume de controle	29
Figura 2.9 – Comportamento de um escoamento turbulento.....	33
Figura 2.10 – Etapas da simulação em CFD utilizando o softwareAnsys CFX (Gomes, 2012).....	38
Figura 3.1– Vista isométrica do modelo 3D	43
Figura 3.2 – Vista de topo do modelo 3D.....	44
Figura 3.3 – Vista do domínio de simulação (Far Field)	45
Figura 3.4 – Malha superficial do modelo 3D	46
Figura 3.5 – Malha superficial dos compressores do sistema de compressão do gás.....	46
Figura 3.6 – Rosa dos Ventos da Unidade.....	48
Figura 3.7 – Decomposição do Vetor Velocidade do Vento Nordeste.....	48
Figura 3.8 – Compressores Selecionados no Estudo.....	50
Figura 3.9 – Condições de contorno inseridas no CFX-Pré.....	53
Figura 3.10 – Pontos de observação da concentração de hidrocarbonetos.....	55
Figura 3.11 – Possíveis Pontos de Detecção	57
Figura 4.1 – Concentração de HC ao Longo de uma Linha no Interior das Dispersões Gasosas	61
Figura 4.2 – Isosuperfície da Dispersão com Fração Molar igual a 0,01 na Malha 1	62
Figura 4.3 – Isosuperfície da Dispersão com Fração Molar igual a 0,01 na Malha 5	62
Figura 4.4 – Plano de corte apresentando o refinamento ao longo da pluma de HC nas malhas estudadas.	63
Figura 4.5 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Norte na Forma de Linhas de Corrente	66
Figura 4.6 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte	67
Figura 4.7 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte	68
Figura 4.8 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte.....	69
Figura 4.9 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte	70

Figura 4.10 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte	71
Figura 4.11– Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte	72
Figura 4.12 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte	73
Figura 4.13 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte	74
Figura 4.14 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte.....	75
Figura 4.15 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade(5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Norte	76
Figura 4.16 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Oeste na Forma de Linhas de Corrente	78
Figura 4.17 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste.....	79
Figura 4.18 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste	80
Figura 4.19 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste	81
Figura 4.20 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste	82
Figura 4.21 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste	83
Figura 4.22 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste	84
Figura 4.23 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste	85
Figura 4.24 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste	86
Figura 4.25 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste	87
Figura 4.26 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade(5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Oeste	88
Figura 4.27 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Noroeste na Forma de Linhas de Corrente	90
Figura 4.28 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste	91

Figura 4.29– Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste	92
Figura 4.30 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste.....	93
Figura 4.31 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste.....	94
Figura 4.32 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste.....	95
Figura 4.33– Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste.....	96
Figura 4.34 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste	97
Figura 4.35 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste	98
Figura 4.36 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste	99
Figura 4.37 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Noroeste.....	100
Figura 4.38 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Nordeste na Forma de Linhas de Corrente	102
Figura 4.39 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste	103
Figura 4.40 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste	104
Figura 4.41 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste	105
Figura 4.42– Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste.....	106
Figura 4.43 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste.....	107
Figura 4.44 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste	108
Figura 4.45 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste	109
Figura 4.46 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste	110
Figura 4.47 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste	111

Figura 4.48 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Nordeste.....	112
Figura 4.49 – Realocação do Detector M03-HC-01.....	114
Figura 4.50 – Posicionamento no Plano XY dos Detectores na Planta da Unidade	115
Figura 4.51 – Origem do Sistema de Coordenadas para a Alocação dos Detectores	117
Figura 4.52 – Figura Ilustrando o Gráfico Gerado pelo CFX da Concentração de Hidrocarbonetos na Linha Vertical do Detector M01-HC-02	118
Figura 4.53 – Figura Ilustrando o Gráfico Gerado pelo CFX da Concentração de Hidrocarbonetos na Linha Vertical do Detector M01-HC-03 para os casos 1, 3 e 6.....	119
Figura 4.54 – Casos 1 e 14 e suas sobreposições.....	120
Figura 4.55 – Casos 1 e 14 e as alturas distintas de detecção na região de sobreposição	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Velocidade Média mais Frequente e Porcentagem Direção Normalizada	47
Tabela 3.2 – Seleção dos Cenários e Especificações das Simulações.....	50
Tabela 3.3 – Composição da Mistura Contida na Corrente de Processo	52
Tabela 3.4– Fração Mássica Normalizada de Hidrocarbonetos	52
Tabela 3.5 – Propriedade e Parâmetros de Análise do Vazamento.....	53
Tabela 3.6 – Condições de Contorno e Parâmetros da Simulação	54
Tabela 3.7 – Parâmetros das Malhas	56
Tabela 3.8 – Número de Iterações nas Simulações.....	56
Tabela 4.1 – Teste de Sensibilidade de Malha (Concentração de HC).....	60
Tabela 4.2 – Desvios absolutos nos Valores de Concentração Molar nos Pontos de Monitoramento em Relação à Malha 5	60
Tabela 4.3 – Coordenadas dos Detectores e Cenários Detectados	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Objetivo

O produto estratégico mais cobiçado pela humanidade no mundo moderno é o petróleo. No estado em que é extraído tem pouquíssima aplicação, sendo uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos em proporções variáveis, contendo impurezas, denominadas impurezas oleofílicas, como os compostos contendo enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais.

Este recurso energético constitui um dos principais suportes para o desenvolvimento econômico mundial e sua importância está na diversidade de derivados que dele podem ser extraídos. Para aproveitar todo o potencial energético do petróleo, este deve ser submetido a processos de separação, conversão e tratamento em unidades de processamento. Esta indústria complexa, dinâmica e de capital intensivo transforma o petróleo nos derivados necessários à demanda do mercado consumidor.

O petróleo é encontrado em bolsões profundos em terra firme e abaixo do fundo do mar. Segundo a teoria biogênica, proposta por Engier e Hofer, o petróleo é resultado da lenta degradação bacteriológica de substâncias orgânicas, restos de animais e vegetais que, sob a ação do calor e da pressão das camadas que foram se depositando ao longo do tempo, se transformaram em gases, compostos solúveis em água e em material sólido remanescente que continuaram a sofrer a ação de bactérias, até passar para um estado semi-sólido (pastoso). Em seguida, este material semi-sólido passa para o estado líquido, por um processo de craqueamento, realizado em temperaturas inferiores a 200 °C, catalisado pelos minerais contidos na rocha matriz (Campos, 1990 e Neiva, 1986 Apud Valle, 2007).

Em terra, o petróleo é encontrado acima da água salgada e abaixo de uma camada gasosa em alta pressão. Assim, quando o poço é perfurado, o petróleo pode jorrar espontaneamente até a superfície em razão da pressão do gás. No mar, essa extração é mais difícil, sendo feita com a utilização de equipamentos especiais de perfuração e extração por meio de bombas em plataformas e navios.

A extração do petróleo em alto mar, dependendo das circunstâncias, pode ser feita por plataformas fixadas ao solo marinho, pode ser constituída de uma ilha artificial ou pode flutuar. Segundo Thomas *et al.* (2004), essas unidades se dividem basicamente nos seguintes tipos de sistemas: plataformas fixas, auto-eleváveis, submersíveis, *tension legs*, semi-submersíveis e os navios adaptados, como navios-sondas e plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*).

Para os campos que possuem lâmina d'água profunda e ultraprofunda faz-se necessária a utilização de plataformas flutuantes. Dentre estas, as mais completas são os FPSO's, Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga. A Figura 1.1 apresenta os tipos de plataforma utilizados.

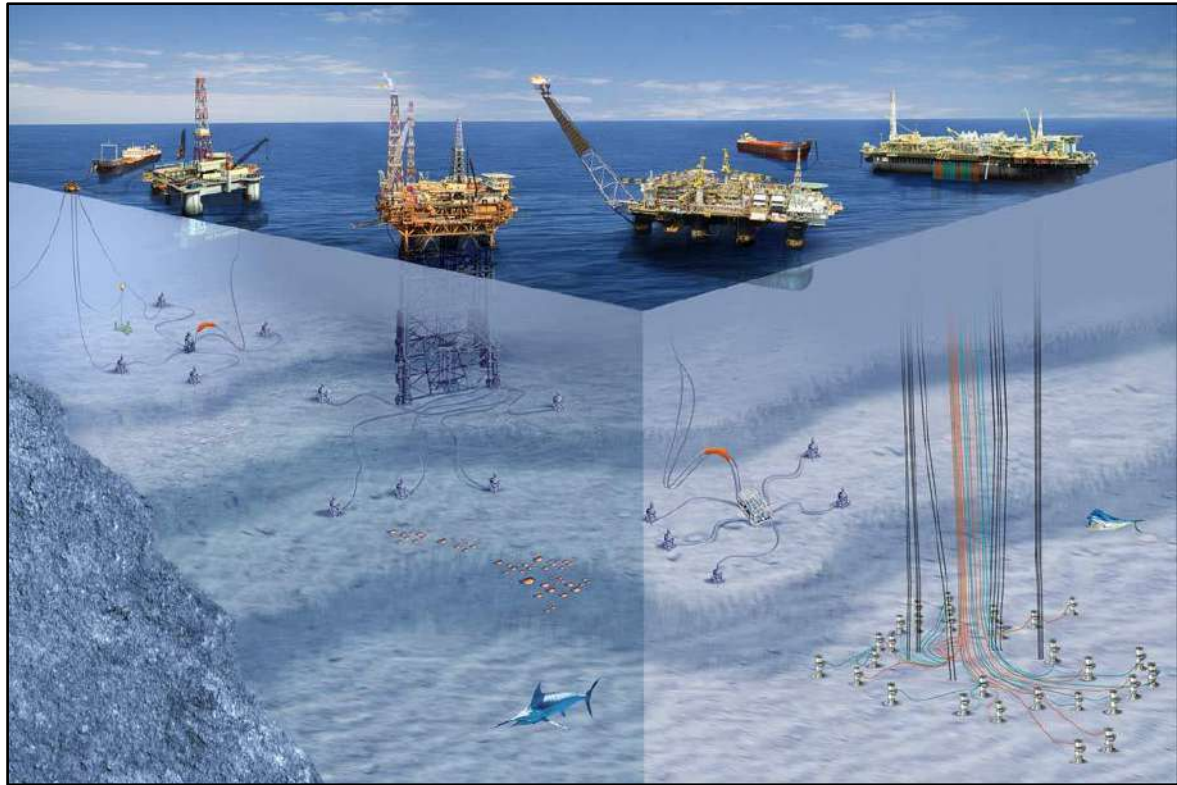


Figura 1.1 - Tipos de plataformas utilizadas nos campos de extração no mar
(<http://petroleosergipe.blogspot.com.br/2012/10/petrobras-preve-dez-novas-plataformas.html>)

Na atividade de exploração e produção de petróleo, em estruturas *onshore* e *offshore* há sempre o risco associado ao vazamento de gás ou óleo. Para projetar essas unidades, a disciplina de arquitetura em conjunto com a disciplina de processo deve conter o *layout* mais seguro possível para a unidade. Por sua vez, a disciplina de automação e instrumentação é responsável por toda a parte de controle dos intertravamentos que conduzirão a unidade a uma parada, total ou parcial, de maneira segura. Quando ocorrem vazamentos de líquidos inflamáveis ou combustíveis, esses podem ser conduzidos com segurança por meio de sistemas de drenagem, afastando-os de estruturas e equipamentos.

Quando todas as barreiras são transpostas e o incidente, como vazamento de gás, ou o acidente, como incêndio ou explosão, ocorrem, são os sistemas de segurança industrial que se apresentam como ferramentas a serem utilizadas na tentativa de se evitar, ou ao menos mitigar, danos à vida humana, ao meio ambiente, aos equipamentos e também a imagem da companhia.

O trabalho nas plataformas oferece risco à vida e saúde dos trabalhadores, isto porque estes trabalham confinados e com difícil acesso a resgate ou socorro. Assim sendo, um sistema que detecte tais gases deve ser instalado em locais específicos das unidades marítimas, visando diminuir o risco de explosões e intoxicações causadas por vazamento de gases (Pupe *et al.*, 2006).

Em 1988 no Mar do Norte, onde está localizado o campo petrolífero de *Piper*, houve um grande desastre envolvendo a plataforma que operava o campo, Piper Alpha. Em menos de três horas, a plataforma foi destruída devido a uma falha no sistema de compressão resultando na ruptura de um *riser*. O incêndio não pode ser controlado devido a um sistema precário e ineficiente de segurança. Após esse acidente, as análises de risco passaram a ser obrigatórias para todas as atividades. A Figura 1.2 apresenta a plataforma Piper Alpha antes e durante o acidente.

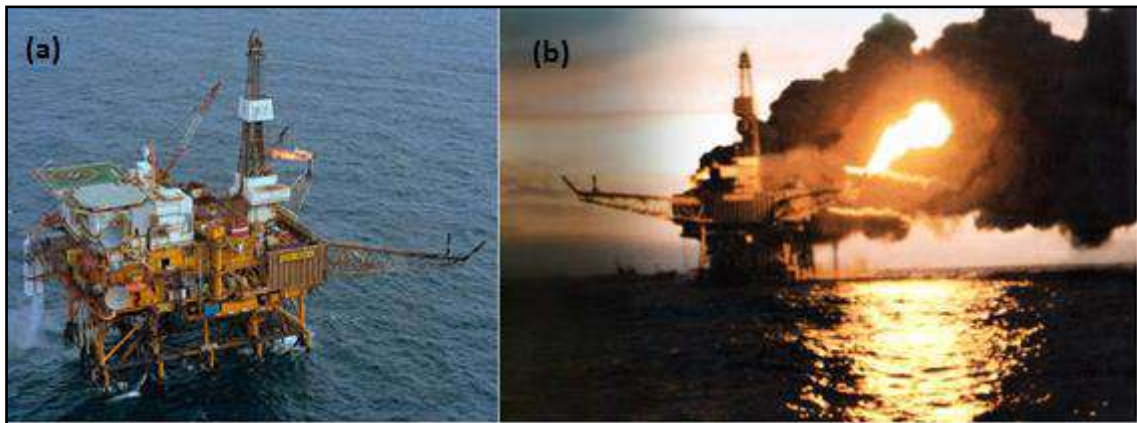


Figura 1.2 - Plataforma *offshore* Piper Alpha antes e durante o acidente

(a) <http://gcaptain.com/piper-alpha-disaster-19-year-anniversary-of-tragedy/>

(b) <http://secondsfromdisaster.net/s01e10-explosion-in-the-north-sea-piper-alpha-disaster/>

Em análises de perigo de explosão de gás em plataformas *offshore*, efetuadas para evitar acidentes como o da Piper Alpha, é essencial saber o grau de preenchimento e a concentração da nuvem de gás inflamável. O pior cenário, no qual todo o ambiente da plataforma está preenchido com uma mistura estequiométrica de ar com gás, não é representativo para tomada de decisões em um estudo de dispersão de gases. Um cenário realista, no entanto, requer uma análise de dispersão gasosa que pode descrever precisamente as interações entre o vazamento de gás, o campo de ventilação, com a complexa, altamente congestionada e parcialmente confinada geometria definida, por exemplo, em módulos *offshore* (Fleck, 2008).

Os projetos de segurança industrial de unidades de processamento de petróleo podem ser divididos, de maneira geral, em três grandes sistemas.

- Sistema de Combate a Incêndio
- Sistema de Proteção Passiva
- Sistema de Detecção de Fogo e Gás (F&G)

No caso do Sistema de Detecção de Fogo e Gás (F&G), espera-se que estes sistemas detectem e informem o mais rapidamente possível a ocorrência de um incêndio ou vazamento de gás, reduzindo-se, com isso, o tempo de resposta para evacuação das pessoas e o controle desta emergência.

Com os avanços da capacidade de processamento dos computadores e os avanços nos algoritmos e técnicas numéricas, as ferramentas utilizadas na fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) estão sendo cada vez mais empregadas na resolução de problemas envolvendo o complexo escoamento desses fluidos em unidades de processo (Gomes, 2012).

Um elevado número de detectores gera maiores custos para aquisição, instalação e manutenção destes dispositivos. Em contrapartida, um número subdimensionado leva a possíveis falhas e a não detecção de vazamentos locais. Assim sendo, tais estudos de dispersão de gases devem ser elaborados, preferencialmente, durante as fases de projeto da unidade e, devido às suas particularidades, cada unidade deve possuir seu próprio estudo.

O presente trabalho propõe inicialmente um estudo do comportamento de nuvens de gás geradas por vazamento em uma unidade offshore. Utiliza-se um modelo para analisar a dispersão gasosa, baseando-se no método de volumes finitos, simulados com ferramenta computacional em CFD. As simulações levam em consideração as condições meteorológicas da região e o *layout* típico de um FPSO usado na extração de petróleo em alto mar. A metodologia proposta define um sistema de detecção dos gases inflamáveis para a plataforma, ou seja, construir uma malha de detectores com o intuito de minimizar o número total de instrumentos a serem utilizados.

1.2 Estrutura do Estudo de Dispersão de Gás

O estudo de dispersão de gases desenvolveu-se com base na estrutura de trabalho apresentada na Figura 1.3. O estudo consiste na análise do escoamento do gás liberado para a atmosfera através do orifício de vazamento, considerando sua interação com ar/vento, obstáculos e a geometria da unidade.

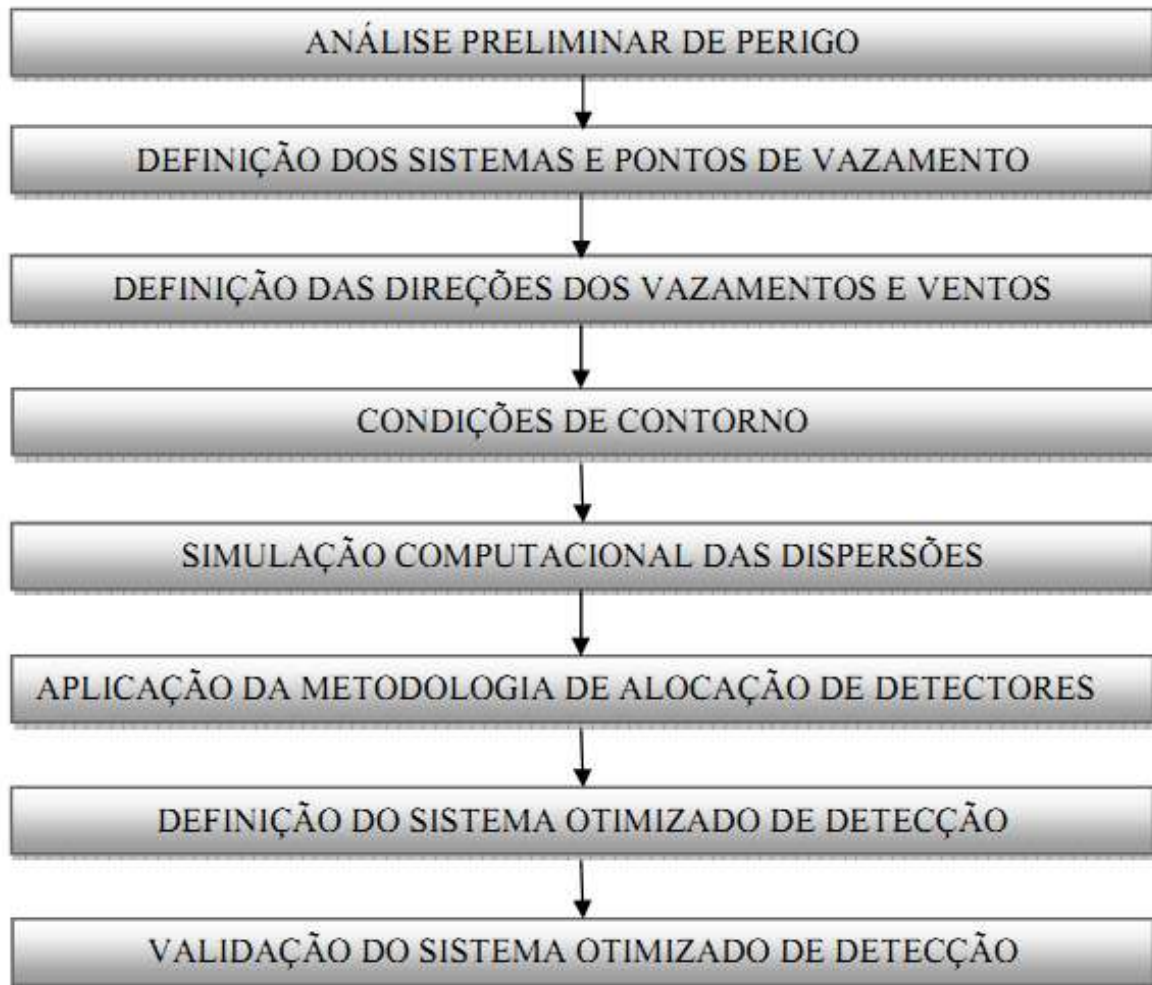


Figura 1.3– Estrutura do estudo de dispersão de gases (Fleck, 2008).

A Análise Preliminar de Perigo (APP) é o método para identificação de perigo nos primeiros estágios de desenvolvimento da planta de processo. Essa técnica qualitativa visa identificar os possíveis eventos acidentais, assim como, pontos de vazamento/liberação de material inflamável ou tóxico em unidades de processamento de petróleo (Lees, 1996). Nesta etapa, leva-se em consideração um critério de localização do *layout* da unidade, características dos inventários dos possíveis vazamentos e especificações de processo (temperatura, pressão, composição, etc.).

De posse destes resultados, são definidas as direções dos possíveis vazamentos, as condições meteorológicas da região onde a plataforma se encontra e as características físico-químicas do gás vazado.

Uma vez determinados os cenários críticos de vazamento, as condições meteorológicas e as características do gás, efetua-se então a análise do vazamento propriamente dito, que começa pela determinação da quantidade de gás a ser vazado

(termo fonte). Esta é uma função da geometria e do diâmetro do orifício de vazamento considerado e das condições termodinâmicas no local do vazamento (Fleck, 2008).

A avaliação das condições que influenciam e caracterizam o vazamento são inseridas no *software* de dinâmica dos fluidos computacional que fornece a solução numérica das equações de conservação que governam este escoamento. A resposta considera os efeitos dos obstáculos no desenvolvimento do escoamento, traduzidas pela existência de diferentes equipamentos e possíveis recirculações pela presença de corredores que direcionam o ar, caracterizando o tamanho da pluma de gás formada.

Com o mapa das plumas de gás resultante dos cenários analisados, é possível definir a malha de detectores localizando os pontos no espaço físico do cenário que conseguem captar, na concentração de interesse, o maior número de nuvens. Os pontos que captam somente nuvens redundantes, ou seja, nuvens que já foram detectadas por outros pontos, são eliminados.

Desta forma, faz-se uma varredura dentro da malha gerada e localiza-se o número mínimo de pontos que conseguem captar todas as nuvens simuladas, fornecendo assim, o posicionamento dos sensores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Unidade de Processamento Offshore - FPSO

As unidades flutuantes de produção, armazenamento e descarga, conhecidos como FPSO's, são responsáveis por elevar à superfície o petróleo encontrado em altas profundidades no oceano. Além de estocar e transferir o petróleo, um FPSO tem a função de processá-lo, retirando do óleo encontrado nos reservatórios a água e o gás. Por ser completamente independente, o FPSO não necessita de estruturas externas como linhas de tubulações ou tanque de armazenamento. Periodicamente o óleo produzido é transportado para navios aliviadores dependendo da produção e da capacidade de armazenamento (Devold, 2010).

As principais estruturas da planta de processo de um FPSO podem ser simplificadas em algumas etapas:

i. O petróleo é elevado do piso marinho por tubulações especiais chamadas de *Risers*, construídas para resistir às pressões exercidas pela imensa coluna d'água. Essas tubulações são conectadas aos *Manifolds*, conjunto de válvulas e instrumentos de controle que permitem flexibilidade na operação da plataforma. No mesmo módulo dos *Manifolds*, encontram-se os lançadores e recebedores de *PIG* (porco), responsáveis pela limpeza e manutenção das linhas de elevação e equipamentos submarinos.

ii. O petróleo que chega ao *Manifold* é alinhado para dutos principais chamados *Headers*, que são responsáveis pela coleta do óleo proveniente dos diversos poços produtores de petróleo. Assim, o petróleo é direcionado para os pré-aquecedores, onde se recupera a energia que poderia ser desperdiçada.

iii. O petróleo segue para o aquecedor de produção, onde trocadores de calor elevam a temperatura do petróleo com objetivo de prepara-lo para entrar no separador de produção ou separador de primeiro estágio. Este vaso possui diversos mecanismos para separar a mistura em três fases individuais sendo estas a água, o óleo e o gás.

iv. O óleo segue para o tratador de óleo, com objetivo de enquadrar o teor de água, sedimentos e salinidade. O óleo que sai deste equipamento é resfriado e segue para o separador atmosférico, recuperando-se os gases separados e maximizando a produção do gás. O óleo então segue para os tanques de carga do navio mantendo a estabilidade da embarcação. Por fim, realiza-se o *offloading*, que consiste na descarga do óleo acumulado nos tanques de carga, por meio de bombas, para um navio aliviador.

v. O gás passa por vasos chamados de *Safety*, onde ocorre o processo de separação do líquido carregado com o gás. Após a separação do líquido, este é enviado para os compressores de primeiro estágio. Então, o gás é resfriado e enviado para o segundo e terceiro estágios de compressão e direcionado para a torre de desidratação de gás ou torre de TEG (Trietilenoglicol). Por fim, o gás desidratado é enviado para o terceiro e último estágio de compressão de gás.

A água oleosa proveniente do separador trifásico passa por uma bateria de hidrociclones para remoção de parte do óleo carregado com a água. Após esta bateria, a água passa pelo polimento final no flotador, podendo assim, ser descartada.

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma de processo simplificado típico de algumas unidades que operam em alto mar.

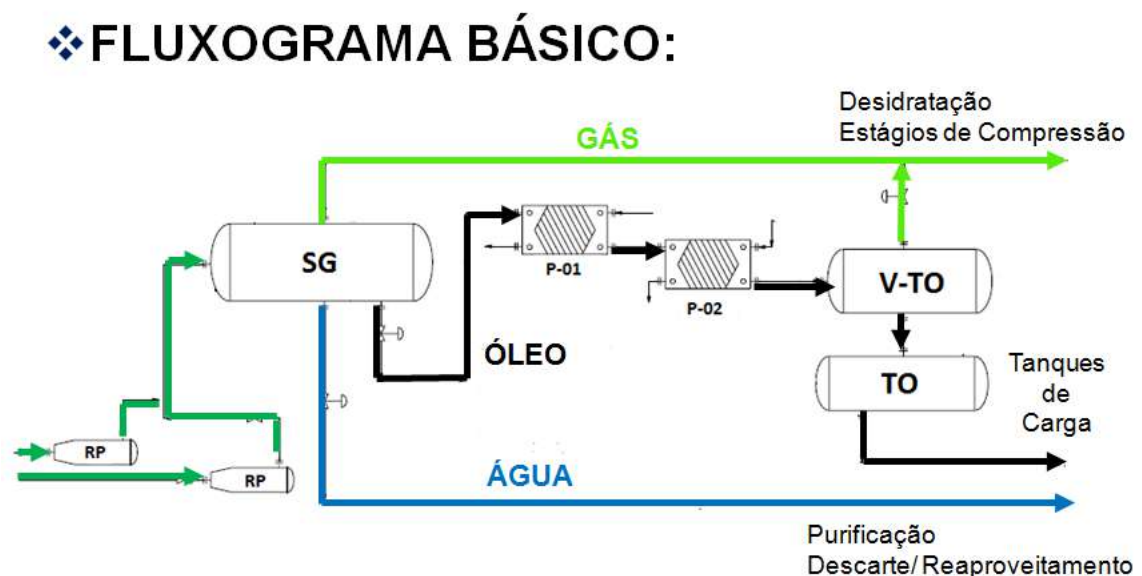


Figura 2.1 – Fluxograma típico de unidades de processamento de petróleo

2.2 Vazamentos

2.2.1 Modelos de Fonte

Acidentes em unidades de processamento químico frequentemente ocorrem por liberações de materiais tóxicos, inflamáveis e explosivos (Crowl e Louvar, 2002). A liberação pode ocorrer em vasos, equipamentos como trocadores de calor, compressores, tubulações de processo, válvulas, flanges e outros. A quantidade máxima de escape depende do inventário contido no reservatório ou corrente e do isolamento proposto.

A liberação do fluido pode ocorrer na fase gasosa, vapor, líquida ou uma mistura bifásica como a líquido-vapor. Um compartimento contendo um líquido pressurizado normalmente irá liberar líquido se a abertura estiver abaixo do nível deste fluido. Para uma dada diferença de pressão, a massa liberada é usualmente maior para líquidos e misturas líquido-vapor do que para gases e vapores (Lees, 1996).

Para representar o processo de liberação desse material são utilizados modelos de fonte. Tais modelos fornecem informações úteis para se determinar as consequências de um acidente. Por meio desses modelos, determinam-se estados físicos, quantidade de material liberado, taxas de liberação, e assim, descrevem o comportamento do material transportado e dispersado no ambiente. Os modelos convertem resultados específicos em efeitos danosos às pessoas, estruturas e ambiente.

A partir dos modelos de fonte, específicos para as inúmeras partes que descrevem a planta de processo, os resultados são frequentemente estimados pela caracterização inadequada dos processos ou a não compreensão dos mesmos. Sendo assim, os parâmetros devem ser maximizados para taxas de liberação e quantidade liberada, garantindo a segurança da unidade.

Mecanismos de liberação podem ser classificados em grandes ou pequenas liberações. Na liberação de grandes proporções, desenvolve-se uma abertura de grandes dimensões em um equipamento na unidade de processo, liberando uma quantidade substancial de material em um período de tempo muito curto. Na liberação por orifício, o material sai a uma taxa suficientemente baixa de modo que as condições a montante, isto é, no interior do equipamento, não são imediatamente afetadas, sendo a hipótese de pressão constante a montante de emprego comum (Gomes, 2012).

Existem diversos modelos de fonte que representam as liberações por orifício, de acordo com o estado físico do material e suas condições de armazenamento ou

manuseio. No presente trabalho, abordam-se, portanto, aos vazamentos de gás/vapor nesses orifícios.

2.2.2 Modelos de Dispersão Atmosférica

Durante o acidente, equipamentos de processo podem liberar materiais rapidamente e em quantidades suficientes para formação de perigosas nuvens que atinjam tanto o interior da unidade quanto comunidades localizadas nas proximidades.

A seriedade dos acidentes apenas enfatiza a importância do planejamento de emergência e do *layout* da unidade para minimizar a ocorrência e as consequências dos vazamentos. Os modelos de dispersão são amplamente utilizados na estimativa dos efeitos da liberação inflamável no ambiente, levando assim, a possibilidade de prevenir ou reduzir os impactos gerados em caso de ocorrência.

A dispersão de um material sendo emitido de um vazamento em uma planta é determinada pelo seu momento e pela gravidade. Se as forças de momento predominam, o fluido forma um jato, enquanto que se as forças gravitacionais predominam, forma-se uma pluma. No entanto, se a dispersão diminuir de intensidade, a turbulência atmosférica passa a ser o fator predominante (Lees, 1996).

Depois do vazamento, o material liberado é carregado pela ação do vento caracterizando na forma de pluma ou nuvem. A máxima concentração do material ocorre no ponto de liberação, pois os efeitos turbulentos de mistura e dissipativos da substância com o ar tendem a minimizar a concentração do mesmo (Crowl e Louvar, 2002).

Ressaltado por Fleck (2008), um grande número de parâmetros afetam os efeitos de dispersão atmosférica de uma substância, podendo influenciar na detecção dos gases, como:

- Velocidade do vento;
- Estabilidade atmosférica;
- Condições do solo, obstáculos e áreas abertas;
- Altura do vazamento acima do nível do solo;
- Densidade do material;
- Quantidade de Movimento do material inicialmente disperso.

À medida que a velocidade do vento cresce, a pluma se torna mais larga e comprida. A substância é carregada com maior velocidade, mas é também mais facilmente diluída pela grande quantidade de ar.

A estabilidade atmosférica está relacionada com a mistura vertical do ar. Durante o dia a temperatura do ar diminui rapidamente com o aumento da altura, favorecendo a difusão vertical. À noite a temperatura cai menos, resultando em menor efeito deste fenômeno.

As condições do solo afetam o mecanismo de mistura na superfície, a camada limite e o perfil do vento em função da altura. Obstáculos aumentam a mistura enquanto áreas abertas a diminuem.

A altura do vazamento afeta significativamente a concentração no nível do solo. Com o aumento da altura do vazamento, as concentrações ao nível do solo são reduzidas desde que a pluma tenha uma grande dispersão vertical.

A densidade e a quantidade de movimento do material disperso alteram a “altura efetiva” do vazamento. Após a dissipação da quantidade de movimento inicial do jato, a mistura turbulenta torna-se o efeito dominante na pluma, sendo que em liberações de gases mais densos que o ar, a nuvem tende a escoar para baixo.

2.2.2.1 Modelos de Pluma, Nuvem e Jato

O modelo de pluma descreve a forma do perfil de concentração em estado-estacionário do material disperso de um vazamento contínuo. Para este modelo, um exemplo seria a dispersão contínua de gases a partir de uma chaminé. Uma pluma em estado-estacionário é formada a partir dos gases liberados na chaminé. Sob condições turbulentas a pluma é cônica e aparentemente diverge de uma fonte num ponto equivalente, cuja posição depende do ponto de transição entre escoamento laminar e turbulento. A velocidade média temporal e o perfil de concentração temporal são similares e aproximadamente gaussianos. A Figura 2.2 apresenta o modelo de pluma em vazamento contínuo.

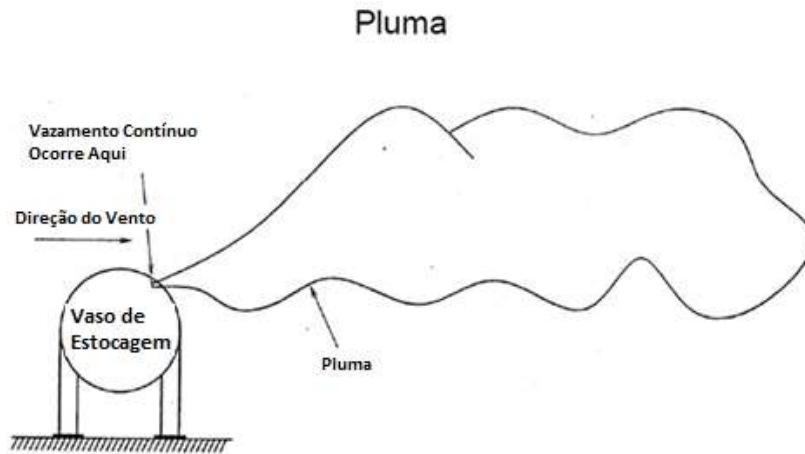


Figura 2.2– Pluma formada por um vazamento contínuo (Adaptado de Crowl e Louvar, 2002)

O modelo de nuvem descreve a forma do perfil de concentração em função do tempo do material de um vazamento único de uma quantidade fixa do material. Um exemplo do modelo de nuvem seria um vazamento repentino de uma quantidade fixa de material devido à ruptura de um vaso de estocagem. Uma grande nuvem de vapor é formada e se afasta do ponto de ruptura.

O modelo de nuvem pode ser usado para descrever uma pluma, ou seja, a pluma pode ser descrita como vazamento de contínuas liberações em nuvem. Se a informação de uma pluma em estado estacionário é tudo de que se necessita, o modelo de pluma é recomendado uma vez que é mais facilmente aplicado. Para estudos envolvendo plumas dinâmicas (por exemplo, o efeito em uma pluma com a mudança da direção do vento), o modelo de nuvem deve ser usado. A Figura 2.3 apresenta o modelo de nuvem em vazamento instantâneo.

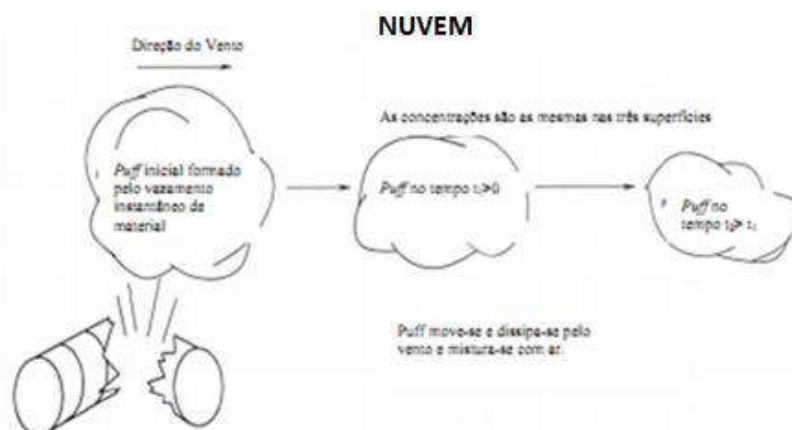


Figura 2.3 – Modelo de Nuvem formado por um vazamento instantâneo(adaptado de Crowl e Louvar, 2002)

Empiricamente o jato é cônico e aparentemente diverge de um ponto numa fonte virtual a montante do orifício. A diluição ocorre por mistura turbulenta, a velocidade média temporal e os perfis de concentração são similares após uma distância equivalente a 10 vezes o diâmetro do orifício e são aproximadamente gaussianos, sendo o perfil de concentração mais largo que o perfil de velocidade. O jato arrasta ar e conserva a sua quantidade de movimento, tal que o fluxo de quantidade de movimento em qualquer plano normal ao eixo é constante como apresentado na Figura 2.4 (Lees, 1996).

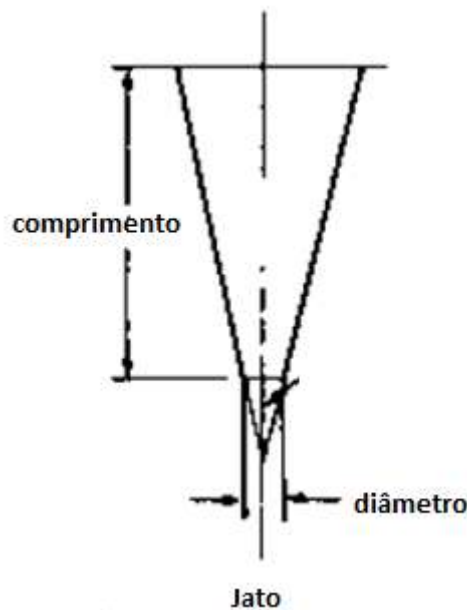


Figura 2.4 – Vazamento em jato (Adaptado de Lees, 1996)

Se a quantidade de movimento de um material sendo emitido de um orifício é alta, a dispersão, na fase inicial, é devido a esta e a emissão é descrita como um jato (*momentum jet*). Se a quantidade de movimento é baixa, seja pelo fato desta ser baixa inicialmente ou por ela ter declinado, a dispersão é devida à gravidade e à turbulência atmosférica, e a emissão é descrita como uma pluma gravitacional (*buoyant plume*). Ambos os tipos de emissão são algumas vezes descritos como plumas, o jato sendo uma pluma forçada.

O escoamento em jato pode ser tratado com comportamento subsônico, sônico e supersônico. Na Figura 2.5, a região sônica, número de Mach = 1, representa a condição crítica (*choked*) do escoamento, no qual, o gás escoava com a velocidade do som. A partir da região sônica, o gás atinge um regime supersônico, número de Mach > 1, onde ocorrem ondas de choque que descrevem uma transição entre o regime sônico e subsônico ou região subexpandida. A região subsônica, número de

Mach < 1 , representa a condição onde o escoamento já está totalmente desenvolvido, podendo ser considerado como escoamento incompressível.

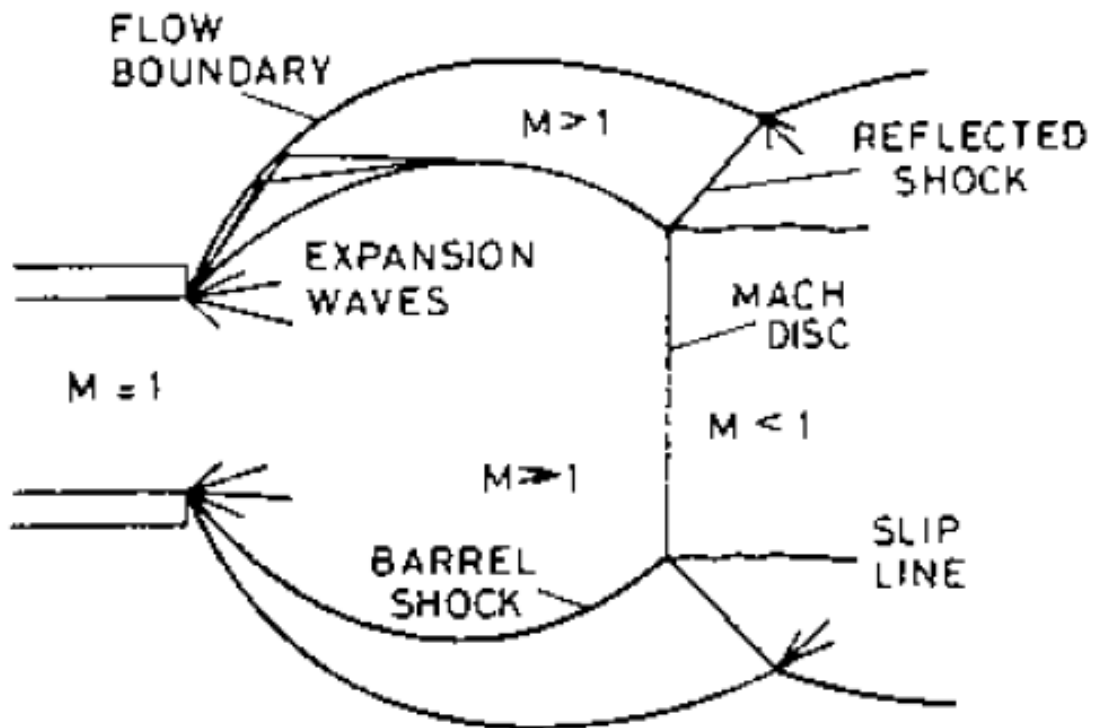


Figura 2.5 – Região subexpandida de momento na liberação em jato (Lees, 1996)

Em simulações utilizando ferramenta CFD, jatos livres providos de tubulações em alta pressão possuem melhor representatividade quando simulados utilizando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG. Este modelo consegue resolver detalhadamente a estrutura do escoamento (*Expansion Waves, Barrel Shock, Reflected Shock e Slip Line*). Em comparação com outros modelos, este apresenta resultados mais próximos quando comparados com a análise experimental (Novembre, 2006). A Figura 2.6 apresenta a comparação de jatos simulados utilizando os modelos de turbulência $k-\varepsilon$, $k-\varepsilon$ RNG, $k-\omega$ SST e o jato experimental.

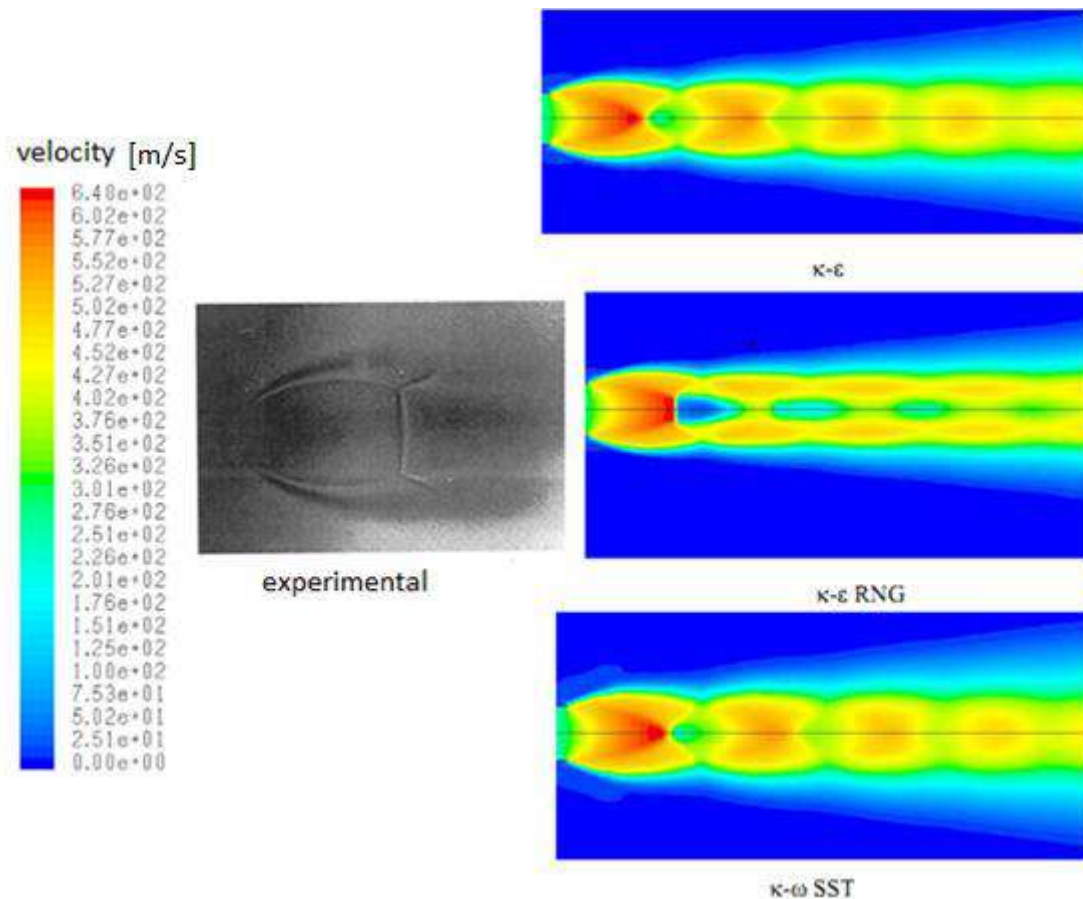


Figura 2.6 –Jato supersônico simulado com diferentes modelos de turbulência (Novembre, 2006)

2.2.2.2 Utilização do Modelo

Na avaliação dos efeitos devido à dispersão atmosférica, um modelo adequado deve ser selecionado, de acordo com as circunstâncias desta dispersão. Quando as consequências da dispersão atmosférica estão numa faixa da ordem de alguns quilômetros, a área de cálculo (domínio) é suficientemente grande quando comparada aos tamanhos das obstruções. Para estes casos o modelo gaussiano pode ser usado.

Por outro lado, ao direcionar as consequências da dispersão para uma escala relativamente pequena, como unidades de processo de plantas químicas e petroquímicas ou plataformas de petróleo, por exemplo, devem-se considerar, obrigatoriamente, as perturbações nos campos de velocidade de vento devido às obstruções, tais como, prédios, equipamentos, tanques de armazenamento, etc. Nestes casos, as avaliações devem ser conduzidas utilizando modelos tridimensionais, através de CFD.

2.2.3 Escoamento Compressível

Em escoamentos compressíveis, a massa específica do fluido varia com a pressão e temperatura e faz-se necessário levar em consideração as transformações termodinâmicas que ocorrem ao longo do escoamento.

