DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM PLATAFORMA OFFSHORE: LOCALIZAÇÃO DE DETECTORES

André Brenner Fleck

Dissertação de Mestrado

Orientadores

Profº Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Profº Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos
Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Março de 2008

DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM PLATAFORMA OFFSHORE: LOCALIZAÇÃO DE DETECTORES

André Brenner Fleck

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M Sc).

Orientada por:

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
(Presidente da Banca)

Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Aprovada por:

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

Aline Sarmento Procópio, D.Sc.

Carlos Eduardo Fontes da Costa e Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2008

Fleck, André Brenner.

Dispersão de Gases Inflamáveis em Plataformas *Offshore*: Localização de Detectores / André Brenner Fleck. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

ix, 219; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. 2008. Orientador(es): Ricardo de Andrade Medronho e Márcio Nele de Souza.

1. Localização de detectores. 2. Dispersão gasosa. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Dissertação (Pós-Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D. e Márcio Nele de Souza, D.Sc. I. Título.

A Deus.

Tu és digno, Senhor e Deus nosso,
de receber a glória, a honra e o poder,
porque todas as coisas tu criaste,
sim, por causa da tua vontade vieram a existir
e foram criadas.
(Apocalipse 4:11)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo Amor, Sabedoria e conhecimento, tornando-me capaz de realizar este trabalho. Isto é um fruto Seu.

Agradeço aos meus pais, Miguel e Claudete, por terem investido, e principalmente, sempre acreditado em mim.

Sou muito grato aos meus irmãos, Rodrigo e Leonardo, pela amizade e carinho.

Agradeço enormemente a minha noiva Rosa, pelo seu amor incondicional, amizade verdadeira e o incentivo, que foram fundamentais durante a execução deste trabalho.

Em especial, agradeço aos meus orientadores, Ricardo de Andrade Medronho e Márcio Nele de Souza pelo conhecimento passado, pela troca de experiências, idéias, sugestões, pelos favores e é claro pela paciência. Agradeço não só a orientação, mas também a amizade adquirida pelo nosso convívio.

Agradeço a todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, em particular a minha amiga Carolina e aos meus companheiros do LabCFD, Diego, Aline e Fred. Sou bastante grato também, ao Alyson e a Camila pelas dicas e pela bibliografia que disponibilizaram.

Agradeço ao “mestre” Carlos Rosa e aos meus chefes Decnop e Nishimura, pelo apoio e incentivo.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química / UFRJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

DISPERSÃO DE GASES INFLAMÁVEIS EM PLATAFORMA OFFSHORE: LOCALIZAÇÃO DE DETECTORES

André Brenner Fleck

Março, 2008

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Em atividades de exploração e produção de petróleo em estruturas *offshore* há sempre o risco associado ao vazamento de gases inflamáveis, que em misturas estequiométricas com o ar podem sofrer ignição, causando acidentes com explosões, resultando em danos pessoais, às instalações, ao ambiente ou à imagem da companhia. A P-36 em 2001, na Bacia de Campos e a Piper Alpha em 1988, no Mar do Norte, são exemplos de acidentes em plataformas marítimas com explosões e vítimas. Assim, deve-se considerar durante o projeto de plataformas *offshore*, sistemas de detecção de gases inflamáveis, cujo projeto geralmente baseia-se em normas técnicas que não fornecem todas as informações necessárias para determinar o número e a localização ótimos dos detectores, podendo resultar em aumento dos custos, tanto pelo excesso de sensores quanto pelos danos gerados pela falta destes. Neste trabalho, empregou-se Fluidodinâmica Computacional (CFD), para prever a formação de plumas de gás, para então, aplicar-se uma metodologia proposta no trabalho e, assim, determinar a melhor posição e a quantidade necessária de pontos de detecção. As simulações numéricas são conduzidas conforme as condições metereológicas da região e o *layout* de uma plataforma típica, cuja seção de compressão foi selecionada para o estudo de caso, contemplando apenas um ponto de vazamento em seis direções ortogonais, cada uma em oito direções distintas de vento. Baseado nos resultados obtidos, acredita-se que esta metodologia seja uma ferramenta útil para avaliar e melhorar o projeto do sistema de detecção de gases inflamáveis de toda a plataforma.

Abstract of the Dissertation presented to Curso de Pós-graduação em Tecnologia de Procesos Químicos e Bioquímicos - EQ/UFRJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FLAMMABLE GAS DISPERSION IN OFFSHORE PLATFORM:
DETECTORS LOCATION

André Brenner Fleck

March, 2008

Supervisors: Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.
Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Oil exploration and production activities in offshore structures always has the risk associated with the leaks of flammable gases. Those gases in stoichiometric mixtures with air can suffer ignition, causing accidents with explosions that may results in injuries to people, to installations, to the environment and even to the image of the company. The P-36 in 2001, Campos Basin and the Piper Alpha in 1988, North Sea, are examples of accidents in maritime platforms with explosions and victims. Thus, detection systems of flammable gases must be considered during the offshore platforms projects. Those systems are generally based on technical norms that do not supply all the necessary information to determine the best number and location of the detectors. Therefore, there is a possibility of both cost increases due to an overestimated number of sensors or platform damages due to lack of these sensors. In this work, Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to predict gas plumes developments, and then, applying this work proposal methodology, the best position and amount of detention points were determined. The numerical simulations were carried out taking in account the region meteorological conditions. A typical platform layout was used in the simulations and the compression section was selected for the case study. One point of leakage in six orthogonal directions was employed. Each one of these six directions was submitted to eight distinct wind directions. Based in this case study, it is believed that this methodology is a useful tool to evaluate and to improve the project of the flammable gases detection system in the entire platform.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Motivação 1

1.2. Objetivo 5

1.3. Estrutura do Trabalho 5

2. DETECÇÃO DE GASES 7

2.1. Detecção do Vazamento 7

2.2. Níveis de Detecção e Ação 10

2.3. Localização dos Detectores 11

2.3.1. Recomendações Gerais 11

2.3.2. Estratégias Utilizadas para Alocção de Detectores 13

2.3.2.1. Strϕm *et al.* (1999) 13

2.3.2.2. Kelsey *et al*. (2002) 14

2.3.2.3. Vianna (2004) 16

3. VAZAMENTOS 18

3.1. Vazamentos de Gases Inflamáveis 18

3.2. Classificação de Vazamentos 18

3.3. Análise Preliminar de Risco: Identificação dos Pontos de Vazamento .. 19

3.3.1. Taxas de Falhas Ocasionando Vazamentos 20

3.3.1.1. Sistemas 20

3.3.1.2. Equipamentos 21

3.4. Distribuição de Tamanhos dos Orifícios 22

4. MODELOS DE DISPERSÃO 26

4.1. Modelos de Dispersão Gasosa 27

4.1.1. Modelo de Plumas e *Puffs* 29

4.1.2. Modelo de Jatos 30

5. MECÂNICA DOS FLUIDOS 34

5.1. Escoamentos Turbulentos 34

5.2. Modelagem Matemática 35

5.2.1. Modelos de Turbulência 38

5.2.2. Modelos de Viscosidade Turbulenta 40

5.2.2.1. Modelo à Equação Zero (*Zero equation*) 41

5.2.2.2. Modelo κ–ε 42

5.3. Simulação Numérica Direta (DNS) 44

5.4. Escoamentos Gasosos 45

5.4.1. Escoamentos Compressíveis 45

5.4.2. Vazamento na Fase Gasosa (Lees, 1996) 46

6. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) 48

6.1. Representatividade da Solução Numérica 51

6.2. Discretização do Domínio (Malha Computacional) 52

6.2.1. Modelos de Sub-malha 54

7. MATERIAIS E MÉTODOS 56

7.1. *Software* e *Hardware* 56

7.2. Variáveis de Interesse na Modelagem do Problema Físico 56

7.3. Geometria e Malha Computacional 56

7.4. Condições de Contorno do Vazamento..... 61

7.4.1. Definição das Condições Meteorológicas da Região da Plataforma 63
7.4.2. Caracterização das Substâncias Envolvidas 66

7.5. Parâmetros da Simulação 66

7.6. Planejamento Experimental 68

7.7. Metodologia Proposta 70

7.7.1. Definição do Sistema de Detecção 70
7.7.2. Classificação dos Detectores 72
7.7.3. Sistema Otimizado de Detecção..... 73
7.7.4. Altura do Sistema Otimizado de Detecção..... 74

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO 76

8.1. Estudo do Jato em CFD 76

8.2. Estudo de Casos: Vazamento no Compressor do Segundo Estágio de Compressão do Segundo Trem de Compressores 82

8.2.1. Vento na Direção Nordeste 86
8.2.2. Vento na Direção Norte 95
8.2.3. Vento Fraco na Direção Noroeste 103
8.2.4. Vento na Direção Noroeste com Pequeno Vazamento 111

8.3. Localização do Vazamento no Equipamento 120

8.4. Aplicação da Metodologia de Alocação de Detectores 121

8.4.1. Determinação do Sistema de Detecção Otimizado 121

8.4.2. Determinação da Altura dos Detectores do Sistema de Otimizado 126

9. CONCLUSÕES..... 127

10. RECOMENDAÇÕES..... 130

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 133

SITES VISITADOS..... 138

ANEXO A..... 139

A.1. Vento na Direção Sul 139
A.2. Vento na Direção Leste 147
A.3. Vento na Direção Oeste..... 155
A.4. Vento na Direção Sudoeste 163
A.5. Vento na Direção Noroeste..... 171
A.6. Vento na Direção Sudeste..... 178

ANEXO B..... 187

B.1. Vento na Direção Nordeste 187
B.2. Vento na Direção Sudoeste 187
B.3. Vento na Direção Noroeste..... 188
B.4. Vento na Direção Sudeste 188
B.5. Vento Fraco na Direção Noroeste 188

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Tipos de Plataformas, fixa, auto-elevável, semi-submersível e navio sonda, respectivamente. (Thomas *et al*., 2004)..... 2

Figura 1.2 - (a) P-36 antes e (b) após o acidente de março de 2001 (Terra e Folha online)..... 3

Figura 1.3 - Etapas para definição do sistema ótimo de detecção da plataforma..... 6

Figura 2.1 - Categorias de sistemas de detecção de vazamento (CCPS, 2000)..... 9

Figura 3.1 - Tipo de liberação em vazamentos (HSE, 2002) 20

Figura 3.2 - Taxas de falhas em sistemas (vazamento / sistema ano) (HSE, 2002)..... 21

Figura 3.3 - Taxas de falhas em equipamentos (vazamento / equipamento ano) (HSE, 2002)..... 22

Figura 3.4 - Taxas e severidade de falhas em sistemas *offshore* e distribuição de tamanho de orifícios (HSE, 2001) 24