Para escoamentos de líquidos, a dependência da pressão é pequena e esses escoamentos podem ser tratados como incompressíveis. Entretanto, para gases, a influência da pressão e temperatura sobre a massa específica é significativa.

A compressibilidade torna-se importante em escoamentos de alta velocidade ou com grandes mudanças de temperatura. Com a variação da velocidade, a pressão sofre variações significativas que são acompanhadas de alterações na massa específica e temperatura.

Em simulações de dispersões gasosas em CFD, adota-se que se o número de Mach é inferior a 0,3 em todos os pontos da região a ser simulada, então o escoamento pode ser assumido como incompressível. Porém, se o escoamento é sônico ou supersônico em algumas regiões, como pode ocorrer em vazamentos de gás a altas pressões, ele deve ser tratado como compressível, ou suposições simplificando este tipo de escoamento podem ser necessárias (Fleck, 2008).

Uma vez que duas variáveis adicionais são necessárias para o tratamento de escoamentos compressíveis, precisa-se também de duas equações adicionais. Tanto a equação de energia quanto a equação de estado (alguns dos gases de interesse de engenharia podem ser representados pela equação de estado do gás ideal) devem ser aplicadas para resolver os problemas de escoamentos compressíveis, o que dificulta, por exemplo, a solução em simulações numéricas com essas características.

2.2.4 Escoamentos Gasosos através de Orifício

Para escoamentos de líquidos, a variação de energia cinética é frequentemente negligenciada e as propriedades físicas, particularmente a densidade, são consideradas constantes. Para escoamentos de gases e vapores, essa hipótese somente é válida para pequenas variações da pressão ($P_1/P_2 < 2$) e baixas velocidades (menor do que 0,3 vezes a velocidade do som no gás). Desta forma, na imensa maioria dos casos em unidades de processo, a energia contida no gás ou vapor como resultado da pressão é convertida em energia cinética conforme os mesmos escapam e se expandem através do orifício. A massa específica, a pressão e a temperatura mudam enquanto o gás ou o vapor passa pela ruptura, caracterizando-se como um escoamento compressível (Crowl e Louvar, 2002).

As descargas de gás ou vapor em orifícios são classificadas como sendo liberações de expansão livre. A Equação 2.1 descreve as varias formas de energia associadas ao escoamento de fluidos. Esta equação representa o balanço de energia mecânica do escoamento compressível de gases e vapores.

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta \left(\frac{u^2}{2\alpha g_c} \right) + \frac{g}{g_c} \Delta Z + F = - \frac{W_s}{q_s} \quad (2.1)$$

onde:

P = Pressão	[força/área];
p = Densidade do fluido	[massa/volume];
u = Velocidade instantânea média do fluido	[comprimento/tempo];
g _c = Constante gravitacional	[comprimento*massa/força*tempo ²];
α = Fator de correção para velocidade	[adimensional];
g = Aceleração da gravidade	[comprimento/tempo ²];
z = Altura	[comprimento];
F = Termo de perda por fricção	[comprimento*força/massa];
W _s = Trabalho de eixo	[força*comprimento];
q _s = Vazão mássica	[massa/tempo].

Neste tipo de liberação a maior parte da energia devido à pressão é convertida em energia cinética sendo a hipótese de comportamento isentrópico (expansão isentrópica) válida.

A vazão mássica para vazamentos de gás ou vapor através de um orifício durante a expansão isentrópica pode ser estimada pela Equação 2.2 (TNO, 2005).

$$q_s = C_d \cdot A_h \cdot \psi \cdot \sqrt{\left(\rho_0 \cdot P_0 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right)} \right)} \quad (kg/s) \quad (2.2)$$

onde:

q_s = Vazão mássica de gás	[kg/s];
C_d = Coeficiente de descarga	[-];
A_h = Área transversal do orifício	[m ²];
ψ = Coeficiente de escoamento	[-];
ρ_0 = Densidade do gás a montante do vazamento	[kg/m ³];
P_0 = Pressão do gás a montante do vazamento	[N/m ²];
γ = Relação entre os calores específicos à pressão e volume constantes (Cp/Cv)	[-].

O valor de ψ^2 , coeficiente de escoamento, é definido pelas razões entre as pressões interna e externa, por uma das duas equações abaixo, Equação 2.4 e 2.6, conforme a relação entre a pressão do gás e a atmosférica (p_a):

No caso de escoamento subcrítico:

$$\frac{P_0}{P_a} < \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.3)$$

então:

$$\psi^2 = \frac{2}{\gamma - 1} \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \cdot \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \cdot \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right) \quad (2.4)$$

No caso de escoamento crítico:

$$\frac{P_0}{P_a} \geq \left(\frac{\gamma + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.5)$$

então:

$$\psi^2 = 1 \quad (2.6)$$

Para a maioria dos gases, a relação Cp/Cv, ou coeficiente isentrópico, varia de $1,1 < \gamma < 1,4$, e o escoamento será crítico quando $P_0/P_a > 1,9$.

A pressão crítica, ou de *choked*, P_c ou P_{choked} , é a máxima pressão que resulta na máxima vazão através do orifício. Para pressões a jusante, menores que P_{choked} , as seguintes afirmações são válidas:

- A velocidade do fluido no ponto do vazamento é a velocidade do som nas condições locais;

- A velocidade e a vazão mássica não podem aumentar mais, reduzindo-se a pressão a jusante. Elas são independentes das condições a jusante.

Este tipo de escoamento é denominado, como já mencionado, crítico, sônico ou estagnado, sendo ilustrado pela Figura 2.7 (Crowl e Louvar, 2002).

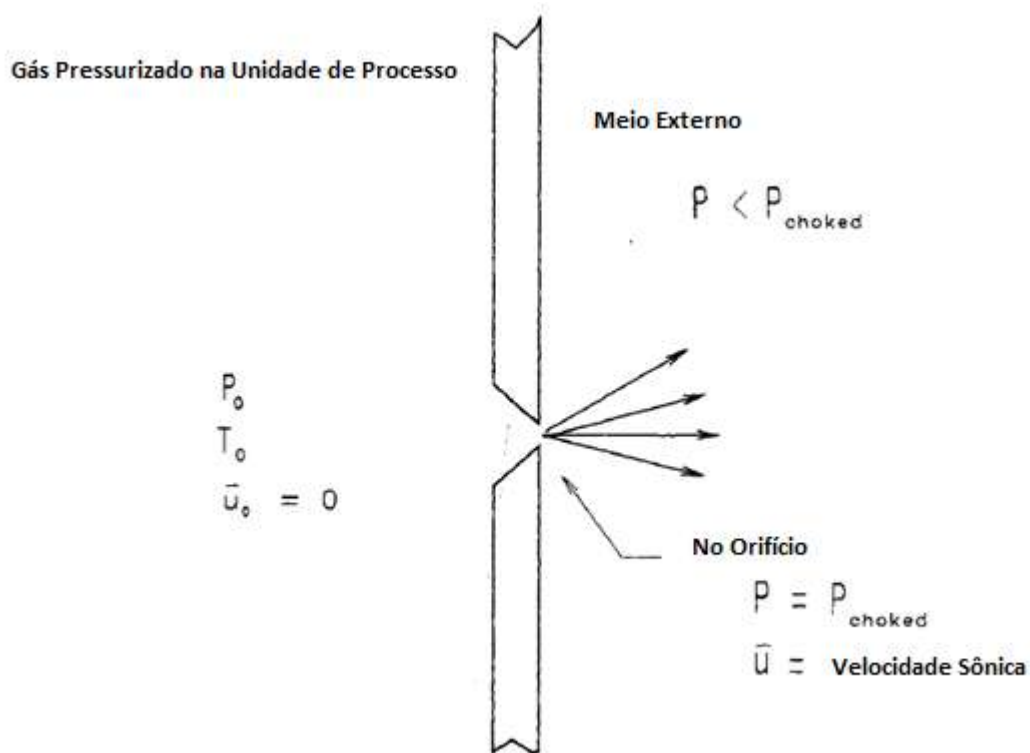


Figura 2.7– Escoamento crítico de gás através de orifício (Crowl e Louvar, 2002)

O escoamento pode ser considerado crítico quando $P_0 \gg P_a$, sendo esse caso o mais comum em unidades de processo.

O coeficiente de descarga, C_d , é determinado por dois fatores: o coeficiente de fricção (C_f) e o coeficiente de contração (C_c), de acordo com a seguinte relação (TNO, 2005):

$$C_d = C_f \cdot C_c \quad (2.7)$$

Para as condições de operação específicas da plataforma em estudo, com pressões acima de 150 kgf/cm² na seção de compressão, e gases cujo comportamento está sendo considerado ideal, tem-se uma larga diferença de pressão entre o equipamento e o ambiente, as condições no vazamento se tornam críticas e o

escoamento passa a ser supersônico (420 m/s para o metano). Adotando-se o valor de 0,62 para o coeficiente de descarga, Reynolds > 30.000 (Beek, 1974 Apud TNO, 2005), a Equação 2.2 pode ser reescrita abaixo.

$$\frac{q_s}{A_k} = 0,62 \cdot \left[p_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{0,5} \quad (2.8)$$

Nota-se que nestas equações o tipo de escoamento é uma função da pressão no interior da fonte do vazamento, que é considerada constante. Porém, sabe-se que durante a liberação gasosa a pressão no interior do equipamento cai, havendo transição e mudança do regime de escoamento, sendo assim conveniente efetuar simulações dinâmicas.

Para escoamentos críticos, a velocidade do gás na abertura da descarga é igual à velocidade do som no gás, a qual pode ser calculada pela Equação 2.9.

$$V_s = \sqrt{\gamma \frac{RT_0}{M}} \quad (2.9)$$

Para gás ideal, a Equação 2.10 também pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_s = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (2.10)$$

2.2.5 Diâmetro do Orifício de Vazamento

A definição do diâmetro do orifício do vazamento deve ser adequada para representar uma situação real na planta de processo. Aspectos como vazão e continuidade do vazamento devem ser considerados na simulação computacional. A escolha da taxa de liberação em geral é arbitrária, mas os resultados da análise de risco podem ser sensíveis a ela (Fleck, 2008).

Neste tipo de abordagem, interessa detectar vazamentos com alto potencial de risco, possibilitando a formação de incêndios ou nuvens explosivas que poderão

movimentar-se pela planta, com fluxo pequeno, porém, constante do gás. Este tipo de vazamento é limitado pela vazão mássica de gás que escoar pelo equipamento, pois não são esperados vazamentos superiores a esta vazão qualquer que fosse a área do orifício de vazamento.

Para vazamentos provocados por rupturas ou falhas nas linhas de processo, a liberação é considerada como instantânea, ocorrendo em um espaço curto de tempo. Nestes eventos, o inventário liberado, bem como as nuvens formadas, seriam de maiores dimensões e, desta forma, mais facilmente percebidas pelos operadores, considerando os sentidos humanos de visão, audição e olfato, por controladores de processo e pela rede de detectores disponível.

Vazamentos com pequenas vazões são mais críticos sob o ponto de vista dos detectores, pois estes dependerão somente do sistema de detecção para serem percebidos. Vazões menores podem passar despercebidas, porém, apresentam perigos à planta de processo.

Não há, até o momento, um critério universalmente aceito para seleção do diâmetro de vazamento. Gomes (2012) e Fleck (2008) observaram em seus estudos que 84% dos vazamentos, em tanques atmosféricos ou tanques pressurizados, ocorrem em diâmetros de até 10 mm e que 80% dos vazamentos em compressores tinham o mesmo diâmetro no orifício de vazamento. Nos dois estudos foi adotado o diâmetro de 10 mm para realização das simulações computacionais.

2.3 Detecção de Gases

O Sistema de Detecção de Gases é normalmente composto por dois subsistemas: o de detecção de Gás Combustível (DGC) e o de Gás Tóxico (DGT), especialmente o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Ambos têm por objetivo indicar a presença de gases acima de determinadas concentrações, de forma a permitir a adoção dos procedimentos de segurança adequados, garantindo assim a preservação da vida humana e minimizando possíveis danos patrimoniais.

De maneira geral, os sistemas de detecção de gases são utilizados para garantir a segurança das pessoas, proteção do patrimônio da empresa, minimização dos impactos à comunidade atendendo todos os requisitos legais vigentes.

Os projetos de sistemas de detecção são normalmente baseados em normas técnicas, as quais, entretanto, não fornecem condições de prever o número ótimo de detectores. Estas normas, em sua grande maioria, indicam que estes sensores deverão localizar-se próximos a pontos de possíveis vazamentos, sem indicar a que distância devem ser posicionados, a quantidade apropriada de detectores, confiabilidade

desejada para o detector ou para o sistema, e ainda, a influência de variáveis externas. O projeto fica, assim, dependente exclusivamente da sensibilidade do projetista, o que poderá conduzir a sistemas super ou subdimensionados.

Das limitações acima citadas pode, portanto, resultar em aumento de custo, quer seja pelo excesso de detectores ou pelos danos gerados pela falta destes. Torna-se assim necessária a substituição destes critérios genéricos por análise quantitativa, mais precisa e baseada em critérios de engenharia. Essas análises acarretam alterações sensíveis nos procedimentos usuais até então recomendados e adotados.

Por melhor que seja conduzido um estudo de dispersão de gases e posicionamento de detectores, é essencial viabilizar um bom projeto de *layout* da planta, bem como as manutenções preventivas dos equipamentos. A existência de muitos fatores que influenciam o escoamento desses gases gera a remota possibilidade de que vazamentos possam não ser detectados. Porém a correta seleção, projeto, e manutenção desses equipamentos podem reduzir a probabilidade da ocorrência de vazamentos.

2.3.1 Detecção do Vazamento

Os detectores de gases são dispositivos permanentemente localizados em uma área ou em partes de equipamentos que estejam sujeitos a vazamentos e, estes devem alertar e fornecer um aviso adiantado mediante a captação do incidente. Outros tipos de instrumentos possuem a capacidade de detectar vazamentos e advertirem os operadores das áreas onde os materiais perigosos possam estar concentrados.

Os tipos de detectores estão divididos em duas categorias gerais, portáteis e fixos. Os detectores fixos permanecem localizados em pontos específicos monitorando o ambiente e alertando sobre vazamentos de gases tóxicos ou inflamáveis. Detectores portáteis são utilizados em casos emergenciais, na necessidade da execução de trabalhos localizados em locais com possível presença ou formação de gás inflamável ou tóxico, oriundos da própria tarefa ou não, e também para entrada de espaços confinados.

Dentre os detectores fixos, podemos ter os do tipo pontual (*point*), que medem a concentração de gás no ponto de amostragem do próprio instrumento ou do tipo visada (*open-path*), que consiste de um emissor de infravermelho e um receptor. Quando sensibilizado por uma nuvem de gás, os raios que chegam ao receptor apresentam distorções em relação à condição normal, possibilitando o cálculo da concentração do gás.

Os detectores de visada, pelas suas próprias características, apresentam a vantagem de reduzir o número de detectores que seriam necessários para proteção de determinada área, podendo ficar espaçados a uma distância de até 150 metros e cobrindo uma região muito maior do que os pontuais. Por outro lado, não podem existir obstruções físicas no caminho entre os emissores e receptores, e eles não devem ser instalados em estruturas sujeitas à vibração, pois os mesmos precisam estar perfeitamente alinhados.

Existem diferentes tipos de sensores usados na detecção de gás. A escolha do sensor dependerá do gás a ser detectado, da faixa de concentração esperada, se o detector é pontual ou de visada, e se há presença de outros gases que podem afetar as leituras ou danificar o sensor (Fleck, 2008).

2.3.2 Limites de Inflamabilidade e Níveis de Ação

Para determinar os níveis requeridos para sistemas de detecção fixos de gás, devem ser levados em consideração quaisquer recomendações e padrões industriais, o limite inferior de inflamabilidade do gás ou do vapor, o tamanho do vazamento potencial, o tempo para atingir uma situação perigosa, se a área está ocupada, o tempo requerido para a resposta do alarme, as ações a serem tomadas seguindo o alarme e a toxicidade do gás ou vapor (HSE, 2004).

Misturas de ar e gás combustível sofrerão ignição ou queima se estiverem dentro de um limite definido de composição. Uma margem de segurança adotada é acionar dois níveis alarmantes, um nível inferior e outro superior. O nível inferior pode agir como um aviso de um problema potencial que requer investigação. O nível superior pode soar como uma resposta emergencial, evacuando a unidade, desligando ou mesmo os dois.

Os níveis de detecção estão associados aos limites de inflamabilidade da mistura. O limite Inferior de Inflamabilidade (LII) e o Limite Superior de Inflamabilidade (LSI) são expressos em porcentagens em relação ao volume de gás ou vapor no ar. O LII é a menor concentração do combustível no volume total da mistura com o ar, que permite a propagação da chama. Já o LSI é a maior concentração do combustível no volume total da mistura com o ar que permite a propagação da chama.

Um dos princípios que devem banalizar a escolha do nível de ação é a de que este não deve ser em 100% do LII, pois, neste caso, a mistura inflamável já estaria formada, e qualquer fonte de ignição dentro desta nuvem ignitaria a mesma. Os dois níveis de detecção são descritos abaixo (Gomes, 2012).

- Nível de alerta, em 20% do LII, que age como um alerta de um possível problema potencial que requer investigação;

- Nível de alarme ou de gás confirmado, em 60% do LII, onde a presença de gás é dada como certa e medidas de mitigação, como evacuação, corte de inventário, entre outras, devem ser tomadas.

Porém, em unidades *offshore* costuma-se adotar os valores de 20% do LII para o nível de alerta e 50% do LII para o nível de gás confirmado (Fleck, 2008).

Para gases tóxicos também são aplicáveis os níveis de ação acima descritos, porém, os valores variam de acordo com a toxicidade de cada gás. Para o sulfeto de hidrogênio (H₂S), por exemplo, adotam-se 8 ppm e 20 ppm, para os níveis de alerta e de gás confirmado, respectivamente.

Fica fácil perceber que reduzindo os valores dos níveis de ação, menores seriam os tempos de detecção e mais rápidas poderiam ser as ações de mitigação. No entanto, esta redução levaria a muitos alarmes “espúrios”, pois praticamente qualquer emissão, um alívio de uma válvula de segurança (PSV), por exemplo, seria considerada como vazamento, levando a mobilização desnecessária da equipe organizacional de resposta a emergências.

Em unidades *offshore* da Petrobras, como o sistema de detecção é intertravado aos sistemas de parada de emergência da plataforma, ou seja, havendo gás confirmado na área são desencadeadas, automaticamente, diversas ações objetivando uma parada segura do processo e demais equipamentos da unidade, existem lógicas de votação que têm por objetivo evitar uma parada de emergência de maneira desnecessária.

2.3.3 Localização dos Detectores

O posicionamento dos detectores em uma planta de processo pode ter como referência os resultados obtidos na análise de dispersão utilizando ferramenta CFD. A obtenção das nuvens com a concentração dos gases possibilita definir a localização por um sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z). A localização e a quantidade de detectores definem a proteção de determinada área e algumas estratégias para posicionar estes dispositivos são abordadas a seguir:

2.3.3.1 *Φvyind Strømme Jan Roar Bakke (1999)*

Strøm e Bakke (1999) descreveram uma metodologia para localização de detectores utilizando simulações em CFD na geração de dados de dispersões gasosas.

No estudo, foi utilizada uma geometria de 20m X 40m X 14,5m e criada uma matriz de 24 pontos de detecção espaçados de 4m X 4m, além de 3 (três) alturas distintas da área da cabeça do poço da plataforma, totalizando 72 pontos de detecção. Presume-se que os pontos de detecção de cada malha de detectores estejam na mesma altura, pois, estas não foram mencionadas.

Simulações transientes foram conduzidas variando as condições de vento em baixa, média e alta intensidade. A rosa dos ventos foi dividida em 12 direções distintas e foi utilizada a velocidade média correspondente às condições de vento. Para o vazamento, utilizaram-se 6 direções ortogonais e 3 vazões mássicas diferentes (respectivamente 3,4; 10,3 e 31,3 kg/s), em uma única posição de vazamento no centro do módulo. Assim sendo, foram simuladas 3 condições de vento, 6 direções de vazamento, 3 vazões diferentes e 1 ponto de vazamento, totalizando 54 simulações.

Foi efetuada uma classificação para cada um dos detectores, ou seja, geraram-se eficiências individuais dos pontos de detecção, baseadas na razão da frequência de vazamento pelo tempo de resposta na detecção, de cada cenário simulado. A frequência de vazamento foi calculada com base nas frequências das condições de ventilação, das vazões de gás e das direções dos vazamentos.

Neste sentido, o melhor detector é aquele que rapidamente detecta o gás, nos cenários de vazamento com maior frequência. O tempo médio de detecção e a percentagem de cenários detectados foram plotados contra o número de detectores, com o intuito de aperfeiçoar a resposta à detecção, bem como a quantidade e localização dos instrumentos de detecção. Os autores mostraram que para o módulo estudado, com apenas 15 detectores foi possível identificar todos os cenários simulados, num tempo de detecção médio em torno de 2 s.

No entanto, os detectores classificados com maiores eficiências tenderam a estar mais próximo dos vazamentos. Assim sendo, os possíveis pontos de vazamento devem ser considerados a partir de estudos de análise de risco em ambientes reais, pois a eficiência dos detectores é influenciada diretamente por esses pontos.

2.3.3.2 Mendes *et al.* (1999)

A metodologia propõe todas as etapas da análise de alocação de detectores em instalações offshore. A definição dos possíveis cenários de vazamento, propriedades físicas dos gases, seleção dos pontos de vazamento, condições de operação dos equipamentos e modelagem computacional foram abordados no artigo. A partir de todas as análises de dispersão, os detectores são posicionados de acordo com a sobreposição das nuvens geradas e a eliminação de pontos de detecção inapropriados

para o layout da unidade. São avaliadas a exclusão dos detectores redundantes e a necessidade de introdução de detectores adicionais.

Inicialmente, foram localizados 104 detectores nas áreas abertas dos 3 decks da unidade e 69 detectores para o *deck* principal utilizando modelo de jato livre. Foram consideradas correntes com 75% de metano e, a partir dessa consideração, foi adotada a alocação dos detectores em uma elevação média de 6,5 m do ponto de vazamento. Por se tratar de um gás mais leve que o ar, o gás disperso tenderia a elevar-se durante o escoamento.

Quando comparados com modelos utilizando CFD, as análises apresentaram redução no número de detectores. Para as mesmas áreas, o número de detectores alocados passou de 104 para 44 e de 69 para 25. Essa redução se mostrou significativa, pois, tomando como base a redução de 60 detectores, o custo para aquisição e instalação dos mesmos tem um decréscimo de US\$ 1.260.000. Além da redução do número total, foi avaliado que a altura de alocação passou de 6,5 m para 3,5 m em média.

Ao final, foi concluído que as maiores concentrações ocorrem próximas ao ponto de vazamento, a densidade dos obstáculos inibe o desenvolvimento do jato livre, gerando pontos de acúmulo de gás e a detecção dos menores vazamentos indica a detecção dos maiores vazamentos desde que a nuvem gerada pelo maior englobe a nuvem gerada pelo menor vazamento.

2.3.3.3 Kelsey *et al.* (2002)

Dados de medidas experimentais de dispersão de gás natural, em ambiente com ventilação natural, liberados à alta pressão, num módulo de processo *offshore* medindo 28m x 12m x 6m foram utilizados para avaliar a eficiência da orientação de se alocar detectores de gás em uma malha de detectores espaçada de 5 x 5 m.

A rede virtual de detecção de gás, baseada em guias e práticas industriais normalmente utilizadas e aceitas pelas operadoras (HSE, 1993 Apud Fleck, 2008), incorporou níveis de detecção e ação, bem como características do tempo de resposta dos instrumentos. Justifica-se a rede de 5 m x 5 m, pois devem ser identificados vazamentos antes que a nuvem de gás inflamável (metano) atinja 6 m de diâmetro, tamanho suficiente para causar danos ao sofrer ignição.

Esta orientação de espaçamento é uma prática industrial normalmente aceita, e é derivada de estudos que mostram que para uma nuvem de gás inflamável (metano) de 6 m de diâmetro, em ambientes não confinados, a velocidade de chama não excede 100 m/s e a sobrepessão não é superior a 0,15 bar. Esses valores são considerados

abaixo daqueles que poderiam causar danos quando esta nuvem sofre ignição. Porém, em locais com alto grau de confinamento, a velocidade de chama pode exceder 125 m/s para uma nuvem de 6 m, requerendo uma redução no espaçamento dos detectores (HSE, 2002).

Para uma primeira análise, foram propostos dois níveis de detectores pontuais, um nível a 3,9 metros de altura (abaixo do mezanino) e outro nível a 6,9 metros de altura (abaixo do teto), numa malha espaçada de 5 metros, originando, assim, 24 detectores pontuais, 12 para cada nível. Como forma de avaliar a eficácia de diferentes tipos de detectores, foram usados 24 detectores pontuais catalíticos e 24 detectores pontuais de infravermelho (IR), além de 4 detectores de visada (*open-path*), estes últimos não respeitando o espaçamento de 5 metros.

Apesar de não ser informado pelos autores, supõe-se que a escolha das alturas dos níveis se deu pelo fato do gás natural ser menos denso que o ar e num eventual vazamento ele terá um movimento ascendente.

Um total de 64 vazamentos no estado estacionário foram analisados em 3 pontos distintos no módulo, com o auxílio de programação computacional. Para todos os vazamentos os autores estimaram as concentrações de gás lidas pelos detectores para diferentes tempos, baseados nos valores típicos dos tempos de resposta de cada tipo de sensor, podendo comparar assim a efetividade dos mesmos.

O estudo mostrou que o detector pontual de IR detectou, no nível de alerta, todos os vazamentos antes da formação de uma nuvem explosiva de 6 m de diâmetro. A mesma rede de detectores catalíticos, assim como a rede de detectores de visada, não obtiveram o mesmo sucesso, 93% e 88%, respectivamente. Já para o nível de alarme (gás confirmado), todas as 3 redes não conseguiram detectar todos os casos, 83% para IR, 60% para catalítico e 68% para visada.

O efeito na mudança da malha, ou seja, do espaçamento entre os detectores e, conseqüentemente, do número de detectores, também foi avaliada pelos autores. Dobrando a distância, isto é, 10 m x 10 m, resultou em uma malha com 3 detectores (um oitavo do número padrão) e um aumento significativo no tempo de detecção. Por outro lado, reduzindo a distância pela metade, 2,5 m x 2,5 m, elevou-se para 192 o número de detectores e uma pequena melhora no tempo de detecção, mostrando que a malha padrão, 5 m x 5 m, se aproxima do número ótimo e do espaçamento entre detectores.

Os autores, no entanto, não otimizaram a quantidade de pontos de detecção da malha inicialmente proposta de detectores, equidistantes de 5 m, e também não discutiram a criticidade da direção da liberação dos cenários simulados, ou seja, a localização do vazamento no equipamento (Fleck, 2008).

2.3.3.4 Fleck (2008)

Em seus estudos, Fleck avaliou a posição de detectores baseado nas afirmações de Kelsey *et al.* (2002) de que, em ambientes confinados, a velocidade de chama para nuvens inflamáveis de 6 m pode chegar a 125 m/s, alcançando valores danosos para a unidade caso as nuvens sofressem ignição. O estudo utilizou ferramenta CFD para geração das nuvens providas da dispersão dos gases inflamáveis e a partir dessas, foram alocados detectores equidistantes de 5 m x 5m para detecção de nuvens com tamanhos inferiores a 6 m.

No estudo, o domínio computacional possui 109 m de comprimento por 60,5 m de largura e 20 m de altura, definindo-se 231 possíveis pontos de detecção. Com a alocação inicial dos detectores e descarte dos dispositivos que não capturassem nenhum vazamento e que detectassem nuvens redundantes, foi proposta uma otimização avaliando-se um gráfico do número de pontos de detecção melhor classificados pela porcentagem de cenários detectados.

A partir dos pontos otimizados, foi proposta a altura dos dispositivos na malha de detectores. Linhas perpendiculares foram alinhadas com o piso nos pontos pré-determinados avaliando-se a concentração ao longo destas. Dentre as alturas dos cenários detectados, foram escolhidos os pontos na concentração de detecção com menor altura para representar a altura de detecção no nível de alarme. Os menores pontos são selecionados pelo fato da fração volumétrica de gás (gases leves) diminuir com o acréscimo da altura, em relação ao piso da plataforma, garantindo-se assim, que todos os pontos da rede de detecção identificassem os cenários de liberação de gás, cujas alturas relativas ao nível de alarme foram superiores as suas respectivas alturas verdadeiras.

Com a obtenção dos resultados, concluiu-se que as menores vazões mássicas tiveram um índice baixo de identificação das nuvens pela rede de detecção proposta e que foi possível determinar o sistema ótimo de detecção de gases da seção de compressão da plataforma, composto por 5 pontos de detecção, sendo capaz de identificar todos os cenários simulados.

Fleck recomenda a utilização de um modelo geométrico mais representativo para plataformas *offshore*, tornando o estudo mais real. Além disso, a utilização de uma função objetivo tornaria o processo de alocação de detectores mais rápido e com menor dependência do operador.

2.4 Mecânica dos Fluidos

Na presente seção são apresentados os principais conceitos da mecânica dos fluidos envolvidos no escoamento da dispersão gasosa. Os fundamentos abordados não objetivam fornecer o conceito introdutório da mecânica dos fluidos, e sim apresentar os fenômenos complexos envolvidos no estudo e que demandam uma compreensão mais acurada da modelagem.

2.4.1 Conservação da Massa

Como um sistema é, por definição, uma porção arbitrária de matéria de identidade fixa, ele é constituído da mesma quantidade de matéria em todos os instantes. A conservação de massa exige que a massa do sistema seja constante (Fox, 2006).

A equação da conservação de massa, conhecida como equação da continuidade, é desenvolvida a partir da análise do balanço de massa sobre um elemento fixo interno ao volume de controle diferencial por onde escoar o fluido. O balanço material é dado na Figura 2.8.

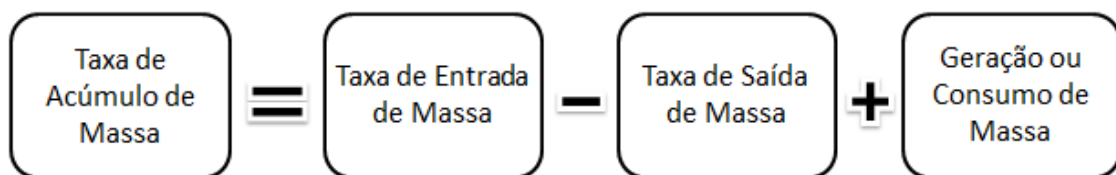


Figura 2.8 – Balanço material no volume de controle

No presente estudo, não serão consideradas reações químicas ou nucleares, logo, não haverá geração ou consumo de massa, portanto, o balanço se resume por meio do termo de acúmulo temporal e os termos convectivos.

A massa dentro do volume de controle, em qualquer instante, é o produto da massa por unidade de volume, ρ , pelo volume, $dx \cdot dy \cdot dz$. Assim, a equação da conservação de massa em coordenadas cartesianas com as derivadas parciais é apresentada na Equação 2.11 e em notação vetorial com o operador ∇ na Equação 2.12.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (2.12)$$

Para fluidos incompressíveis a massa específica não é função nem das coordenadas espaciais nem do tempo. A Equação 2.12 pode ser simplificada de acordo com a Equação 2.13.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2.13)$$

2.4.2 Conservação da Quantidade de Movimento

Para um sistema movendo-se em relação a um referencial fixo, a segunda lei de Newton estabelece que a soma de todas as forças externas sobre o sistema é igual à taxa de variação da quantidade de movimento linear do sistema (Fox, 2006).

A equação da conservação da quantidade de movimento, conhecida como equação do movimento, é desenvolvida a partir de um volume de controle inercial, fixo no espaço em relação a um sistema de coordenadas cartesianas que não está acelerando em relação a um referencial estacionário. O procedimento é análogo àquele seguido na formulação matemática da conservação de massa para um volume de controle.

As forças que atuam sobre um elemento de fluido podem ser classificadas como forças de corpo e forças de superfície. Forças de superfície incluem tanto forças de normais quanto forças tangenciais (cisalhamento). O somatório das forças que atuam em um elemento de volume do volume de controle é dado na Equação 2.14.

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_g \quad (2.14)$$

onde:

F_i = forças de inércia por unidade de volume;

F_p = forças de pressão por unidade de volume;

F_v = forças viscosas por unidade de volume;

$F_g =$ forças de campo por unidade de volume.

Essas forças assumem as seguintes formas (Equações 2.15 a 2.18) obtidas para a aceleração de um elemento de fluido de massa infinitesimal em movimento em um campo de velocidade, sendo válidas apenas para escoamentos incompressíveis ($\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$):

$$\mathbf{F}_i = \frac{D\rho\mathbf{v}}{Dt} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{F}_p = -\nabla P \quad (2.16)$$

$$\mathbf{F}_\nu = -\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (2.17)$$

$$\mathbf{F}_g = \rho\mathbf{g} \quad (2.18)$$

onde:

$\frac{D}{Dt}$ = derivada substantiva;

$\boldsymbol{\tau}$ = tensor tensão;

ρ = densidade do fluido;

\mathbf{v} = vetor velocidade;

P = pressão;

\mathbf{g} = aceleração da gravidade.

Substituindo as Equações 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 na Equação 2.14, obtemos a Equação 2.19.

$$\frac{D\rho\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho\mathbf{g} \quad (2.19)$$

Substituindo-se a Equação 2.19 para fluido newtoniano incompressível e com viscosidade constante, obtém-se a equação de Navier-Stokes (Equação 2.20).

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (2.20)$$

2.4.3 Escoamentos Turbulentos

A maioria dos escoamentos encontrados na natureza e em aplicações práticas na engenharia apresentam instabilidades e possuem flutuações que são dependentes do tempo e da posição no espaço, envolvendo, transferências convectivas de momento, massa e energia. Esses escoamentos, necessariamente tridimensionais, são chamados de turbulentos (Neto, 2002).

Escoamentos turbulentos são caracterizados pela mudança caótica nas propriedades e variáveis do fluido. A turbulência é um regime de operação de qualquer sistema dinâmico cuja operação pode ser caracterizada por um número de graus de liberdade suficientemente elevado.

A turbulência ocorre quando as forças de inércia no fluido se tornam mais importantes que as forças viscosas, o que é representado por um alto número de Reynolds (Bird *et al.*, 1960).

2.4.3.1 Turbulência

O escoamento turbulento é caracterizado pelo comportamento aleatório, irregular, caótico e tridimensional o que torna difícil sua descrição e predição. As estruturas rotacionais do escoamento, chamadas de turbilhões ou vórtices, frequentemente são observadas. Assim, a turbulência pode ser identificada pelo movimento dos turbilhões com um largo espectro de tamanhos, o que implica uma gama de escalas de comprimento. Os maiores tamanhos de turbilhões tem a mesma ordem de grandeza do domínio, enquanto que, os de menor tamanho estão limitados pelas forças viscosas e pela energia cinética do movimento atuante (Klein, 2012).

Em escoamentos turbulentos a difusividade aumenta, significando maior transferência das propriedades de transporte (momento, calor e massa). A energia cinética dos menores turbilhões é transformada em energia interna (calor), aquecendo o fluido em escoamento pela ação das tensões viscosas. Os menores turbilhões recebem energia de turbilhões ligeiramente superiores, que recebem energia de turbilhões um pouco maiores, e assim sucessivamente, até se chegar aos maiores turbilhões que extraem sua energia do escoamento médio (Teoria de Kolmogorov). A

continuidade é mantida, uma vez que as menores escalas de turbilhões ainda são maiores que o livre caminho médio das moléculas. A Figura 2.9 apresenta o comportamento de um escoamento turbulento.

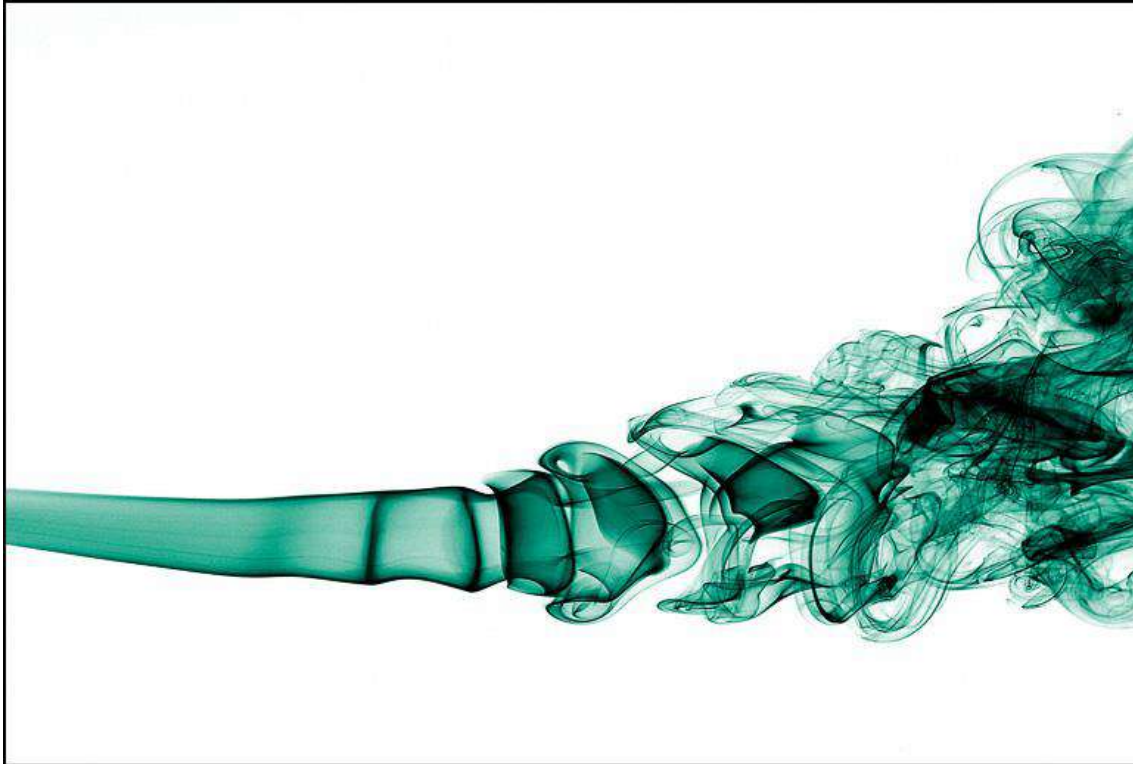


Figura 2.9 – Comportamento de um escoamento turbulento
(http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/GJ017/text.jsp)

O escoamento pode ser resolvido computacionalmente utilizando-se 3 (três) abordagens distintas: *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES) e *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS). Dentre essas abordagens, a mais utilizada na indústria é a RANS, pois, esta necessita de menor esforço computacional na modelagem das maiores escalas de turbulência.

Ao se medir a velocidade de um fluido que escoar no regime turbulento em um dado ponto e em função do tempo, obtém-se comportamento oscilatório e caótico nas medições.

Uma variável instantânea, num tempo t qualquer, pode ser decomposta em duas componentes. A primeira representa a média temporal e a segunda representa a flutuação turbulenta.

A utilização da média temporal funciona como um filtro que remove as flutuações. A aplicação desta média na equação de Navier-Stokes instantânea (Equação 2.23) gera a Equação 2.24, ambas escritas em notação indicial.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_i v_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{v}_i \bar{v}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{v_i' v_j'} \right] \quad (2.24)$$

A única diferença entre a equação do movimento instantânea (2.23) e a média temporal da equação do movimento (2.24) é o termo adicional surgido ($-\overline{v_i' v_j'}$), conhecido, quando multiplicado por ρ , como tensor de Reynolds, que representa a ação das flutuações de velocidade no escoamento médio. Devido a este termo, o sistema passa a ter mais incógnitas do que equações requerendo relações adicionais para modelar os componentes do tensor de Reynolds.

Na resolução do problema de fechamento da turbulência, são utilizados os modelos de viscosidade turbulenta e modelos baseados nos tensores de Reynolds. Os modelos de viscosidade turbulenta serão abordados a seguir, pois, serão utilizados no desenvolvimento do estudo.

2.4.3.2 Modelos de Viscosidade Turbulenta

Segundo Boussinesq (1877), o conceito de viscosidade turbulenta relaciona a tensão turbulenta diretamente com a deformação do escoamento médio, de modo similar à relação entre a tensão cisalhante e o gradiente de velocidade de um escoamento Newtoniano (Lei de Newton da Viscosidade). A Equação 2.26 apresenta a relação entre as tensões turbulentas e os gradientes de velocidade média do escoamento.

$$-\rho \overline{v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (2.26)$$

Onde δ é o delta de Kroenecker (1, se $i = j$ e 0, se $i \neq j$), e k é a energia cinética turbulenta. Substituindo a Equação 2.26 na equação média de Navier-Stokes (2.24), o fechamento passa pela modelagem da viscosidade turbulenta.

É importante ressaltar que μ_t é uma propriedade do escoamento, fortemente dependente da posição e da intensidade de turbulência, diferenciando, portanto, de μ que é uma característica do fluido (viscosidade molecular).

2.4.3.3 Modelos a 2 Equações

Expressam a viscosidade turbulenta em função de 2 quantidades turbulentas (normalmente a energia cinética e sua taxa de dissipação) e resolve uma equação de transporte para calcular cada uma.

Prandtl escolheu a energia cinética turbulenta, k , (por unidade de massa), como a base da escala de velocidade, como se apresenta na Equação 2.27.

$$k = \frac{1}{2} \overline{v_i' v_i'} = \frac{1}{2} (\overline{v_{ix}'^2} + \overline{v_{iy}'^2} + \overline{v_{iz}'^2}) \quad (2.27)$$

O modelo k - ϵ e as suas variantes são um dos mais utilizados na solução de problemas de interesse industrial. Este modelo, na sua forma padrão, possui duas equações, uma para a energia cinética turbulenta, k , e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta, ϵ . O problema do fechamento é resolvido relacionando o tensor de Reynolds com a energia cinética turbulenta e sua dissipação através das Equações 2.28 e 2.31, conforme abaixo, criando posteriormente as equações de transporte para k e ϵ .

$$\tau_{ii} = \overline{v_i' v_i'} = 2k \quad (2.28)$$

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \epsilon; \quad (2.29)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (2.30)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.31)$$

onde $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_κ , σ_ε e C_μ são constantes

2.5 Fluidodinâmica Computacional

O estudo numérico combinado de diversos fenômenos de transporte, entre os quais se inclui transporte de movimento, é chamado CFD (*Computational Fluid Dynamics*) (iESSS, 2011). Em outras palavras, a Dinâmica dos Fluidos Computacional é uma ferramenta que utiliza o estudo dos fenômenos de transporte que envolve escoamento de fluidos, transferência de calor, transferência de massa e reações química acoplados a métodos matemáticos, numéricos e computacionais.

Simulações em CFD oferecem compreensão do comportamento do escoamento em situações onde é impraticável ou mesmo impossível realizar experimentos. Torna possível testar diferentes cenários com pouco esforço extra. Para uma boa previsão dos resultados é necessário que os modelos utilizados representem o fenômeno desejado. Essa representatividade é confiável quando tais modelos são confrontados com experimentos bem controlados, bem definidos e que possam ser repetidos. A percepção do operador é essencial para que essa poderosa ferramenta seja aplicada corretamente e os resultados possam ser utilizados com prudência.

Essa ferramenta contém uma grande quantidade de informações sobre campos de velocidade, pressão, densidade, temperatura, concentração, etc. Soluções com CFD são largamente aplicáveis para diversas disciplinas, de projeto de aviões, carros, válvulas artificiais de coração, compressores, previsão de tempo e modelagem ambiental.

A análise teórica é importante para se conhecerem os modelos matemáticos que serão abordados, tendo em vista que, hipóteses simplificadoras podem ser utilizadas para a resolução do problema numérico. Uma solução analítica simplificada pode ser utilizada como condição inicial para a resolução de um problema mais complexo. Os resultados das análises servem tanto para avaliar a adequação dos resultados aos modelos numéricos (validação física), quanto para a elaboração de novos modelos.

Embora as simulações numéricas apresentem constante aperfeiçoamento, estas não substituem análises experimentais.

A utilização da simulação em CFD é justificada quando:

- Os estudos envolvem riscos experimentais (alta pressão, temperatura, materiais tóxicos, etc.);
- A elaboração de modelos geométricos se torna muito cara e complexa (plantas experimentais);
- Deseja-se obter o processo de otimização de equipamentos (grande quantidade de pontos experimentais);
- Deseja-se observar fenômenos complexos e entendê-los.

2.5.1 Etapas da Simulação CFD

O conhecimento do problema é essencial para a realização de análises utilizando CFD. As variáveis mais importantes devem ser relacionadas e investigadas para que simplificações possam ser feitas ou até mesmo o descarte de algumas variáveis menos significativas sejam avaliadas, além da determinação dos limites de estudo do problema.

O problema físico é modelado matematicamente através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Tais modelos estimam o comportamento do sistema em diferentes situações se explicam os fenômenos envolvidos.

Os códigos de CFD são estruturados em algoritmos numéricos que resolvem o escoamento de fluidos. Os códigos geralmente apresentam 4 (quatro) elementos principais: Um gerador da geometria e malha, que definem os principais elementos geométricos e discretizam o espaço onde os fenômenos ocorrem; um pré-processador, onde serão inseridas as condições de contorno, modelos e simplificações; um *solver*, resolvendo o problema acoplado, e um pós-processador, analisando a resposta e verificando a necessidade de modificações do problema. A Figura 2.10 apresenta as etapas que devem ser seguidas.



Figura 2.10 – Etapas da simulação em CFD utilizando o *software* Ansys CFX (Gomes, 2012)

Para a análise com CFD, o domínio de interesse é a região onde ocorre o escoamento do fluido. Para definir esta região, o modelo geométrico deve ser proposto contendo as principais dimensões do problema físico. Nesta etapa, deve-se ter atenção para facilitar a aplicação das condições de contorno e diminuir a necessidade de malha propondo simplificações no modelo como simetrias e periodicidades. Posteriormente, o volume deve ser discretizado por meio de volumes infinitesimais que são conectados pelos seus nós, onde as equações são calculadas e somente nesses pontos as soluções são obtidas, sendo essa etapa denominada, geração de malha. Num projeto industrial com uso de CFD, mais de 50% do tempo é dedicado a estas duas etapas, ou seja, criação da geometria e geração da malha (Malalasekera, 1995 Apud Gomes, 2012).

Assim como o domínio precisa ser discretizado, as equações também precisam de uma transformação equivalente. Sendo assim, as equações deixam de ser resolvidas através de equações diferenciais, substituindo-se as derivadas por expressões algébricas, já que o domínio passou a ser discreto (Gomes, 2012).

No pré-processamento, o usuário tem a tarefa de definir propriedades dos fluidos, selecionar os modelos fenomenológicos que se fazem presentes, especificar as condições de contorno apropriadas que descrevem as fronteiras do domínio.

No CFX, a técnica para discretização do problema, no *solver*, é a utilização dos volumes finitos. As técnicas utilizadas neste tipo de *solver* se diferenciam pela aproximação das variáveis de fluxo e pela discretização das equações. A solução consiste na linearização de um sistema de equações algébricas que são discretizações pela substituição de aproximações em equações governantes do escoamento e manipulações matemáticas subsequentes.

O modelo matemático deve descrever os fenômenos físicos de maneira fiel ou, pelo menos, o mais próximo da realidade para que os erros gerados na solução numérica não ocorram, levando a pouca ou nenhuma representatividade. Assim, o método numérico adotado precisa resolver corretamente as equações algébricas geradas.

2.5.2 Malha Computacional

A discretização do espaço físico se refere à aproximação de um problema em um domínio contínuo por elementos discretos, construindo-se a chamada malha computacional.

A grande maioria dos métodos numéricos de solução de equações de transporte envolve cálculo no nível de subdomínios, portanto, é necessário que o domínio seja subdividido em pequenos elementos. Esta subdivisão é chamada de geração de malha (*mesh*).

Regiões que possuem fortes gradientes nas variáveis de escoamento devem passar por uma análise mais criteriosa na geração da malha. Estes locais devem ser refinados de maneira que não ocorram perdas de informações nas menores escalas, evitando-se assim, perdas no resultado final. Quanto maior for o refinamento, maior será a quantidade de pontos discretos e, mais fina será a malha, levando-se a resultados mais precisos e acurados. Por outro lado, ao tornar a malha mais fina, a demanda computacional aumenta e com isso, o tempo de simulação e a capacidade necessária para o processamento ficam mais elevados.

O teste de sensibilidade de malha é essencial para se evitar subdimensionamento ou até mesmo superdimensionamento da malha empregada. O teste consiste na redução gradual do tamanho dos elementos (refinamento) que descrevem o domínio avaliando-se as variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, etc.), até que estas não se alterem significativamente.

As malhas computacionais podem ser estruturadas, não-estruturadas ou híbridas. A rede formada possui uma numeração que segue uma lei de formação e esses podem ser variados ou não. Essas podem ser uniformes ou não uniformes, igualmente espaçados ou espaçados de acordo com a necessidade do domínio, porém, uma alta deformação dos elementos pode levar a problemas numéricos.

As malhas estruturadas apresentam regularidade na distribuição espacial de seus pontos. Malhas deste tipo possuem sempre o mesmo número de vizinhos e são compostas por elementos quadriláteros, em geometrias 2D e elementos hexaédricos em geometrias 3D. As malhas não-estruturadas são caracterizadas pela ausência de regularidade na distribuição espacial dos pontos, um exemplo é a malha tetraédrica (ou triangular, quando bi-dimensional). As malhas não-estruturadas são muito importantes quando o domínio analisado é dado por uma geometria muito complexa. As malhas híbridas geralmente são utilizadas para capturar informações do perfil de velocidade e temperatura próximo a paredes utilizando elementos prismáticos.

Uma boa malha é muito importante para minimização dos erros na resolução do problema, evitando-se a difusão numérica e tornando os resultados mais acurados. A malha apresenta 3 componentes: boa resolução, distribuição apropriada da malha e boa qualidade de malha. As duas primeiras dependem do processo de geração da malha, assim como os refinamentos locais, o uso de tamanhos adequados e as estratégias de refino usadas pelo usuário para condução de uma determinada análise.

2.5.3 Malhas Adaptativas

A adaptação de malha, no *software* CFX, é um processo de refinamento seletivo em áreas especificadas pelo critério adaptativo. Isso significa que a malha passará automaticamente por refinamentos localizados com intuito de tornar a malha mais fina onde as variáveis selecionadas apresentam variações rápidas na ordem de apresentar resultados mais acurados nestas regiões (ANSYS 13.0 Help, 2011).

A estratégia de adaptação automática de malhas é realizada através da utilização de uma combinação dos métodos de refinamento e realocação nodal, onde os elementos da malha, que possuem baixa qualidade, são adequadamente subdivididos, com o objetivo de melhorar a qualidade dos mesmos. Em seguida, a malha é submetida a um processo de realocação nodal, com o propósito de melhorar as propriedades geométricas dos elementos, bem como suavizar a transição entre as regiões de baixa e alta densidade de elementos (Popioleket *al.*, 2001).

A estratégia adaptativa garante uma boa transição entre regiões refinadas e grosseiras, mantendo a compatibilidade entre regiões adjacentes. A qualidade global da malha gerada é assegurada pela contribuição das medidas dos erros locais calculados para cada nó da malha. A malha adaptativa converge para uma malha de boa qualidade mesmo que a malha inicial seja extremamente grosseira (Siqueira, 2009).

No processo adaptativo, é necessário estipular os níveis de adaptação para a malha. Nesta etapa, é recomendado, no CFX, selecionar níveis de 1 a 5 para evitar malhas super refinadas, pois, os elementos são subdivididos a cada processo adaptativo, podendo assim, deformar e piorar a resolução do problema numérico. Este método de refinamento é disponível apenas para problemas em regime estacionário.

No CFX é possível determinar o número de passos adaptativos, critério de convergência para cada passo, número máximo de nós após o refinamento, critério de subdivisão dos elementos da região (aresta ou elemento) e sobre quais variáveis o refinamento deve ser realizado.

Além de determinar os parâmetros para adaptação, também é possível verificar a qualidade da malha após o processo adaptativo, pois, a cada passo estipulado, um backup da malha anterior é gerado ficando disponível ao usuário para verificação dos resultados. Este procedimento deve ser controlado, pois, dependendo do tamanho da malha, os refinamentos intermediários podem ocupar grandes espaços nos discos de armazenamento do equipamento.

Este método é muito útil para avaliação de problemas com dezenas de cenários diferentes e em regiões distintas do domínio. A adaptação de malha evita refinamentos exagerados e construção de dezenas de malhas para avaliação de equipamentos distantes como no caso de plantas industriais. Neste tipo de problema, todos os módulos de produção devem ser inseridos no modelo para avaliar a influencia de correntes de ar. Sendo assim, com este método adaptativo é possível confeccionar uma única malha com tamanhos de elementos adequados a cada equipamento e com bons valores para os critérios de qualidade na avaliação de casos independentes, sem a necessidade de refinar a malha localmente.

3 METODOLOGIA

3.1 Recursos Computacionais

Simulações numéricas foram feitas utilizando o *software* de Fluidodinâmica Computacional CFX, versão 13.0, distribuído pela ANSYS Inc. Esse *software* é específico para análise de problemas fluidodinâmicos, através da solução numérica das equações de Navier-Stokes, utilizando o método dos volumes finitos. A geração da geometria e da malha computacional foram feitas utilizando os *softwares* AutoCad 2013 e ICEM CFD 13.0, respectivamente. Os recursos de pré-processamento, quanto à aplicação de cargas, do *solver* e de pós-processamento são próprios do CFX.

O CFX permite trabalhar com misturas multicomponentes, em análises transientes e regimes turbulentos. Permite considerar a presença de obstáculos ao desenvolvimento do escoamento, sendo especialmente aconselhável para análises de curtas distâncias.

Desenvolvido exclusivamente para análises CFD, o CFX possui algoritmos de solução adequados ao problema de dispersão de gases. Possui elevada capacidade gráfica, o que proporciona resultados de fácil visualização e largo emprego. Permite determinar diretamente a distribuição de concentrações de gás em qualquer ponto da unidade.

As simulações foram feitas utilizando 12 processadores Intel Xeon com 24 GB de memória RAM e 18TB de memória física. Durante as simulações realizadas, o tempo para cada análise levou, em média, 4 horas e 30 minutos de duração.

3.2 Estudo de Dispersão de Gases

Os equipamentos que oferecem maior probabilidade de vazamento são os compressores e estes foram escolhidos como foco da análise (Fleck, 2008 e Gomes, 2012). A Análise Preliminar de Perigo (APP) avalia os possíveis cenários de liberações líquidas ou gasosas em instalações industriais, entretanto, como uma planta de processos apresenta dezenas de cenários de liberações gasosas, ficaria inviável, para a finalidade do presente trabalho, realizar simulações de dispersão em todos esses cenários. Assim sendo, optou-se por considerar apenas os cenários de vazamento no sistema de compressão dos gases e nos sistemas de exportação e injeção do gás.

A qualidade da representação geométrica tem efeito significativo nos resultados das simulações. De acordo com a geometria, podem ser formadas zonas de estagnação, zonas de maior circulação de ar, zonas geradoras de vórtices, zonas

turbulentas, etc. Essa caracterização do ambiente onde o fluido será liberado irá influenciar no tamanho da nuvem de gás gerada, bem como na sua concentração. Logo, é fácil perceber que a etapa da criação do modelo geométrico da plataforma tem importância nos resultados (Fleck, 2008).

3.2.1 Geometria e Malha Computacional

No presente trabalho foi escolhida uma unidade com grau de complexidade elevado. Foi escolhido um FPSO genérico que possui as características principais para o tratamento do óleo, gás e água extraído em alto mar. A geometria utilizada foi adaptada a partir das plataformas de petróleo em funcionamento na Petrobras.

No modelo desenvolvido, não foram considerados a presença de tubulações e *Pipe Racks*, devido à insuficiência de recursos computacionais na geração da malha. A Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam uma vista isométrica, uma vista de topo identificando os módulos que serão estudados na unidade e a vista do *farfield* (domínio no qual as simulações foram realizadas) respectivamente.

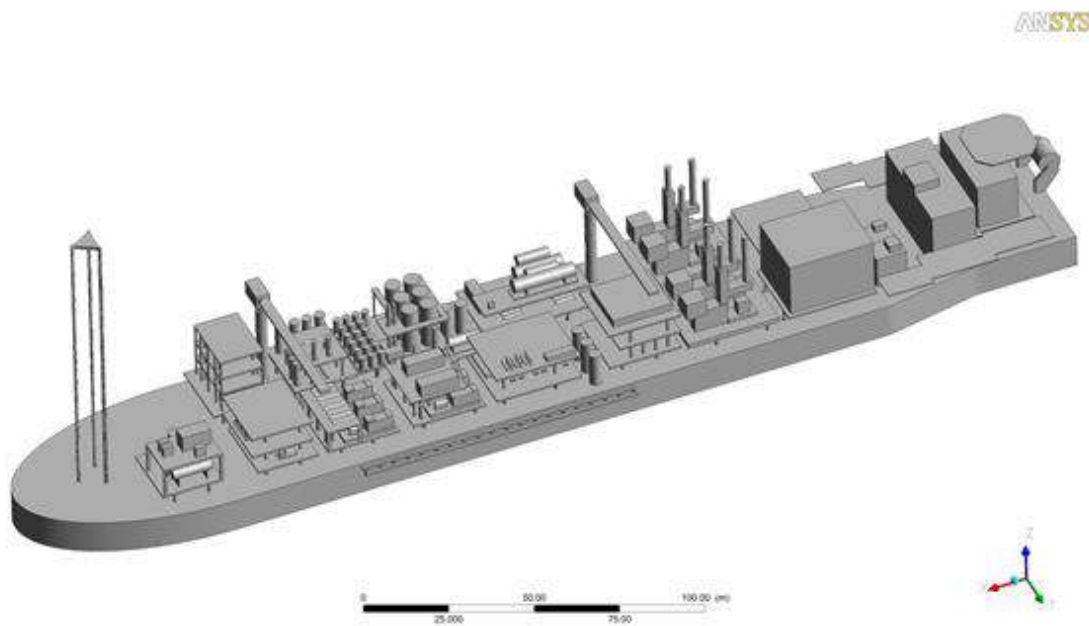


Figura 3.1– Vista isométrica do modelo 3D

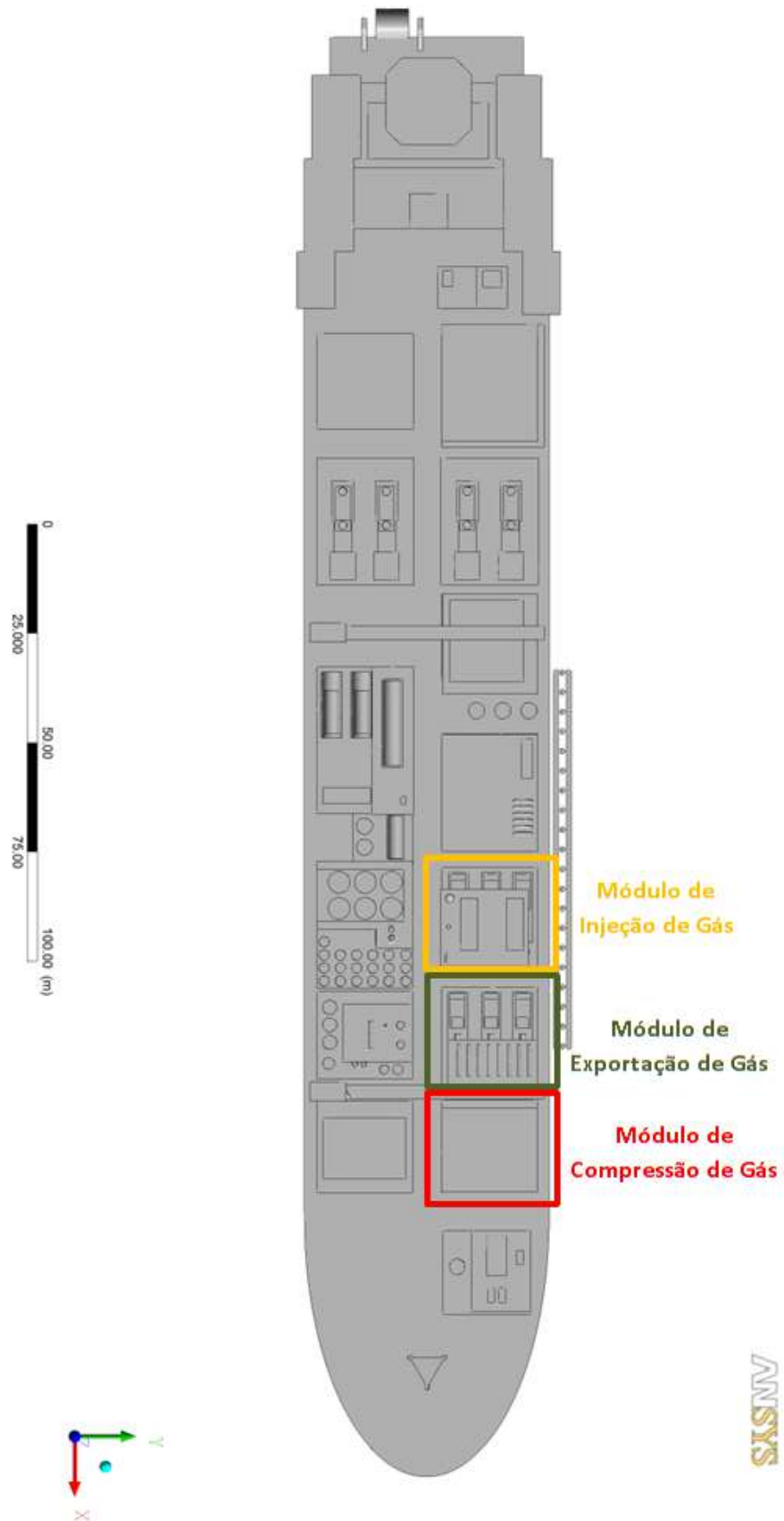


Figura 3.2 – Vista de topo do modelo 3D

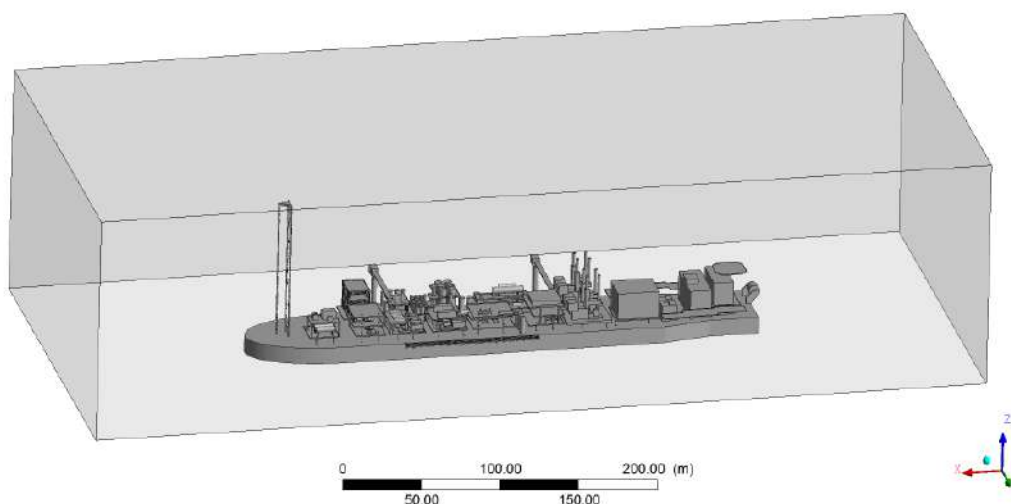


Figura 3.3 – Vista do domínio de simulação (*Far Field*)

A geometria utilizada possui 580 x 256 x 150 m e a unidade possui 330 x 56 x 100 m e, foi construída de forma similar a um FPSO da Petrobras. Devido à inviabilidade da construção de malhas estruturadas face à complexidade da geometria, foram usadas, na discretização do domínio, malhas não estruturadas, constituídas por elementos tetraédricos.

Optou-se pela não adoção de elementos prismáticos (*infante boldriés*) na resolução da camada limite térmica e hidrodinâmica das superfícies dos equipamentos e módulos da unidade, pois, em um estudo de dispersão de gases, o interesse se encontra na dispersão dos gases no seio do domínio. Além disso, os maiores gradientes se encontram localizados próximos à liberação do gás, dedicando-se, portanto, o esforço computacional para um refinamento nesta região (Gomes, 2012).

O tamanho da malha é um parâmetro importante em análises utilizando CFD, já que o método dos volumes finitos teoricamente é um método consistente (Malesa, 1995 Apud Fleck, 2008), ou seja, quanto maior o número de nós, mais precisos serão os resultados da simulação. No entanto, análises de sensibilidade do tamanho da malha são realizadas, não para assegurar que a solução é independente do mesmo, mas para ver se a dependência dela é aceitável. Não é esperado para esses tipos de problemas, que soluções com total independência da malha possam ser atingidas (Fleck, 2008).

A Figura 3.4 e Figura 3.5 apresentam as malhas superficiais no modelo 3D e nos compressores do sistema de compressão do gás. Com base nos resultados do teste de sensibilidade de malha, apresentados no Capítulo 4, foi definido que a utilização da

malha adaptativa aos parâmetros de interesse é a melhor alternativa para tornar mais dinâmica as simulações em termos de malha e acompanhamento. A adaptação permite que apenas uma malha seja proposta e, a partir desta, realizar as simulações em qualquer ponto do domínio sem a preocupação de inserir uma densidade de malha local.

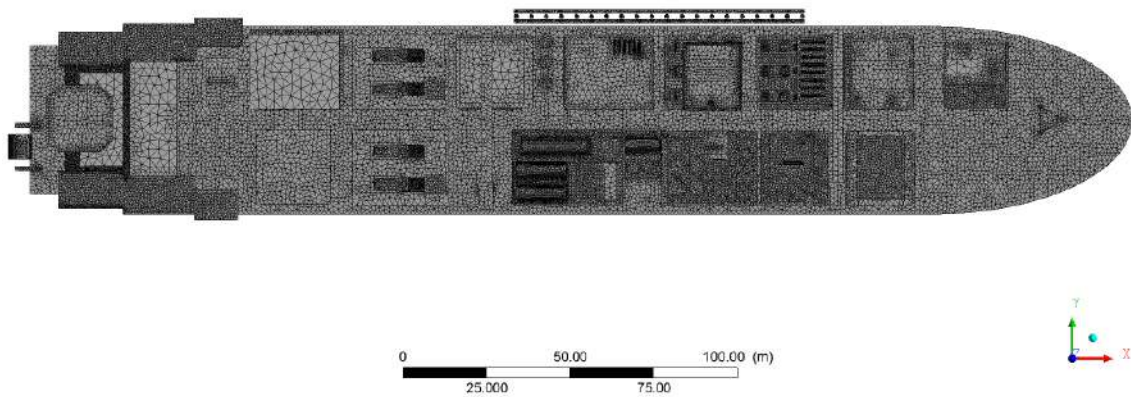


Figura 3.4 – Malha superficial do modelo 3D

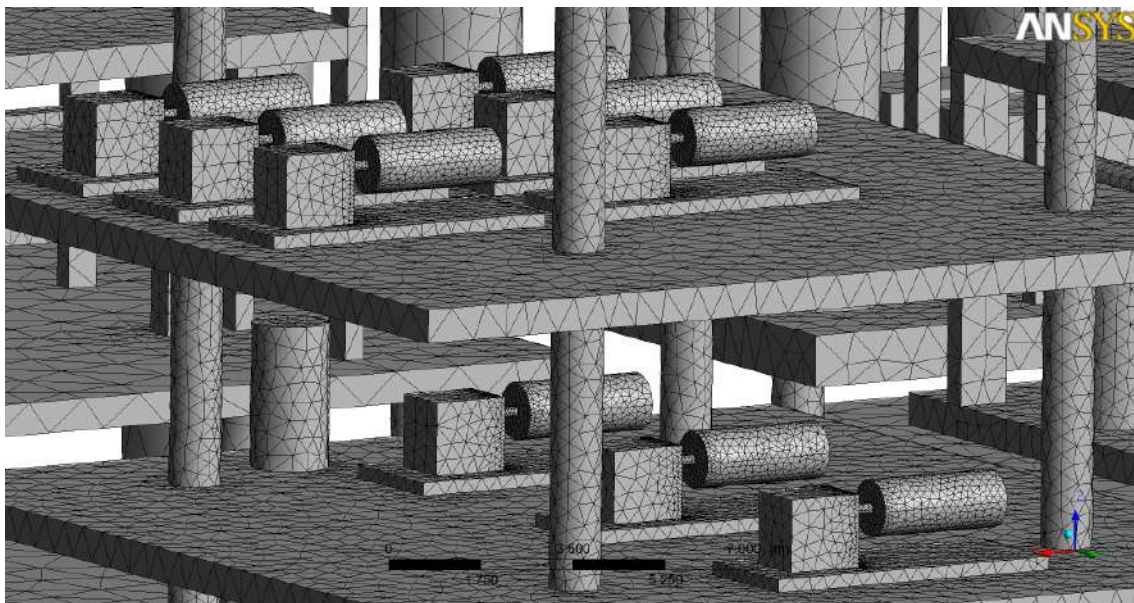


Figura 3.5 – Malha superficial dos compressores do sistema de compressão do gás

3.2.2 Definição das Condições Meteorológicas

Na análise de dispersão de gases, a ventilação natural é um parâmetro importante que influencia significativamente no desenvolvimento do escoamento contendo gases inflamáveis, concentrando menos ou mais a mistura explosiva na atmosfera. Esta condição pode ser afetada por equipamentos que obstruem a passagem do ar e requerem uma boa representação, de tal maneira que sejam provenientes de dados meteorológicos da região de estudo, tornando a simulação numérica mais realista.

As condições meteorológicas estabelecem a velocidade média mais frequente dos ventos e a porcentagem de ocorrência para cada direção. O valor de porcentagem para cada direção faz-se necessário quando se deseja calcular a probabilidade de ocorrência de determinado cenário dentro dos listados na APP. No presente estudo não serão elaboradas análises deste tipo, portanto, este valor é meramente ilustrativo e é apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Velocidade Média mais Frequente e Porcentagem Direção Normalizada

Direção	N	NE	L	SE	S	SO	O	NO
Velocidade Média Mais Frequente (m/s)	3.5	6.5	5.5	4.5	3.5	3.5	2.5	2.5
% Direção Normalizada	15,50	25,94	16,79	12,41	12,31	6,15	4,79	6,11

Fonte: INMET

O Norte de projeto esta alinhado com o Norte verdadeiro. A Figura 3.6 apresenta a Rosa dos Ventos para a unidade. Define-se o vento Norte como aquele que provém do Norte e vai para o Sul, assim como o vento Sul aquele que provém do Sul e vai para o Norte, e assim sucessivamente.

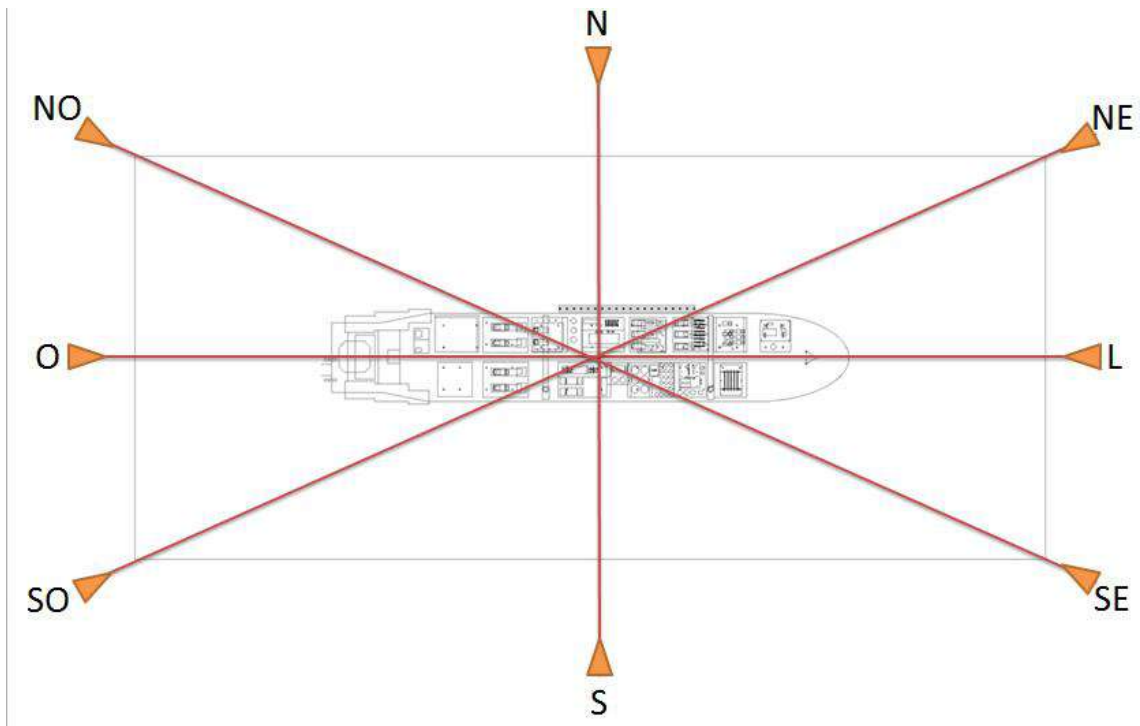


Figura 3.6 – Rosa dos Ventos da Unidade

Os ventos Nordeste, Noroeste, Sudeste e Sudoeste entram no domínio formando um ângulo de 45° com a unidade. Para inseri-los foi necessário aplicar a decomposição dos vetores velocidade desses ventos, possibilitando a entrada de dados no CFX-Pré. A Figura 3.7 apresenta um exemplo de decomposição de vetores feita para o vento Nordeste e este procedimento é análogo para os ventos Sudoeste, Sudeste e Noroeste.

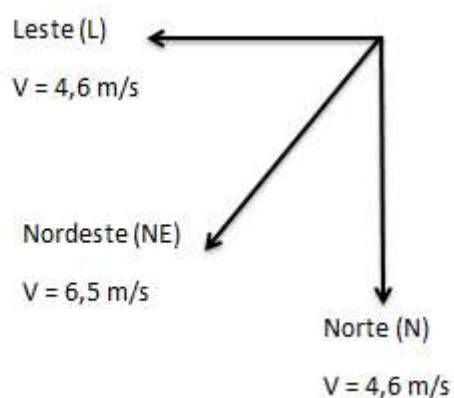


Figura 3.7 – Decomposição do Vetor Velocidade do Vento Nordeste

3.2.3 Seleção dos Cenários, Parâmetros e Condições de Contorno

Sugere-se, sempre que possível, serem analisadas 6 direções ortogonais para o vazamento, em cada ponto selecionado (Strøm *et al.*, 1999). A quantidade de gás próximo à concentração estequiométrica é muito sensível a pequenas variações na direção, taxa, localização e tipo de vazamento. Mudando a direção do vazamento em 90°, o volume do gás próximo ao estequiométrico mudou de um preenchimento de 10% para 65% do módulo em questão (Fleck, 2008).

Entretanto, realizar todas as simulações previstas seria inviável, pois seriam simulados pelo menos 8 direções de vento x 6 direções de vazamento x número de pontos de vazamento, tendo assim, um número excessivo de cenários a serem simulados.

Em uma unidade de processo convencional existem dezenas de cenários de vazamento, de forma que simular 6 direções de vazamento para cada cenário praticamente inviabiliza os prazos de projeto, quer seja o esforço computacional, quer seja pelo tempo necessário para realizar todas as simulações e posteriormente processar os resultados.

Segundo Fleck (2008), em estudos de dispersão de gases com auxílio de CFD, deve-se dar preferência para vazamentos direcionados para o piso da unidade, ou situações onde há obstáculos na saída do jato, confinando parcialmente o gás e aumentando a mistura hidrocarboneto/ar, ou seja, o volume inflamável. Assim sendo, neste estudo será utilizada a recomendação proposta.

Sendo assim, foram selecionadas 3 (três) direções de vazamento para os compressores escolhidos:

1. Para o piso da unidade
2. Para o Norte de projeto
3. Para o Sul de projeto

Os vazamentos que consideram as direções Norte e Sul só cabem aos compressores que estiverem entre outros equipamentos. Se não houver obstáculos para o escoamento próximo ao compressor, não serão simuladas as duas direções e sim uma delas apenas.

A partir dessas premissas, a Tabela 3.2 apresenta a seleção dos cenários para cada compressor. Foram selecionados 4 compressores, 2 no módulo de compressão do gás (1 em cada elevação), 1 no módulo de exportação do gás e 1 no módulo de injeção do gás. Os compressores escolhidos estão entre outros 2 compressores, necessitando-se simular 3 direções de vazamento. Caso fossem simuladas as 8 direções de vento para cada direção de jato em todos os compressores, o estudo teria 96 cenários. Esse

número é extremamente alto e dispendioso em termos computacionais. Para diminuir o número de cenários e manter a representatividade do estudo, foram consideradas as 8 direções de vento dividindo-as entre os compressores semelhantes, ou seja, compressores com obstáculos semelhantes para o escoamento. Os compressores escolhidos são apresentados na Figura 3.8. Assim, foram simulados 48 cenários para representar os 96 possíveis cenários.

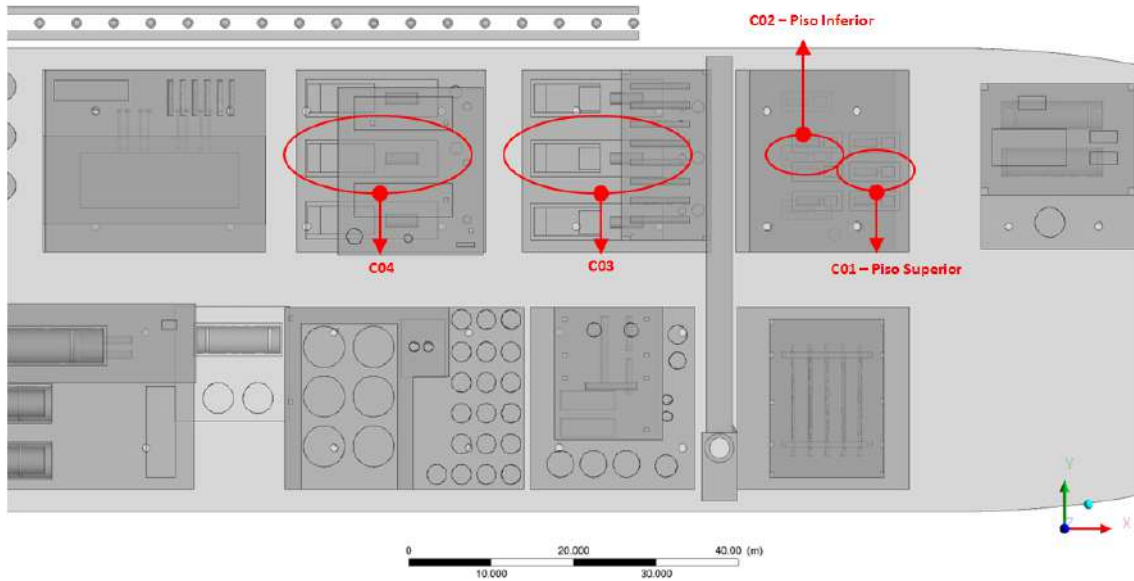


Figura 3.8 – Compressores Selecionados no Estudo

Tabela 3.2 – Seleção dos Cenários e Especificações das Simulações

Cenário	Equipamento	Direção de Vento	Direção do Vazamento
1	C-01	Norte	Norte
2	C-01	Norte	Sul
3	C-01	Norte	Baixo
4	C-01	Noroeste	Norte
5	C-01	Noroeste	Sul
6	C-01	Noroeste	Baixo
7	C-01	Leste	Norte
8	C-01	Leste	Sul
9	C-01	Leste	Baixo
10	C-01	Sudeste	Norte
11	C-01	Sudeste	Sul
12	C-01	Sudeste	Baixo
13	C-01	Sul	Norte
14	C-01	Sul	Sul
15	C-01	Sul	Baixo
16	C-02	Nordeste	Norte

Cenário	Equipamento	Direção de Vento	Direção do Vazamento
17	C-02	Nordeste	Sul
18	C-02	Nordeste	Baixo
19	C-02	Oeste	Norte
20	C-02	Oeste	Sul
21	C-02	Oeste	Baixo
22	C-02	Sudoeste	Norte
23	C-02	Sudoeste	Sul
24	C-02	Sudoeste	Baixo
25	C-03	Norte	Norte
26	C-03	Norte	Sul
27	C-03	Norte	Baixo
28	C-03	Noroeste	Norte
29	C-03	Noroeste	Sul
30	C-03	Noroeste	Baixo
31	C-03	Leste	Norte
32	C-03	Leste	Sul
33	C-03	Leste	Baixo
34	C-03	Sudeste	Norte
35	C-03	Sudeste	Sul
36	C-03	Sudeste	Baixo
37	C-03	Sul	Norte
38	C-03	Sul	Sul
39	C-03	Sul	Baixo
40	C-04	Nordeste	Norte
41	C-04	Nordeste	Sul
42	C-04	Nordeste	Baixo
43	C-04	Oeste	Norte
44	C-04	Oeste	Sul
45	C-04	Oeste	Baixo
46	C-04	Sudoeste	Norte
47	C-04	Sudoeste	Sul
48	C-04	Sudoeste	Baixo

As condições atmosféricas e as condições de operação do compressor são inseridas por meio das condições de contorno. Na aplicação das condições de contorno, algumas propriedades devem ser inseridas. No CFX-Preá, foi criado um fluido denominado “Mistura” que representa o gás contido nas linhas de processo do FPSO. A composição do gás deve ser típica ao do gás natural processado nesses sistemas, sendo assim, a Tabela 3.3 apresenta os componentes presentes na mistura e suas respectivas frações molares e mássicas de acordo com o peso molecular de cada espécie.

Tabela 3.3 – Composição da Mistura Contida na Corrente de Processo

Componentes	PM	% Molar	% Molar*PM	Fr. Mássica
CH ₄	16,04	0,750	12,030	0,5508
C ₂ H ₆	30,07	0,125	3,759	0,1721
C ₃ H ₈	44,10	0,070	3,087	0,1413
C ₄ H ₁₀	58,10	0,030	1,743	0,0798
C ₅ +	72,15	0,010	0,722	0,0330
CO ₂	44,01	0,005	0,220	0,0101
N ₂	28,01	0,010	0,280	0,0128

Nota: Segundo Fleck (2008), a composição acima é representativa para o caso.

Observa-se na tabela acima que o peso molecular da mistura é 21,84 e, comparando este valor com o peso molecular do ar, 28,97, conclui-se que a mistura estudada irá ter um comportamento ascendente, pois é mais leve que o ar.

Para facilitar o pós-processamento na análise da concentração dos hidrocarbonetos no domínio, foi criada uma subsistira chamada “HC”, que representa os hidrocarbonetos presentes na corrente e possui fração mássica de 0,9770 na mistura contida na corrente de processo. A Tabela 3.4 apresenta a fração mássica normalizada para os hidrocarbonetos.

Tabela 3.4– Fração Mássica Normalizada de Hidrocarbonetos

Componentes	Fr. Mássica Normalizada
CH ₄	0,5637
C ₂ H ₆	0,1761
C ₃ H ₈	0,1447
C ₄ H ₁₀	0,0817
C ₅ +	0,0338

Segundo Gomes (2012), se um refinamento adequado for realizado na região da dispersão do gás, o *Soure point* (ponto fonte) pode ser usado como condição de contorno de entrada do gás no domínio de interesse, poupando tempo ao se evitar que o furo tenha de ser feito durante a etapa de confecção da geometria.

Tendo em vista a afirmação acima, o *Soure point* foi utilizado neste trabalho como condição de entrada. Os parâmetros importantes para calcular a vazão mássica e a velocidade do vazamento estão inseridos na Tabela 3.5. Nesta são encontrados os valores para pressão interna, P_o , diâmetro do orifício de vazamento, D , área do vazamento, A , densidade da mistura na linha de processo, ρ_o , coeficiente isentrópico, γ , vazão mássica, q_{uis} , e a velocidade do vazamento após expansão, V_s . Os cálculos para alguns desses parâmetros são encontrados no item 2.2.4.

Tabela 3.5 – Propriedade e Parâmetros de Análise do Vazamento

Parâmetro	Valor
P_o [kgf/cm ²]	150
D [mm]	10
A [m ²]	$7,85 \times 10e-5$
ρ_o [kg/m ³]	129,40
γ	1,29
q_s [kg/s]	1,39
V_s [m/s]	382,94

No CFX-Pré são especificados como a simulação será tratada em relação ao regime do escoamento. Segundo HSE (2003 Apud Gomes, 2012), em geral, é suficiente realizar cálculos estacionários para analisar o tamanho das nuvens geradas, sendo que o escoamento transiente pode ser utilizado para determinação do tempo de detecção.

Regiões 2D da geometria podem ser definidas como *inlet*, *outlet*, *opening* ou *wall* (*free slip* ou *no slip*, sem ou com aderência, respectivamente). A condição de *inlet*, significa que o fluido entrará no domínio. No caso do *outlet*, o fluido sairá do domínio preferencialmente e no caso do *opening*, o fluido poderá entrar ou sair do domínio.

O *Source Point* atua em um único elemento da malha e cria fontes de quantidade em um ponto específico dentro do domínio de interesse. A localização do ponto é definida em coordenadas cartesianas e a fonte é criada no elemento de malha que está mais próximo do ponto especificado. As fontes devem ser especificadas como quantidades volumétricas, como vazão mássica, ou seja, quantidade de movimento ou radiação térmica não podem ser especificados sozinhos (Ansys 13.0 Help, 2011). A Figura 3.9 apresenta as condições de contorno inseridas no CFX-Pré.

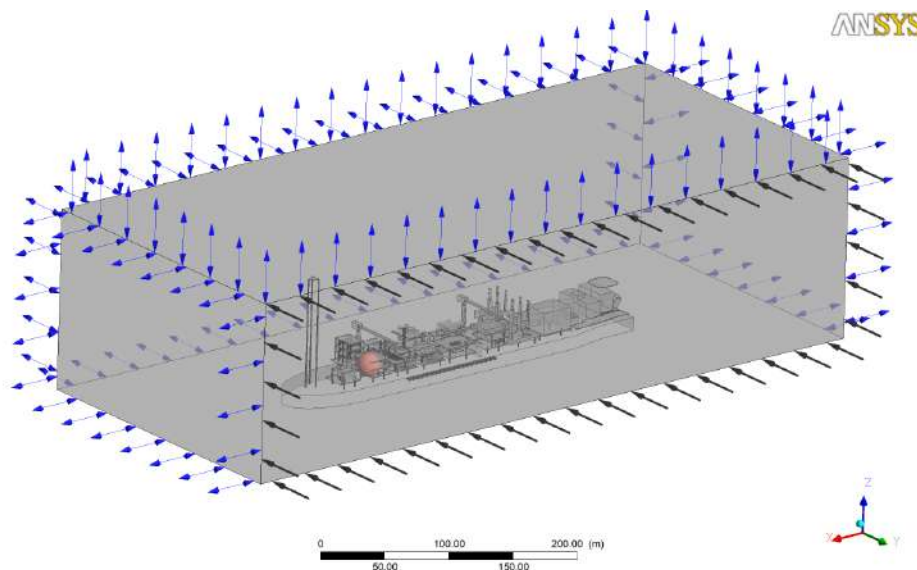


Figura 3.9 – Condições de contorno inseridas no CFX-Pré

A Tabela 3.6 apresenta um resumo das condições do escoamento e de contorno e os parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 3.6 – Condições de Contorno e Parâmetros da Simulação

Condição de Contorno/ Parâmetro	Especificação/ Valor
Regime do Escoamento	Estacionário
Pressão de Referência: Domínio [atm]	1
Densidade de Referência: Domínio [kg/m ³]	1,183
Gravidade Direção \hat{z} [m/s ²]	-9,81
Tipo de Escoamento	Incompressível
Modelo de Transferência de Calor	Isotérmico
Modelo de Turbulência	K- ϵ
Modelo de Função de Parede	<i>Scalable</i>
Condição Ambiente	<i>Ar Ideal Gas a 25°C</i>
Superfícies de Saída do Gás + Ar	<i>Opening (P_{set} = 0 atm)</i>
Superfícies de Entrada de Ar	<i>Inlet (subsonic)</i>
Superfícies da Unidade e Limite Inferior (Mar)	<i>Wall (No Slip)</i>
Entrada do Gás (<i>Source Point</i>) [m/s]	$V_s = 382,94$
Entrada do Gás (<i>Source Point</i>) [kg/s]	$q_s = 1,39$
Número Máximo de Iterações	600
Critério de Convergência (RMS)	1,00E-06

*Densidade de Referência: Densidade do Ar

*RMS: Raiz do desvio quadrado médio

3.2.4 Teste de Sensibilidade de Malha

O teste de sensibilidade de malha objetiva eliminar a influência da malha nos resultados de dispersão de gases. O teste de sensibilidade de malha é realizado utilizando os mesmos modelos matemáticos, as mesmas condições de contorno para o ambiente e para o vazamento e o mesmo layout da unidade, mantendo-se os equipamentos inalterados, variando o refinamento da malha, até que a concentração do componente de interesse não se altere significativamente.

Com o objetivo de facilitar as simulações mantendo-se a independência da malha, foram realizadas simulações utilizando o método de adaptação de malha. A utilização deste método facilita a obtenção do resultado a partir de uma malha grosseira, definindo-se apenas, a quantidade de adaptações, o número máximo de nós no refinamento automático da malha e sobre quais parâmetros esse refinamento deve ser feito, como exemplo, concentração de hidrocarbonetos no domínio. O Cenário1 foi selecionado para obtenção dos resultados adaptativos conforme Tabela 3.2.

A partir do perfil da dispersão de gases obtidas nas malhas propostas e nos níveis de adaptação, foram criados, no CFX-Post, pontos de monitoramento aleatórios para

que a concentração de hidrocarbonetos fossem medidas e comparadas. As coordenadas dos pontos e os valores da concentração do gás são apresentados no item 4.1.

Desta forma, foi definido que a adaptação de malha possui representatividade no resultado das simulações. Como a recomendação do CFX é não chegar a 5 adaptações, pois o alto grau de refinamento pode provocar deformações nos elementos da malha, por precaução definiu-se um máximo de 3 níveis de adaptação. Observou-se que são necessárias 3 adaptações de malha partindo-se de uma malha com 786.864 nós e 4.159.528 elementos, chegando-se ao máximo de 1.400.000 nós. A Figura 3.10 apresenta os pontos de observação no módulo de compressão de gás, totalizando 8 pontos de observação.

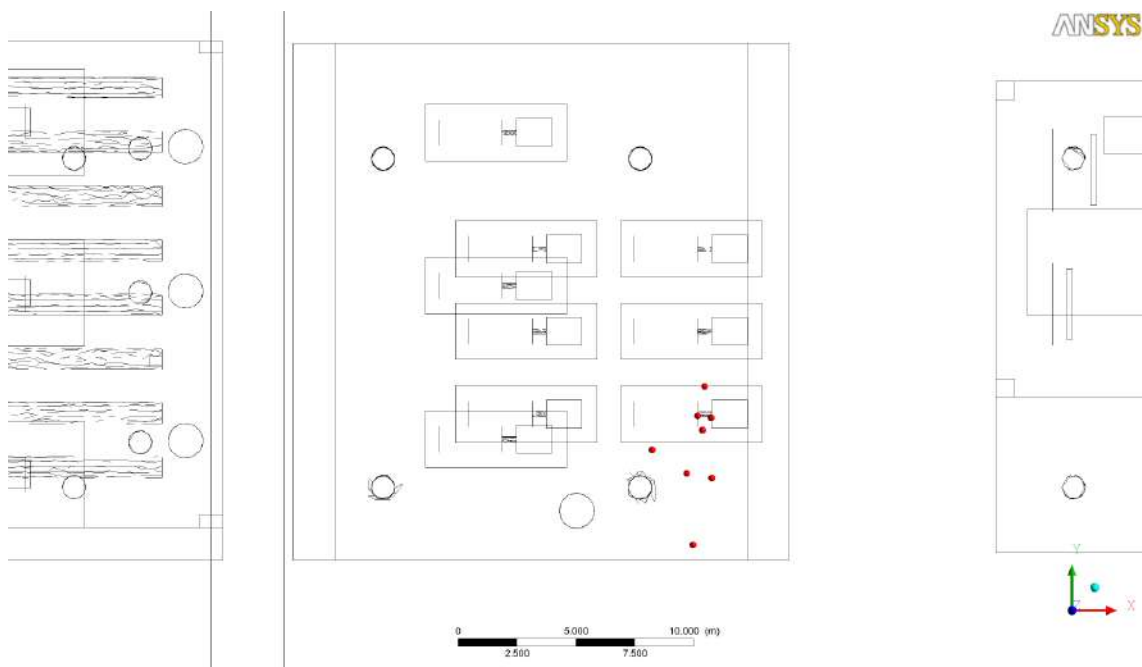


Figura 3.10 – Pontos de observação da concentração de hidrocarbonetos

Os principais parâmetros das malhas, e os seus respectivos valores, estão descritos na Tabela 3.7. Nesta tabela são apresentados o número total de nós e elementos, a razão de crescimento e a qualidade das malhas. No ICEM CFD, o critério de qualidade de malha é atendido se este estiver acima de 0,3 para o parâmetro *Quality*.

Tabela 3.7 – Parâmetros das Malhas

PARÂMETRO	Malha Inicial	ADAPTAÇÃO			
		1ª	2ª	3ª	3ª
Número de Nós	786.864	951.183	1.256.691	1.411.650*	1.591.796*
Número de Elementos	4.159.528	4.975.839	6.543.666	7.350.996*	8.261.393*
Razão de Crescimento	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Quality	> 0,3	> 0,3	> 0,3	> 0,3	>0,3

* Diferença no tamanho final da malha

Foi observado que as simulações atingiram resíduos menores que $10e-06$ a partir de 102 iterações, levando a 38 minutos de simulação. Com base nestes dados, foi adotado para as simulações que, após a adaptação de malha, seriam necessárias, pelo menos, 150 iterações para atingir a convergência. A Tabela 3.8 apresenta o número de iterações por nível de adaptação, após a adaptação e total para cada simulação. Definiu-se cada malha nomeando-as como Malha 1, Malha 2, Malha 3, Malha 4 e Malha 5.