Figura 4.1 - Pluma característica formada por um vazamento contínuo (CCPS, 2000) 29

Figura 4.2 - *Puff* formado por um vazamento instantâneo (CCPS, 2000)..... 30

Figura 5.1 - Comparação das flutuações em escoamentos laminar e turbulento (CEFT/FEUP, 2006) 36

Figura 6.1 - Etapas para uma simulação de CFD usando o CFX da ANSYS (Rigas, 2004)..... 50

Figura 6.2 - Malhas não-estruturada e estruturada não-uniforme, respectivamente (HSL, 2002) e (Simões *et al.*, 2003)..... 53

Figura 7.1 - Geometria simplificada de uma plataforma semi-submersível..... 57

Figura 7.2 - Geometria inscrita no contorno da plataforma 57

Figura 7.3 - (a) Locais dos troncos de cone no compressor e (b) em detalhe 58

Figura 7.4 - Malha gerada no CFX-MESH a partir da geometria usada 60

Figura 7.5 - (a) Detalhe do refino especial da malha nas regiões do vazamento e (b) malha do tronco de cone 61

Figura 7.6 - Direções de possíveis vazamentos no compressor 62

Figura 7.7 - Rosa-dos-ventos da plataforma 64

Figura 7.8 - Malha da direção de entrada no volume de controle escolhida como Norte e as 8 direções de vento usadas no estudo 65

Figura 7.9 - Rede de 5 m x 5 m de pontos de detecção inicialmente proposta 71

Figura 7.10 – (a) Detalhe das linhas nos pontos de detecção, (b) vista frontal e (c) vista lateral 75

Figura 7.11 - Exemplo do gráfico da fração volumétrica de gás variando ao longo de uma linha, mostrando a altura de 2,5 m relacionada ao nível de detecção para um determinado cenário 75

Figura 8.1 - (a) Geometria e (b) malha utilizadas no estudo do jato 77

Figura 8.2 - Ângulo de espalhamento do jato para escoamentos (a) incompressível e (b) levemente compressível 78

Figura 8.3 - Perfil de velocidade na linha central do jato para escoamento (a) incompressível e (b) levemente compressível 79

Figura 8.4 - Perfil de velocidade do Jato, em diferentes alturas, para os escoamentos (a) incompressível e (b) levemente compressível 80

Figura 8.5 - Variação da fração volumétrica de gás na linha central do jato para escoamento (a) incompressível e (b) levemente compressível 82

Figura 8.6 - Campo de escoamento do vento na direção Nordeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade 87
Figura 8.7 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Leste (X) 88
Figura 8.8 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Oeste (Xm)..... 89
Figura 8.9 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para cima (Y) 90
Figura 8.10 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores , e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Nordeste e vazamento para baixo (Ym) 91
Figura 8.11 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Sul (Z)..... 92
Figura 8.12 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Norte (Zm)..... 93
Figura 8.13 - Campo de escoamento do vento na direção Norte nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade..... 96

Figura 8.14 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Leste (X) 97
Figura 8.15 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Oeste (Xm)..... 98
Figura 8.16 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para cima (Y) 99
Figura 8.17 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores , e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Norte e vazamento para baixo (Ym). 100
Figura 8.18 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Sul (Z)..... 101
Figura 8.19 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Norte (Zm)..... 102
Figura 8.20 - Campo de escoamento do vento fraco na direção Noroeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade..... 104
Figura 8.21 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Leste (X)..... 105

Figura 8.22 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Oeste (Xm) 106
Figura 8.23 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para cima (Y) 107
Figura 8.24 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento fraco para Noroeste e vazamento para baixo (Ym) 108
Figura 8.25 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Sul (Z) 109
Figura 8.26 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco Noroeste e vazamento para Norte (Zm) 110
Figura 8.27 - Campo de escoamento do vento na direção Noroeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade 112
Figura 8.28 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Leste (X) 113
Figura 8.29 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Oeste (Xm) 114

Figura 8.30 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para cima (Y) 115
Figura 8.31 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Noroeste e vazamento pequeno para baixo (Ym) 116
Figura 8.32 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Sul (Z) 117
Figura 8.33 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Norte (Zm) 118
Figura 8.34 - Sistema de detecção otimizado para o estudo de caso proposto. 122
Figura 8.35 - Sistema de detecção otimizado, (a) pelo rearranjo de 2 pontos de detecção e (b) pelo rearranjo de 2 pontos de detecção e a adição de um ponto, para o estudo de caso proposto. 124
Figura 8.36 - Gráfico da % de cenários detectados x Número de detectores usados ... 125
Figura A.1 - Campo de escoamento do vento na direção Sul nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. 140
Figura A.2 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Leste (X) 141

Figura A.3 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Oeste (Xm) 142
Figura A.4 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Sul e vazamento para cima (Y). . 143
Figura A.5 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sul e vazamento para baixo (Ym) 144
Figura A.6 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Sul (Z)..... 145
Figura A.7 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Norte (Zm)..... 146
Figura A.8 - Campo de escoamento do vento na direção Leste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade..... 148
Figura A.9 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Leste (X)..... 149
Figura A.10 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Oeste (Xm)..... 150

Figura A.11 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Leste e vazamento para cima (Y) 151

Figura A.12 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Leste e vazamento para baixo (Ym) 152

Figura A.13 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Sul (Z) 153

Figura A.14 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Norte (Zm) 154

Figura A.15 - Campo de escoamento do vento na direção Oeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade 156

Figura A.16 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Leste (X) 157

Figura A.17 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem e horizontal, para vento Oeste e vazamento para Oeste (Xm) 158

Figura A.18 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Oeste e vazamento para cima (Y) 159

Figura A.19 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Oeste e vazamento para baixo (Ym) 160

Figura A.20 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Sul (Z)..... 161

Figura A.21 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Norte (Zm)..... 162

Figura A.22 - Campo de escoamento do vento na direção Sudoeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade 164

Figura A.23 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Leste (X)..... 165

Figura A.24 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Oeste (Xm) 166

Figura A.25 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para cima (Y)..... 167

Figura A.26 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com

corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sudoeste e vazamento para baixo (Ym) 168

Figura A.27 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Sul (Z)..... 169

Figura A.28 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Norte (Zm)..... 170

Figura A.29 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Leste (X)..... 172

Figura A.30 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Oeste (Xm) 173

Figura A.31 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para cima (Y)..... 174

Figura A.32 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Noroeste e vazamento para baixo (Ym) 175

Figura A.33 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Sul (Z)..... 176

Figura A.34 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Norte (Zm)..... 177
Figura A.35 - Campo de escoamento do vento na direção Sudeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade 179
Figura A.36 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Leste (X) 180
Figura A.37 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Oeste (Xm)..... 181
Figura A.38 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical, para vento Sudeste e vazamento para cima (Y) 182
Figura A.39 - (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sudeste e vazamento para baixo (Ym) 183
Figura A.40 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Sul (Z)..... 184
Figura A.41 - (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Norte (Zm)..... 185
Figura B.1 - Composição do vetor do vento na direção Nordeste..... 187

Figura B.2 - Composição do vetor do vento na direção Sudoeste..... 187

Figura B.3 - Composição do vetor do vento na direção Noroeste..... 188

Figura B.4 - Composição do vetor do vento na direção Sudeste..... 188

Figura B.5 - Composição do vetor do vento fraco na direção Noroeste 189

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Níveis de detecção, de ação e condições de confirmação (Kelsey *et al.*, 2002) 10

Tabela 3.1 - Sistema de classificação de vazamento de hidrocarboneto (HSE, 2000) ... 19

Tabela 5.1 - Valores das constantes da equação da taxa de dissipação turbulenta (CFX, 2007) 44

Tabela 7.1 - Direções do vento e suas respectivas velocidades médias (SIMO - Petrobras S/A) 63

Tabela 7.2 - Composição do gás natural 66

Tabela 7.3 - Condições de contorno 67

Tabela 7.4 - Parâmetros da simulação 68

Tabela 7.5 - Especificação das simulações realizadas 69

Tabela 8.1 - Condições de contorno do estudo do jato 76

Tabela 8.2 - Parâmetros da simulação do estudo do jato 77

Tabela 8.3 - Volumes de gás detectável e inflamável, frequências ponderadas e identificação dos cenários simulados 84

Tabela 8.4 - Coordenadas, número, identificação e *ranking* dos cenários detectados pelos sensores 126

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

A Área transversal ao orifício.

B Soma de todas as forças de campo.

C_{μ} Parâmetro do modelo k-ε.

$C_{\varepsilon 1}$ Parâmetro do modelo k-ε.

$C_{\varepsilon 2}$ Parâmetro do modelo k-ε.

C_D Coeficiente de descarga.

C_1 Metano.

C_2 Etano.

C_3 Propano.

C_4 Butano.

C_5^+ Pentano e hidrocarbonetos mais pesados.

C_{pto} Classificação ou *Ranking* do ponto de detecção.

f_{μ} Constante da equação de viscosidade turbulenta no modelo à equação zero.

f_{vaz} Frequência de ocorrência do vazamento, falhas/equipamento.ano.

FW_{cen} Frequência ponderada do cenário simulado.

g vetor gravidade.

L Leste.

l_t Escala de comprimento turbulento.

m Massa, kg ou vazão mássica do fluido.

n Número de detectores instalados num ponto ou número de cenários detectados.

N Norte.

NE Nordeste.

NO Noroeste.

O Oeste.

p Pressão.

p_{vento} Probabilidade do vento.

SO Sudoeste.

SE Sudeste.

S Sul.

T Temperatura.

U vetor velocidade.

U_z Velocidade na direção z.

$\overline{U_z}$ Valor médio das velocidades calculado sobre um grande número de flutuações.

u_z Flutuação turbulenta da velocidade .

U_t Escala de velocidade turbulenta.

V_D Volume total do domínio.

V_{inf} Volume inflamável ou explosivo (contendo entre 5 % e 15 % de gás vazado).

X Coordenada de um ponto no domínio ou vazamento de gás na direção Leste.

Xm Vazamento de gás na direção Oeste.

Y Coordenada de um ponto no domínio ou vazamento de gás para cima.

Ym Vazamento de gás para baixo.

Z Coordenada de um ponto no domínio ou vazamento de gás na direção Sul.

Zm Vazamento na direção Norte.

w_{expl} Ponderação referente a intensidade da explosão.

LETRAS GREGAS

β *Blend Factor* (esquema advectivo).

γ Relação entre os calores específicos a pressão e a volume constantes (C_p /C_v).

δ Delta de Kroenecker.

ε Taxa de dissipação de Energia Cinética Turbulenta, m²/s².

Φ Variável ou propriedade do escoamento num instante t.

$\overline{\Phi}$ Média temporal da variável ou propriedade do escoamento.

Φ ’ Flutuação turbulenta da variável ou propriedade do escoamento no instante t.

κ Energia cinética turbulenta.

ρ Massa específica.

μ Viscosidade absoluta.

μ_T Viscosidade turbulenta.

μ_{eff} Viscosidade efetiva.

σ_κ Parâmetro do modelo *k*-ε.

σ_ε Parâmetro do modelo *k*-ε.

τ Tensor Tensão, kg/m.s².

$\bar{\boldsymbol{\tau}}^{V}$ Tensor relacionado ao fluxo do momento viscoso.

$\bar{\boldsymbol{\tau}}^{T}$ Tensor do fluxo de momento turbulento.

ψ_0 Variável utilizada no cálculo da vazão mássica inicial de gás de um orifício.

ζ Viscosidade *bulk*.

SUBSCRITOS

0 Inicial ou a montante.

a Nas condições atmosféricas.

m Indica sentido negativo dos eixos, adotados nas simulações.

real Valor real da variável.

set Variável inserida como condição de contorno.

ref Variável de referência.

OPERADORES

$\nabla.()$ Operador Divergente

$\nabla()$ Operador Gradiente

$\bar{()}$ Grandeza Média

$\int_a^b()$ Operador Integral

$\partial()/\partial()$ Derivada

$()\otimes()$ Produto Vetorial

SIGLAS

CEFT / FEUP Centro de Estudos de Fenómenos de Transporte da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

CFD Computacional fluid dynamics.

CCPS Center for Chemical Process Safety

FPSO Floating, Production, Storage and Offloading.

HSE Health & Safe Executive

HSL Health & Safe Laboratory.

LEL Low Explosivity Level .

LES Large Eddy Simulation.

PDR Porosity/Distributed Resistence.

RMS Raiz do erro quadrático.

SDV Shut Down Valves.

UEL Upper Explosivity Level .

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O petróleo é um recurso energético que constitui um dos principais suportes para o desenvolvimento econômico mundial, sua importância está na diversidade de derivados que dele podem ser extraídos, principalmente na forma de combustíveis. É também empregado numa das mais importantes indústrias de base, a petroquímica.

Plataformas para extração de petróleo e gás são largamente utilizadas no Brasil e no mundo. No ano de 2007, aproximadamente 88,5 % da produção de óleo e mais de 63 % da produção de gás brasileiras foram provenientes de reservas marítimas, sendo a maioria dessas reservas em águas profundas (entre 400 e 1000 metros) e ultraprofundas (a partir de 1000 metros) (Petrobras S/A).

A descoberta de novos campos marítimos de petróleo e gás, como os campos gigantes de Tupi e Júpter no pré-sal, elevam ainda mais as reservas deste insumo em áreas *offshore* de lâminas d'água profundas e ultraprofundas, e consequentemente, aumentam também a necessidade de se utilizar sistemas flutuantes de exploração e produção.

No extenso litoral brasileiro, a Petrobras tem enormes campos de produção, e também de exploração, de petróleo e gás em bacias como de as Campos, do Espírito Santo, de Santos, entre outras. A empresa totalizou 103 plataformas de produção, com uma produção média diária de 2 milhões 298 mil barris de óleo equivalente em 2006. Neste mesmo ano, possuia também 44 sondas marítimas de perfuração. (Petrobras S/A)

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-sonda e plataformas do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) (Figura 1.1).

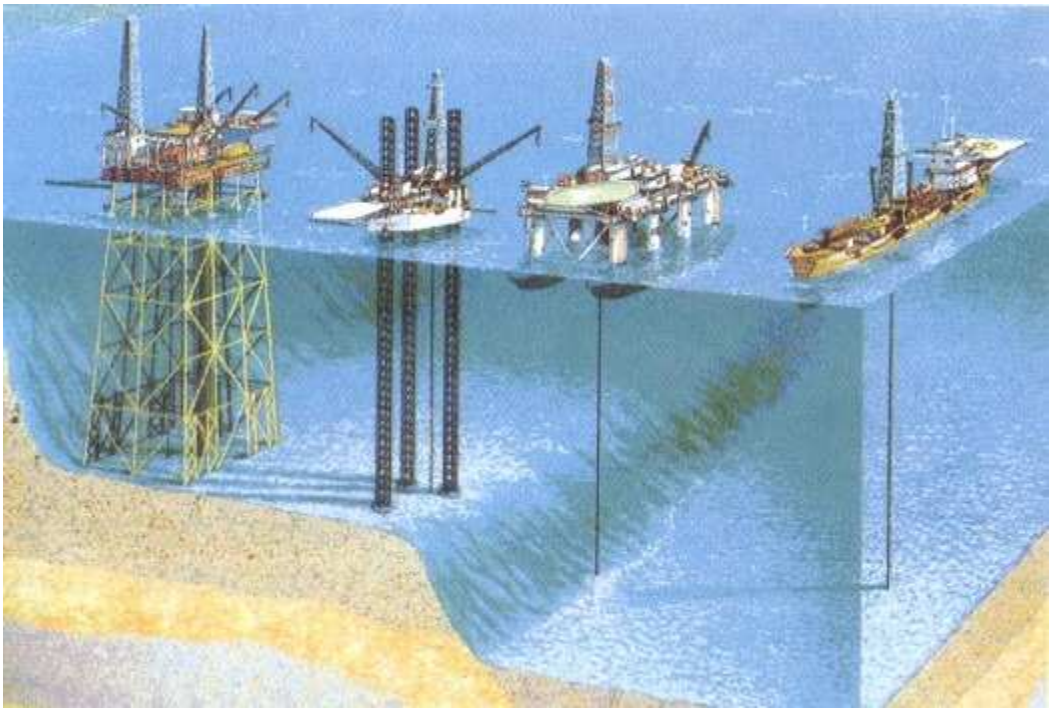


Figura 1.1 - Tipos de Plataformas, fixa, auto-elevável, semi-submersível e navio sonda, respectivamente. (Thomas *et al.*, 2004).

Na atividade de exploração e produção de petróleo, em estruturas *on* e *offshore* há sempre o risco associado ao vazamento de gás ou óleo, que sofrendo ignição pode causar incêndio e explosões. Por isso, deve-se considerar, durante o projeto destas plataformas, sistemas de detecção de vazamentos de gases tóxicos, bem como de gases inflamáveis.

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).

Um exemplo recente de explosão em plataformas no Brasil é o da P-36, na época, a maior plataforma de produção de petróleo do mundo. A plataforma sofreu duas explosões em março de 2001 causando a morte de 11 funcionários. A P-36 entrou em funcionamento em março de 2000 e se localizava no Campo do Roncador, no litoral norte fluminense (Figura 1.2).

Em 1988 no Mar do Norte, uma pequena explosão no módulo de compressão da plataforma *offshore* Piper Alpha, causou um incêndio que resultou na ruptura de um riser. A maior parte da plataforma foi na sequência destruída pelo fogo, causando a morte de 167 pessoas, com apenas 62 sobreviventes (HSL, 2002). Após esse acidente análises de risco passaram a ser obrigatórias para todas as atividades.

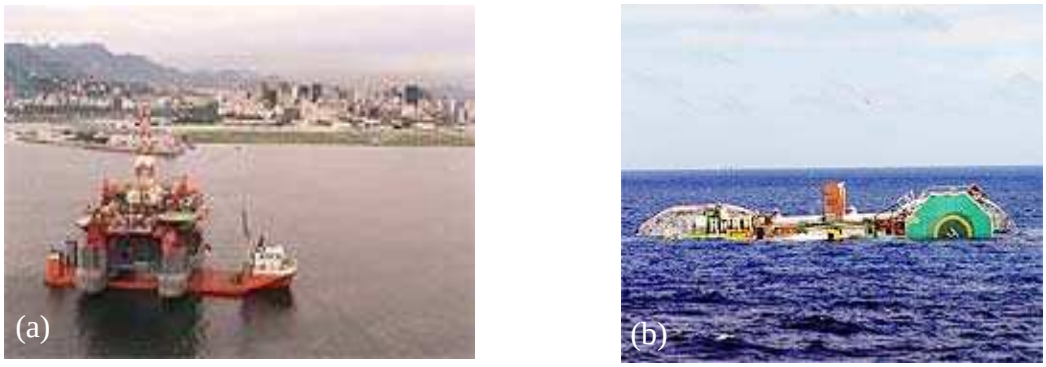


Figura 1.2 – (a) P-36 antes e (b) após o acidente de março de 2001 (Terra e Folha online).

Para Osenbroch *et al*. (2002), é essencial saber em análises de perigo de explosão de gás em plataformas *offshore*, efetuadas para evitar acidentes como os supracitados, 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, é frequentemente conservativo. 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*.

Estatísticas do HSE (*Health & Safe Executive*) no período entre 1992 e 1999, mostram que de um total de 873 vazamentos gasosos em ambientes *offshore*, apenas 540 (62%) foram inicialmente detectados pelos sistemas de detecção de gases, sendo o restante identificado por pessoas, usando o olfato ou a audição. Assim, sensores bem localizados podem melhorar a performance de um sistema de detecção e enfatizam a necessidade de entendimento da dispersão gasosa, da ventilação, e dos processos executados no ambiente *offshore*, bem como o seu *layout*, na decisão da alocação desses instrumentos de identificação de vazamentos de gás (Strϕm *et al.*, 1999 e Kelsey *et al.*, 2002).

Geralmente, o projeto de um sistema de detecção de gases se baseia em normas técnicas que não fornecem todas as informações necessárias para determinar o número e a localização ótimos dos detectores. Elas recomendam, de maneira vaga, que os sensores estejam localizados perto de possíveis pontos de vazamento, entretanto, não estabelecem distâncias, metodologias para considerar a influência de variáveis externas, o número mínimo de detectores e a confiança do detector e/ou do sistema (Strϕm *et al.*, 1999 e Pupe *et al*., 2006). O projeto fica, assim, dependente exclusivamente da sensibilidade do projetista, o que poderá conduzir a sistemas super ou subdimensionados.

Portanto, as limitações acima listadas podem resultar em aumento de custo, quer seja pelo excesso de detectores ou pelos danos gerados pela falta destes. É necessário, então, substituir critérios genéricos por uma análise quantitativa, baseada em critérios de engenharia. Neste trabalho é previsto inicialmente, com o uso da Fluidodinâmica Computacional (CFD), onde se formarão as plumas para então, a partir da metodologia proposta determinar o correto posicionamento e quantidade de detectores necessários.