Tabela 3.8 – Número de Iterações nas Simulações

Malha	Nível de Adaptação	Nº de Iterações por Adaptação	Nº de Iterações Após Adaptação	Nº Total de Iterações
Malha 1	0	0	600	600
Malha 2	1	450	150	600
Malha 3	2	225	150	600
Malha 4	3	150	150	600
Malha 5	3	150	150	600

3.2.5 Metodologia do Posicionamento de Detectores

A metodologia para o posicionamento de detectores resume-se basicamente em definir uma rede inicial de detectores de gases inflamáveis, simular os cenários de vazamento, classificar os pontos de detecção e reposicionar a malha de detectores com os pontos melhor classificados, obtendo-se o menor número possível de dispositivos que capturem todas as nuvens simuladas.

Segundo Mendes (1999), a alocação de detectores é mais eficiente utilizando modelos em CFD na análise de volumes finitos. Verificou-se que o posicionamento dos detectores deve ser feito a partir da sobreposição das dispersões gasosas, avaliando a exclusão dos detectores redundantes e a necessidade de adição de novos detectores. Além disso, os detectores devem ser posicionados acima do ponto de vazamento quando gases mais leves que o ar forem considerados.

Kelsey (2002) afirma que, em ambientes confinados, a velocidade de chama para nuvens inflamáveis de 6 m pode chegar a 125 m/s, alcançando valores danosos para a unidade caso as nuvens sofressem ignição. Com essa afirmação, Fleck (2008) adotou um espaçamento de 5 m x 5 m para garantir que todas as nuvens abaixo de 6 m fossem detectadas. Assim como Fleck, será avaliado o posicionamento de detectores equidistantes em 5 m x 5 m como na Figura 3.11. A partir da posição preliminar, serão determinados os pontos de sobreposição das dispersões e exclusão daqueles que não detectam nenhum cenário e dos detectores redundantes. Além disso, foi analisada a altura dos detectores a partir de linhas perpendiculares ao piso da plataforma e selecionado os pontos na concentração de detecção que estivessem nas alturas mais baixas acima do ponto de vazamento, definindo a localização final de cada detector. Os possíveis pontos de detecção totalizam 100 detectores atuantes nos 3 módulos selecionados, sendo 25 pontos por *deck* (serão avaliados 2 *decks* no Módulo de Compressão de Gás).

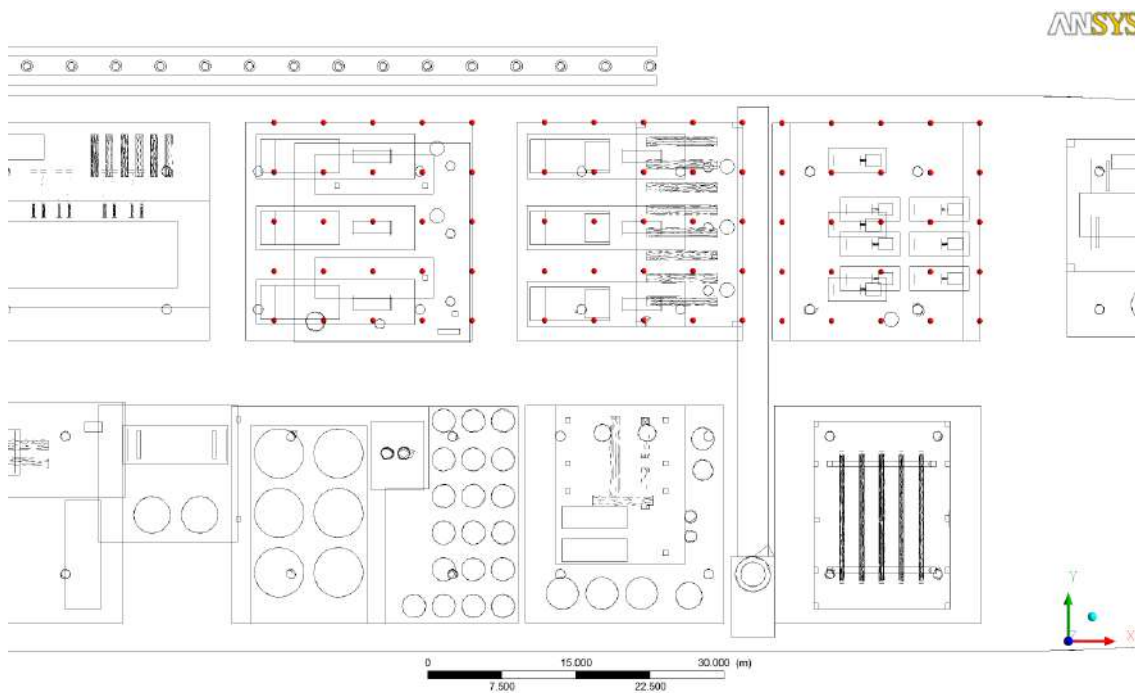


Figura 3.11 – Possíveis Pontos de Detecção

Este estudo terá como base parte da metodologia descrita por Fleck (2008), pois, esta engloba os conceitos definidos pelos outros autores. Serão avaliados os posicionamentos dos detectores que detectam o nível de alerta (20% do LII ou 1% volume ou fração volumétrica de 0,01), para cada cenário de vazamento. Como não foram consideradas todas as direções de vento para cada compressor, a Tabela 3.2 mostra que para compressores semelhantes, foram adotadas todas as direções de vento dividindo-as entre estes. Assim, diminui-se o número de cenários podendo-se extrapolar os resultados dos ventos para todos os compressores e estabelecer a malha

de detectores final. Cabe salientar que a consideração de resultados só é válida para equipamentos que possuam obstáculos posicionados de forma semelhante.

Assim sendo, a nuvem formada pela dispersão do C-01 com direção de vento para o Norte, serve de resultado para alocar detectores na área do compressor C-02, pois, estes possuem semelhança geométrica. A mesma consideração é adotada para as outras direções de vento. Cada *deck* terá uma disposição de detectores independente, ou seja, os vazamentos de um módulo não poderão ser detectados por outros módulos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de Sensibilidade de Malha

Na Tabela 4.1 são apresentadas as concentrações de hidrocarbonetos para a malha proposta inicialmente e seus diferentes níveis de adaptação. Esta tabela apresenta as coordenadas para 8 pontos de monitoramento distintos escolhidos aleatoriamente conforme item 3.2.4. Cabe salientar que os pontos de monitoramento são apenas para observação das concentrações e comparação entre as malhas, não configurando uma rede de detectores.

Avaliou-se a concentração de hidrocarbonetos nos pontos selecionados verificando-se a diferença da concentração entre as malhas. Definiu-se que a influência da malha não seria significativa quando a diferença dos valores entre as malhas mais refinadas e menos refinadas fosse menor ou igual a 10^{-3} . Pode-se perceber que as variações na concentração de hidrocarbonetos nas malhas 4 e 5 são suficientes para atender o critério. Adotou-se essa tolerância, pois, a concentração de detecção corresponde à fração molar igual a 0,01 (20% do LII para o metano). Pode-se expressar 1% do volume como 1% da fração molar no domínio, pois, adota-se o comportamento de gases ideais durante a dispersão, ou seja, a fração volumétrica de um componente é igual a fração molar deste mesmo componente a uma dada temperatura e pressão.

$$PVa = NaRT \quad (4.1)$$

$$PV = NRT \quad (4.2)$$

A divisão da Equação 4.1 pela Equação 4.2 confirma a afirmativa e é expressa na Equação 4.3.

$$\frac{Va}{V} = \frac{Na}{N} \quad (4.3)$$

onde:

R	Constante Universal dos Gases
T	Temperatura do Sistema
P	Pressão do Sistema
V	Volume Total
Va	Volume Ocupado pelo Componente "a"
N	Número de Moles Total
Na	Número de Moles do Componente "a"

Tabela 4.1 – Teste de Sensibilidade de Malha (Concentração de HC)

Coordenadas (m)			Concentração de HC (Fração Volumétrica)				
X	Y	Z	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4	Malha 5
192,4000	10,6835	13,9899	0,0836	0,0720	0,0768	0,0248	0,0264
192,1050	9,4316	14,0491	0,0958	0,1255	0,1090	0,0720	0,0737
192,6760	9,3556	13,7522	0,0770	0,0996	0,0945	0,0748	0,0760
190,1750	8,0000	13,4466	0,0210	0,0151	0,0198	0,0096	0,0122
192,3130	8,8394	13,0000	0,0469	0,0229	0,0381	0,0449	0,0469
191,6430	6,9968	14,0000	0,0319	0,0105	0,0022	0,0188	0,0177
192,7030	6,7980	13,5000	0,0574	0,0735	0,0618	0,0587	0,0588
191,9070	3,9708	13,0000	0,0466	0,0515	0,0206	0,0406	0,0411

A Tabela 4.2 apresenta o desvio absoluto nos valores de concentração molar das Malhas 1, 2, 3 e 4 em relação à malha idealizada, ou seja, Malha 5. Os testes de sensibilidade de malha foram aplicados para o Cenário1 conforme Tabela 3.2.

Tabela 4.2 – Desvios absolutos nos Valores de Concentração Molar nos Pontos de Monitoramento em Relação à Malha 5

Pontos Observáveis	Desvio Malha 1	Desvio Malha 2	Desvio Malha 3	Desvio Malha 4
Ponto 1	0,0572	0,0456	0,0504	0,0016
Ponto 2	0,0221	0,0518	0,0353	0,0017
Ponto 3	0,0010	0,0236	0,0185	0,0012
Ponto 4	0,0088	0,0029	0,0076	0,0026
Ponto 5	0,0000	0,0240	0,0088	0,0020
Ponto 6	0,0142	0,0072	0,0155	0,0011
Ponto 7	0,0014	0,0147	0,0030	0,0001
Ponto 8	0,0055	0,0104	0,0205	0,0005

A Figura 4.1 apresenta um gráfico de concentração x comprimento por meio de uma linha passando pelos pontos (192,10 , 12,90 , 13,75) e (192,10 , -20,00 , 13,75) no interior das dispersões gasosas. Pode-se observar que não ocorrem desvios brutos entre as malhas, porém, para a tolerância desejada, observa-se que as Malhas 4 e 5 são as que possuem os menores desvios na concentração de detecção.

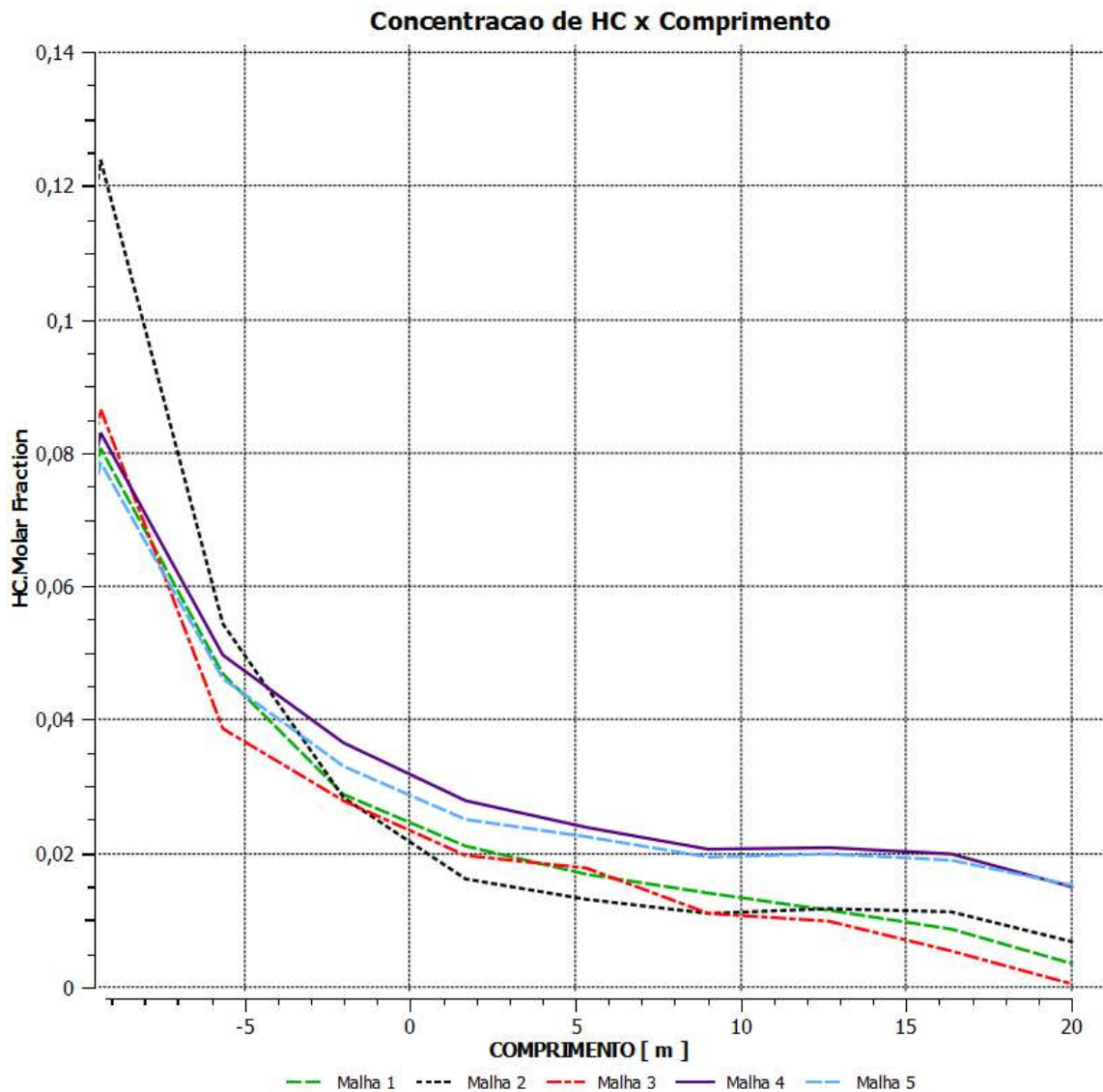


Figura 4.1 – Concentração de HC ao Longo de uma Linha no Interior das Dispersões Gasosas

Conclui-se que a Malha 4 representa o nível no qual os resultados são satisfatórios para a análise. Assim sendo, definiu-se 3 níveis de adaptação de malha com número máximo de nós igual a 1.400.000.

A Figura 4.2 e Figura 4.3 apresentam as dispersões para a concentração de detecção igual a 20% do LII (fração molar igual a 0,01) nas malhas com menor e maior refinamento. Nelas, observa-se a suavização dos resultados da malha grosseira para a malha refinada no processo adaptativo.

A Figura apresenta a diferença no refinamento das malhas estudadas.

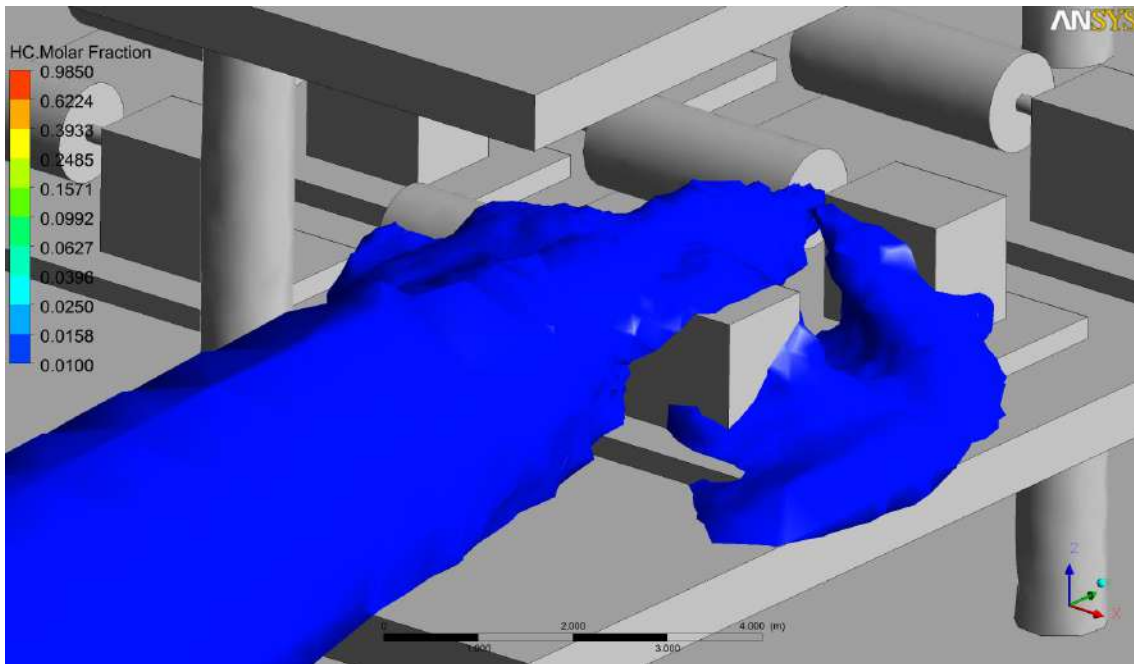


Figura 4.2 – Isosuperfície da Dispersão com Fração Molar igual a 0,01 na Malha 1

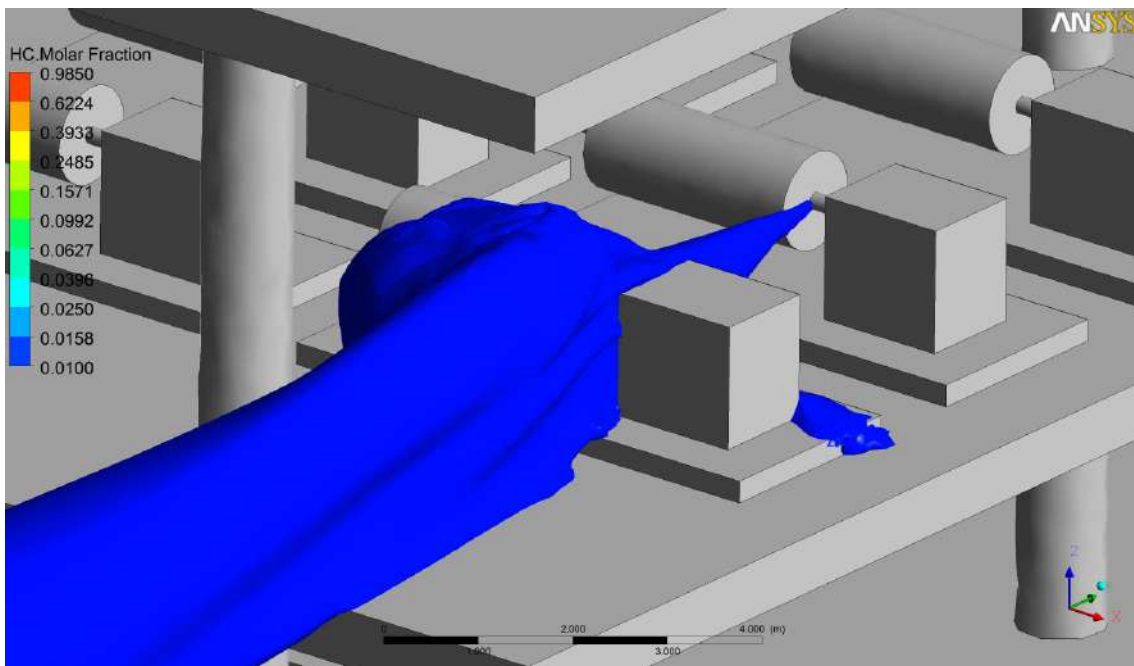


Figura 4.3 – Isosuperfície da Dispersão com Fração Molar igual a 0,01 na Malha 5

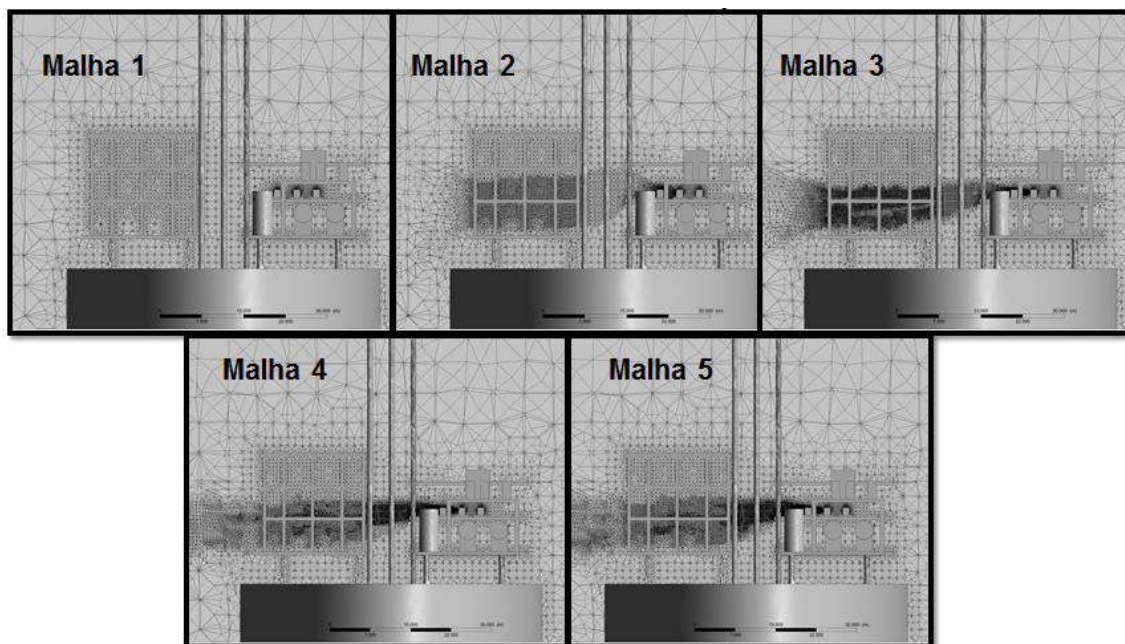


Figura 4.4 – Plano de corte apresentando o refinamento ao longo da pluma de HC nas malhas estudadas.

4.2 Vazamento nos Compressores dos Módulos do FPSO

Os compressores do sistema de compressão, exportação e injeção de gás C-01, C-02, C-03 e C-04 foram os pontos de vazamento para a realização do estudo de dispersão de gases em plataformas *offshore*.

Realizando as simulações listadas na Tabela 3.2, espera-se obter dados suficientes para aplicação da metodologia proposta para alocação dos detectores de gás na unidade de processo.

Os resultados serão apresentados em função dos pontos de vazamento, separados pelas direções de vazamento e pelas direções de vento.

Serão apresentados os campos de escoamento do vento nas formas de linhas de corrente e vetores velocidade, sendo possível, portanto, visualizar os caminhos percorridos pela corrente de ar na unidade, assim como pontos de recirculações, caminhos preferenciais e regiões de estagnação de ar, que podem colocar em risco à integridade das instalações e das pessoas.

Os resultados das dispersões de gás natural vazado são apresentados também sob duas formas de visualização, de modo a facilitar a análise dos riscos inerentes ao vazamento. Na primeira maneira são apresentadas as vistas superior e lateral das plumas formadas após o vazamento, para observar o espalhamento e a altura atingida pelas mesmas, respectivamente. Duas plumas são apresentadas na forma de

isosuperfícies, nas concentrações (frações volumétricas) de gás referentes ao limite de detectabilidade dos sensores comerciais, gerando o chamado volume detectável, e quando necessário referente aos limites inferior e superior de explosividade, nomeado de volume inflamável ou explosivo, ou seja, respectivamente, iguais a 0,01 e entre 0,05 e 0,15. Outra forma de apresentação é constituída por planos que possuem superfícies de contorno com variação de coloração em função da fração volumétrica do gás, ou seja, cortes vertical e/ou horizontal das nuvens, no ponto de origem do vazamento, para visualizar as áreas cuja concentração de gás encontra-se entre 5 e 15 %.

4.2.1 Compressor C-01 com Vento na Direção Norte

O campo de escoamento do vento na direção Norte, com velocidade de 3.5 m/s, ao longo do domínio da unidade é apresentado na Figura 4.5 nas formas de linhas de corrente e na Figura 4.6, Figura 4.9 e Figura 4.12 na forma de vetores velocidade, já influenciado pelo vazamento de gás no compressor C-01.

A Figura 4.7, Figura 4.10 e Figura 4.13 apresentam a isosuperfície de 20% do LII e a Figura 4.8, Figura 4.11 e Figura 4.14 a vista em corte do contorno da concentração de hidrocarbonetos (0,01 a 0,9850 de fração volumétrica) formados pelo escoamento do gás proveniente do compressor C-01 com respectivas direções de vazamento.

A Figura 4.15 apresenta, no caso do vazamento para baixo, as vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol.

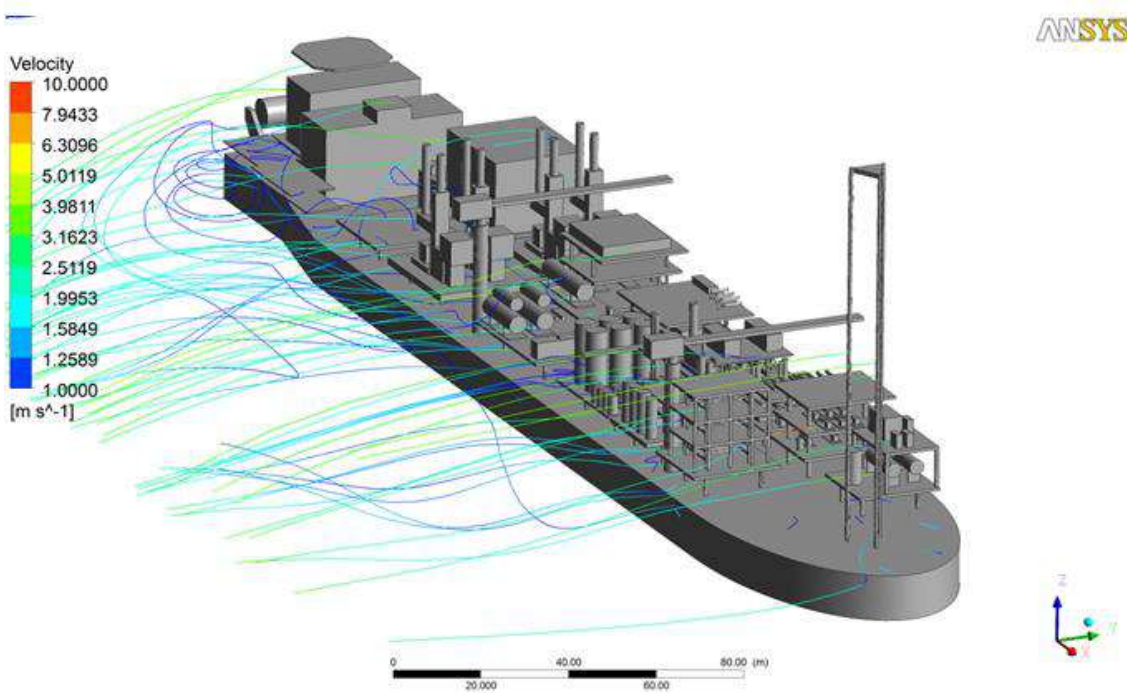
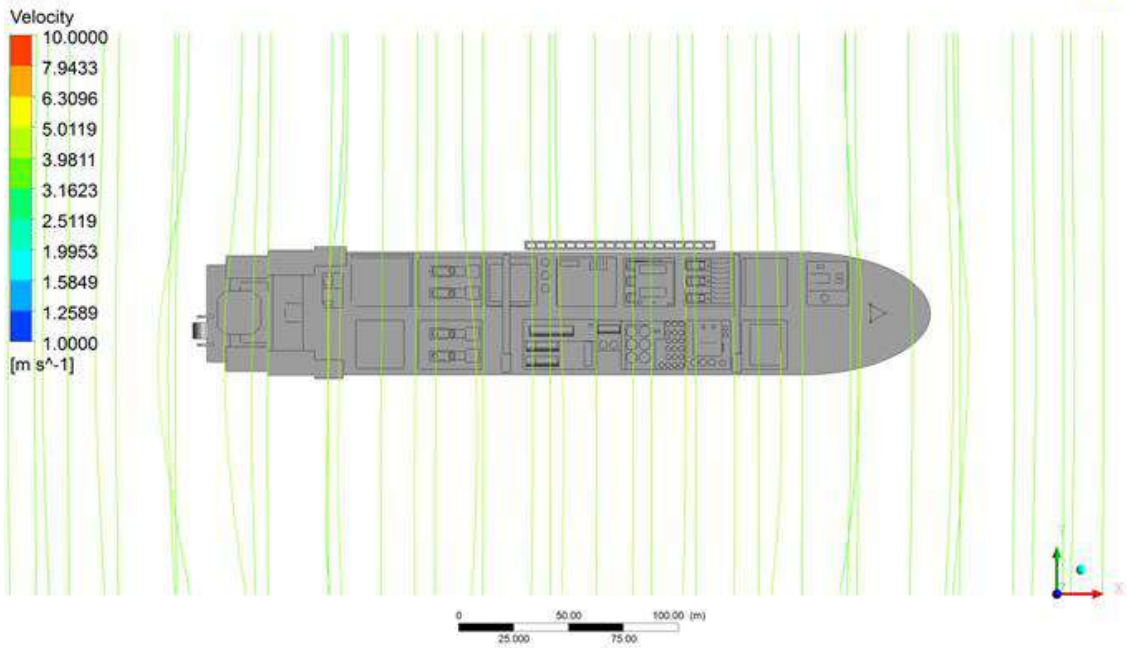


Figura 4.5 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Norte na Forma de Linhas de Corrente

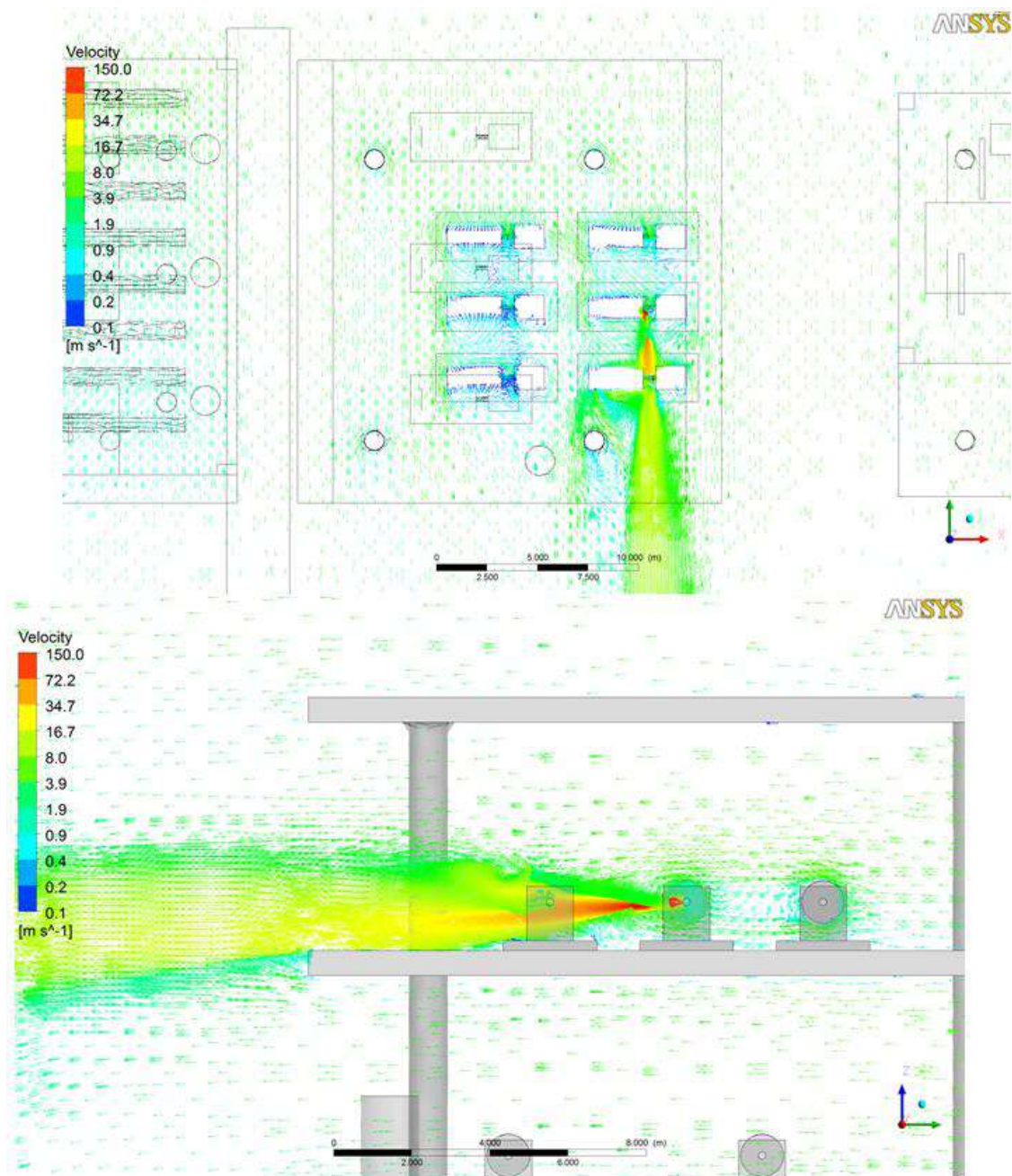


Figura 4.6 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte

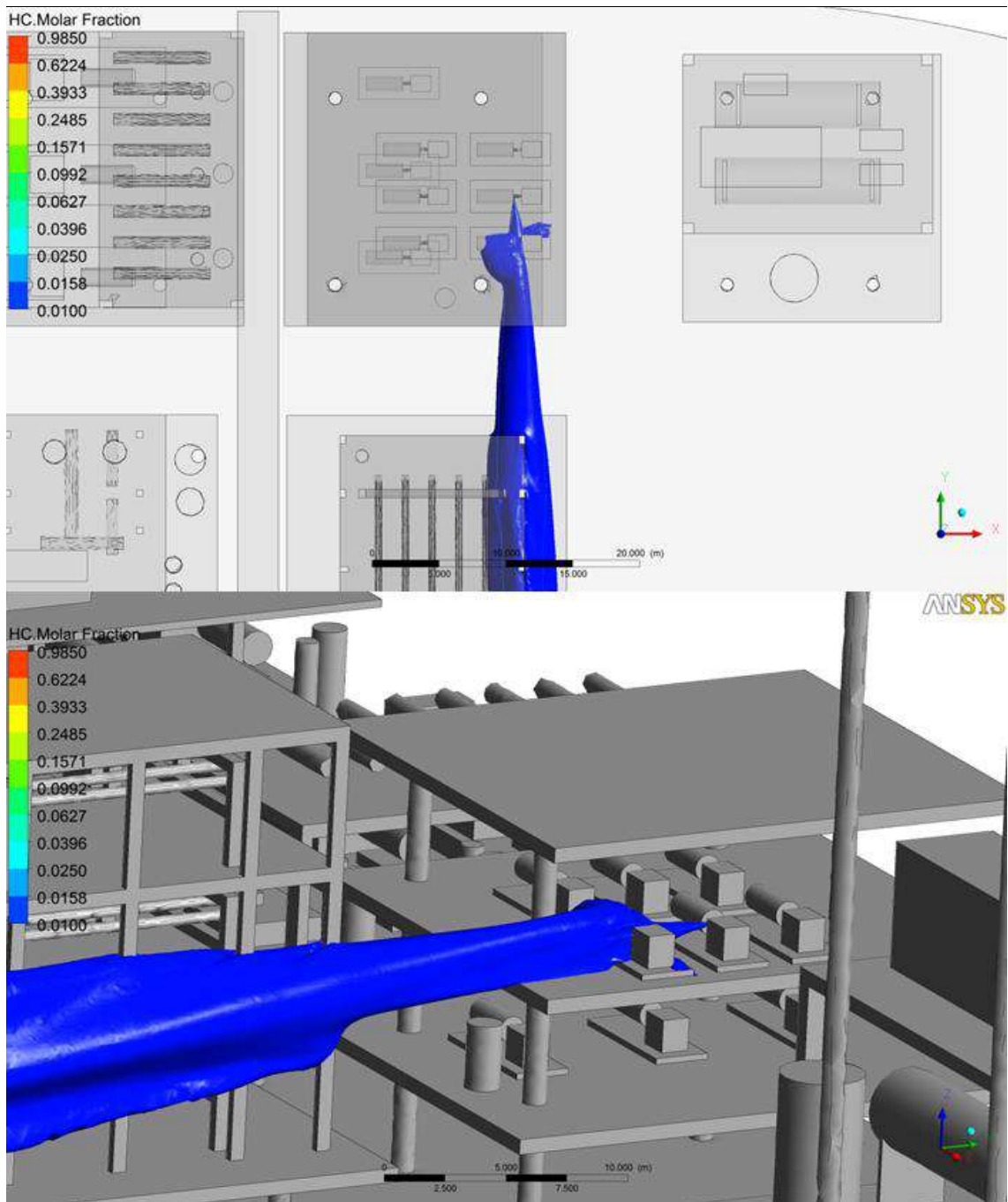


Figura 4.7 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte

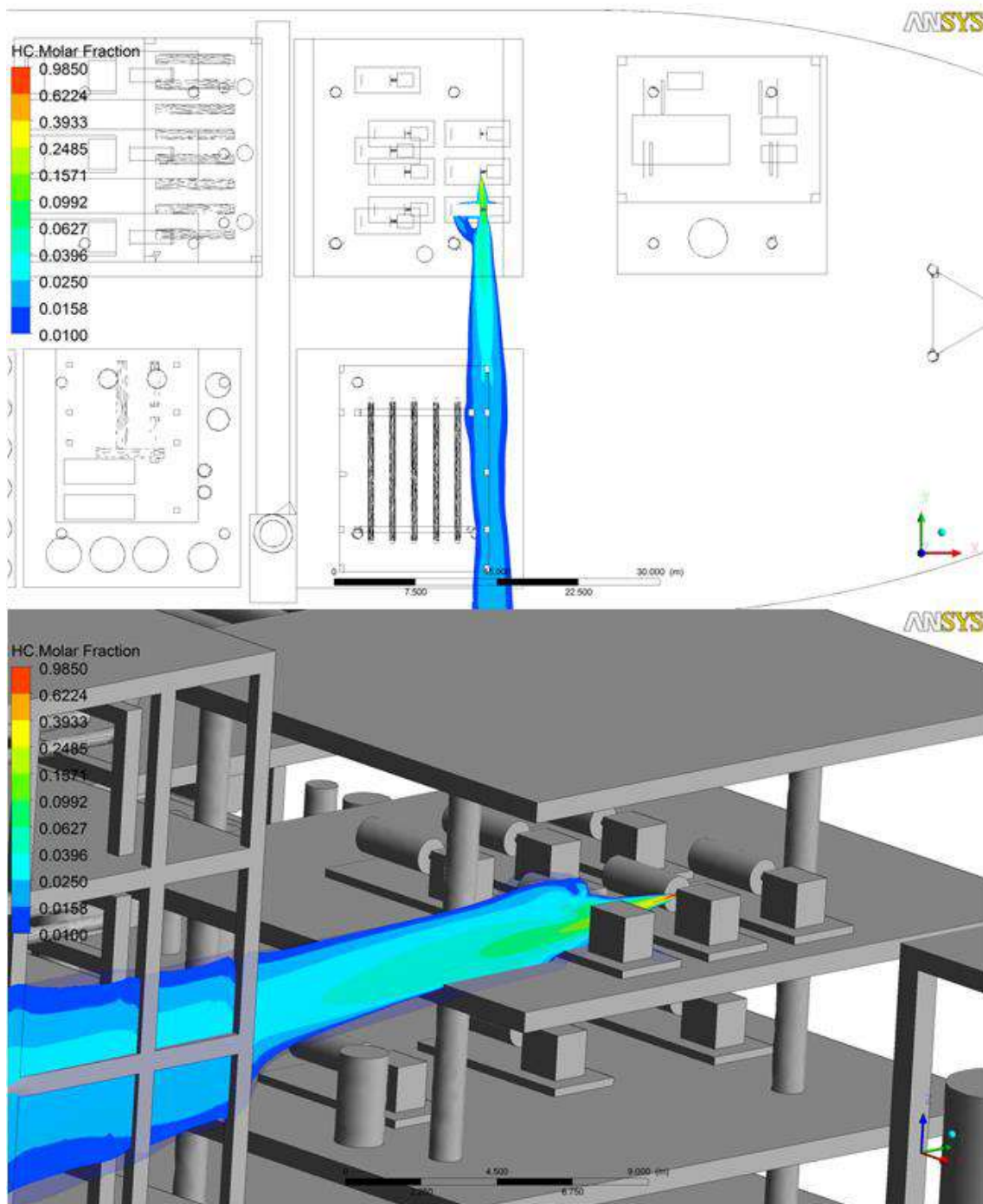


Figura 4.8 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Sul e Vento Norte

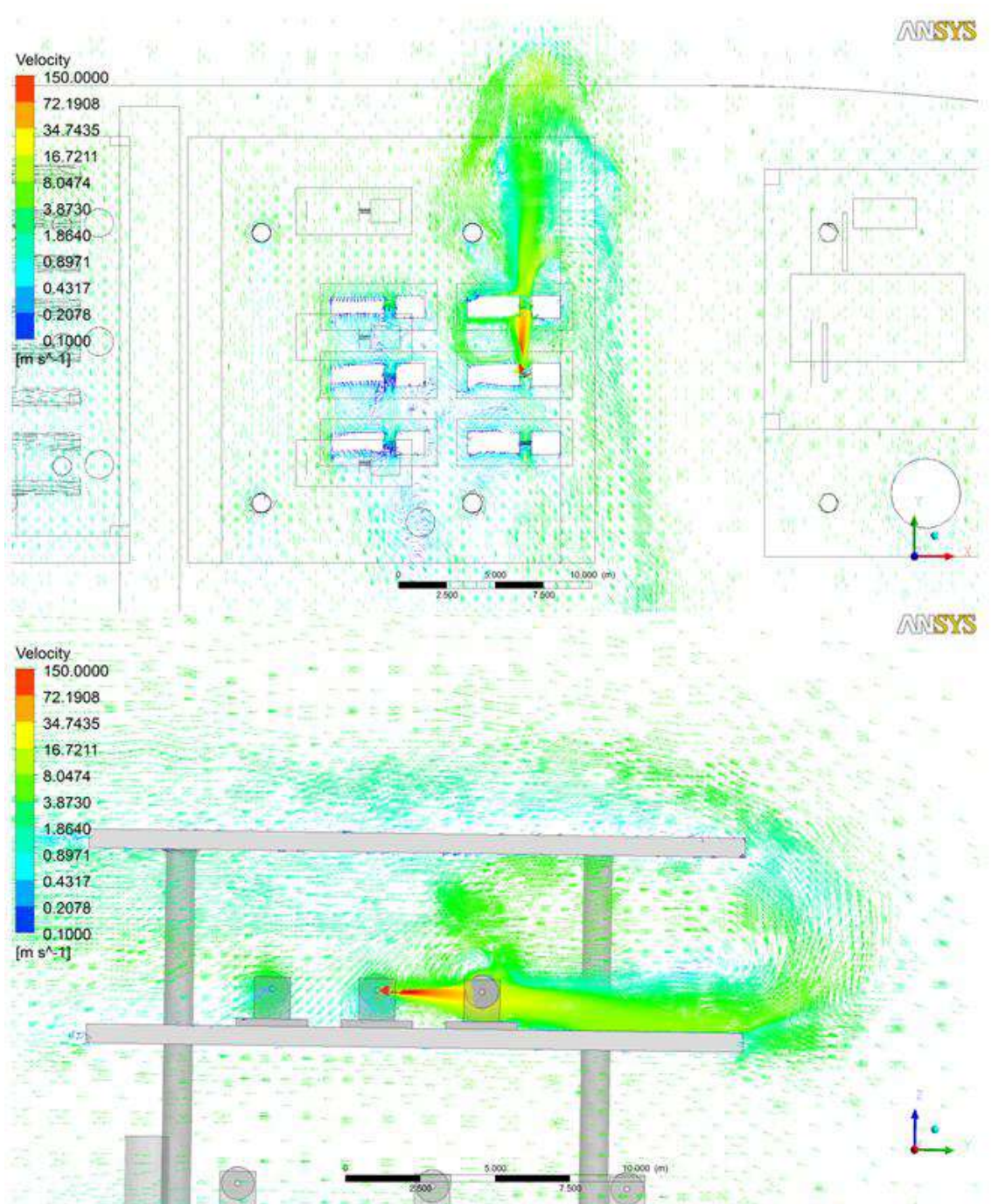


Figura 4.9 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte

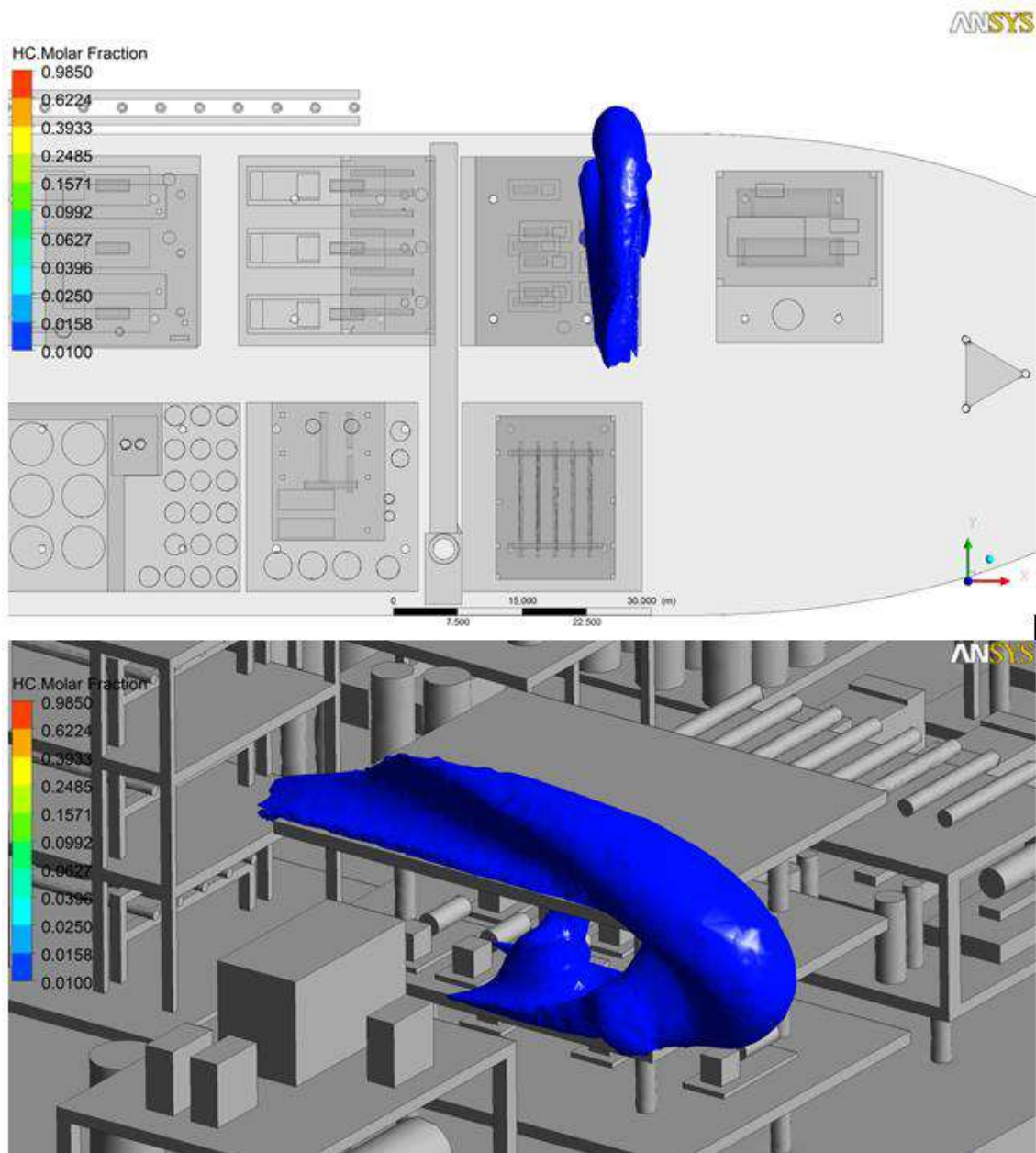


Figura 4.10 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte



Figura 4.11– Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para o Norte e Vento Norte

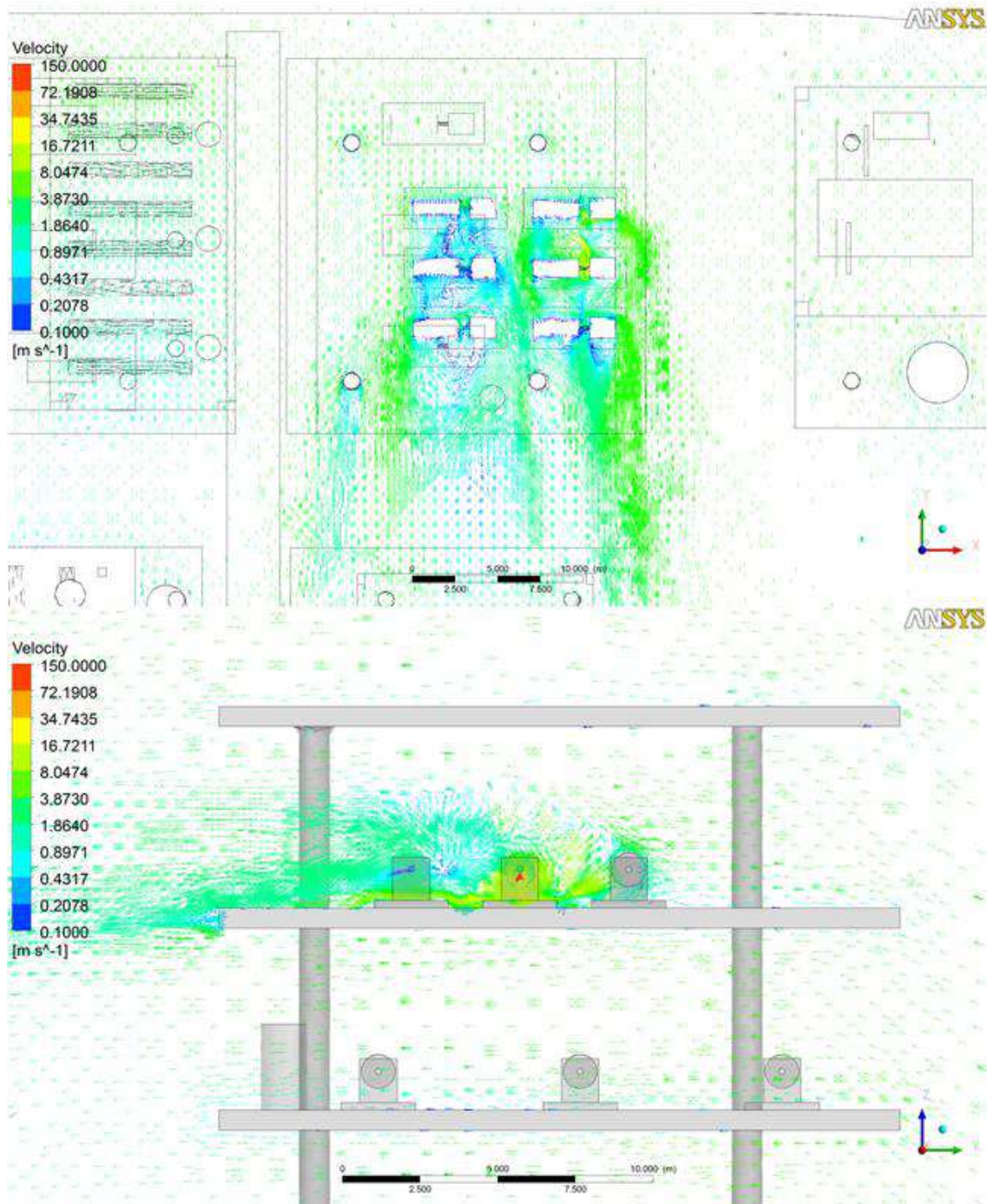


Figura 4.12 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte

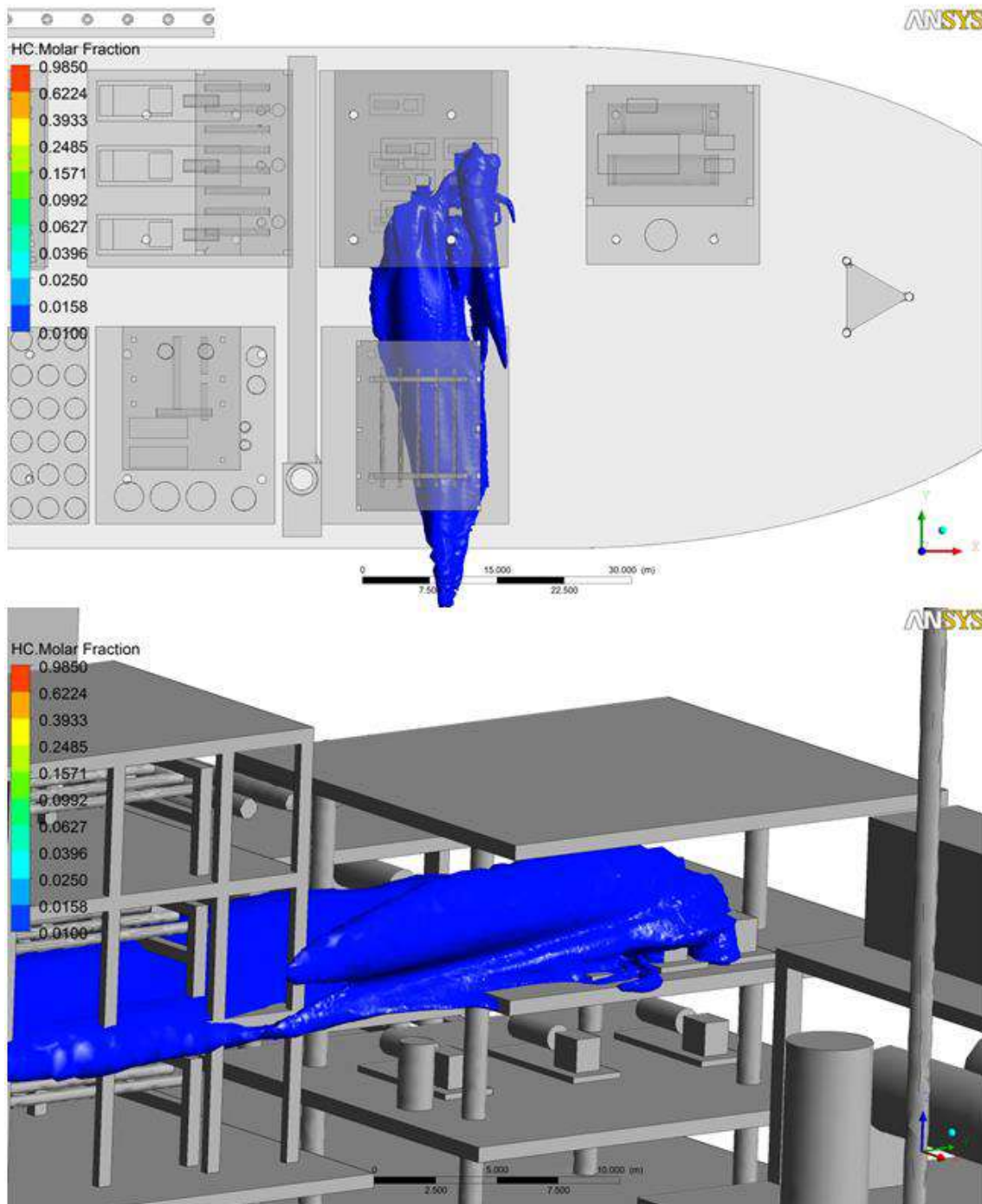


Figura 4.13 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte

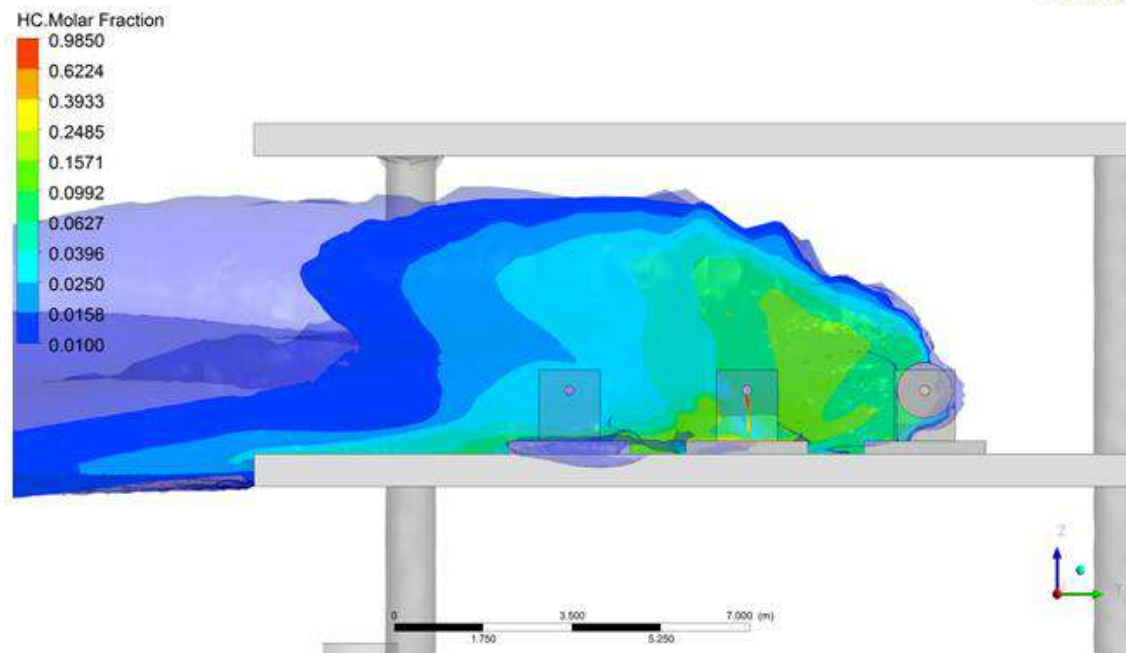
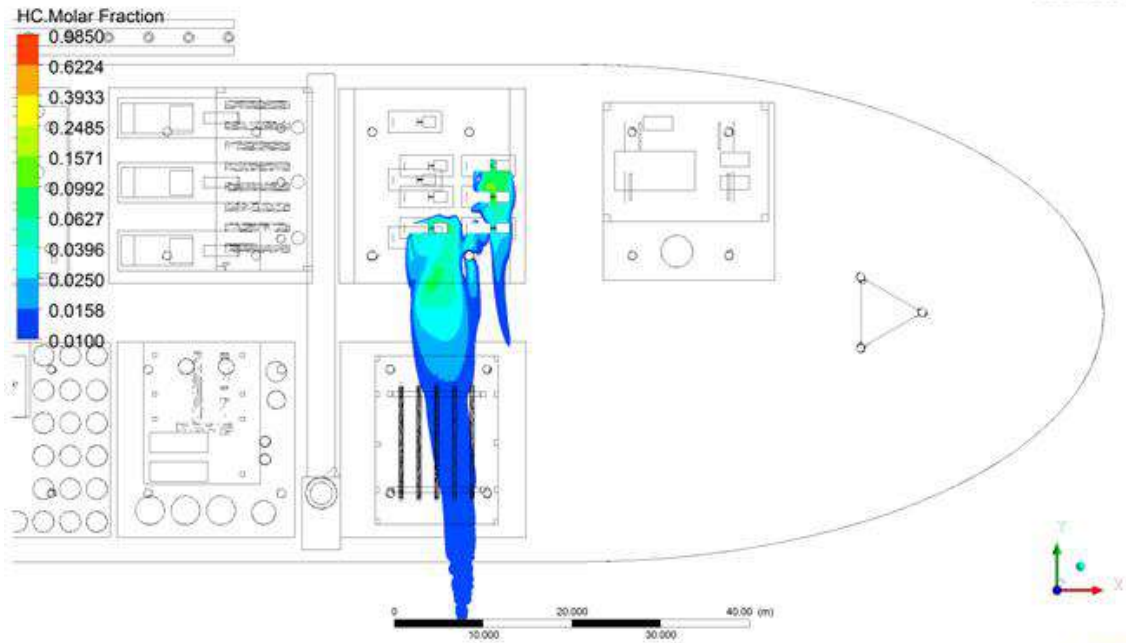


Figura 4.14 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-01 com Direção de Jato para Baixo e Vento Norte

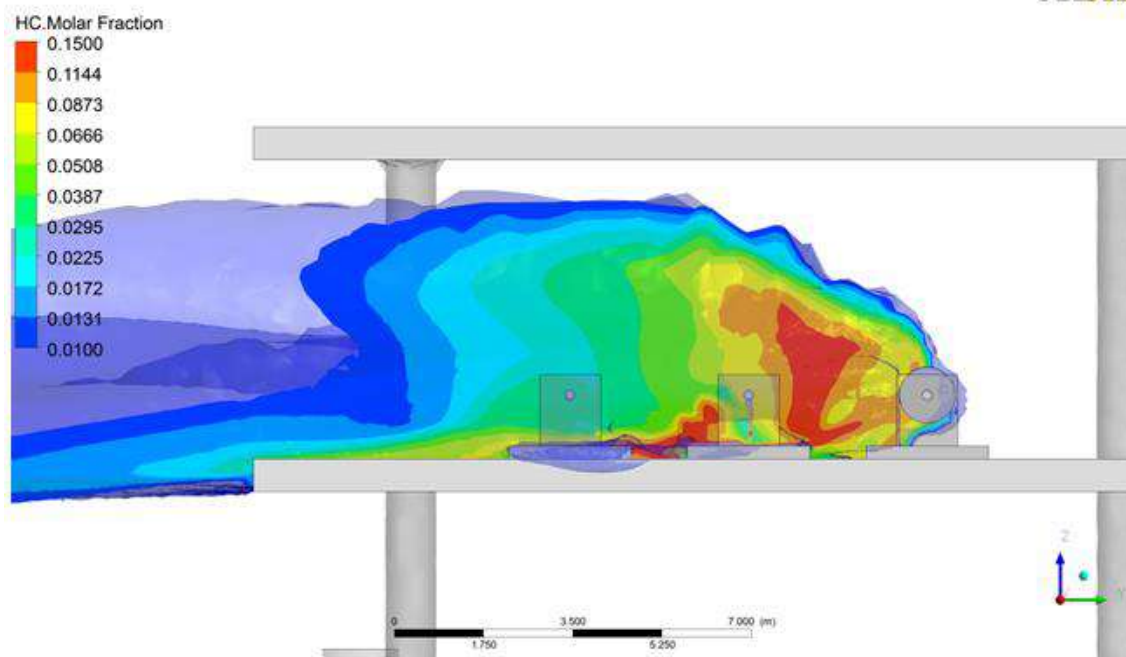
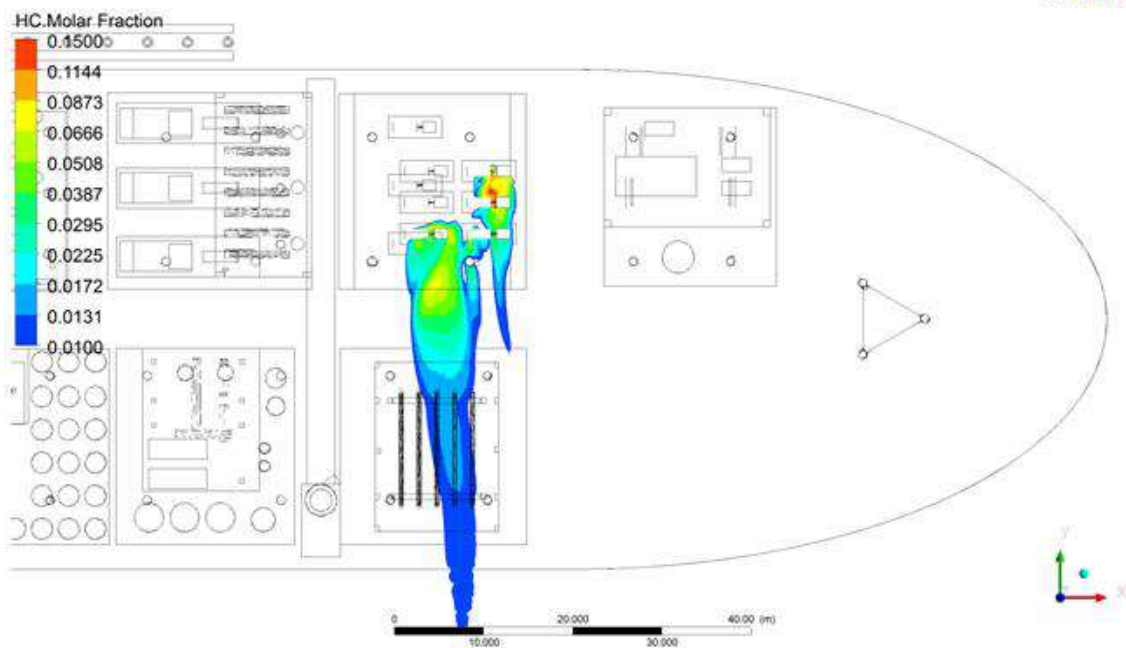


Figura 4.15 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade(5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Norte

4.2.2 Compressor C-02 com Vento na Direção Oeste

O campo de escoamento do vento na direção Oeste, com velocidade de 2.5 m/s, ao longo do domínio da unidade é apresentado na Figura 4.16 nas formas de linhas de corrente e na Figura 4.17, Figura 4.20 e Figura 4.23 na forma de vetores velocidade, já influenciado pelo vazamento de gás no compressor C-02.

A Figura 4.18, Figura 4.21 e Figura 4.24 apresentam a isosuperfície de 20% do LII e a Figura 4.19, Figura 4.22e Figura 4.25 a vista em corte do contorno da concentração de hidrocarbonetos (0,01 a 0,9850 de fração volumétrica) formados pelo escoamento do gás proveniente do compressor C-02 com respectivas direções de vazamento.

A Figura 4.26 apresenta, no caso do vazamento para baixo, as vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol.

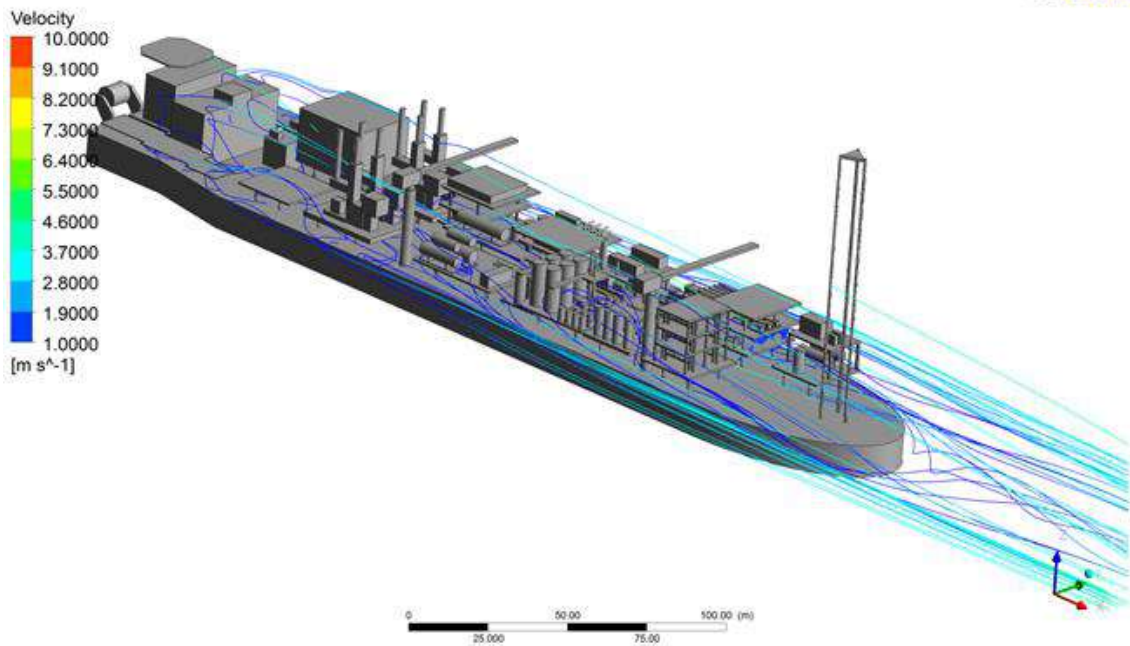
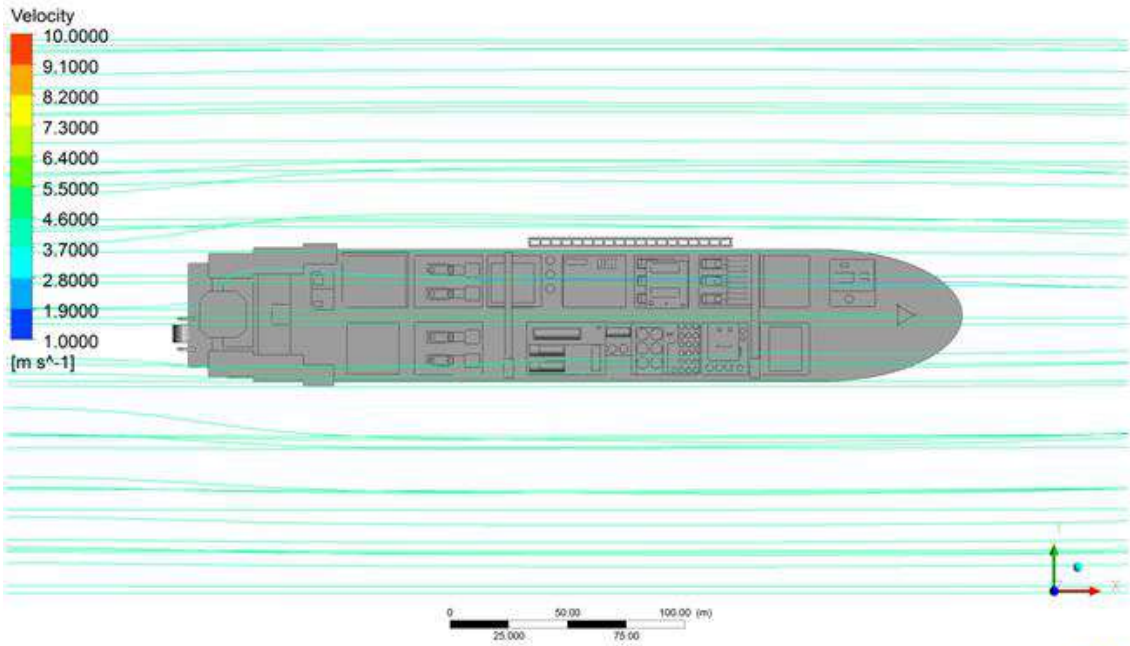


Figura 4.16 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Oeste na Forma de Linhas de Corrente

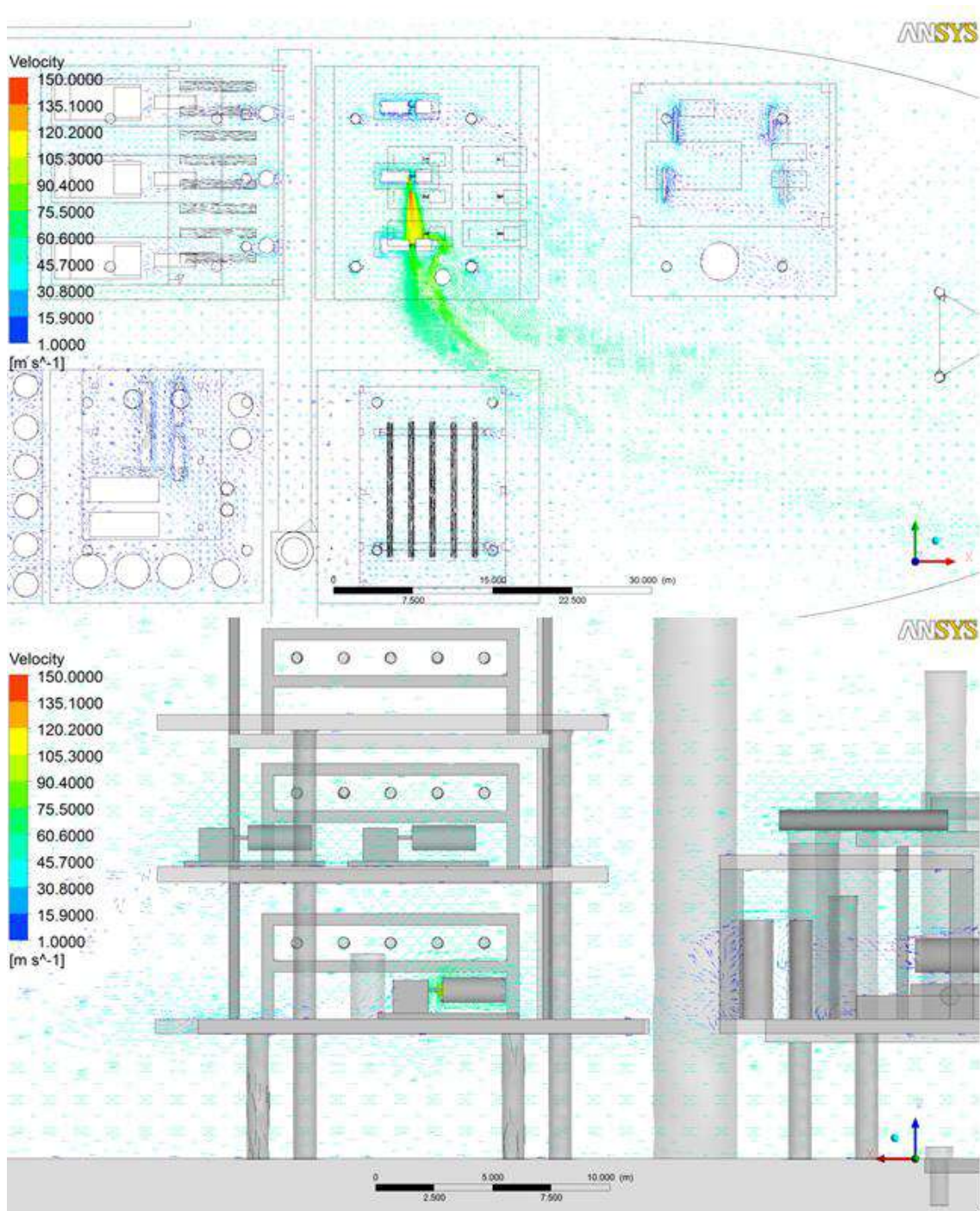


Figura 4.17 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste

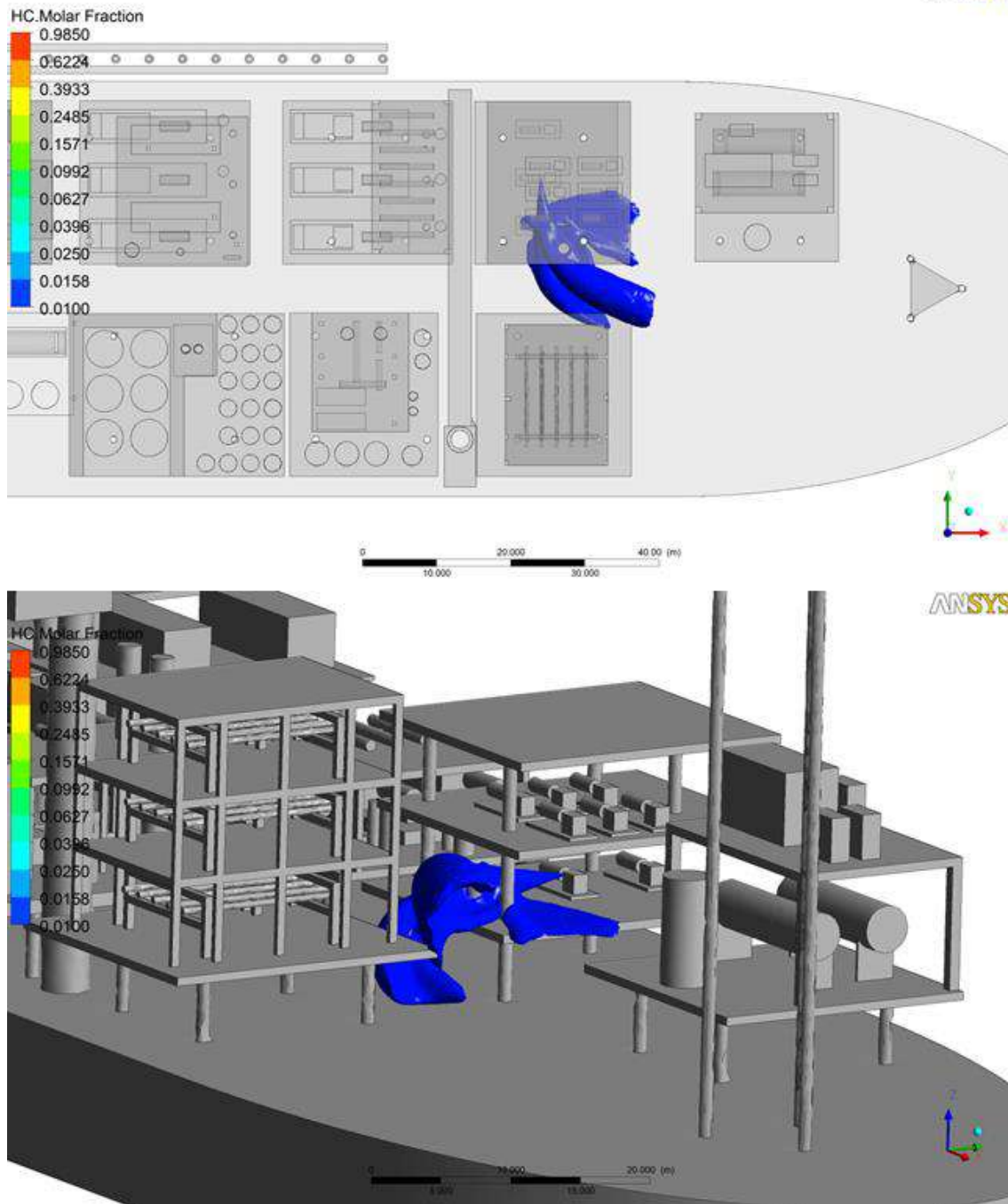


Figura 4.18 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste

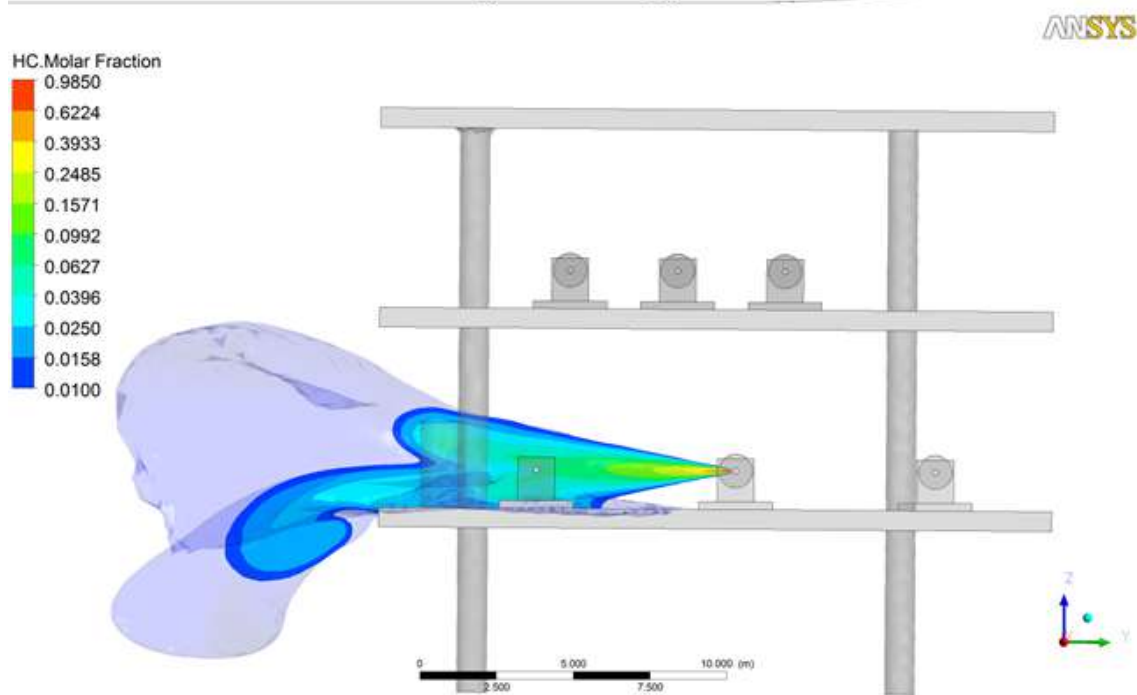
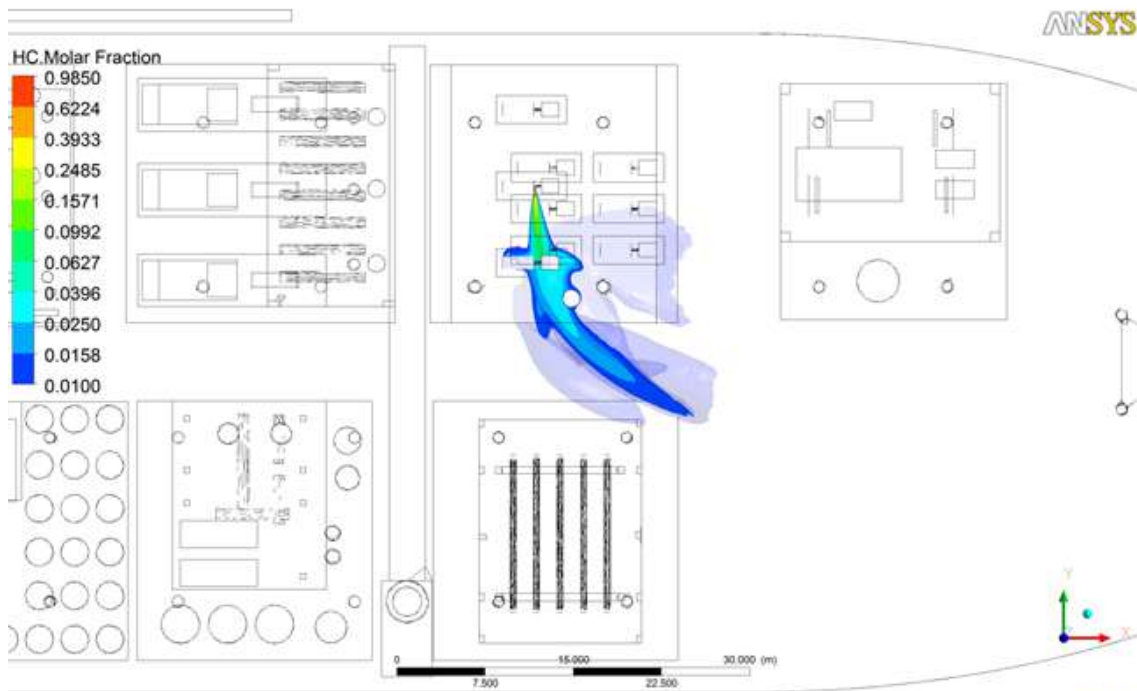


Figura 4.19 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Sul e Vento Oeste

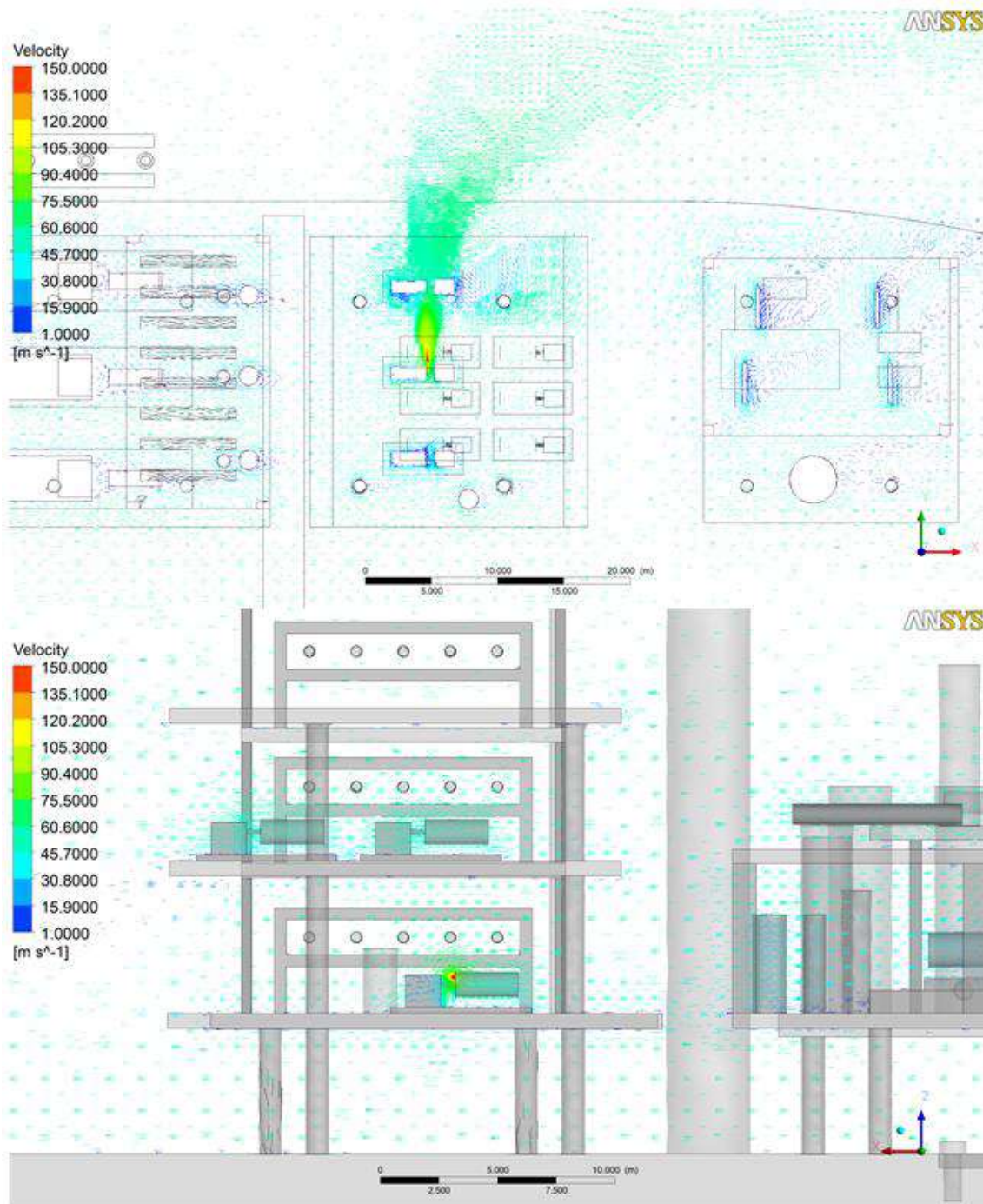


Figura 4.20 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste

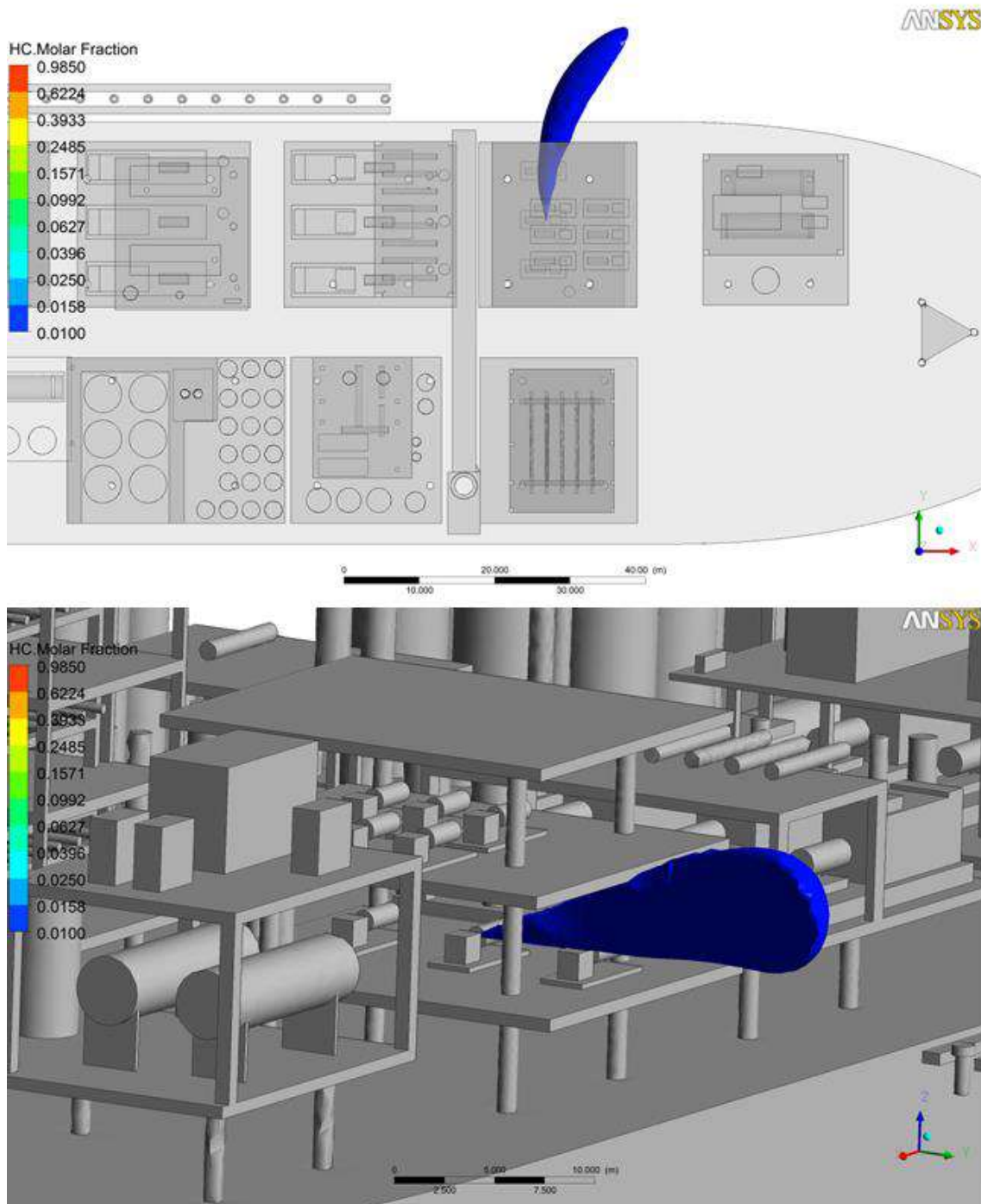


Figura 4.21 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste

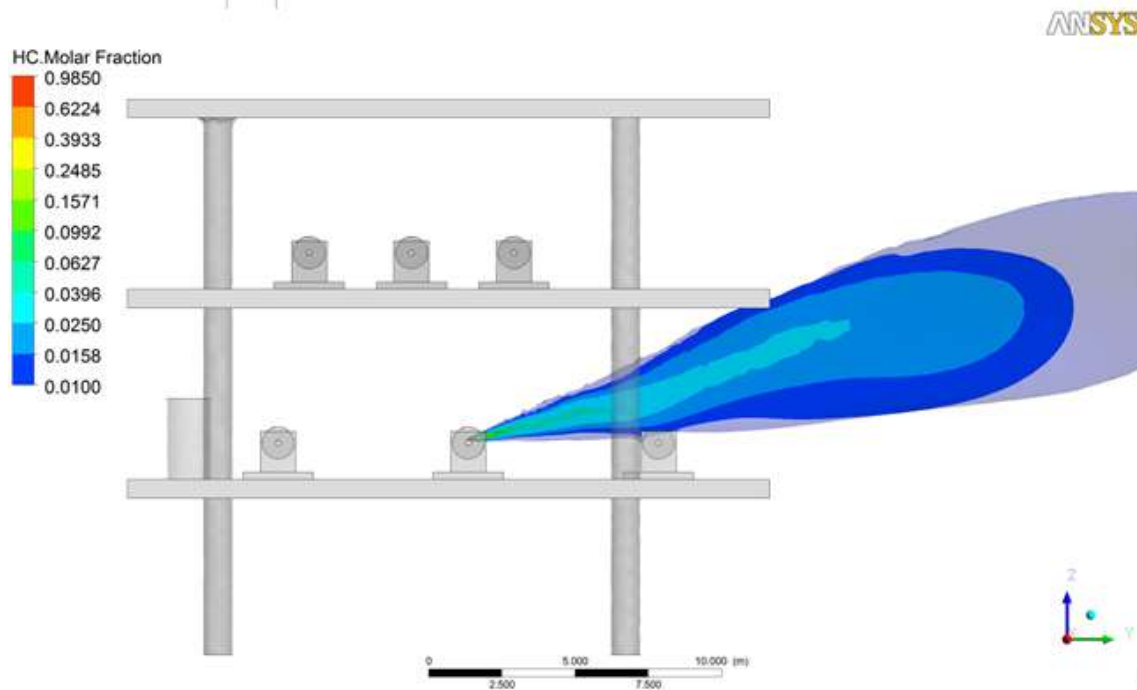
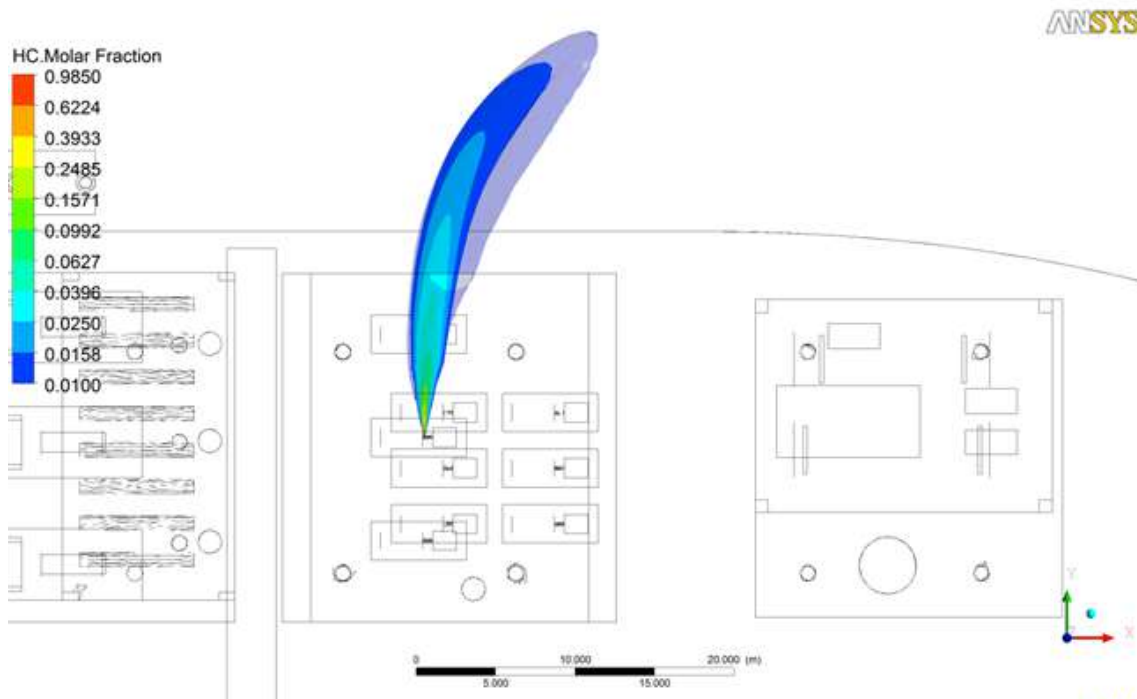