Simulações em CFD têm dado importantes contribuições em análises de segurança em diversas áreas. Esta tendência é dirigida pelo fato de que experimentos, especialmente em grande escala, têm um alto custo e freqüentemente não são plausíveis de serem realizados. E hoje em dia, a velocidade de crescimento de computadores de alto desempenho está possibilitando realizar simulações de CFD de cenários reais de acidentes (Baraldi *et al.*, 2007).

Além disso, houve uma grande melhora nos últimos anos na modelagem de grandes números de dispersões de nuvens reais, em ambientes congestionados, com CFD. Os códigos de CFD comerciais vêm sendo validados para tais aplicações e os resultados são bastante encorajadores, confirmando a sua aplicabilidade em problemas destas áreas (HSL, 2005 e Bakke *et al.*, 2003). Assim sendo, um estudo usando CFD torna-se adequado para prever a localização ótima do sistema de detecção de gás de uma plataforma.

1.2. Objetivo

O trabalho propõe inicialmente um estudo do comportamento de nuvens de gás geradas por vazamentos em uma plataforma *offshore*. O estudo modela e analisa a dispersão gasosa, baseando-se na simulação computacional em CFD. As simulações são conduzidas conforme o *layout* de uma plataforma típica e as condições meteorológicas da região no entorno da plataforma. Por fim, a metodologia proposta define um sistema ótimo de detecção de gases inflamáveis para a plataforma, ou seja, a quantidade mínima necessária, bem como a melhor localização dos detectores.

1.3. Estrutura do Trabalho

O estudo foi dividido em várias etapas (Figura 1.3), que são apresentadas e discutidas ao longo do trabalho. A estrutura do trabalho propõe inicialmente a elaboração de uma análise preliminar de perigos, objetivando identificar os possíveis eventos de acidentes de vazamentos gasosos que podem resultar em danos pessoais, à instalação, ao ambiente ou à imagem de uma companhia. Para melhorar o entendimento dos resultados, a instalação pode ser divida em sistemas e/ou subsistemas.

De posse destes resultados, parte-se para a identificação dos pontos de vazamentos localizados nestes sistemas, ou seja, que equipamentos e em quais direções se dariam os vazamentos.

Condições meteorológicas da região onde a plataforma se encontra e características fisico-químicas do gás vazado, como pressão, temperatura e composição devem ser levadas em consideração no estudo.

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). Isto é uma função da geometria e do diâmetro do orifício de vazamento considerado e das condições termodinâmicas no local do vazamento.

As concentrações de gás resultantes de vazamentos e dispersões são determinadas utilizando um software de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Pacotes de CFD fornecem soluções numéricas das equações de conservação, que governam os escoamentos, no caso específico, do ar e dos gases vazados na plataforma. O problema considera a presença de obstáculos ao escoamento dos gases, traduzida pela existência dos diferentes equipamentos.

A seguir é proposta uma malha de detectores de gás que, em conjunto com o mapa das plumas de gás resultantes dos cenários analisados, são classificados de acordo com a capacidade de detecção dos casos. Pontos de detecção que identificarem apenas cenários redundantes, ou seja, já percebidos por outros sensores são eliminados.

Assim, após definidos os locais onde há maior eficiência na identificação e a quantidade de sensores a serem utilizados, é possível determinar a configuração ótima de detecção de gases da plataforma. Por fim é conveniente efetuar mais algumas simulações em CFD, objetivando a validação do sistema otimizado de detecção.

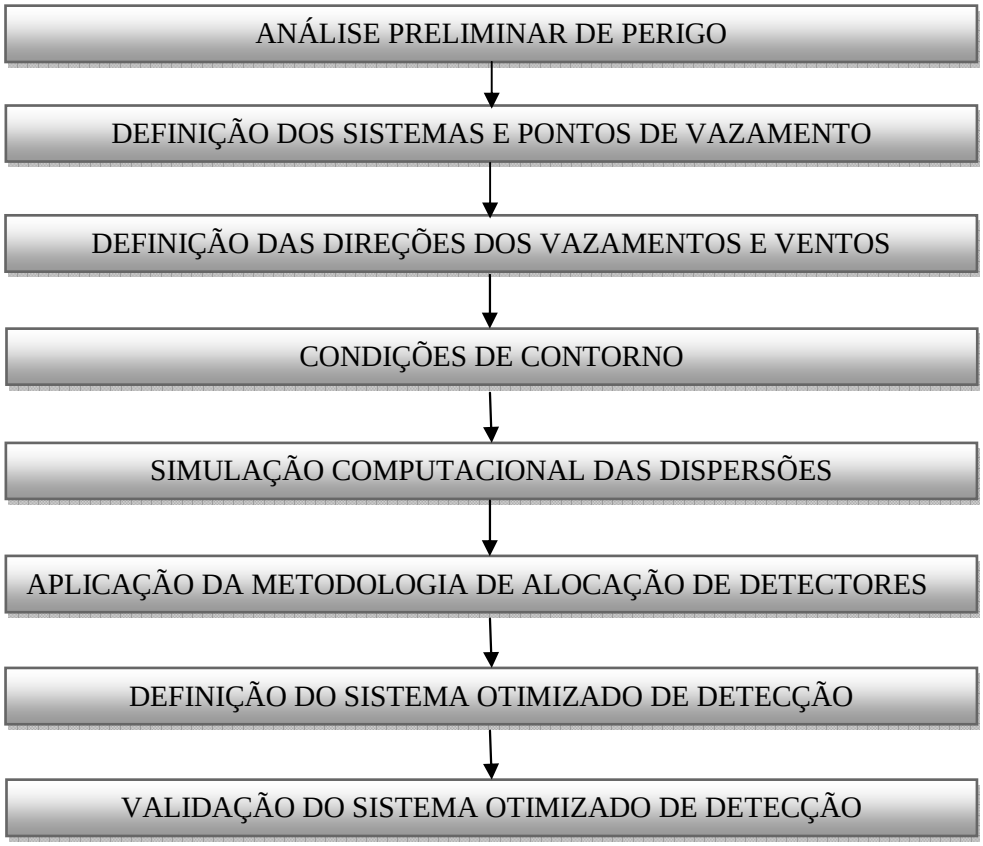


Figura 1.3 – Etapas para a definição do sistema ótimo de detecção da plataforma.

2. DETECÇÃO DE GASES

Após a detecção de um vazamento, a equipe de funcionários da planta deve responder e alertar a população circunvizinha que existe uma emergência no local. Isto é facilitado dispondo de dispositivos de reconhecimento do vazamento, como detectores gasosos e de um plano de contingência (Louvar *et al*., 2002).

Exigências básicas para um sistema de detecção de vazamentos são que o mesmo deve responder de forma efetiva e confiável ao perigo, e ser tolerante aos procedimentos do ambiente e do processo (HSE, 2004).

Um sistema de detecção de gases em plataformas marítimas de exploração e produção de petróleo é geralmente formado por dois subsistemas: um para a detecção de gases inflamáveis e outro para a detecção de gases tóxicos, especialmente gás sulfídrico (H_2S). Ambos monitoram as concentrações destes gases para preservar a vida humana e minimizar danos à estrutura e aos equipamentos da plataforma. Estes subsistemas são amplamente reconhecidos e utilizados como uma forma eficaz de proteção das instalações e de redução dos riscos para os seus empregados (CCPS, 2000).

Elementos essenciais na detecção de gases estão associados à mitigação do vazamento. Por causa da rapidez com que uma liberação pode se desenvolver, pode não haver tempo suficiente para se conduzir uma evacuação de emergência das populações próximas ao local, nem para uma resposta individual de emergência. Desta forma a rápida detecção do vazamento é imprescindível para evitar danos à plataforma ou à vida.

2.1. Detecção do Vazamento

Existem diversos métodos de detectação de vazamentos, que podem ser classificados em três categorias (Zhang, 1996):

- Métodos Biológicos: pessoas experientes ou cachorros treinados podem detectar e localizar um vazamento por inspeção visual, odor ou som.
- Métodos Baseados em *Hardware*: diferentes aparelhos são usados para ajudar na detecção e localização de vazamentos. Alguns desses *hardwares* incluem sensores acústicos e detectores de gás, detectores de pressão negativa e termografia infravermelho.
- Métodos Baseados em *Software*: vários pacotes computacionais são usados para detectar vazamentos em longas tubulações. A complexidade e confiabilidade desses pacotes variam significativamente. Exemplos desses métodos são detectores de mudança de pressão/vazão e balanço de massa/volume, sistemas baseados em modelos dinâmicos e análise da pressão pontual.

Nos métodos baseados em *Hardware*, detectores de gases tóxicos ou inflamáveis dão uma valiosa contribuição para a segurança de processos. Eles são usados para ativar alarmes se uma concentração especificada do gás ou vapor é excedida. Isto pode antecipar o perigo do acidente, ajudando na segurança das pessoas. No entanto, um detector não evita a ocorrência do vazamento ou indica qual ação deve ser tomada, ou seja, ele não substitui boas práticas de segurança e manuteção (HSE, 2004).

A razão do uso de detectores é que podem estar permanentemente localizados em uma área ou em uma parte do equipamento para fornecer um aviso adiantado de um vazamento. Há tmbém muitos tipos de instrumentos portáteis que podem ser usados para detectar vazamentos e advertirem as pessoas naquelas áreas onde os materiais perigosos podem estar concentrados.

Os tipos de sistemas de detecção podem ser classificados em duas categorias gerais, portáteis ou fixos. Os detectores fixos têm a característica de possuírem pontos de detecção montados permanentemente em locais específicos para detectar vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis. Detectores portáteis são usados em emergências, estes detectores podem usar pontos fixos com um sistema de amostragem ou detecção através de reação química.

Como mostrado na Figura 2.1, os sistemas fixos podem ser divididos em duas categorias gerais: aqueles com sensores locais, e aqueles que monitoram uma área extraindo uma amostra levando a um analisador central. Ambas as categorias podem ser divididas em sistemas para detectar gases inflamáveis ou tóxicos. Os instrumentos portáteis se dividem em categorias similares.