Figura 4.22 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para o Norte e Vento Oeste

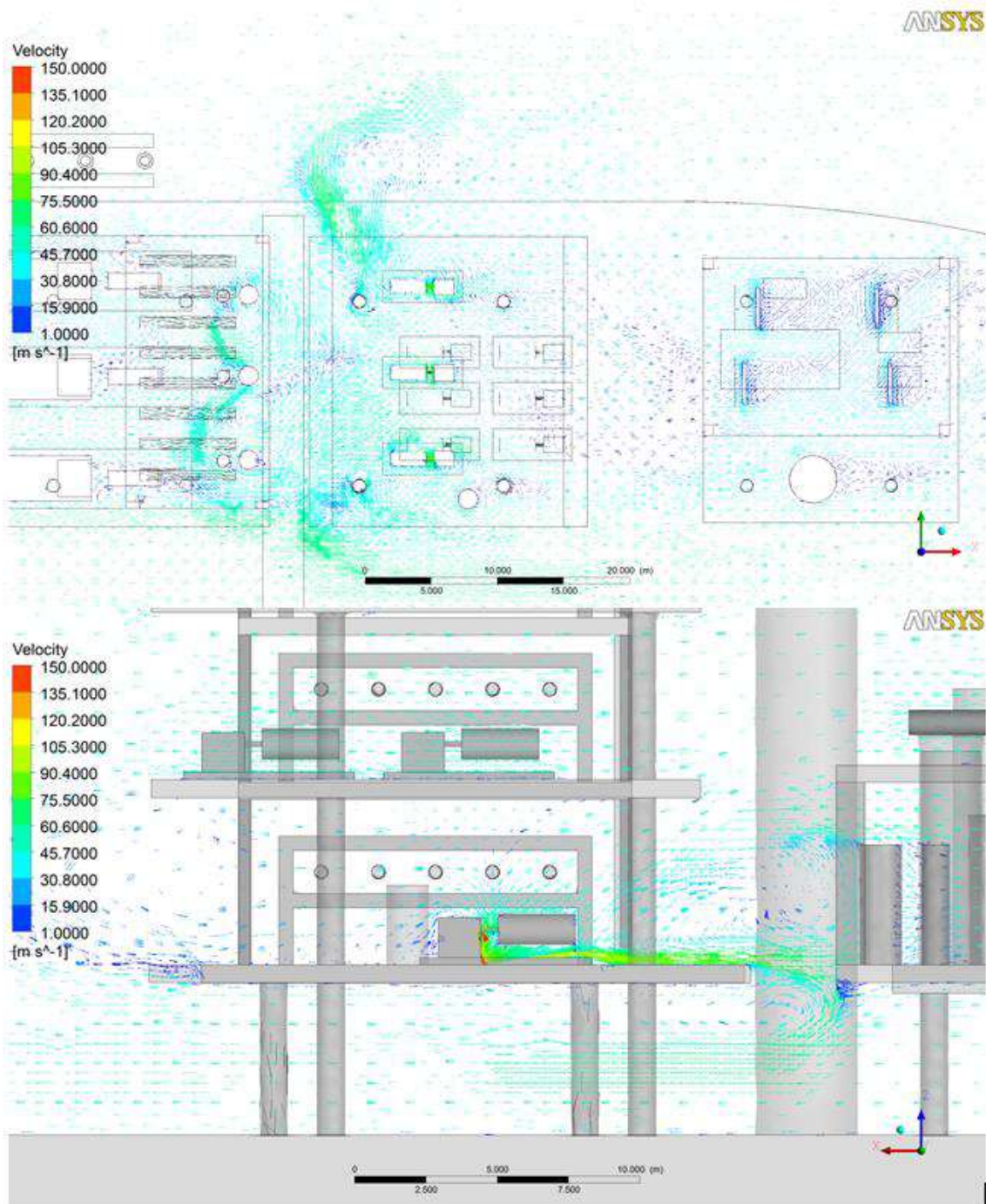


Figura 4.23 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste

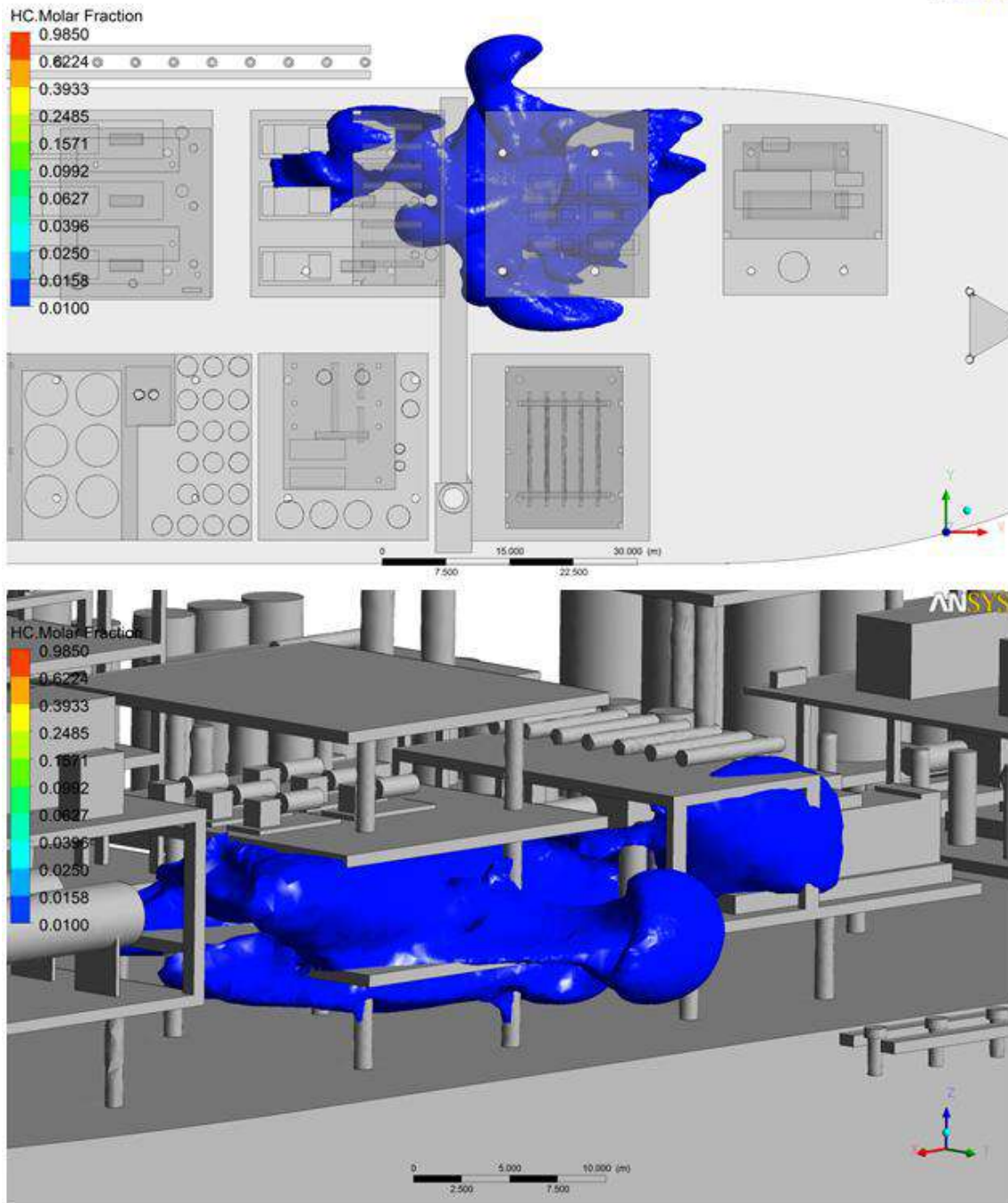


Figura 4.24 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste

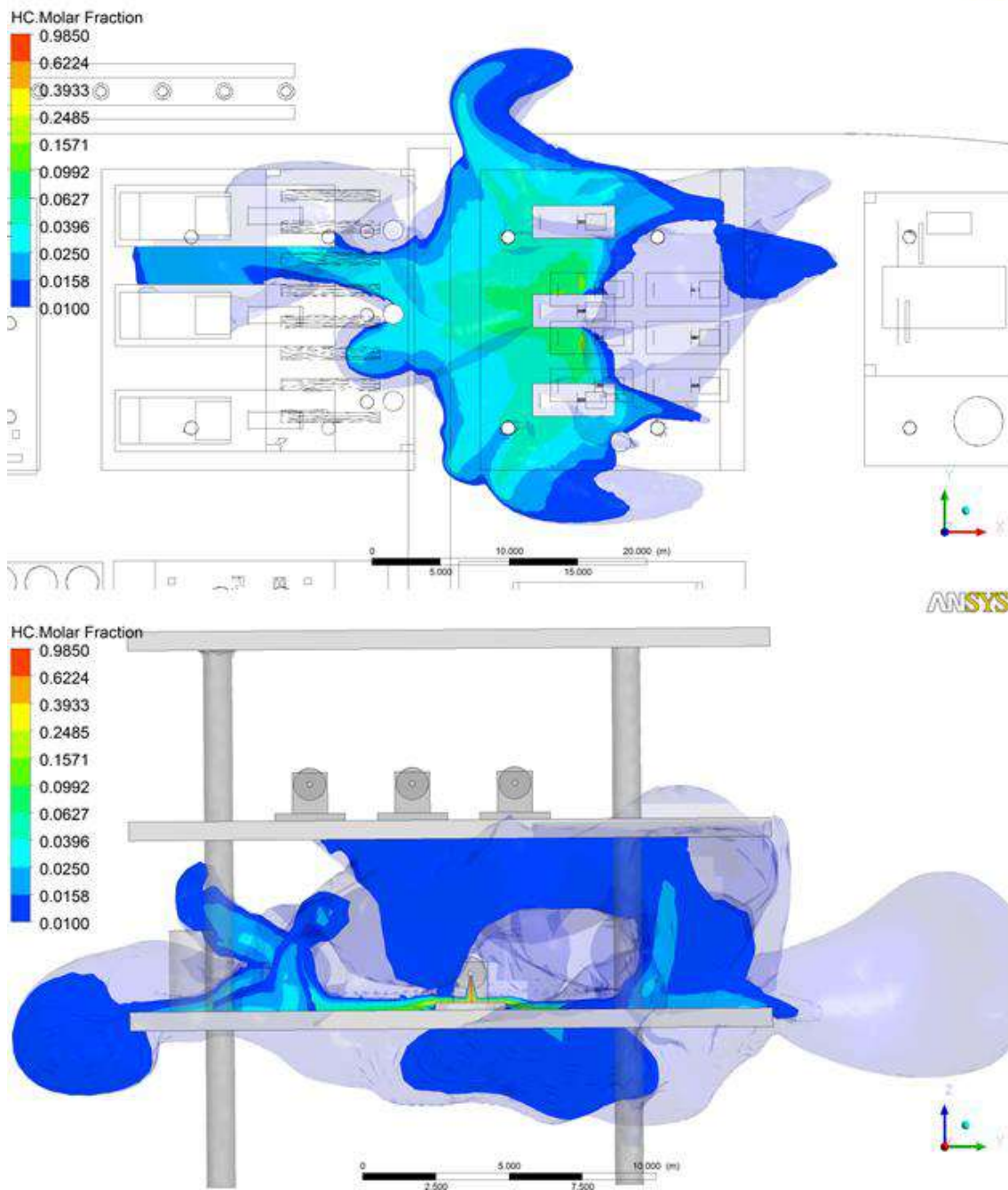


Figura 4.25 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-02 com Direção de Jato para Baixo e Vento Oeste

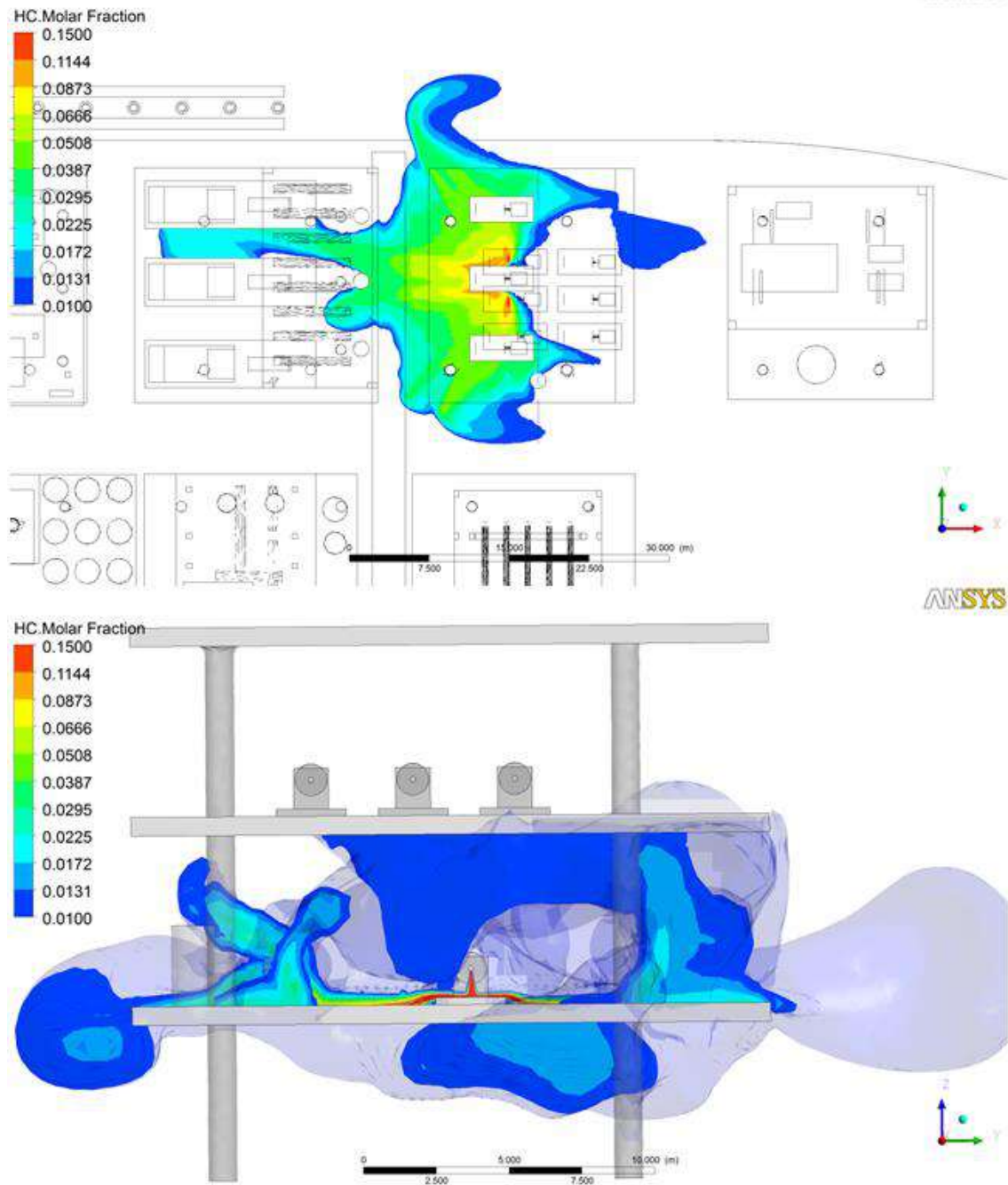


Figura 4.26 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade(5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Oeste

4.2.3 Compressor C-03 com Vento na Direção Noroeste

O campo de escoamento do vento na direção Oeste, com velocidade de 2.5 m/s, ao longo do domínio da unidade é apresentado na Figura 4.27 nas formas de linhas de corrente e na Figura 4.28, Figura 4.31 e Figura 4.34 na forma de vetores velocidade, já influenciado pelo vazamento de gás no compressor C-03.

A Figura 4.29, Figura 4.32 e Figura 4.35 apresentam a isosuperfície de 20% do LII e a Figura 4.30, Figura 4.33 e Figura 4.36 a vista em corte do contorno da concentração de hidrocarbonetos (0,01 a 0,9850 de fração volumétrica) formados pelo escoamento do gás proveniente do compressor C-03 com respectivas direções de vazamento.

A Figura 4.37 apresenta, no caso do vazamento para baixo, as vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol.

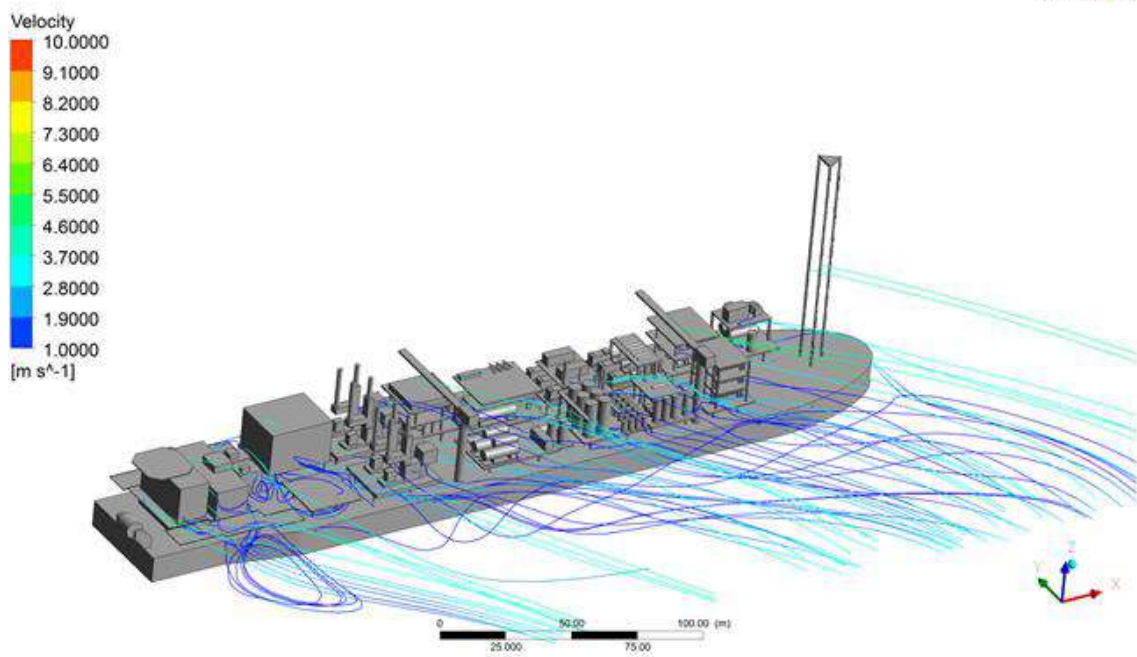
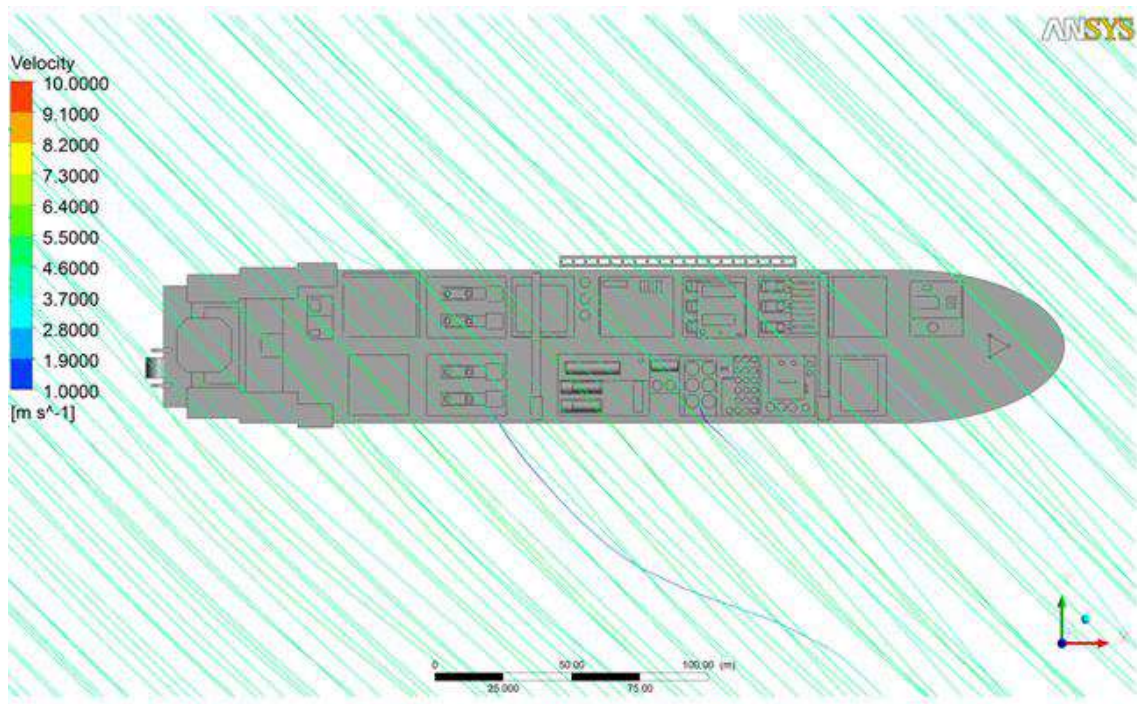


Figura 4.27 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Noroeste na Forma de Linhas de Corrente

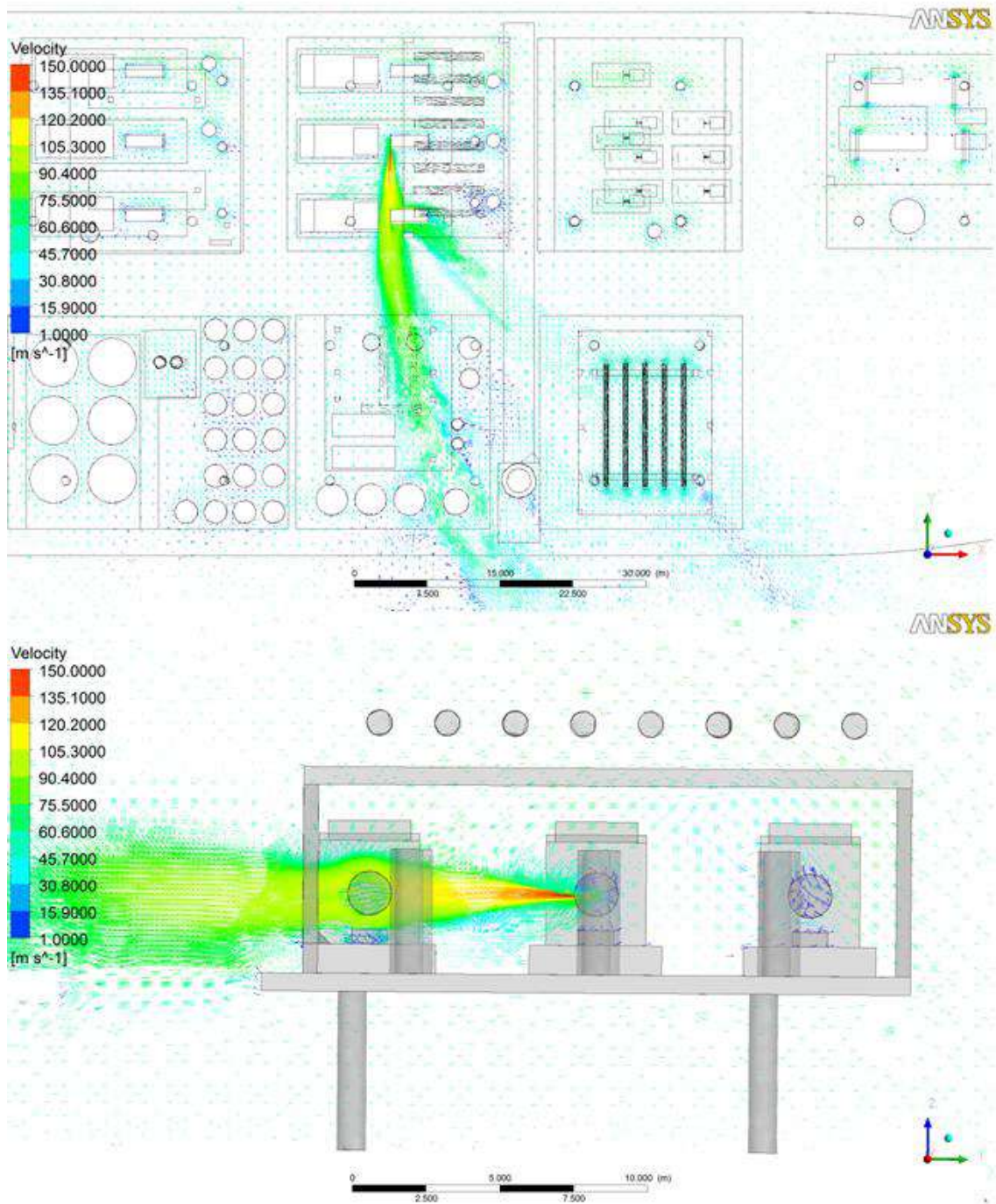


Figura 4.28 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste

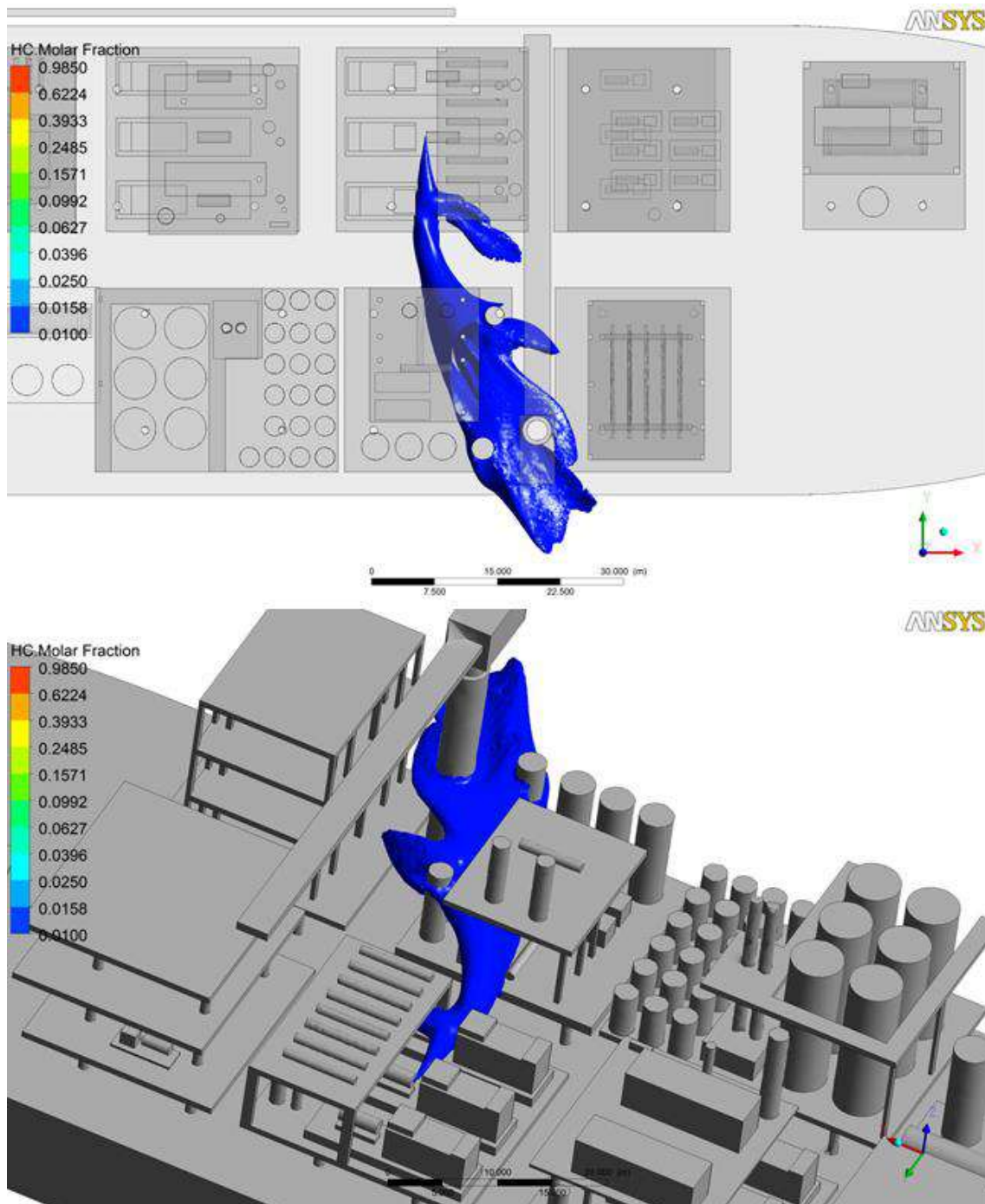


Figura 4.29– Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste

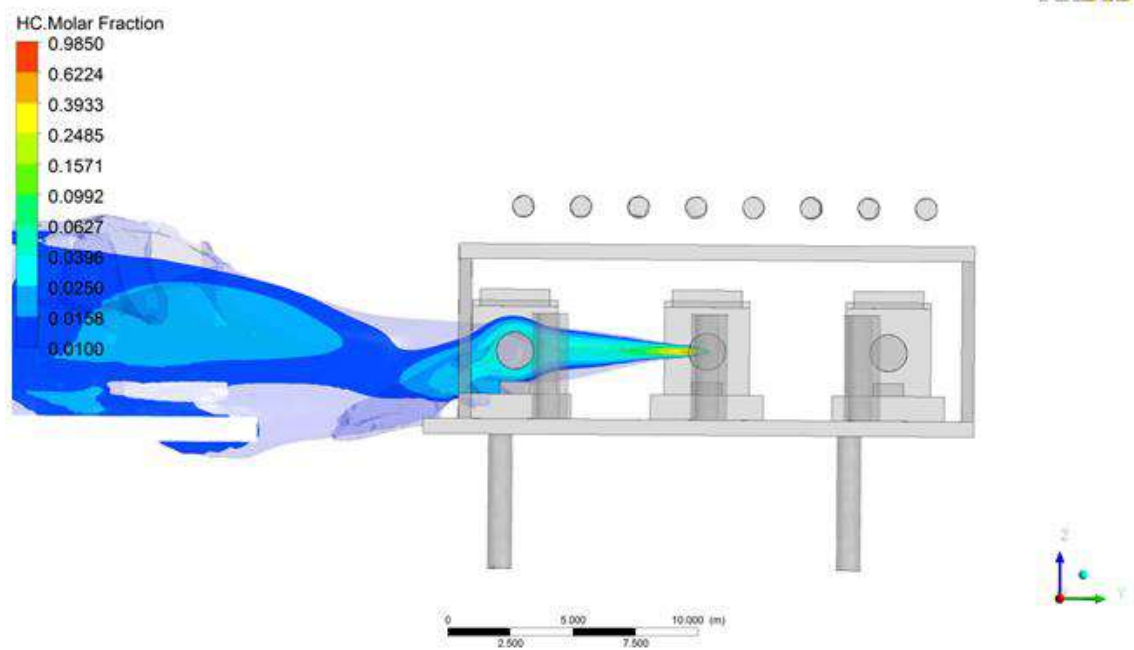
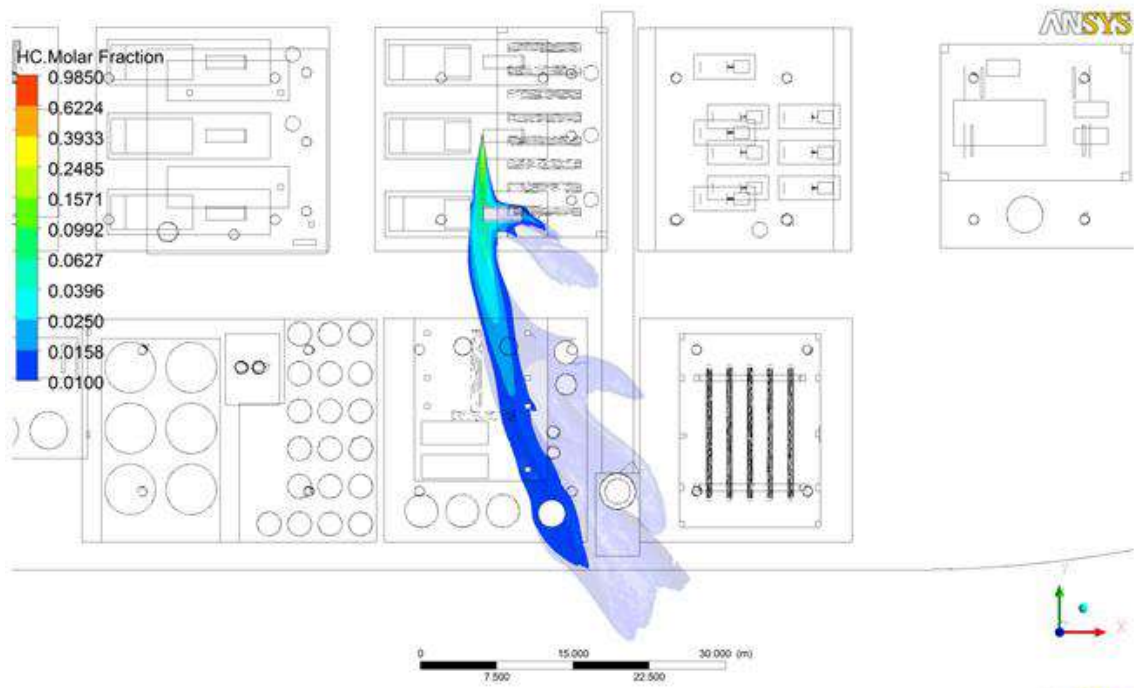


Figura 4.30 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Sul e Vento Noroeste

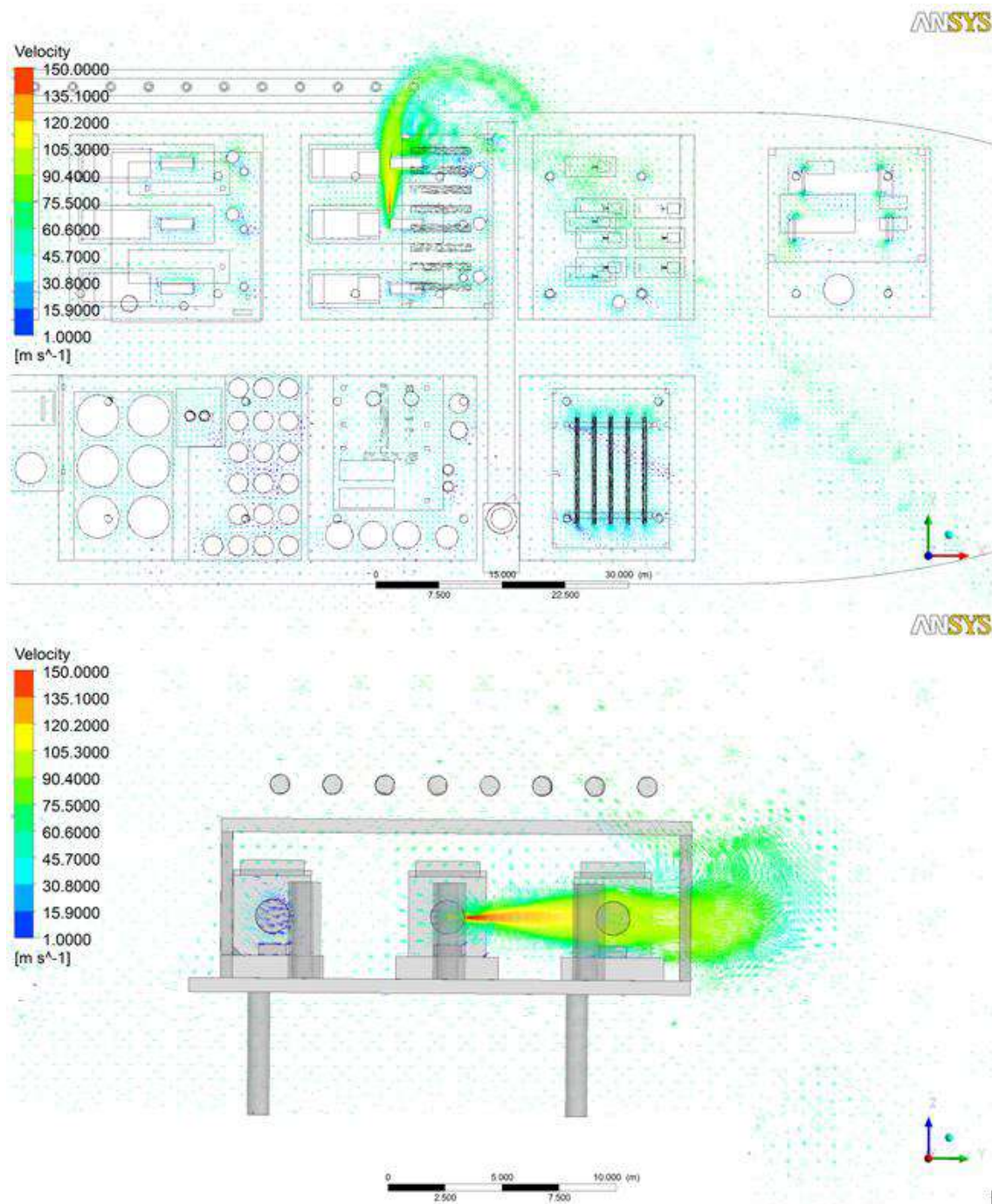


Figura 4.31 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste

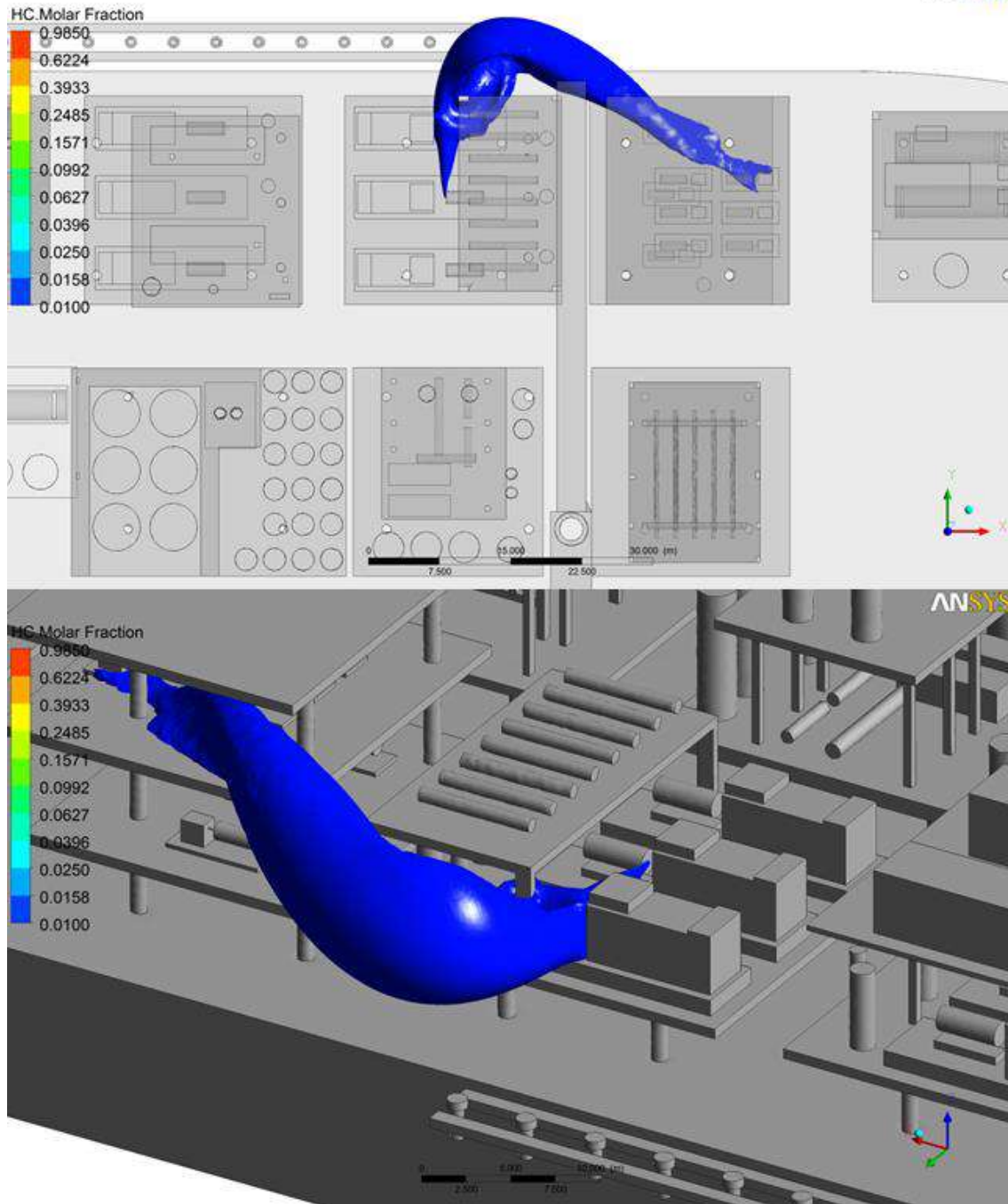


Figura 4.32 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste

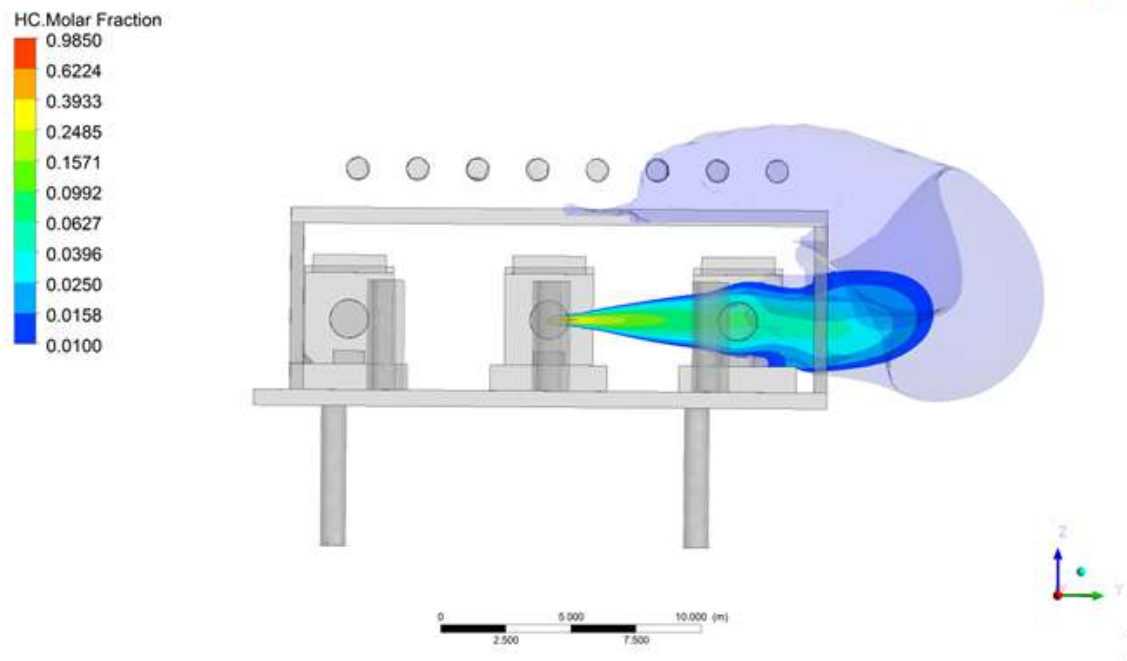
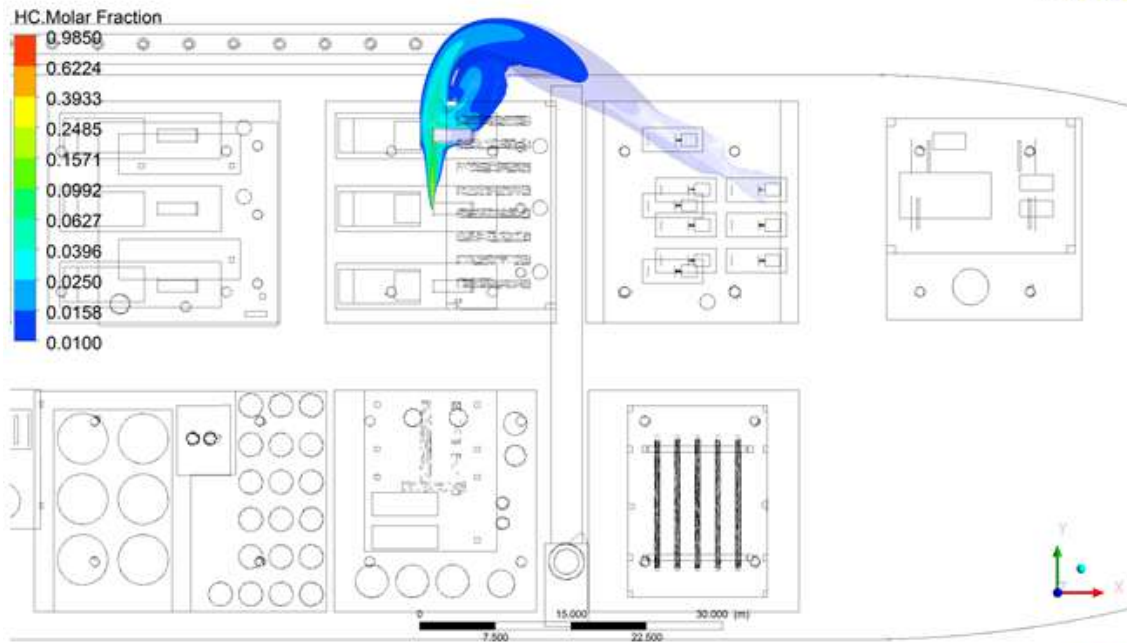