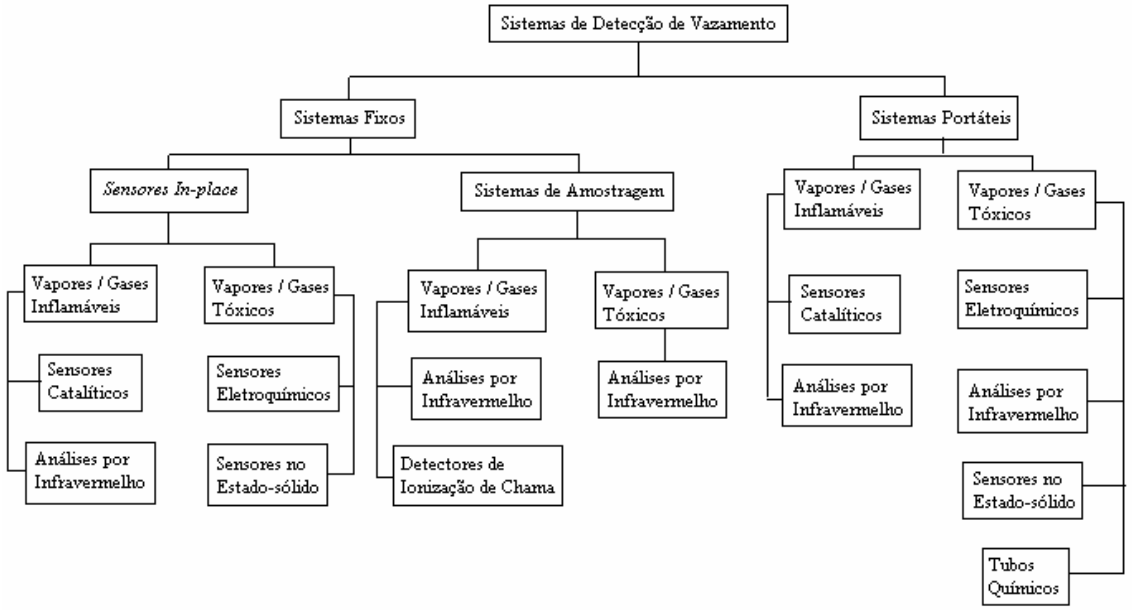


Figura 2.1 - Categorias dos sistemas de detecção de vazamento (CCPS, 2000).

Os detectores podem ser do tipo *point* que medem a concentração de gás no ponto de amostragem do instrumento. Já detectores do tipo *open-path* ou *beam* consistem tipicamente de uma fonte de radiação e um detector remoto, separados fisicamente por uma viga. O detector mede a concentração média de gás ao longo de todo caminho dessa viga (HSE, 2004).

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 fixo ou portátil, se é do tipo *point* ou *open path*, ou se há a presença de outros gases que podem afetar as leituras ou danificar o sensor. Os principais tipos de sensores são: catalítico, infravermelho, condutividade térmica, ionização de chama, temperatura de chama, semicondutor e ultrasônico (HSE, 2004).

2.2. Níveis de Detecção e 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 explosividade do gás ou 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).

Uma margem segura também deve ser incorporada para considerar pontos sem ventilação, onde vapores podem se acumular, e a variabilidade da ventilação natural. Uma opção é colocar dois níveis de alarme. O nível inferior (alarme ou detecção) pode agir como um aviso de um problema potencial que requer investigação. O nível superior (ação) pode soar uma resposta emergencial, uma evecuação, um desligamento, ou ambos. Para propósitos de detecção de vazamentos, HSE (2004) propõe que o primeiro nível de alarme deve ser o menor, preferencialmente não maior que 10 % do LEL (*Low Explosivity Level*). E o segundo não deve ser superior a 25 % do LEL.

A Tabela 2.1 mostra os níveis de detecção (ou alarme) e de ação, e a condição para confirmação do vazamento (número mínimo de sensores utilizados), para diferentes tipos de sensores. Os valores mostrados nesta tabela são intermediários de uma faixa de concentração de gases, comumente utilizada, para níveis de detecção e ação. O número de detectores necessários para dar a confirmação reflete na confiabilidade dos diferentes tipos (Kelsey *et al.*, 2002).

Tabela 2.1 – Níveis de detecção, de ação e condições de confirmação (Kelsey *et al.*, 2002)

Tipo de detector	*Nível de Detecção*	*Nível de Ação*	*Cond. Confirmação*
Catalitic point	20 % LEL	50 % LEL	Mínimo 2 de n
Infrared point	20 % LEL	50 % LEL	1 de n
Infrared beam	100 % LEL.m	300 % LEL.m	1 de n

Para Kelsey *et al.* (2005), a mudança do nível de detecção (diminuição da concentração de gás - % LEL - nos níveis de detecção e ação do instrumento) teria um efeito significativo, particularmente em vazamentos com pequenas taxas ou vazões, pois reduziriam-se os tempos de detecção. Mas pode levar a um número inaceitável de alarmes espúrios. O interesse neste trabalho é o nível de alarme dos detectores, que será fixado em 20 % do LEL.

2.3. Localização dos Detectores

2.3.1. Recomendações Gerais

Os instrumentos devem ser posicionados para detectar qualquer acumulação de gás antes de criar um perigo. Fatores a serem considerados são (HSE, 2004):

- A planta e os equipamentos do processo;
- O tipo de sensor;
- As propriedades do gás e suas características de dispersão;
- A ventilação;
- Outras questões de segurança, como localização das pessoas e dos equipamentos de proteção.

A planta e os equipamentos de processo devem ser avaliados para identificar as fontes mais prováveis de vazamentos de gases, sendo que Louvar *et al*. (2002), Kelsey *et al.*, (2002) e HSE (2004) propõem como exemplos: conexões e flanges de tubulações, válvulas, tubos danificados, compressores, cabines de análises, tanques ou vasos de estocagem, torres de resfriamento acima dos ventiladores, trocadores de calor e locais de enchimento ou esvaziamento de cargas.

Um segundo grupo de locais para monitoramento com detectores são as áreas que podem ser afetadas pelos vazamentos, como entradas de ar em salas de controle; locais que podem ser atingidos, devido à direção do vento (prédios de administração, casas de manutenção, comunidades vizinhas e etc); áreas próximas aos pontos que podem causar

ignição (fornos, *boilers*, *flares* e etc) ou pontos com potencial de vazamento; entradas de ar em abrigos temporários projetados para proteção de possíveis vazamentos.

O caminho do gás ou suas características de dispersão dependerão da densidade do gás e do padrão de ventilação. A densidade já foi usada para determinar a altura em que os sensores devem ser posicionados relativo à fonte potencial, por exemplo, o metano (gás natural) é menos denso que o ar, então ele subirá (HSE, 2004). Louvar *et al*. (2002) comentam que detectores para gases densos, como vapor de cloro, são tipicamente ajustados a uma altura de 0,3 a 1,0 m, enquanto que para gases leves, eles são instalados a uma altura de 1,5 a 2,4 m acima do solo.

A sensibilidade de uma rede de detecção de gases inflamáveis ao nível (altura) foi investigada por Kelsey *et al.* (2005). O uso de duas camadas de detectores aumentou a cobertura do ambiente, o que melhorou as taxas e o tempo médio de detecção. Redes com duas camadas de detecção podem ser essenciais em ambientes onde existem fluidos criogênicos ou gases densos. Ou até mesmo ambientes de alta pressão que acarretariam em vazamentos de jatos com altos momentos, ou seja, em condições sônicas, ou em mudanças de fase e em grandes diferenciais de densidade.

O padrão de ventilação para localizações externas depende da velocidade e direção do vento, *layout* e geometria da planta. Se necessário, testes de fumaça ou modelos computacionais podem ser usados para prever como o gás vazado se comportará e determinar o melhor lugar dos sensores (HSE, 2004). Ambos os métodos são também utilizados para verificar a localização dos sensores.

Os fabricantes de detectores devem ser consultados para recomendações de características de posicionamento e capacidades dos sensores, já que eles estão mais familiarizados com suas capacidades de detecção. Ao mesmo tempo o engenheiro do processo deve realizar sua própria pesquisa para assegurar que o equipamento instalado gerará a resposta desejada (Kelsey *et al.*, 2002).

O número de sensores deve ser considerado. Duplicação (ou triplicação) dos sensores e aparatos de controle são requeridos para monitoração contínua e para prevenir alarmes espúrios (HSE, 2004), que podem ser bastantes problemáticos.

2.3.2. Estratégias Utilizadas para Alocação de Detectores

Aqui são mostradas algumas estratégias que já foram utilizadas para otimização do número e localização de detectores de gás, ou seja, para criar um sistema de detecção de gases, cujo objetivo é proteger um determinado ambiente *on* ou *offshore* onde possa ocorrer vazamento de gases. A seguir são citadas e discutidas tais metodologias.

2.3.2.1. Strϕm *et al.* (1999)

Uma metodologia para a análise da localização de detectores de gases inflamáveis em ambientes *offshore* foi proposta por Strϕm e Bakke, que usaram os resultados de simulações em CFD para gerar dados de dispersão gasosa. Foram utilizadas no estudo, redes de detecção espaçadas de 4 m x 4 m com 24 sensores (*point detectors)*, em 3 alturas distintas da área da cabeça do poço da plataforma (totalizando 72 detectores), cujas medidas são 40,0 x 20,0 x 14,5 m. Entretanto, não são mostradas exatamente as alturas desses 3 níveis propostos. Além disso, presume-se que os pontos de detecção de cada malha estejam na mesma altura.

Um total de 54 simulações transientes foram conduzidas com um *software* de dinâmica dos fluidos computacional, variando condições do vento (baixa, média e alta ventilação), que foram distribuídas em 12 direções distintas. 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. Porém, não foram discutidos os cenários mais críticos em relação à direção do vazamento, impossibilitando, num estudo futuro, a redução na quantidade de simulações executadas.

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 otimizar a resposta à detecção, bem como a quantidade e localização do 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, o número e localização dos pontos de vazamento incluídos num estudo de detecção de gás devem ser baseados numa avaliação dos lugares plausíveis em ambientes reais, correspondendo a locais de vazamento definidos em estudos de análise de risco da área específica (Kelsey *et al.*, 2002).

2.3.2.2. Kelsey *et al.* (2002)

Dados de medidas experimentais de dispersões de gás natural provenientes de vazamentos de alta pressão num módulo de processo *offshore* (28,0 x 12,0 x 6,0 m) naturalmente ventilado foram usados para examinar como uma rede espaçada de 5 m x 5 m de detectores de gases inflamáveis (*point detectors* Infravermelhos ou Catalíticos), e outra composta por 4 *beam detectors* Infravermelhos, responderiam aos vazamentos. Para a primeira rede, foram propostas duas malhas em diferentes níveis, totalizando 24 detectores. Apesar dos autores mostrarem as coordenadas das redes de detecção proposta, eles não justificam claramente as duas alturas adotadas para os níveis propostos.

A rede virtual de detecção de gás, baseada em guias e práticas industriais normalmente utilizadas e aceitas pelas operadoras (HSE, 1993), incorporou níveis de detecção e ação (Tabela 2.1), 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.

Para avaliar a efetividade desses guias, bem como fazer recomendações para futuros guias, e para otimizar a localização dos detectores, variando local, número e tipo de sensores, usaram-se os seguintes parâmetros: vazão mássica do vazamento entre 0,5 e 10,0 kg/s; vazão (6 a 360 *air changes*/h), velocidade (0,9 a 8,6 m/s) e direção do vento (Leste e Oeste); e diferentes tipos de confinamentos do perímetro. Um total de 64 vazamentos no estado estacionário foram analisados em 3 pontos distintos no módulo, com o auxílio de programação no software MATLAB. 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.

Com relação ao tipo de sensor usado, devido às características de cada um, o estudo resultou numa rede de *point detectors* Infravermelhos que identificou, com sucesso, todos os vazamentos antes da formação de uma nuvem explosiva de 6 m de diâmetro (nível de detecção). A mesma rede de detectores Catalíticos, assim como a rede de *beam detectors* Infravermelhos, não obteve o mesmo sucesso. Já para o nível de ação, todas as 3 redes tiveram falhas. O efeito na mudança do número de detectores foi estudado pelos autores. A mudança no espaçamento da malha para 2,5 m x 2,5 m (192 detectores) e 10 m x 10 m (3 detectores), gerou um decréscimo pouco significativo e um aumento enorme no tempo de detecção, respectivamente, mostrando que a malha ótima para o caso é realmente a padrão de 5 m x 5 m, proposta inicialmente. Os autores, no entanto, não otimizaram a quantidade de pontos de detecção dessa rede inicialmente proposta de sensores 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.

2.3.2.3. Vianna (2004)

A metodologia de Vianna, para a determinação do número e localização ótimos dos detectores de gás em um piso de uma plataforma de produção de petróleo, baseia-se na noção de conjunto dominante minimo (de menor custo) de um grafo e sua aplicação aos problemas relacionados a controle e vigilância. A proposta consiste na divisão da área atingida pelo vazamento de gás em pequenas subáreas, gerando uma malha, na qual cada subárea é associada a um nó de um grafo. Essas subáreas formam um conjunto. Desta forma, o modelo de programação matemática proposto tem como finalidade encontrar um subconjunto que cubra todos os demais elementos do conjunto de subáreas e desta maneira garantir que toda a área da plataforma onde haja a possibilidade de ocorrer um vazamento de gás, esteja coberta (protegida), sem que haja a necessidade de se instalar um detector em cada subárea.

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) é utilizada para estudar o escoamento do gás na ocorrência de um vazamento no estado estacionário, ou seja, mapear a área atingida pelo vazamento de gás. A simulação computacional também é utilizada para validar a localição dos detectores, após estabelecida a malha na região de interesse, e após a resolução do problema de cobertura de conjuntos, segundo o modelo de programação matemática.

A metodologia proposta consiste de 6 etapas:

- Primeira etapa: Para cada piso da instalação, identificar os segmentos isoláveis a partir das válvulas de isolamento – SDV (*Shut Down Valves*);
- Segunda etapa: Estimar a freqüência de vazamento de cada segmento;
- Terceira etapa: Realizar uma simulação de dispersão, utilizando CFD, para pequeno vazamento do segmento de maior freqüência, com a concentração da nuvem ajustada entre 20% e 60% do limite inferior e superior de flamabilidade, respectivamente;

- Quarta etapa: Estabelecer uma malha na região de interesse do piso da instalação com espaçamento igual à metade do raio da nuvem gerada na terceira etapa;
- Quinta etapa: Resolver o problema de cobertura de conjuntos, segundo o modelo de programação matemática;
- Sexta etapa: Simular os casos de fluidodinâmica computacional considerando 6 direções de vazamento e 8 direções de vento, a fim de validar a locação dos detectores.

No estudo de Vianna, gás metano é liberado de um gasoduto de importação a 50 kgf/cm^2 e 20º C, gerando uma taxa de descarga de 2,5 kg/s e um jato de 150 m/s, numa plataforma de 59,21 m x 52,26 m. Foram simulados 12 casos para o segmento de maior freqüência. Estes casos são combinações de direção de vento, todas com 6,5 m/s, e direção de vazamento a fim de representar todas as possibilidades possíveis, para apenas uma localização de vazamento que, para o estudo de caso, foi na borda da plataforma.

Simulações para o pior caso (ventos vindo de Oeste e liberação de gás para Leste) mostram que aproximadamente metade do piso fica envolvido por uma nuvem de gás inflamável. Após a resolução do problema de cobertura de conjuntos, segundo o modelo de programação matemática proposto, os resultados mostram que, para as simulações realizadas, pelo menos um detector de gás da malha proposta identificaria o vazamento.

Com relação às coordenadas dos pontos de detecção da malha resultante proposta pelo autor, por exemplo, no estudo de caso realizado, além de serem apresentadas em forma de subáreas, não mostram suas respectivas alturas utilizadas. Aqui também não foram discutidos os cenários mais críticos para a direção do vazamento.

3. VAZAMENTOS

3.1. Vazamentos de Gases Inflamáveis

Hidrocarbonetos que, em condições termodinâmicas de extração e produção, encontram-se na fase gasosa, são compostos basicamente por metano, e em menores concentrações por etano e outros elementos. Estes não têm cor e são inodoros, sendo considerados de baixa toxicidade.

No aspecto segurança, destaca-se que o mesmo possui massa específica menor que a do ar, que se por um lado pode facilitar sua dispersão para a atmosfera, por outro lado pode se acumular em regiões sem circulações ou com recirculações de ar.

Hidrocarbonetos misturados, em determinadas concentrações, ao oxigênio (O_2) presente no ar, formam misturas explosivas. A faixa de porcentagem volumétrica, de 5% a 15%, em que o metano forma uma mistura explosiva ou inflamável com o ar é relativamente estreita. Nota-se que o limite inferior de flamabilidade (ou explosividade) é alto, ou seja, para se atingir as condições de auto-sustentação da combustão faz-se necessária uma quantidade significativa de combustível em relação à quantidade total de ar em um ambiente. Mesmo atingindo tal valor num ambiente interno, e iniciada a combustão, sua auto-sustentação pode ser logo perdida, pois rapidamente se atinge o limite superior de flamabilidade (UEL – *Upper Explosivity Level*) e o gás se dilui no ar.

3.2. Classificação de Vazamentos

A divisão *offshore* da HSE coletou dados de vazamentos em plataformas e os classificou como menor, significativo ou maior, em relação ao tempo e potencial de danos às instalações e às pessoas. A classificação é feita pela vazão com uma determinada duração do vazamento, ou pela quantidade absoluta de material vazado, conforme a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Sistema de classificação de vazamento de hidrocarboneto (HSE, 2000)

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

3.3. Análise Preliminar de Perigo: Identificação dos Pontos de Vazamento

Para cada plataforma analisada, deve ser realizada uma análise de risco objetivando identificar os principais sistemas e equipamentos com potenciais riscos de vazamento de gás. A seleção de cenários representativos de vazamento em uma instalação é uma etapa vital numa análise de risco, porém ainda não é explicada com detalhes suficientes em análises de segurança. Cenários de vazamento devem ser representativos em relação à magnitude da liberação, sua duração, localização, orientação, tipo de fluido vazado e a cobertura das várias áreas de uma instalação onde podem ocorrer acidentes. Deficiências na seleção dos cenários representativos de vazamento vêm sendo encontradas em recentes análises de segurança (HSE, 2004).

Pelo fato da plataforma em estudo ser fictícia, faltam dados mais detalhados para a realização da análise preliminar de perigo. Assim, recorreu-se a dados estatísticos, sendo realizada extensa pesquisa de vazamentos e acidentes ocorridos com gás em instalações *offshore* reportados pelo HSE. Apesar de dados estatísticos de vazamentos serem na realidade dados históricos, não representando bem a realidade encontrada atualmente, são informações de grande valia e não podem ser desprezados.

A base de dados estatísticos que contém as informações utilizadas neste trabalho compreende dados dos relatórios, ano 2001 e 2002, da HSE que tem como título “Análise e Estatísticas de Vazamentos *Offshore* de Hidrocarbonetos”. A utilização do banco de dados dos relatórios da HSE teve por finalidade encontrar informações dos vazamentos mais prováveis e das situações com potencial de se ocorrer os mesmos.

Em 2002 o relatório reportou 2.312 vazamentos, avaliados e inseridos no banco de dados durante o período de 9 anos e 6 meses desde a criação do Banco de Dados de Vazamentos de Hidrocarbonetos em 1 de outubro de 1992, até 31 de março de 2002, inclusive.

Os vazamentos de gás constituem a maior parte destes vazamentos, isto é, 1267 (54,8%). Os outros tipos ordenados em ordem decrescentes são vazamentos de óleo 403 (17,4%), em sistemas fora do processo 269 (11,6%), bifásicos 205 (8,9%) e condensados 168 (7,3%) (Figura 3.1).

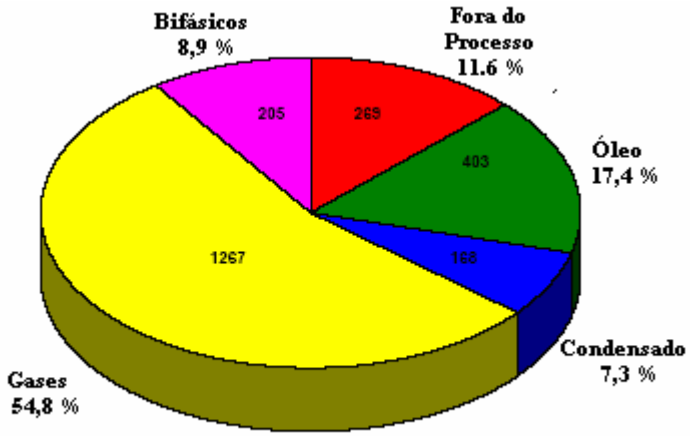


Figura 3.1 – Tipo de liberação em vazamentos (HSE, 2002).

3.3.1. Taxas de Falhas Ocasionando Vazamentos

Diversos cenários de vazamento foram avaliados em função da freqüência de vazamento e severidade das conseqüências.

3.3.1.1. Sistemas

O sistema com maior taxa de falhas que ocasionam vazamentos é o de compressão de gás, com uma taxa anual de 2,90 x 10^{-1} falhas. Operações com altas temperaturas e pressões, vibrações e os efeitos conseqüentes em itens vulneráveis dos equipamentos tais como flanges, conexões e dutos de pequeno diâmetro são considerados os maiores contribuintes para a freqüência dos vazamentos neste tipo de sistema (Figura 3.2).

A segunda maior taxa de falhas é no sistema de exportação de óleo com 1,56 x 10^{-1} falhas por ano, seguido pelo sistema de queima de gás combustível com 1,38 x 10^{-1} falhas por ano e de injeção de gás no poço com 1,25 x 10^{-1} falhas por ano.