Figura 4.33– Contornos com Corte Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para o Norte e Vento Noroeste

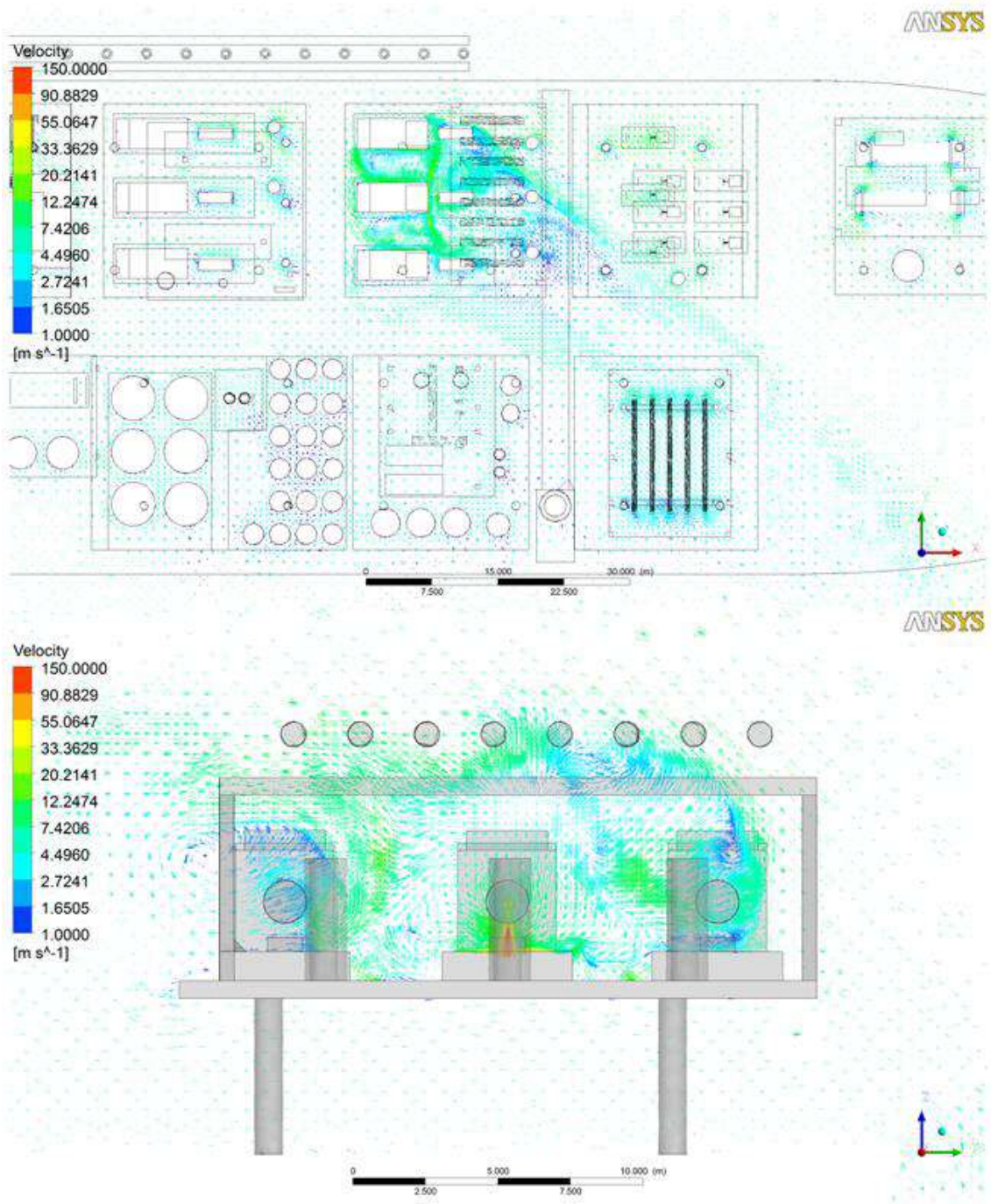


Figura 4.34 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste

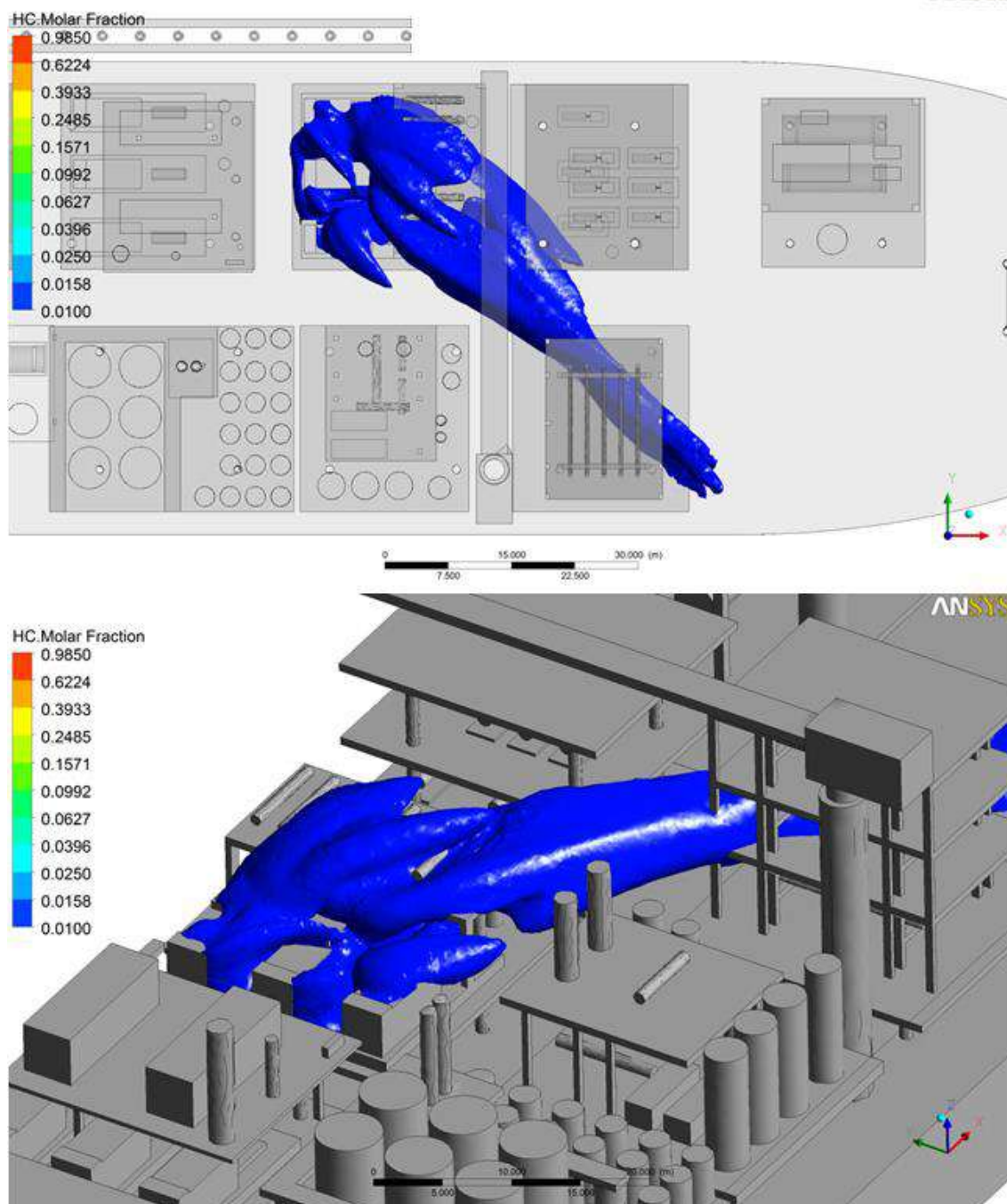


Figura 4.35 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste

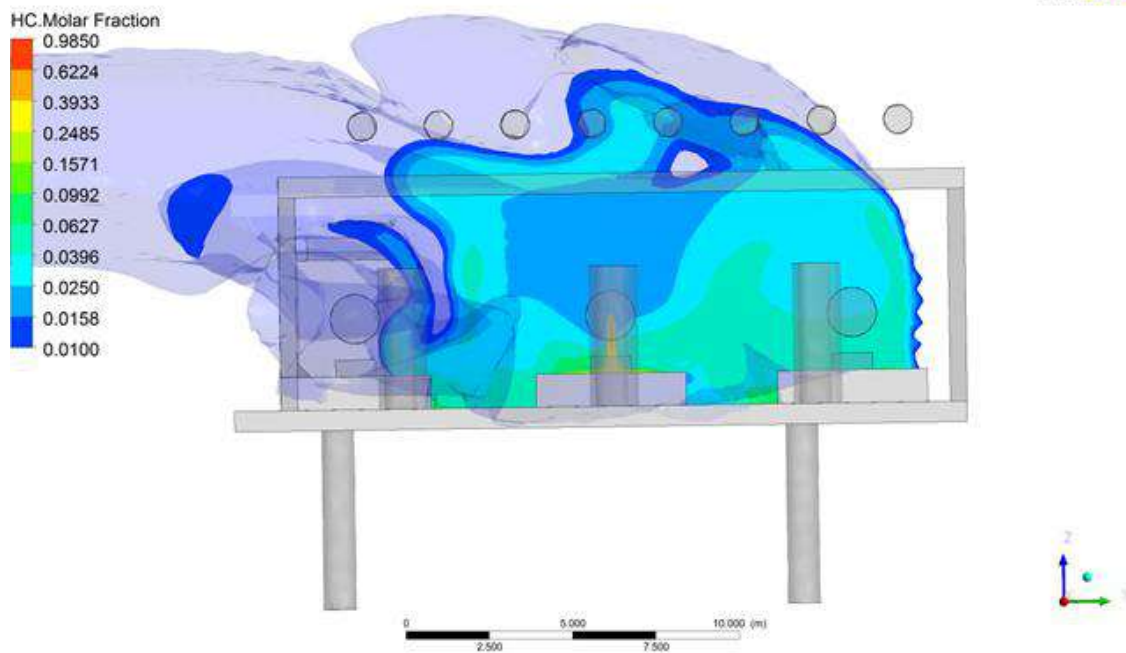
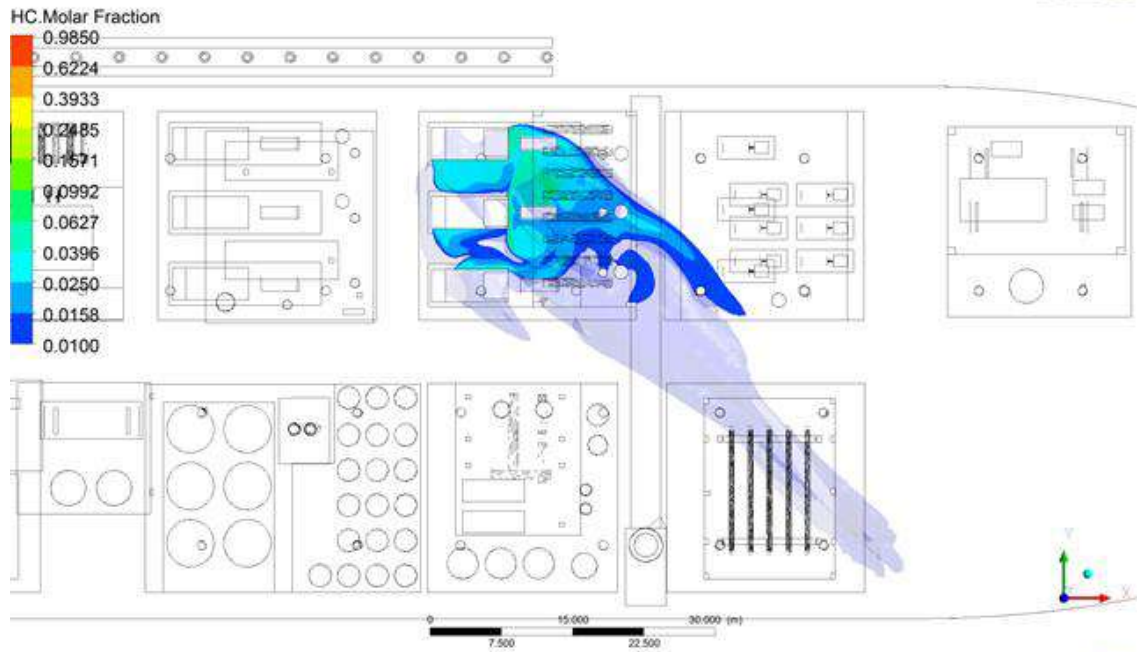


Figura 4.36 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-03 com Direção de Jato para Baixo e Vento Noroeste

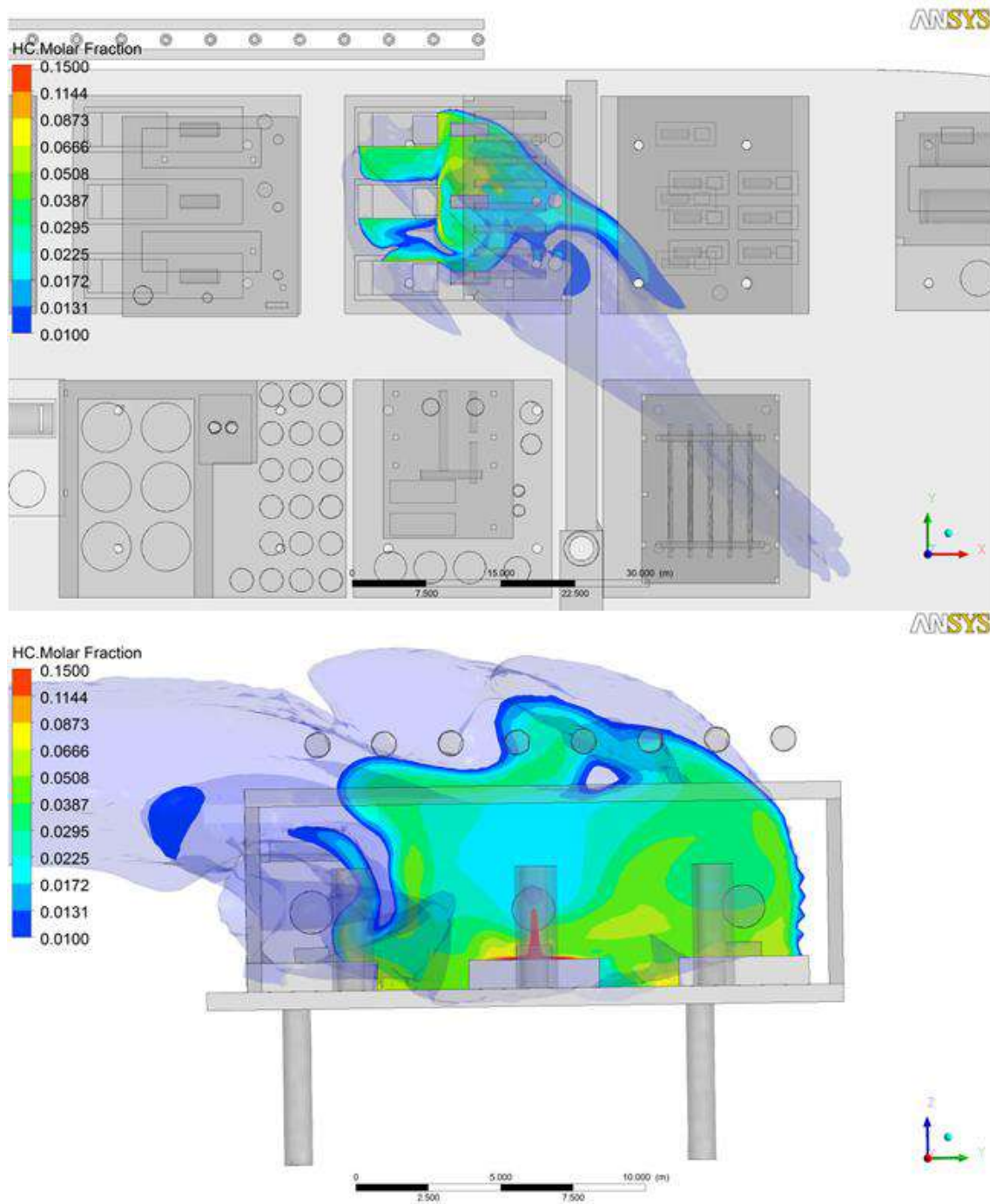


Figura 4.37 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Noroeste

4.2.4 Compressor C-04 com Vento na Direção Nordeste

O campo de escoamento do vento na direção Oeste, com velocidade de 6.5 m/s, ao longo do domínio da unidade é apresentado na Figura 4.38 nas formas de linhas de corrente e na Figura 4.39, Figura 4.42 e Figura 4.45 na forma de vetores velocidade, já influenciado pelo vazamento de gás no compressor C-04.

A Figura 4.40, Figura 4.43 e Figura 4.46 apresentam a isosuperfície de 20% do LII e a Figura 4.41, Figura 4.44 e Figura 4.47 a vista em corte do contorno da concentração de hidrocarbonetos (0,01 a 0,9850 de fração volumétrica) formados pelo escoamento do gás proveniente do compressor C-04 com respectivas direções de vazamento.

A Figura 4.48 apresenta, no caso do vazamento para baixo, as vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol.

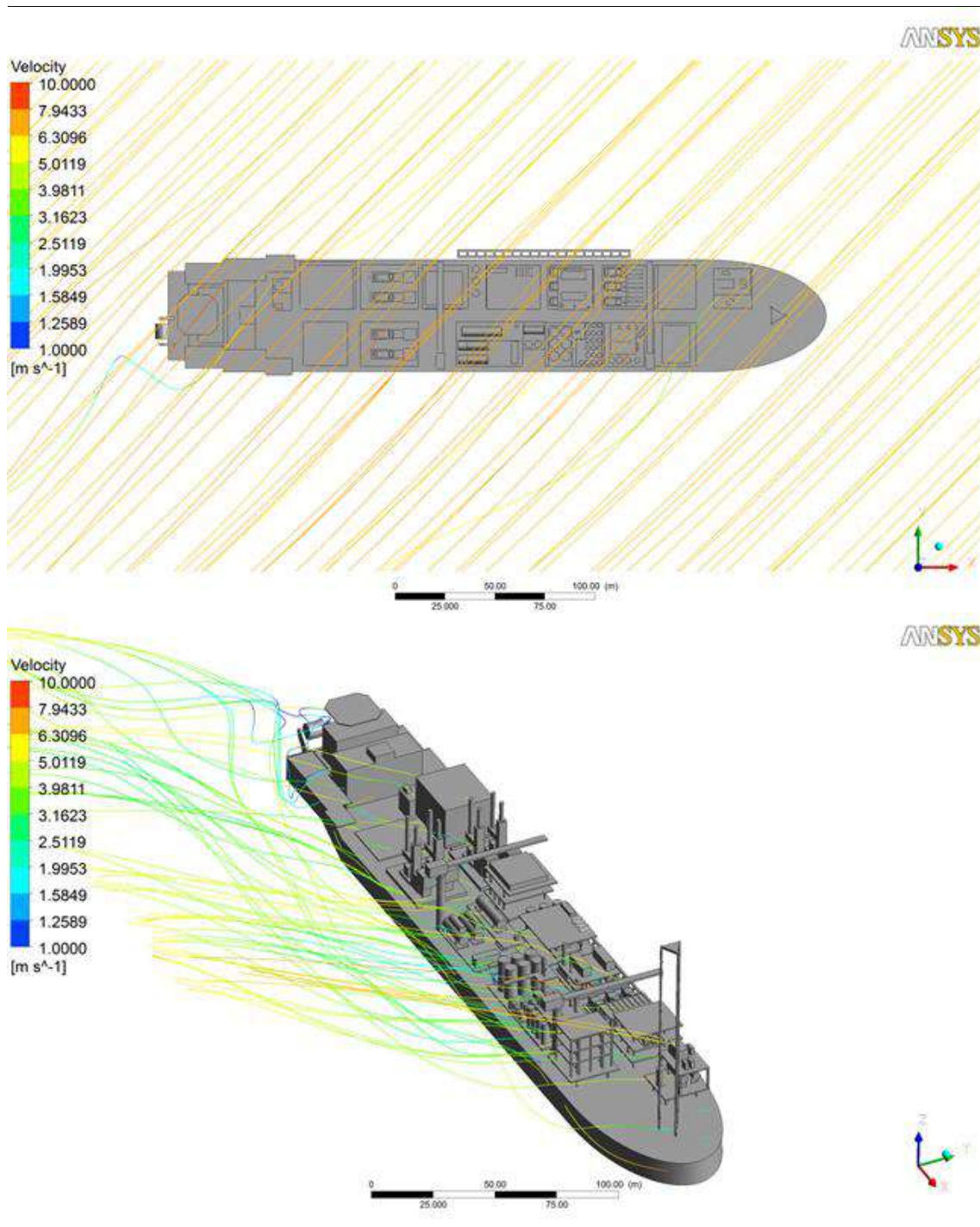


Figura 4.38 – Campo de Escoamento do Vento na Direção Nordeste na Forma de Linhas de Corrente

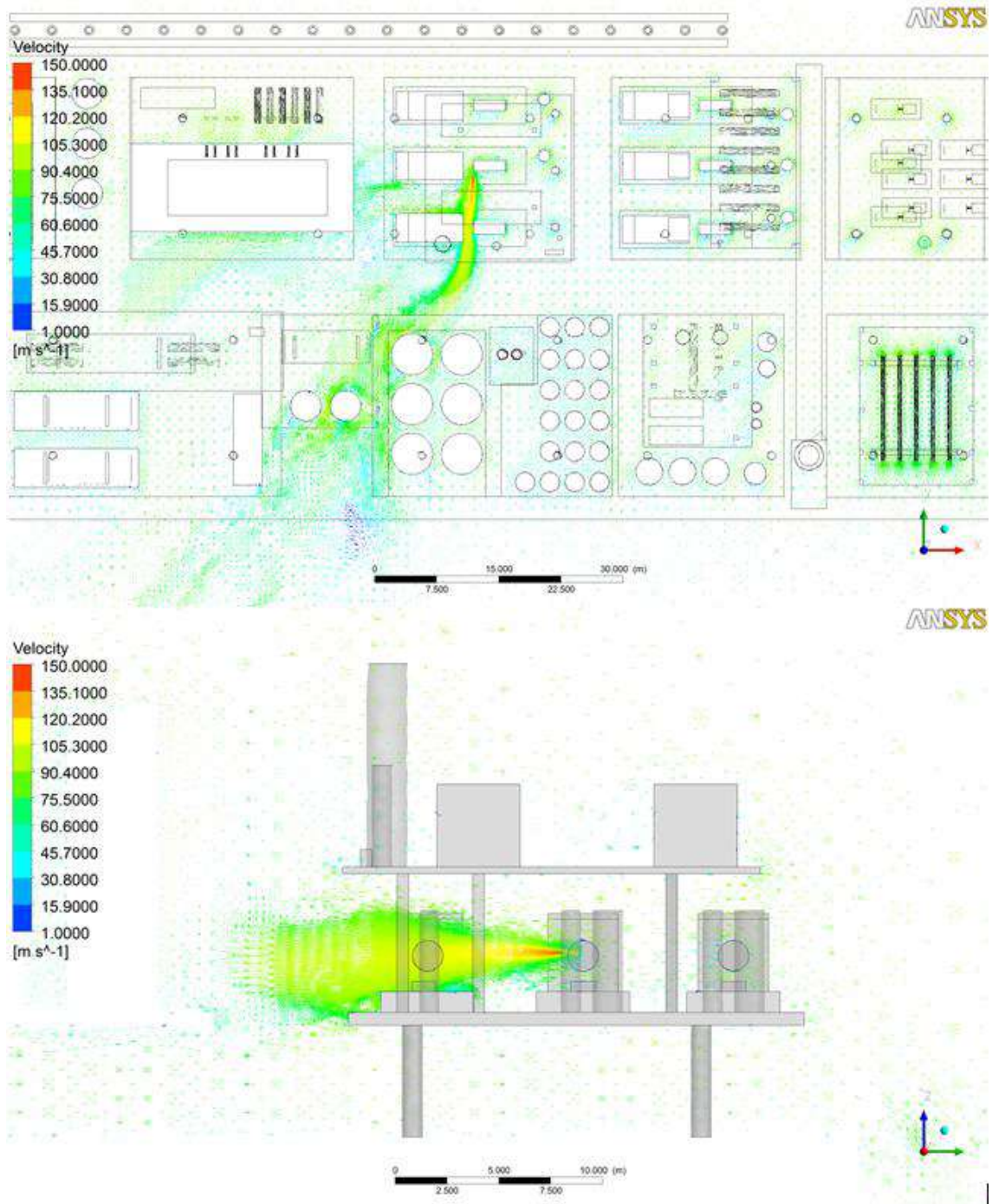


Figura 4.39 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste

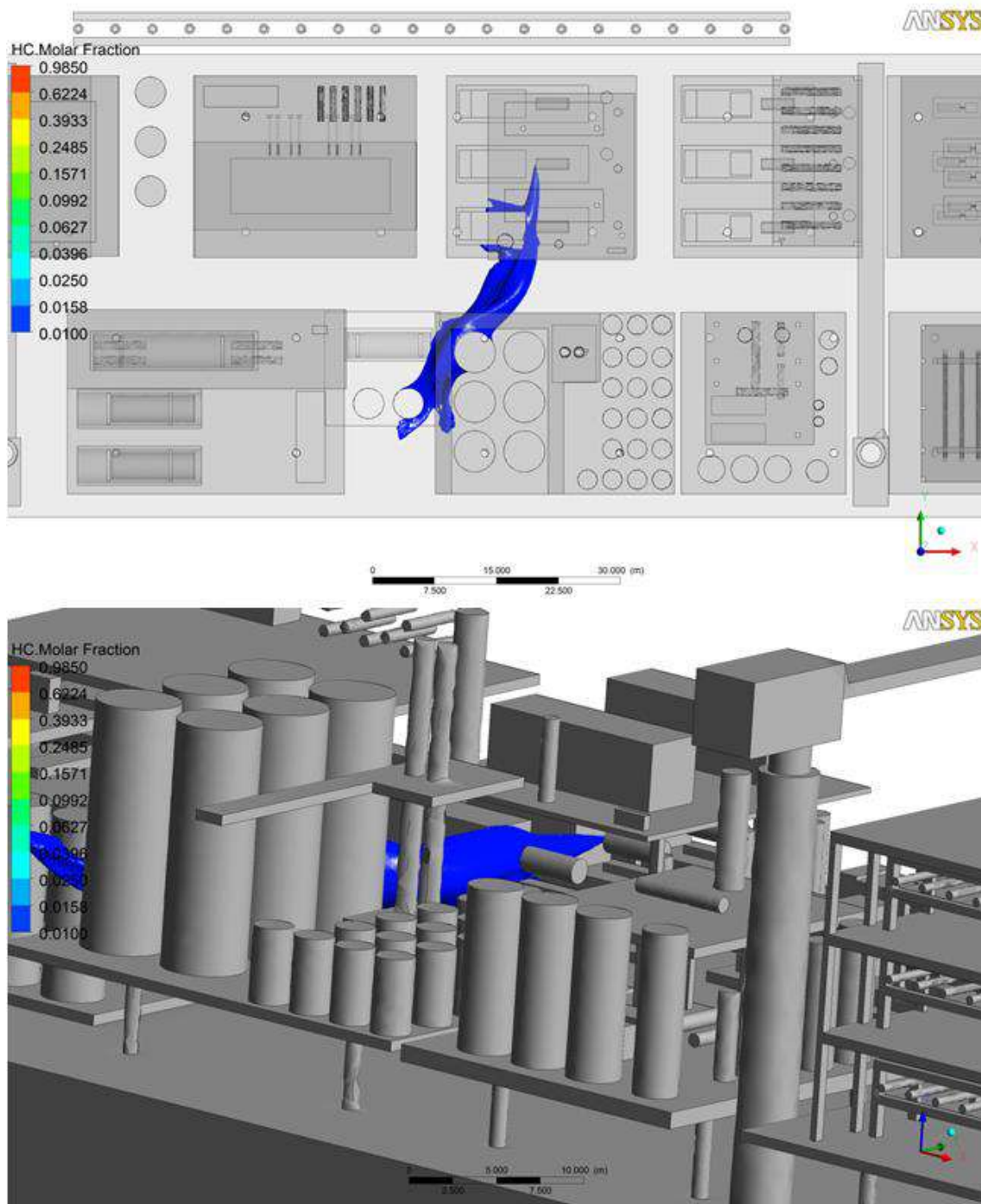


Figura 4.40 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste

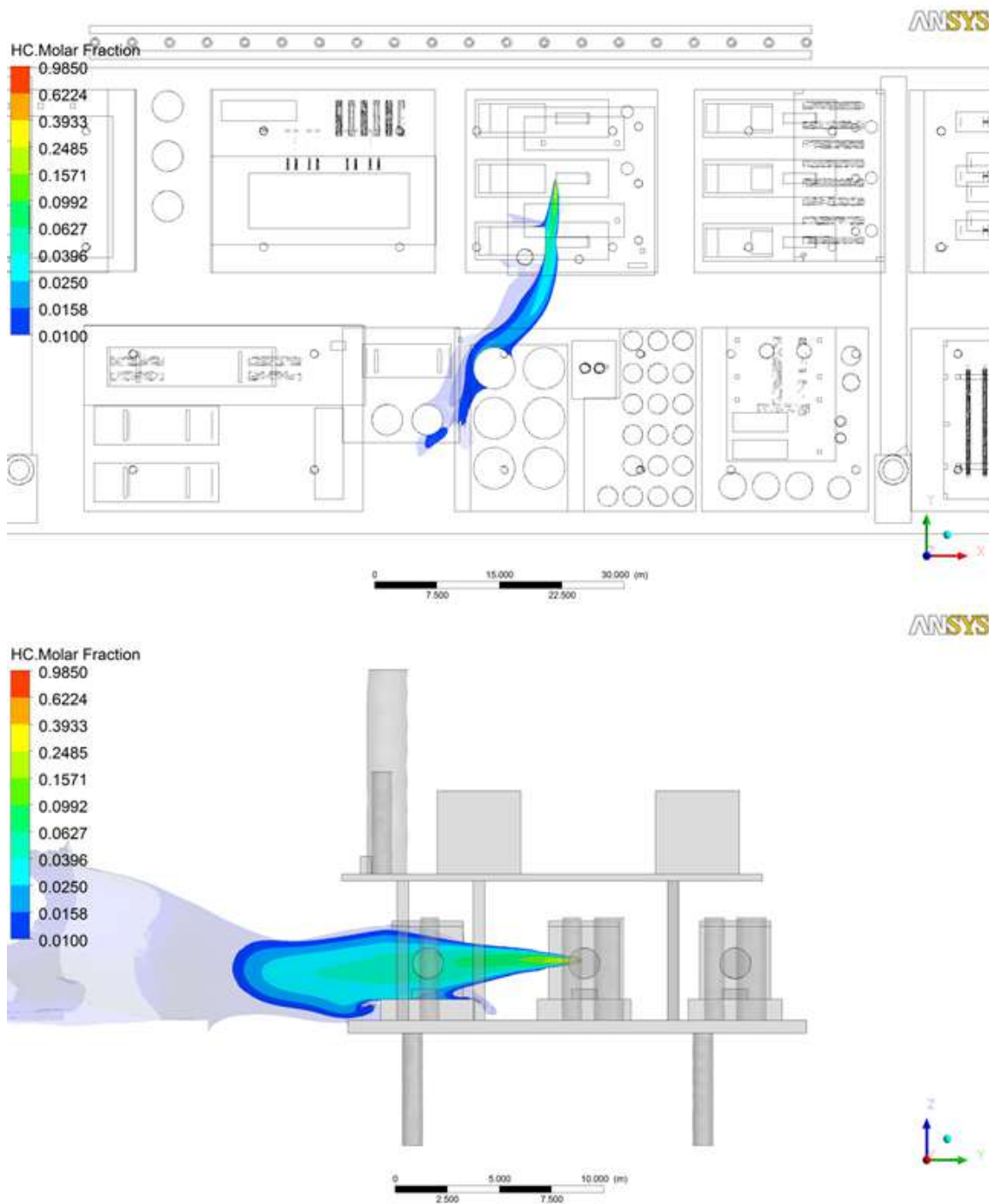


Figura 4.41 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Sul e Vento Nordeste

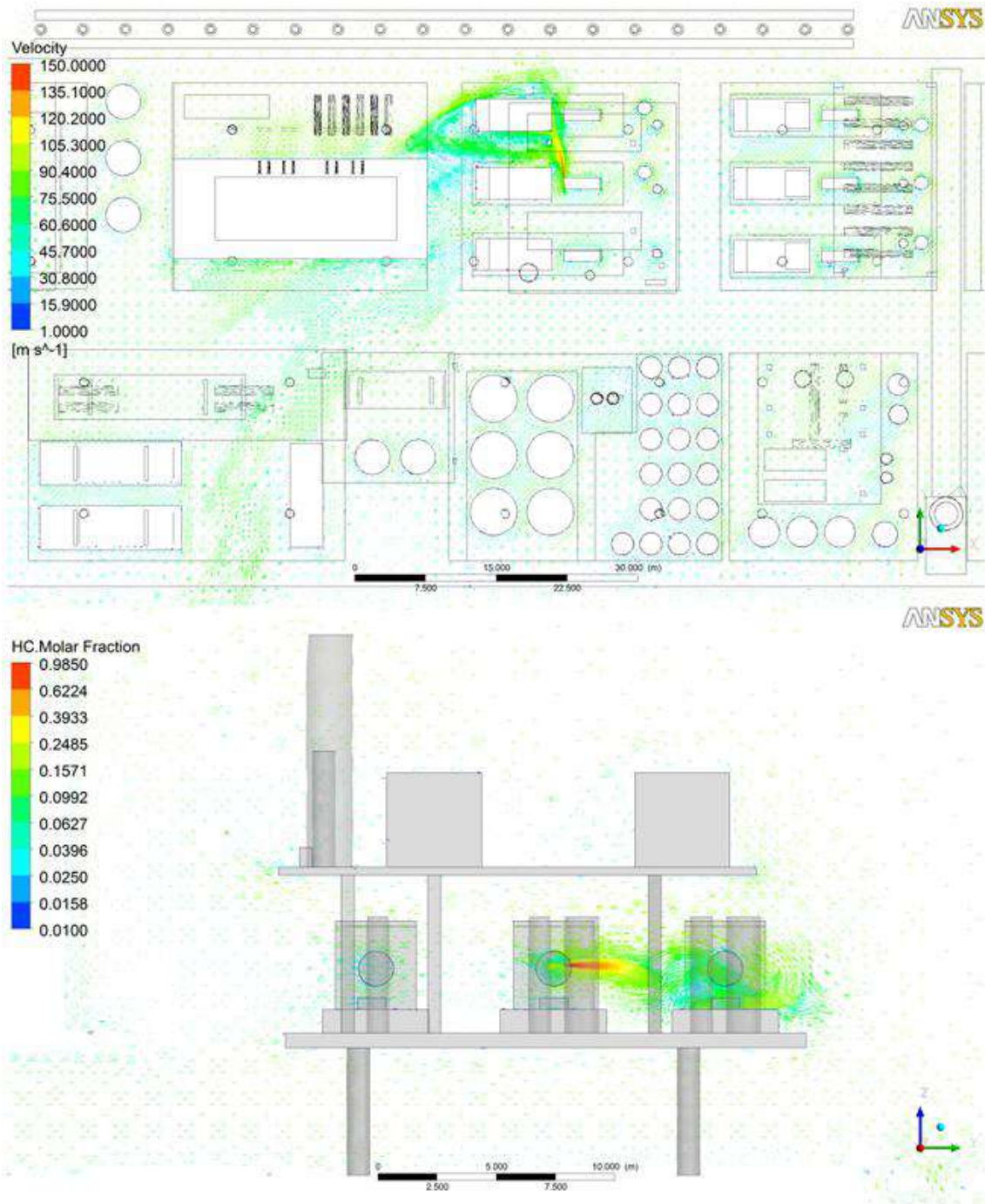


Figura 4.42– Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste

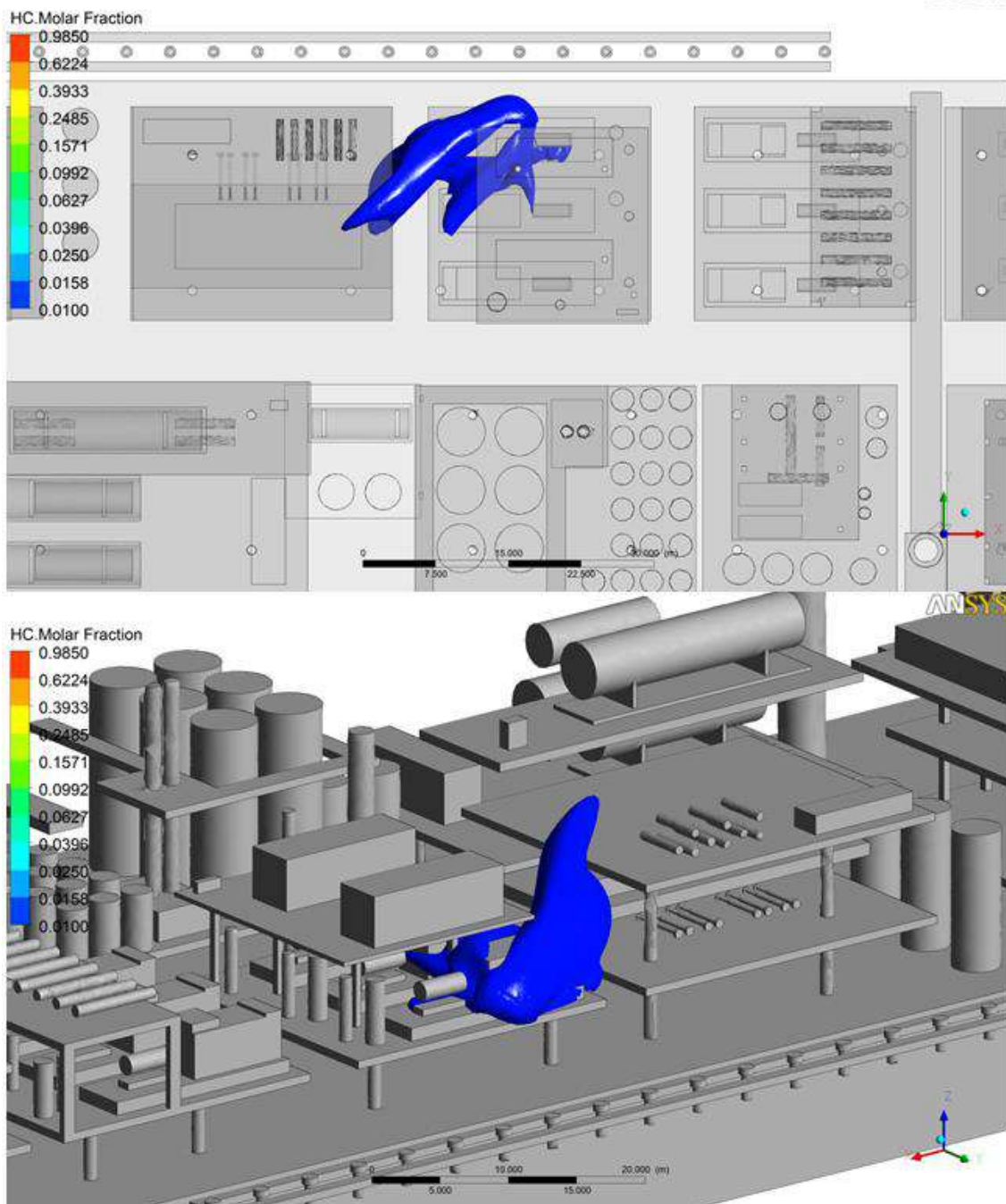


Figura 4.43 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste

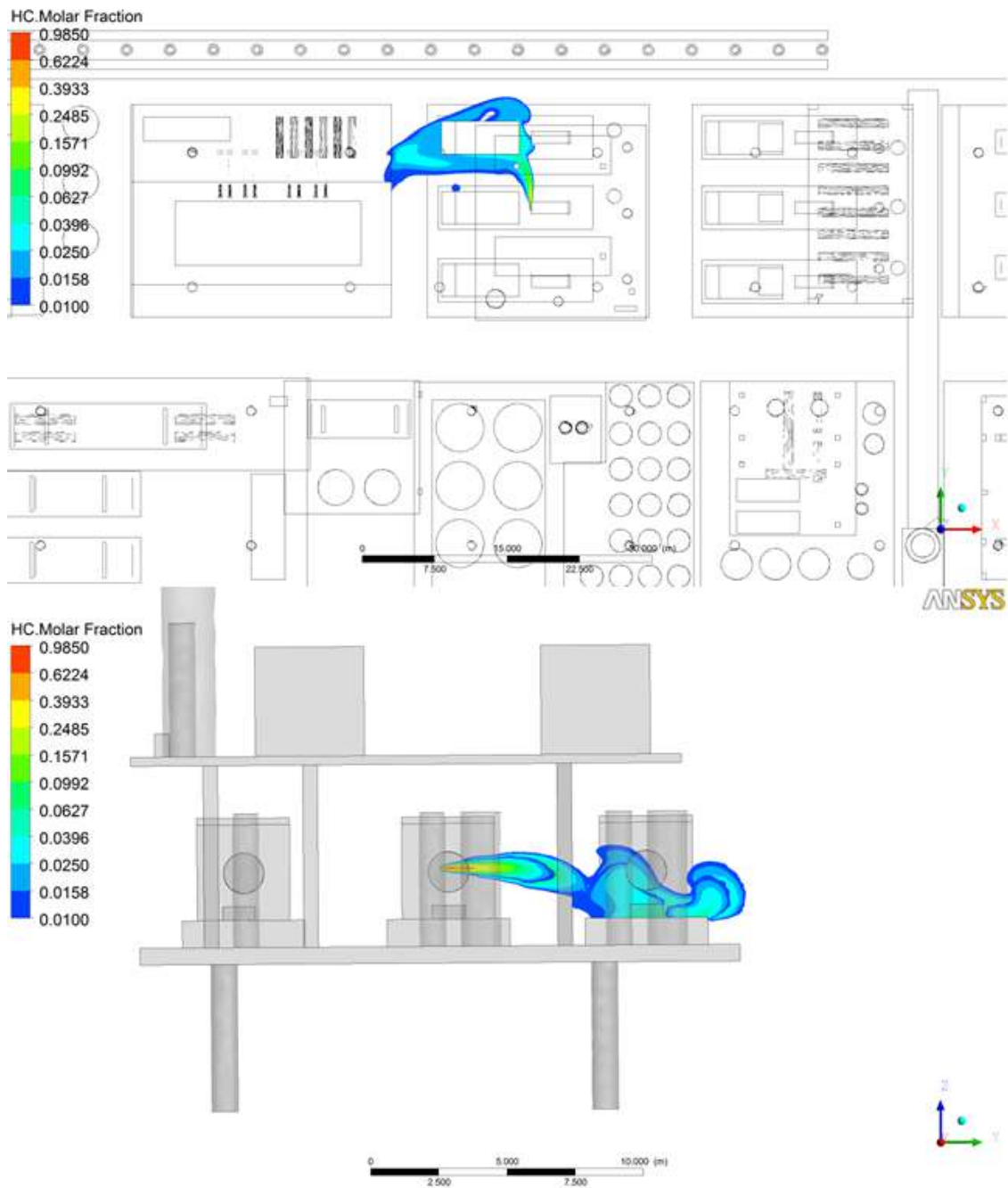


Figura 4.44 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para o Norte e Vento Nordeste

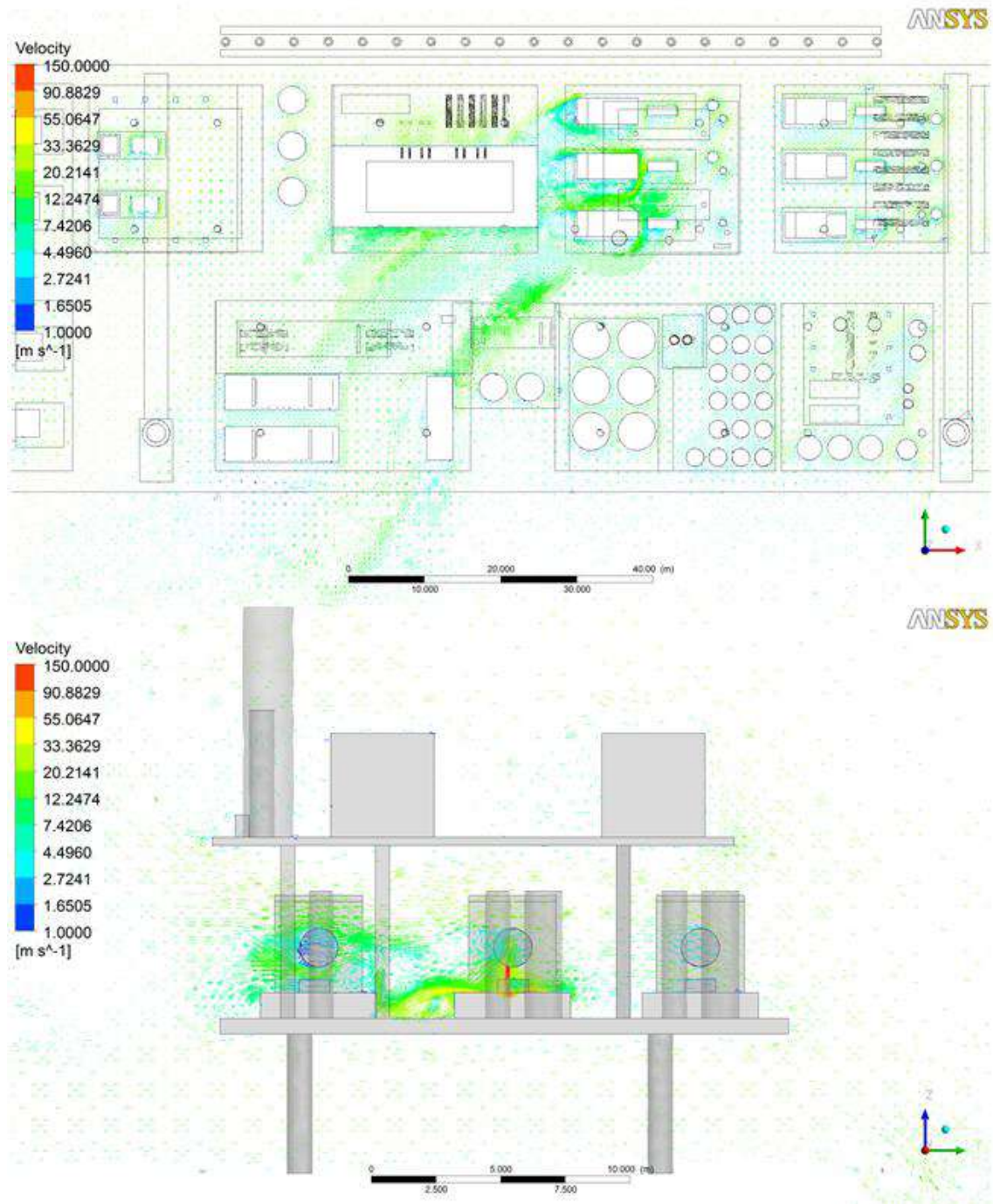


Figura 4.45 – Vetores de Velocidade na Unidade Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste