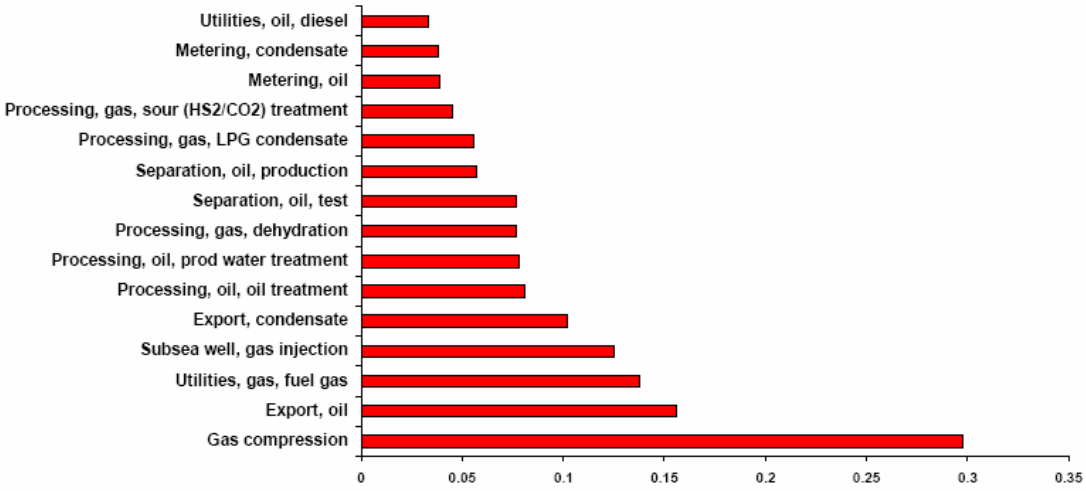


Figura 3.2 – Taxas de falhas em sistemas (vazamento / sistema ano) (HSE, 2002).

3.3.1.2. Equipamentos

Dentre os equipamentos com as maiores taxas de vazamentos estão as turbinas bicombustíveis com 7,24 x 10^{-2} falhas por equipamento por ano, os compressores (*reciprocating compressors*) com 6,52 x 10^{-2} falhas por equipamento por ano, ambos indicaram grande ligação com os sistemas listados acima (Figura 3.3). Na sequência aparecem as turbinas a gás e vasos de pressão horizontais, com 2,40 x 10^{-2} e 2,00 x 10^{-2} falhas por equipamento por ano, respectivamente.

Verifica-se que os vazamentos se desenvolvem nas partes mais frágeis desses equipamentos, como válvulas, flanges e tubos. Deve-se notar, também, que a respectiva população desses equipamentos é bastante numerosa o que acarreta na redução dos valores das taxas de falhas individuais.

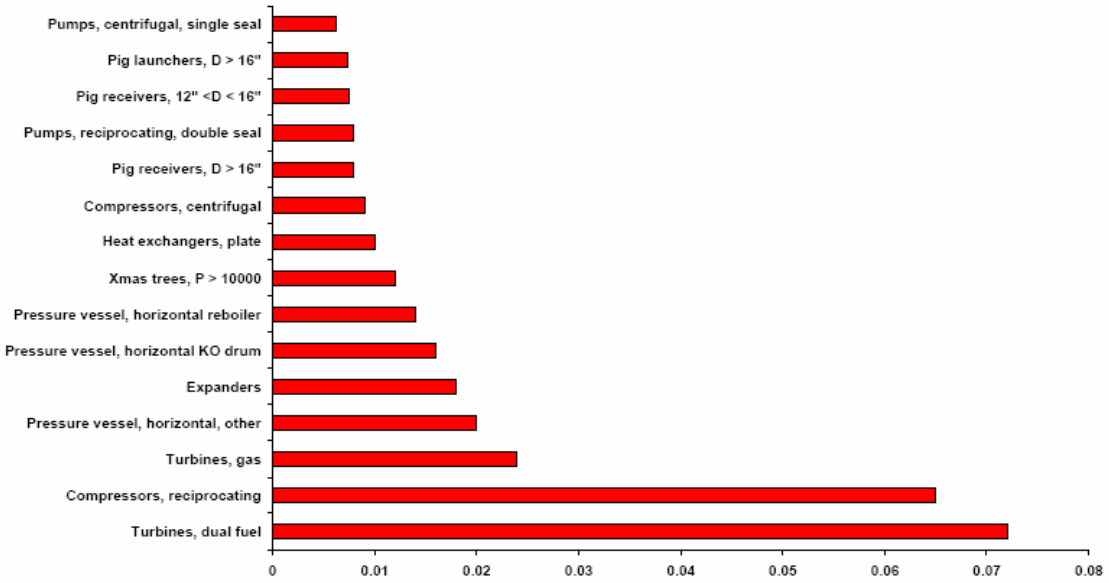


Figura 3.3 – Taxas de falhas em equipamentos (vazamento / equipamento ano) (HSE, 2002).

3.4. Distribuição de Tamanhos dos Orifícios

Na determinação do orifício de vazamento adequado para a simulação computacional, devem ser considerados aspectos como vazão e continuidade do vazamento, bem como os meios de detecção do mesmo. Segundo HSE (2004), a escolha da taxa de liberação em geral é arbitrária, mas os resultados da análise de risco podem ser sensíveis a ela.

Em HSL (2003) sugere-se que a taxa de liberação de gás deve ser a maior de tal maneira que não seja detectada. Isto pode ser calculado como a vazão de gás que, quando totalmente misturado com o ar da ventilação ambiente, causa apenas um alarme para um detector localizado na saída dessa ventilação. Vazamentos maiores que este devem ser identificados e uma ação apropriada pode ser tomada. Liberações menores podem passar sem serem detectadas, porém apresentam perigos também menores.

Deseja-se detectar vazamentos que persistem no tempo, ou seja, aqueles sobre os quais se tem condições de agir. Em análises de risco, essas liberações geralmente são representadas por taxas de vazamento constantes, ou seja, que não variam no tempo (HSE, 2004). Desta forma, interessa principalmente identificar vazamentos que possam alimentar incêndios ou formar nuvens explosivas que poderão movimentar-se pela planta. Estas liberações se caracterizariam pela emissão constante de gás, que deve ser

detectada e possibilitar a ação de medidas de controle, tais como bloqueio do fluxo, interrupção da operação das fontes geradoras de ignição e, eventualmente, despressurização e/ou abandono da planta.

Este tipo de liberação é limitada pela vazão mássica de gás que flui pelo equipamento. Isto porque não se espera vazamentos superiores a esta vazão, pois não haveria gás suficiente para alimentá-lo, qualquer que fosse a área do orifício de vazamento.

Há outros meios de detectar vazamentos de gás, tais como o sistema de baixa pressão e sentidos humanos. Dentre estes meios destaca-se a observação visual, a percepção do ruído e a ação dos pressostatos de baixa. A ação destes sistemas será efetiva apenas para vazamentos de grandes dimensões, nos quais há quedas de pressão acima de seu *set point*. Em contrapartida, apenas sensores de gás possibilitam a detecção de vazamentos que resultem em queda de pressão abaixo deste limite.

Em função dessas características aparentemente contraditórias, pode-se constatar que vazamentos pequenos dependerão somente do sistema de detecção para serem percebidos, enquanto que vazamentos grandes poderão ser percebidos pelo sistema de pressostatos e pelos sentidos humanos de visão e audição. Torna-se, portanto, notável que vazamentos com pequenas vazões são mais críticos sob o ponto de vista de detecção (Strϕm *et al*., 1999 e Kelsey *et al*., 2002). Neste sentido, Strϕm *et al*. (1999) efetuaram simulações de um vazamento de 0,7 kg/s, em algumas condições de ventilação, e observaram que o gás vazado foi rapidamente disperso para concentrações abaixo do LEL, mesmo nos casos de baixa ventilação.

A seleção do orifício do vazamento deve contemplar, necessariamente, todos estes aspectos, de forma a garantir que o projeto final de locação dos detectores atenda às situações reais de vazamento. Entretanto, não há, até o momento, um critério universalmente aceito a respeito de que diâmetro de vazamento considerar.

Nos relatórios da HSE, o número total de vazamentos para cada sistema foi dividido em sete categorias de acordo com o tamanho do furo, juntamente com a freqüência de cada uma destas divisões (Figura 3.4).

TABLE 1 : SYSTEM FAILURE RATES & SEVERITY / HOLE SIZE DISTRIBUTION

NOTES:
1. Previous = Total for all previous years from 1 October 1992 to 31 March 1999
2. Rate = Total Leaks divided by Total System Years. If no leaks reported, then Rate is not calculated.
3. Hole size is not applicable for some scenarios e.g. where open vessels such as shale shakers are involved or for liquid carry-over incidents, etc.

CAUTION : DO NOT USE SEVERITY AND HOLE SIZE DISTRIBUTION FACTORS TOGETHER.

SYSTEM (ALL TYPES)	YEAR	SYSYEARS (Note 1)	SEVERITY DISTRIBUTION				RATE (PER YEAR) (Note 2)	HOLE SIZE DISTRIBUTION						
			MAJOR	SIGNIFICANT	MINOR	TOTAL		<10 mm	10<25 mm	25<50 mm	50<75 mm	75<100 mm	>=100 mm	N/A (note 3)
			Overall rate may be multiplied by the severity distribution factor shown to obtain rate for leaks of different severities					Leak rate may be multiplied by hole size distribution factor to obtain rate for various hole sizes.						
GAS COMPRESSION.	Previous	835	16	172	51	239		181	36	9	0	3	5	5
	1999/00	141	2	37	10	49		44	4	1	0	0	0	0
	2000/01	145	1	26	21	48		44	2	1	1	0	0	0
	Total:	1121	19	235	82	336	3.00E-01	269	42	11	1	3	5	5
			0.06	0.70	0.24	< DISTRIBUTION >		0.80	0.13	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01
IMPORT, CONDENSATE	Previous	60	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
	1999/00	9	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
	2000/01	9	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
	Total:	78	0	0	0	0	Note 2	0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	< DISTRIBUTION >		0	0	0	0	0	0	0
IMPORT, GAS,	Previous	1231	2	12	4	18		14	2	1	0	0	1	0
	1999/00	185	0	0	2	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	188	0	1	1	2		2	0	0	0	0	0	0
	Total:	1604	2	13	7	22	1.37E-02	18	2	1	0	0	1	0
			0.09	0.59	0.32	< DISTRIBUTION >		0.82	0.09	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00
IMPORT, OIL,	Previous	802	1	13	8	22		16	1	2	0	0	2	1
	1999/00	139	0	2	0	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	139	0	0	1	1		1	0	0	0	0	0	0
	Total:	1080	1	15	9	25	2.31E-02	19	1	2	0	0	2	1
			0.04	0.60	0.36	< DISTRIBUTION >		0.76	0.04	0.08	0.00	0.00	0.08	0.04
MANIFOLD, GAS	Previous	1728	3	13	2	18		16	2	0	0	0	0	0
	1999/00	281	0	1	1	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	283	2	0	0	2		1	1	0	0	0	0	0
	Total:	2292	5	14	3	22	9.60E-03	19	3	0	0	0	0	0
			0.23	0.64	0.14	< DISTRIBUTION >		0.86	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MANIFOLD, OIL	Previous	1417	3	17	3	23		17	2	2	0	0	2	0
	1999/00	253	0	5	4	9		8	1	0	0	0	0	0
	2000/01	253	0	1	2	3		3	0	0	0	0	0	0
	Total:	1923	3	23	9	35	1.82E-02	28	3	2	0	0	2	0
			0.09	0.66	0.26	< DISTRIBUTION >		0.80	0.09	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00

Figura 3.4 - Taxas e severidade de falhas em sistemas *offshore* e distribuição de tamanho de orifícios (HSE, 2001).