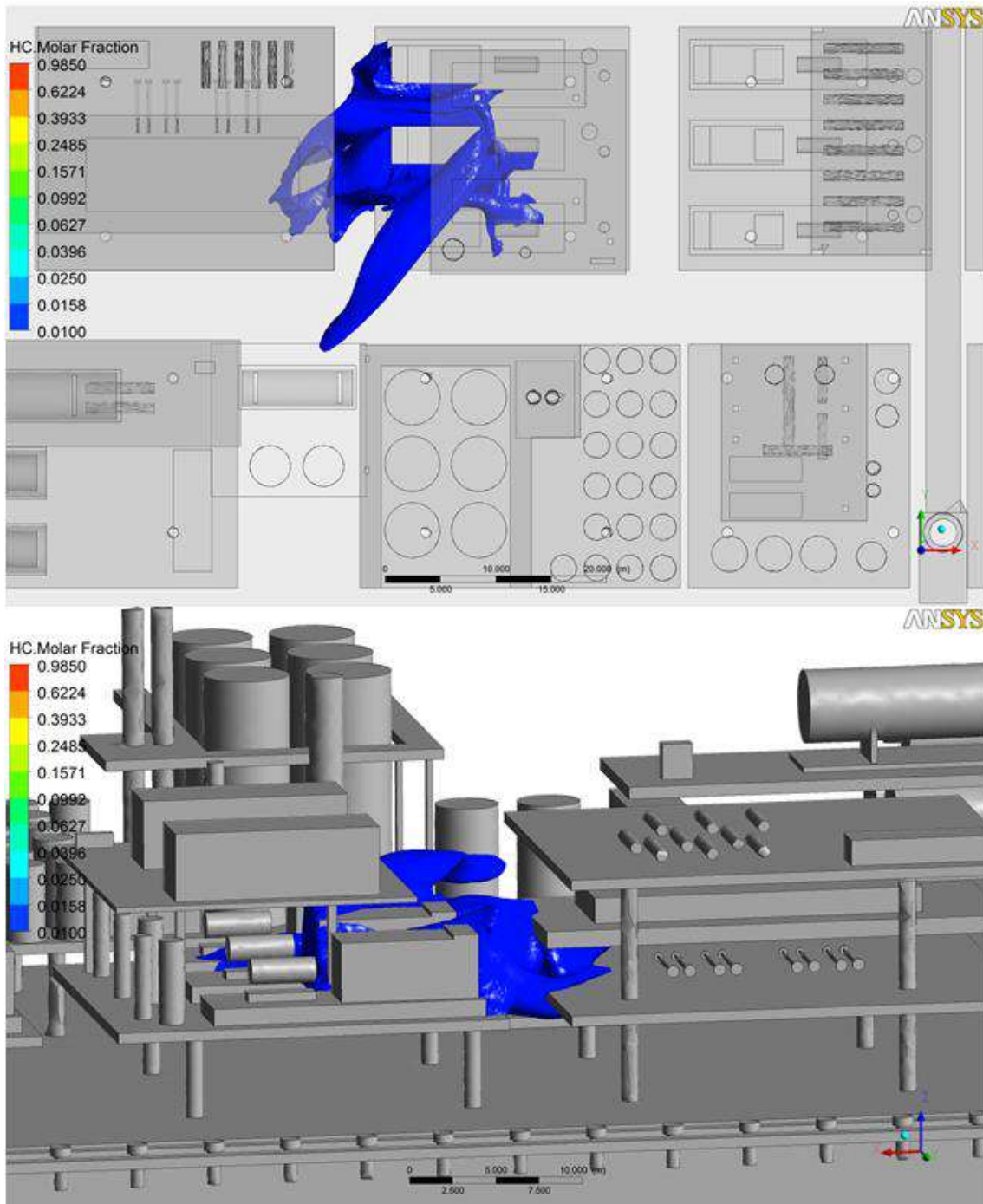


Figura 4.46 – Isosuperfície com Concentração no Limite de Alarme dos Detectores Correspondente a 20% do LII Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste

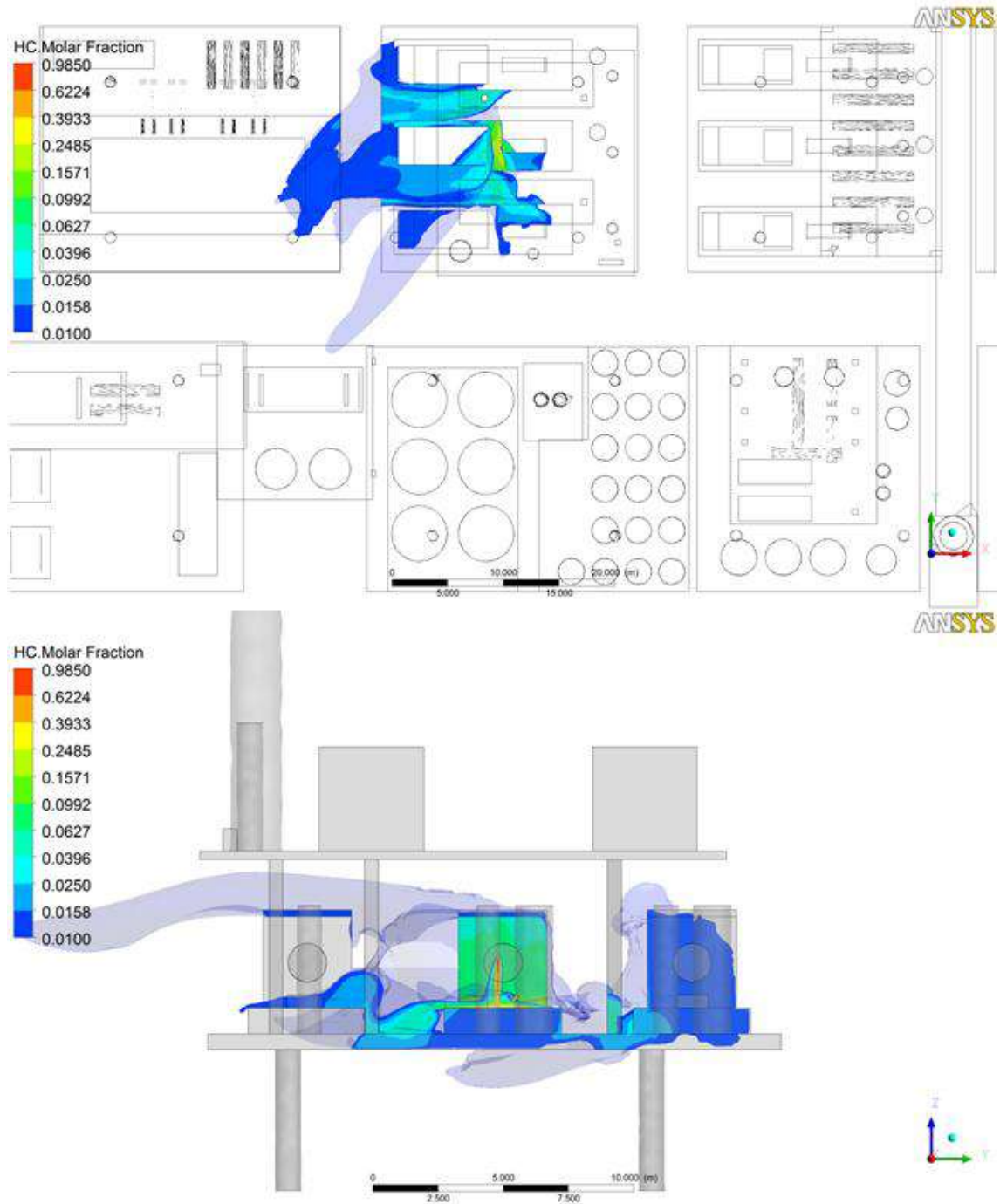


Figura 4.47 – Contornos com Cortes Horizontal e Vertical da Nuvem Proveniente do Vazamento no C-04 com Direção de Jato para Baixo e Vento Nordeste



Figura 4.48 – vistas superior e de corte da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (5% a 15% vol) para o Vazamento com Direção para Baixo e Vento Nordeste

A partir das imagens apresentadas, pode-se avaliar o comportamento de algumas nuvens formadas pelo vazamento dos compressores selecionados. Observa-se que os vazamentos com direção de jato alinhado ao vento incidente tendem a ser mais finas e compridas na concentração de detecção (20% do LII) como na Figura 4.8. Na maioria dos casos a pluma toma como preferência a direção do vento, sendo arrastada e tendo entre 15e 25 metros de comprimento na região detectável (Figura 4.19, Figura 4.22, Figura 4.30, Figura 4.33 e Figura 4.41). Para os jatos direcionados opostamente ao vento, as nuvens formadas são impulsionadas pelo vento podendo acumular próximo ao ponto de vazamento ou em um movimento ascendente pela mistura ser mais leve que o ar (Figura 4.10 e Figura 4.43). Os piores cenários são encontrados para vazamentos direcionados para o *deck* da unidade (baixo), pois, estes acumulam o gás vazado (Figura 4.13, Figura 4.24, Figura 4.35 e Figura 4.46) e com 100% do LII qualquer fonte de ignição como faíscas provocadas por equipamentos elétricos formam a chama imediatamente (Figura 4.14, Figura 4.25, Figura 4.36 e Figura 4.47).

Um bom projeto de classificação de áreas é de fundamental importância, pois nessas regiões não pode haver qualquer equipamento elétrico que não seja apropriado para atmosferas explosivas. Além disso, fica claro também a importância dos detectores estarem alocados de forma a que atuem o mais rapidamente possível, tentando, inclusive, evitar que a mistura explosiva chegue a ser formada (Gomes, 2012).

Portanto, recomenda-se fortemente, sempre que for possível e coerente, nos estudos de dispersão de gases em ambiente offshore com o auxílio de CFD, dar-se preferência a vazamentos direcionados para o piso da plataforma, ou situações onde há obstáculo na saída do jato, confinando parcialmente o gás e aumentando a mistura hidrocarboneto/ar, ou seja, o volume inflamável (Fleck, 2008).

4.3 Aplicação da Metodologia de Alocação de Detectores

Como apresentado na Figura 3.11, a malha de detecção de gases inicialmente proposta possui 100 detectores equidistantes, numa malha 5 m x 5 m. Após a simulação dos 48 cenários de vazamento nos compressores, observou-se que apenas 1 ponto não identificou nenhum cenário.

Outra observação importante foi que a malha proposta não foi capaz de detectar 4 cenários dos possíveis apresentados, sendo estes os casos 34, 41 e a consideração de seus resultados, 34* e 41*, correspondentes aos compressores C-03 e C-04. Sendo assim, houve a necessidade de realocação de detectores para que estes casos fossem identificados. A realocação permitiu o deslocamento dos detectores mais próximo da nuvem detectável adicionando esses cenários aos outros já detectados. A Figura

4.49 apresenta o exemplo para o detector M03-HC-01. O pequeno deslocamento permitiu que, além dos cenários já identificados por esse detector, ele identificasse o caso 34. Os casos 41, 34* e 41* foram detectados analogamente. Esses detectores foram deslocados aproximadamente 2,0 metros de suas posições iniciais.

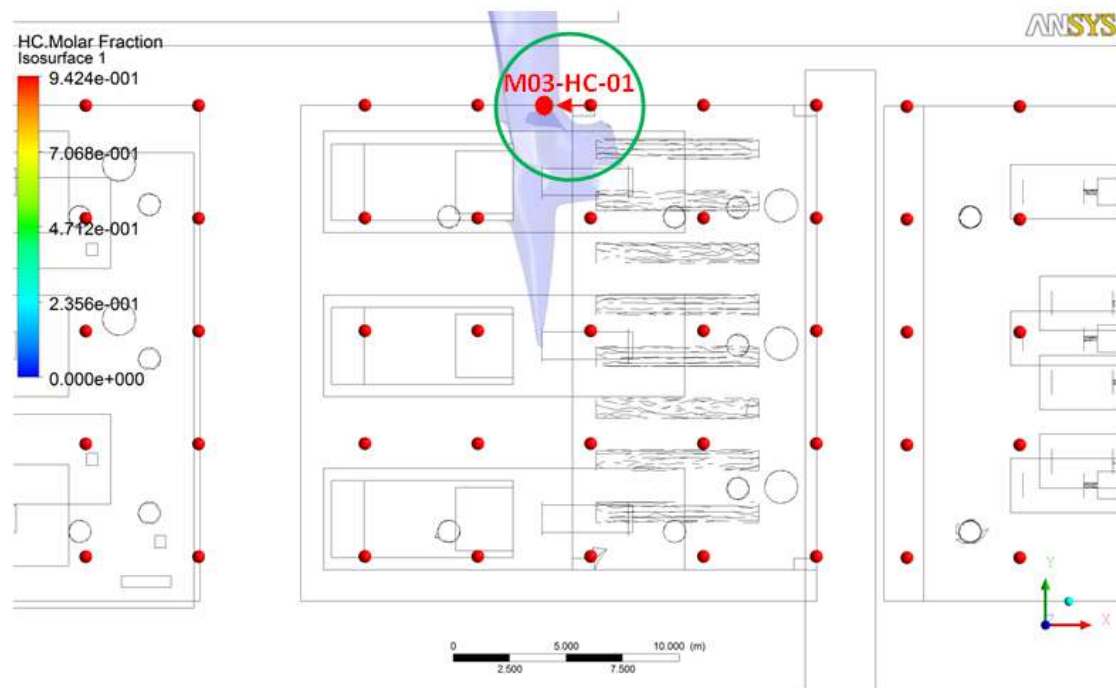


Figura 4.49 – Realocação do Detector M03-HC-01

Assim, dos 100 pontos inicialmente propostos, eliminando aqueles que não detectam nenhum caso e os que detectaram apenas cenários redundantes, chega-se à conclusão que seriam necessários 20 detectores para identificar 96 cenários. Para uma unidade *Offshore* com dezenas de cenários de vazamento e considerando o posicionamento de detectores independentes por módulo ou *deck*, o número total é satisfatório para alarmar incidentes em 4 regiões distintas mantendo 3 módulos em constante monitoramento. Portanto, foram utilizados 20% dos pontos propostos inicialmente para identificar 96 cenários de vazamento sendo simulados apenas 48 deles como resultados. Além disso, a malha de detectores de 5 m x 5 m capturou 94,8% dos cenários avaliados, não identificando 5 deles.

Dentre os 20 detectores posicionados, 4 estão alocados em cada *deck* do módulo de compressão de gás (totalizando 8 detectores), 6 no módulo de exportação de gás e 6 no módulo de injeção de gás. A Figura 4.50 apresenta a localização dos detectores nas coordenadas XY na planta da unidade e a Tabela 4.3 indica as coordenadas destes detectores.

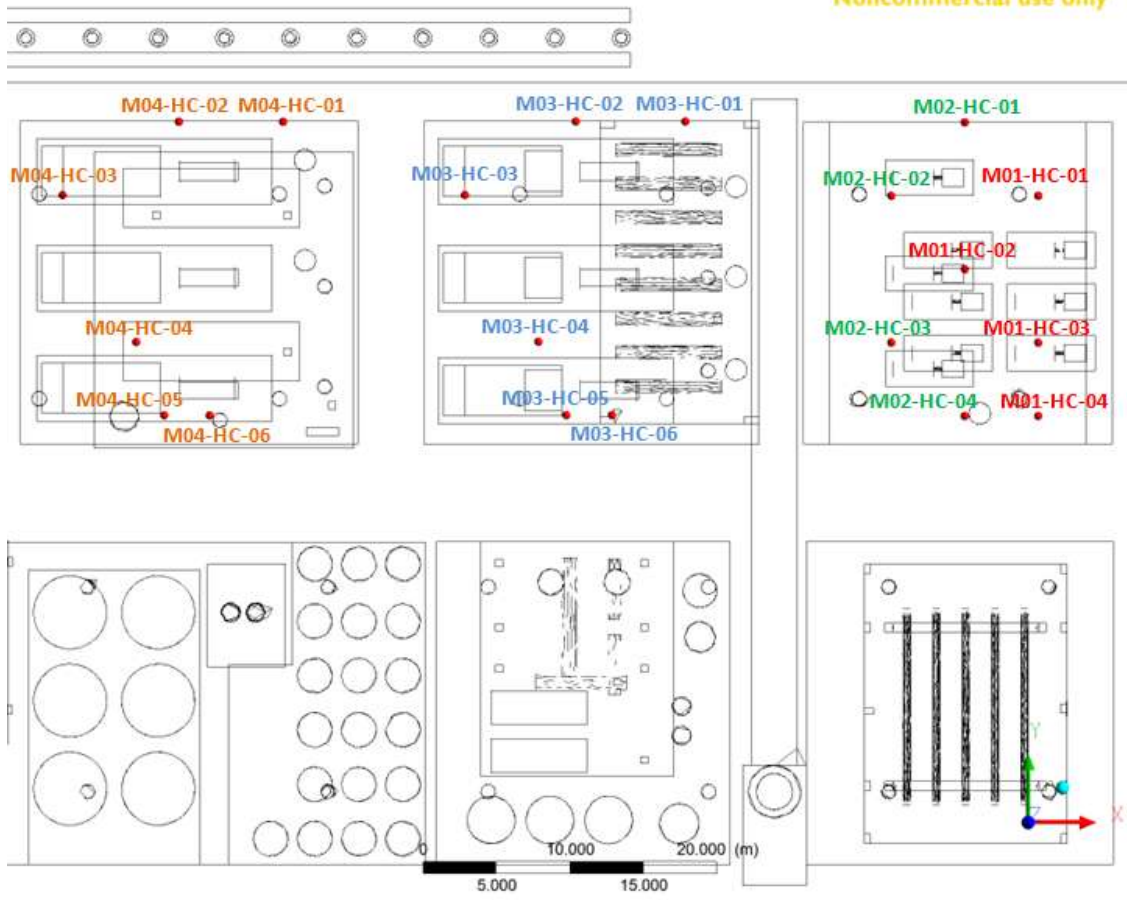


Figura 4.50 – Posicionamento no Plano XY dos Detectores na Planta da Unidade

Analisando a Tabela 4.3 e os resultados extrapolados, verifica-se que 41,7% (40/96) dos cenários são cobertos por, pelo menos, 2 detectores, o que é muito positivo, pois aumenta a confiabilidade do sistema. Isto significa que, nestes casos, se um detector falhar, ao menos um outro detector estará apto a fazer a detecção. Os cenários detectados contendo asterisco fazem parte dos cenários extrapolados, ou seja, o cenário 1 é identificado por 3 detectores (M01-HC-01, M01-HC-03 e M01-HC-04), já o cenário 1* é identificado por 2 detectores (M02-HC-01 e M02-HC-04).

Por outro lado, o detector M01-HC-03 é o responsável pela detecção do maior número de casos, 15 ao todo. Além disso, detectando 15 dos 24 casos abordados na região do compressor C-01, 62% dos casos são cobertos por apenas um detector. Desta forma, numa situação real, seria conveniente, visando aumentar a confiabilidade do sistema de detecção, que um outro detector fosse instalado próximo ao detector de M01-HC-03 para que mais cenários fossem identificados por pelo menos 2 detectores.

Tabela 4.3 – Coordenadas dos Detectores e Cenários Detectados

Detector	Número de Cenários Detectados	Coordenadas (m)			Cenários Detectados
		X	Y	Z	
M01-HC-01	11	191	20,2	13,4	1, 4, 7, 10, 12, 13, 15, 19*, 21*, 22*, 24*
M01-HC-02	8	186	15,2	14,3	6, 9, 12, 15, 16*, 18*, 21*, 24*
M01-HC-03	15	191	10,2	13,8	1, 2, 3, 5, 6, 8*, 9*, 11*, 12*, 14*, 15*, 17*, 18*, 21*, 24*
M01-HC-04	11	191	5,2	13,8	1, 3, 6, 8, 11, 14, 17*, 18*, 20*, 21*, 23*
M02-HC-01	9	186	25,2	8,8	1*, 4*, 10*, 13*, 15*, 19, 21, 22, 24
M02-HC-02	10	181	20,2	7,5	7*, 9*, 10*, 12*, 13*, 15*, 16, 18, 21, 24
M02-HC-03	11	181	10,2	6,4	3*, 6*, 8*, 9*, 11*, 12*, 15*, 17, 18, 21, 24
M02-HC-04	9	186	5,2	9,4	1*, 2*, 3*, 5*, 6*, 14*, 20, 21, 23
M03-HC-01	7	161	25,3	8,2	25, 28, 39, 43*, 45*, 46*, 48*
M03-HC-02**	4	159,5	25,3	9,8	37, 39, 45*, 48*
M03-HC-03	9	152	20,3	10,2	27, 30, 31, 36, 39, 40*, 42*, 45*, 48*
M03-HC-04	8	157	10,3	8,4	27, 30, 33, 35, 36, 39, 42*, 48*
M03-HC-05**	4	158,8	5,3	8,0	27, 30, 32, 45*
M03-HC-06	10	162	5,3	9,8	25, 26, 27, 29, 30, 38, 44*, 45*, 47*, 48*
M04-HC-01	7	139,6	25,3	8,2	25*, 28*, 39*, 43, 45, 46, 48
M04-HC-02**	4	132,5	25,3	9,8	37*, 39*, 45, 48
M04-HC-03	9	124,6	20,3	10,2	27*, 30*, 31*, 36*, 39*, 40, 42, 45, 48
M04-HC-04	8	129,6	10,3	8,4	27*, 30*, 33*, 35*, 36*, 39*, 42, 48
M04-HC-05**	4	131,5	5,3	8,0	27*, 30*, 32*, 45
M04-HC-06	10	134,6	5,3	9,8	25*, 26*, 27*, 29*, 30*, 38*, 44, 45, 47, 48

*Casos detectados pela consideração dos resultados referentes ao Caso em questão

** Detectores Realocados

4.3.1 Determinação da Altura dos Detectores do Sistema de Detecção

A Tabela 4.3 indica as coordenadas dos detectores selecionados, os cenários detectados por cada um deles e a quantidade total de cenários identificados. A origem do sistema de coordenadas, ou seja, o ponto (0,0,0) está localizado na altura do *Deck* Principal do FPSO no centro do casco próximo ao alojamento da embarcação como mostrado na Figura 4.51.

Para posicionar verticalmente os detectores, foi utilizada a metodologia descrita por Fleck (2008). Foi gerado um gráfico de concentração sobre linhas perpendiculares ao piso nos pontos selecionados e a alocação dos detectores se deu na altura mais baixa, na concentração detectável, a partir da altura do ponto de vazamento, identificando assim, todos os cenários capturados pelo detector em questão.

A Figura 4.52 apresenta, como exemplo, o gráfico de concentração de hidrocarbonetos na linha vertical do detector M01-HC-02, mostrando que a menor altura que detecta os casos 6, 9, 12 e 15 é a de 14,3 metros. As alturas tomam como referencia o *deck* principal da embarcação, assim sendo, o detector está localizado a 1,8 metros do *deck* do módulo em questão, que está a 12,5 metros do *deck* principal. A curva de concentração para o caso 15 apresenta a concentração da fração molar de 0,01 na menor altura, mostrando que os outros casos já estão com concentrações maiores que a limite.

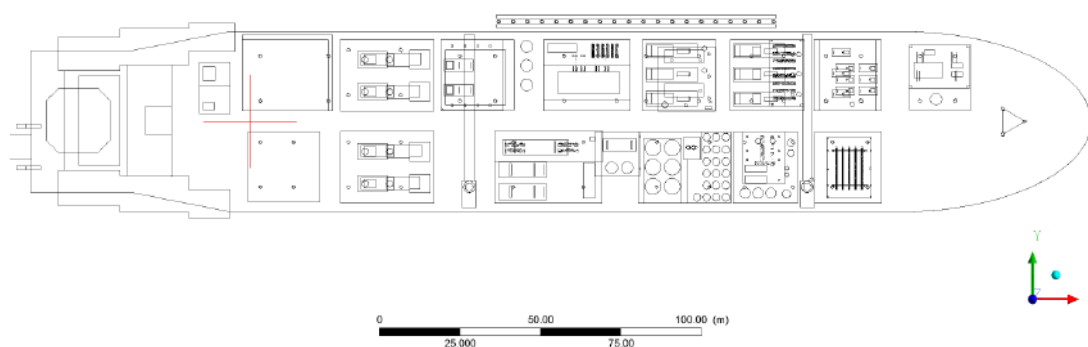


Figura 4.51 – Origem do Sistema de Coordenadas para a Alocação dos Detectores

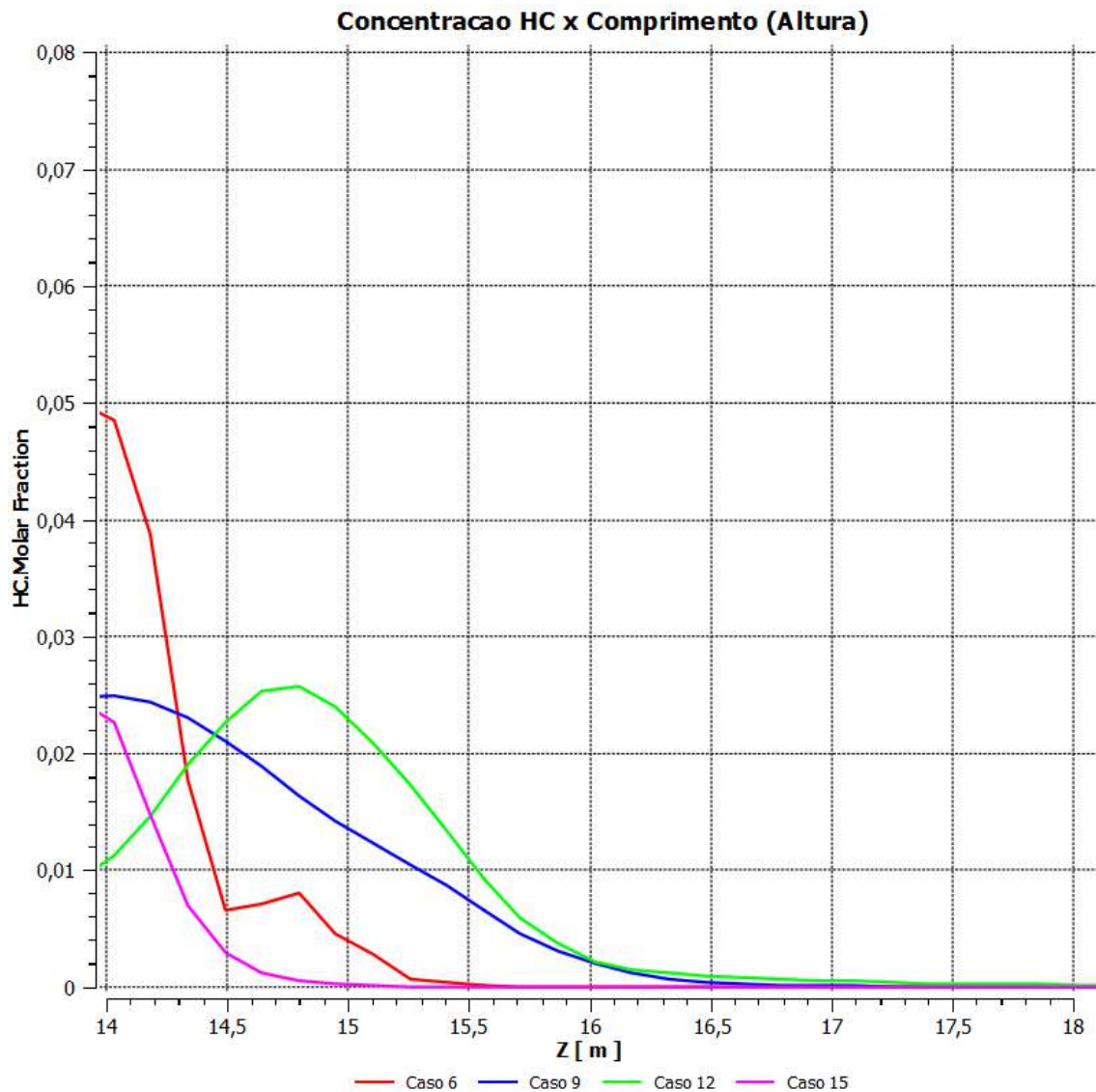


Figura 4.52 – Figura Ilustrando o Gráfico Gerado pelo CFX da Concentração de Hidrocarbonetos na Linha Vertical do Detector M01-HC-02

Após posicionar os detectores verticalmente nos módulos, houve alguns casos que, mesmo sendo capturados no plano XY, obtiveram alturas diferentes de detecção. O caso 1 é detectado pelos detectores M01-HC-01, M01-HC-03, M01-HC-04, M02-HC-01 e M02-HC-04, porém, para o detector M01-HC-03, a altura de detecção deveria ser 13,8m e 19m como indicado na Figura 4.53. Assim seriam necessários 2 detectores na mesma posição no plano XY, porém, com alturas diferenciadas.

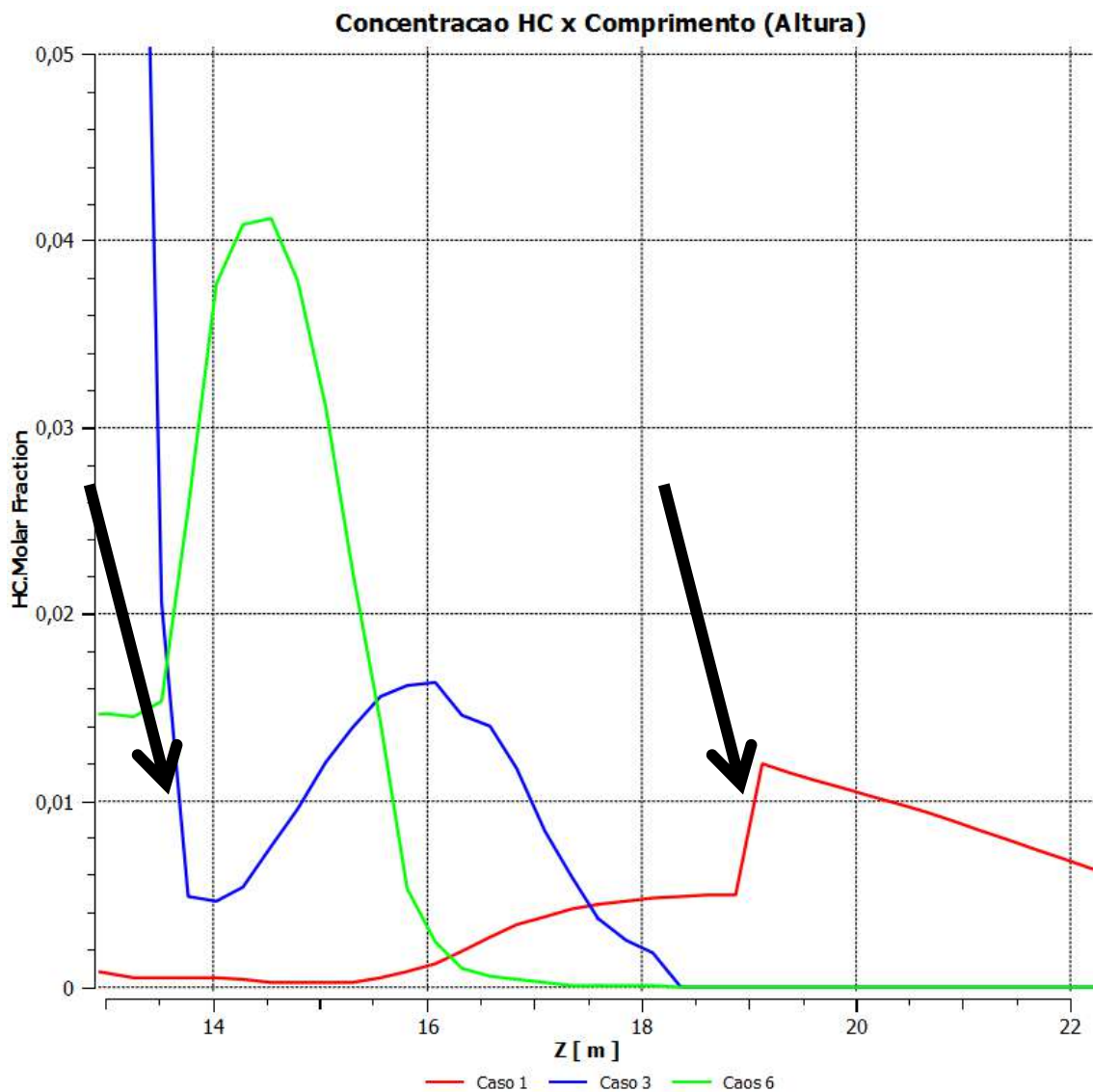


Figura 4.53 – Figura Ilustrando o Gráfico Gerado pelo CFX da Concentração de Hidrocarbonetos na Linha Vertical do Detector M01-HC-03 para os casos 1, 3 e 6

A Figura apresenta os casos 1 e 14 contendo uma mesma região para possível posicionamento de um detector, porém a Figura mostra que não existe uma altura em comum para tal posicionamento.

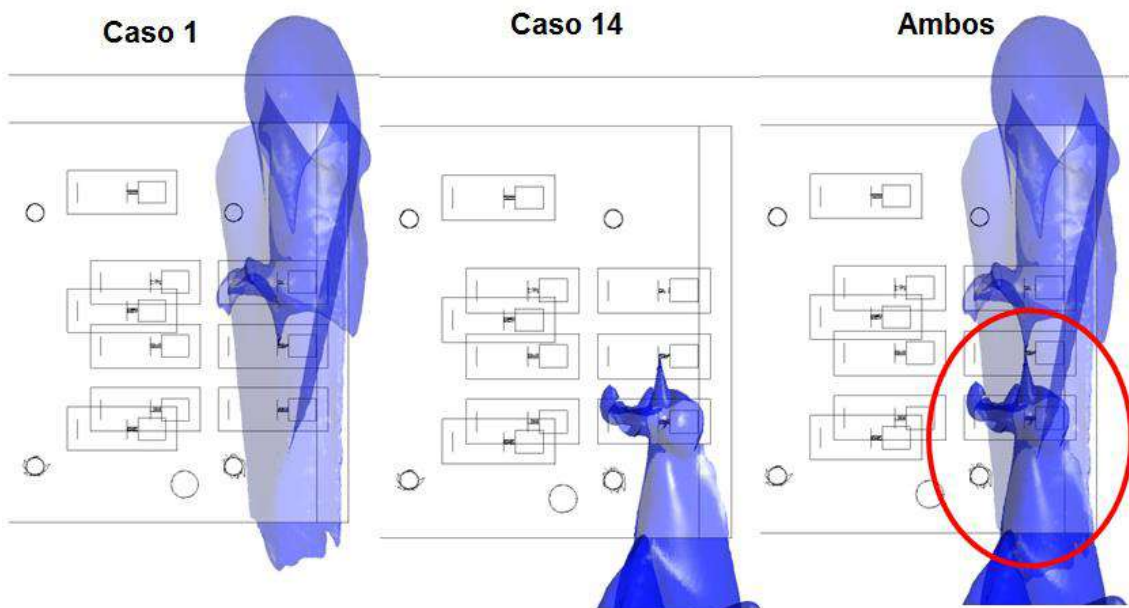


Figura 4.54 – Casos 1 e 14 e suas sobreposições

Não há altura comum de detecção

ANSYS

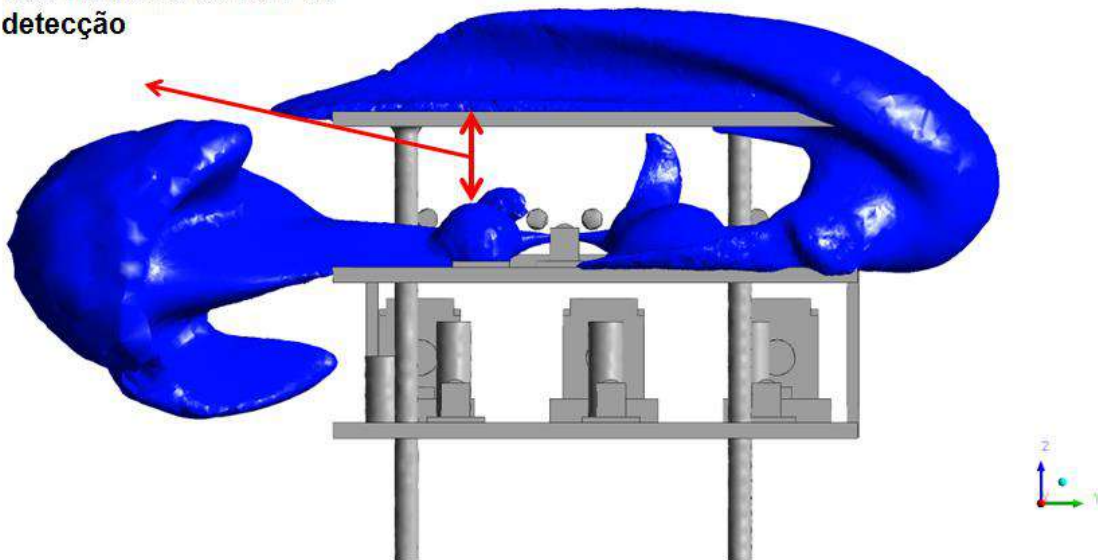


Figura 4.55 – Casos 1 e 14 e as alturas distintas de detecção na região de sobreposição

Esses casos foram considerados como sendo capturados inicialmente, porém, uma verificação da metodologia de determinação das alturas deve ser feita evitando que esses casos deixem de ser alertados.

Em um projeto real, seria necessário, neste momento, verificar se nesses pontos de detecção seria possível alocar os detectores, ou seja, se estes pontos não estão em áreas de manutenção, rotas de fuga, ou outros locais que inviabilizem a sua fixação. Isto seria feito de maneira simples com o auxílio da maquete 3D da unidade.

Esta tarefa não foi realizada no presente trabalho, pois os detectores não serão fisicamente instalados na planta.

Pode ser verificado que nenhum dos detectores poderia ser excluído da malha de detecção sem prejuízo à “otimização” da mesma, ou seja, não existe nenhuma situação em que os cenários cobertos por um determinado detector fossem todos eles cobertos pelos outros 19 detectores. O caso 2, por exemplo, só é coberto pelo detector M01-HC-03; assim como, o caso 19 pelo detector M02-HC-01; o caso 32 pelo detector M03-HC-05 e etc.

Cabe salientar ainda que mais pontos de vazamento gerariam, obviamente, mais simulações e mais plumas gasosas, e o processo de alocação poderia ser mais completo. Na consideração de mais cenários, a capacidade de um detector detectar diversas nuvens é muito mais provável, ou seja, dificilmente existiriam detectores na planta que fossem responsáveis pela detecção de somente uma nuvem ou de um número pequeno de nuvens. Em outras palavras, isso significa dizer que se fossem levados em consideração, por exemplo, 192 cenários, ao invés das 96 do presente trabalho, o aumento do número de detectores não seria proporcional, isto é, certamente o número ótimo seria inferior a 40 detectores.

5 CONCLUSÕES

Um modelo geométrico real e detalhado de uma unidade *offshore* foi confeccionado para avaliação do comportamento de nuvens gasosas provenientes de vazamentos em determinados módulos. A partir dos resultados obtidos, foi aplicada a metodologia de posicionamento de sensores para geração da malha de detecção de gases inflamáveis.

Assim como outros autores, recorreu-se a dados estatísticos de vazamento para definição dos possíveis cenários a serem analisados. Essa abordagem estatística foi necessária pela falta de informações detalhadas sobre o processo, inviabilizando a realização de uma análise preliminar de perigo.

Constatou-se que a metodologia apresentada na modelagem do vazamento gera resultados coerentes, portanto, aceitáveis para o estudo em questão. Os cenários de vazamento para compressores são resultados de uma análise de frequência de incidentes por ano e são observadas em maior quantidade nesses equipamentos.

A estratégia de refinamento da malha por malha adaptativa demonstrou que esse recurso acelera a análise refinando apenas regiões de interesse e evitando refinamentos desnecessários ao longo do domínio. O teste de sensibilidade apresentou um critério aceitável, na medida em que a malha atingiu convergência quando sua quantidade de nós foi dobrada. Apesar de o critério ser aceito, uma malha contendo 1.400.000 nós é considerada pesada para análises em CFD, entretanto, o tempo computacional mostrou-se viável para o estudo.

Assim como Fleck, observou-se que os piores cenários são aqueles em que o jato se direciona para o piso da embarcação, levando ao acúmulo de gases inflamáveis e aumentando a possibilidade de ocorrer explosões. Em contrapartida, equipamentos que trabalham em altas pressões podem gerar jatos de fogo com grandes comprimentos impedindo rotas de fuga e impactando módulos adjacentes ao do vazamento em questão.

De posse do mapa das plumas gasosas resultante dos cenários analisados, a metodologia de alocação de detectores foi aplicada. Após definidos os locais onde seriam localizados os sensores, especificamente para o estudo de casos efetuado, foi possível determinar o sistema satisfatório de detecção de gases nos módulos contendo gases inflamáveis, composto por 20 pontos de detecção, sendo capaz de identificar todos os cenários simulados. A identificação dos vazamentos, bem como as alturas de cada ponto de detecção foram obtidas de forma bastante prática e confiável, com o auxílio do *software* CFX-POST.

Apesar de alguns casos serem detectados em alturas diferentes da recomendada na metodologia, as nuvens geradas representam um sistema estacionário no qual não ocorrem variações de direção de vento. Este princípio não ocorre na realidade, pois a instabilidade do ar leva a variações da direção do vento, permitindo assim, que esses casos sejam capturados pelo sistema de detecção mesmo em pequenos intervalos de tempo.

6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Na complementação deste estudo é importante obter mais detalhes geométricos da unidade objetivando alcançar resultados mais próximos da realidade, aumentando a confiabilidade do estudo. Com os avanços dos *softwares* próprios para geração de malhas computacionais, será possível representar equipamentos com dimensões menores e criar malhas híbridas possibilitando cálculos mais precisos.

É importante realizar uma análise preliminar de perigo objetivando obter todas as possíveis fontes de vazamento e estimar todas as plumas gasosas geradas por esses cenários. Assim, aplicar a metodologia de posicionamento de detectores verificando os casos que necessitam de detectores com alturas diferentes ou implementar uma metodologia alternativa para posicionamento vertical dos dispositivos em toda a plataforma. A elaboração de uma rotina computacional para varredura da malha computacional possibilitaria a busca de pontos otimizados para alocação dos detectores, evitando assim, erros provocados pela limitação humana na análise de todas as plumas gasosas.

Recomenda-se realizar simulações transientes para avaliação do tempo de detecção da rede de detectores proposta. A eficiência do sistema de detecção de gases poderia ser apresentada por meio do tempo de detecção para tomada de decisões dos operadores. Simulações em regime estacionário não estimam o comportamento das plumas gasosas em vazamentos com menor duração, sendo assim, a análise transiente poderia ser realizada com base no inventário contido nas linhas de processo.

Assim como recomendado por Fleck (2008), é conveniente também, quando disponíveis os dados, efetuar uma análise custo benefício, onde o balanço dos benefícios e custos associados à adição de cada detector, ou à consideração de alarmes espúrios, utilizando uma probabilidade de falha tolerável, é efetuado, ajudando na determinação do número ótimo de sensores em áreas da plataforma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS 13.0 Help, 2011.

Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot E. N. (2002), Transport Phenomena, 2ª Ed., John Wiley & Sons Inc., New York.

Crowl, D. A., Louvar, J. F. (2002), Chemical Process Safety Fundamentals With Applications, 2ª Ed. Prentice Hall Inc.

Devold, H. (2010), Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production, ABB Oil and Gas, Oslo.

Fleck, A. B. (2008), Dispersão de Gases Inflamáveis em Plataformas Offshore: Localização de Detectores, Dissertação de Mestrado, UFRJ/EQ, Rio de Janeiro.

Fox, R. W., McDonald, A. T., Pritchard, P. J. (2006), Introdução à Mecânica dos Fluidos, 6ª Ed., LTC Editora.

Gomes, E. G. (2012), Dispersão de Gases Inflamáveis em Unidades de Processamento de Petróleo: Otimização de Detectores, Dissertação de Mestrado, UFRJ/EQ, Rio de Janeiro.

Health & Safety Executive (2002), Offshore Hydrocarbon Releases Statistics and Analysis.

Health & Safety Executive (2004), The Selection and use of flammable gas detectors.

Health & Safety Laboratory (2005), CFD Modelling of Low Pressure Jets for Area Classification, Fire and Explosion Group.

iESSS - Instituto ESSS de Pesquisa e Desenvolvimento.

Kelsey, A., Hemingway, M. A., Walsh, P. T., Conolly, S. (2002), Evaluation of Flammable Gas Detector Networks Based on Experimental Simulations of Offshore, High Pressure Gas Releases, Institution of Chemical Engineers, Vol 80, Part B.

Lees, F. P. (1996), Loss Prevention in the Process Industries, volume 1, Butterworth-Heinemann, 2ª Ed., Elsevier.

- Mendes, M. F., Mansur, W., Araújo, M. S., Salomão, W. (1999), Designing Gas Detection Systems for Offshore Installations Using CFD Models, Petrobras e MTL Engenharia, The Proceeding of the Ninth (1999) International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Volume IV, Brest, France.
- Neto, A.S. (2002), Fundamentos da Turbulência nos Fluidos, Em: Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), Turbulência, Ediouro Gráfica e Editora S.A, Volume 1, Rio de Janeiro.
- Novembre, N., Podenzani, F., Colombo, E. (2006), Numerical Study For Accidental Gas Releases From High Pressure Pipelines, European Conference on Computational Fluid Dynamics.
- Popiolek, T.L., Vaz dos Santos, M.A. (2001), Um Novo Critério de Adaptação de Malha, Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.
- Pupe, C.G., da Silva, A.S. (2006), O uso de CFD na previsão da dispersão de gases em plataformas offshore, Dissertação de Projeto Final, Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- Siqueira, D. M. B. (2009), Geração Adaptativa de Malhas de Superfícies Paramétricas com Controle de Curvatura, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Strøm, Φ ., Bakke, J.R. (1999), Gas Detector Location, Safety on Offshore Installations Conference.
- Klein, T.S. (2012), The Development and Application of Two-Time-Scale Turbulence Models for Non-Equilibrium Flows, Scholl of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester.
- Thomas, J.E. (2004), Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2a Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- TNO.(2005), The Netherlands Organization of Applied Scientific Research - Methods for the calculation of physical Effects (Yellow Book), CPR14E, 3ª Ed.
- Valle, M. L. M. (2007), Produtos do Setor de Combustíveis e de Lubrificantes, Editora Publit, Rio de Janeiro.