Pela análise da Figura 3.4 é possível verificar que todos os sistemas que apresentaram grandes taxas anuais de falhas, resultaram em pequenos orifícios, por exemplo, 80% dos vazamentos em compressores de gás tinham orifícios com menos de 10 mm de diâmetro. Logo, pelo exposto acima, é razoável propor, para este estudo, vazamentos em orifícios circulares de diâmetro 10 mm. Isto limita a vazão mássica que escapa através do orifício.

Como na metodologia deste trabalho é proposta uma classificação dos pontos de detecção, é interessante ressaltar que Strϕm *et al*. (1999) estudaram como a classificação dos detectores era dependente da vazão da liberação gasosa. Concluíram que a ordenação dos detectores, considerando 3 vazões individualmente, geraria 3 listas de classificação não muito distintas da originalmente aceita, a qual considera todas as vazões em um mesma classificação. Os autores comentam que pode não ser necessário incluir uma faixa de vazões para os vazamentos nos estudos de dispersão gasosa e detectores de gás.

É importante também lembrar que diferentes geometrias de orifícios irão gerar jatos diferenciados, e consequentemente, comportamentos distintos no escoamento do jato (Wakes e HSL, 2003), principalmente a pequenas distâncias do orifício. Um trabalho investigativo é necessário para estabelecer até que ponto esses diferentes comportamentos no jato afetariam o escoamento da pluma gasosa.

4. MODELOS DE DISPERSÃO

Acidentes sérios enfatizam a importância de um planejamento de emergência e de se projetar plantas de processo que minimizem a ocorrência e as conseqüências de vazamentos de material tóxico e/ou inflamável. Modelos de vazamentos são rotineiramente usados para estimar os efeitos da liberação no ambiente industrial e comunitário, especialmente aqueles que atingem longas distâncias.

Existem três passos a serem seguidos ao se utilizar um modelo de vazamento de material tóxico e/ou inflamável (CCPS, 2000):

1. Identificar a base do modelo. Quais situações do processo podem acarretar um vazamento, e qual a pior situação?
2. Desenvolver um modelo para descrever como os materiais são liberados e a vazão do vazamento.
3. Usar o modelo de dispersão para descrever como os materiais se difundem nas áreas adjacentes.

A principal ênfase do modelo de dispersão de gases é prover uma ferramenta para mitigação de vazamentos. O modelo prevê a área afetada e concentração do material em cada ponto desta área. A base do modelo é valiosa para eliminar situações com vazamentos em potencial.

Existem muitos modelos clássicos disponíveis, desde modelos empíricos e fenomenológicos até aqueles baseados em CFD. Cada classe de modelos tem uma série de simplificações e suposições, limitando as suas capacidades de serem utilizados como ferramentas confiáveis fora das faixas de validação contra dados experimentais (HSL, 2002). Os primeiros têm uma fácil implementação, mas oferecem menos detalhes. Eles são computacionalmente mais eficientes que os modelos de CFD. No entanto, em geometrias congestionadas e parcialmente confinadas, os modelos empíricos e fenomenológicos são menos precisos que os modelos mais complexos baseados em CFD (Osenbroch *et al.*, 2002).

Entretanto, é necessário para os estudos de dispersão utilizar-se de algum modelo, de tal maneira que exista um equilíbrio entre precisão e tempo computacional, de acordo com a complexidade do problema e com os recursos computacionais disponíveis.

Os usuários devem estar cientes das incertezas associadas aos diferentes modelos. Acredita-se que apenas os modelos que caem na classe de CFD avançado podem ser verdadeiramente preditivos fora das suas faixas de validação. No entanto, mesmo estes têm limitações e requerem mais desenvolvimento e testes antes desta capacidade ser totalmente aceita, o que mesmo assim é atualmente limitada a geometrias relativamente simples para os recursos computacionais existentes (HSL, 2002).

Para o HSL (*Health & Safe Laboratory*) (2002), a precisão esperada pelos modelos ditos fenomenológicos e os de CFD mais simples é geralmente bastante boa, isto é, os modelos produzem soluções que são aproximadamente corretas, mas apenas para um cenário para os quais os parâmetros dos modelos foram ajustados.

4.1. Modelos de Dispersão Gasosa

Modelos de dispersão descrevem o transporte de materiais gasosos pelo ar. Os processos físicos de maior interesse em dispersões gasosas são o transporte e mistura turbulenta, a gravidade e a mudança de fase (Baraldi *et al.*, 2007).

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, seja dominada pelo momento ou pela gravidade, diminui de intensidade, a turbulência atmosférica passa a ser o fator predominante (Lees, 1996).

Depois de um vazamento, a nuvem é carreada pelos ventos na forma de pluma ou de um *puff* ou bufada (Figuras 4.1 e 4.2). A máxima concentração do material ocorre no ponto

do vazamento. A concentração ao longo da nuvem tende a diminuir devido à mistura turbulenta e à dispersão da substância com o ar (CCPS, 2000).

Segundo Strϕm *et al.* (1999) um grande número de parâmetros afeta a dispersão atmosférica de um material, podendo influenciar na detecção dos gases:

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

Com o crescimento da velocidade do vento, a pluma torna-se mais larga e mais comprida; a substância é carreada 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 significantemente 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 o momento do material disperso alteram a “altura efetiva” do vazamento. Após a dissipação do momento 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.

4.1.1. Modelo de Plumas e *Puffs*

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 um cigarro aceso. Uma pluma em estado-estacionário é formada a partir do cigarro. 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 (CCPS, 2000).

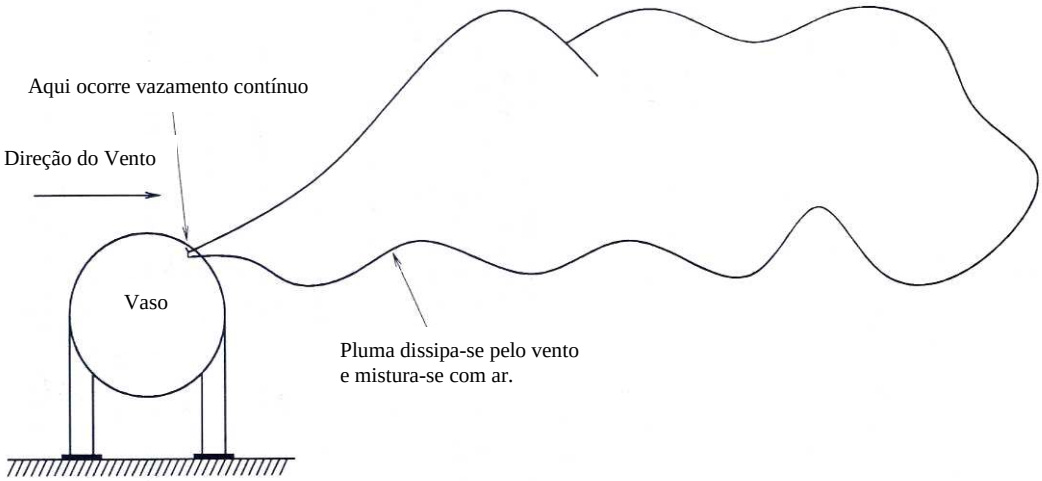


Figura. 4.1 - Pluma característica formada por um vazamento contínuo (CCPS**, 2000).**

O modelo de *puff* 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 *puff* seria um vazamento repentino de uma quantidade fixa de material devido à ruptura de um vazo de estocagem. Uma grande nuvem de vapor é formada e se afasta do ponto de ruptura.

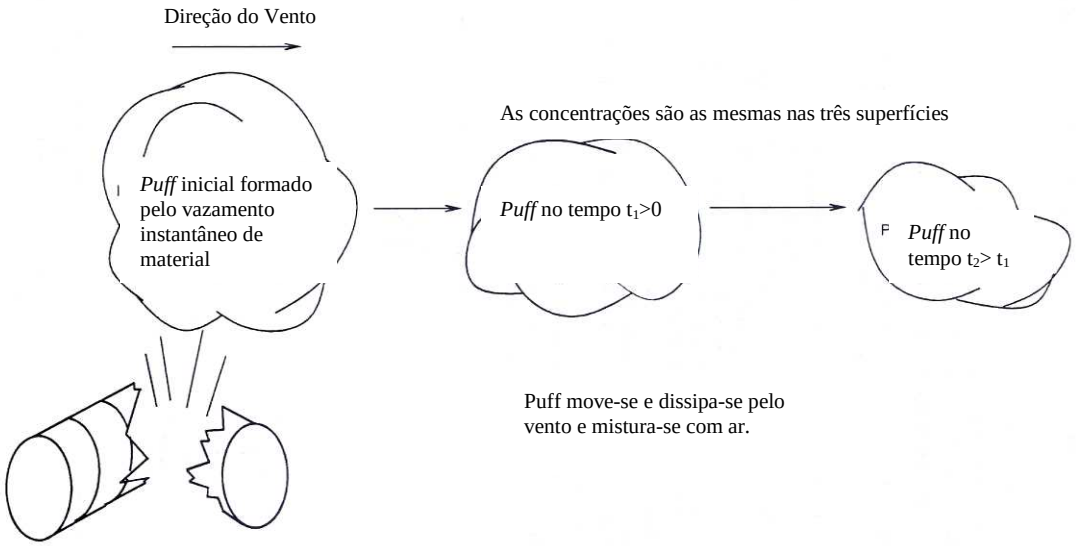


Figura. 4.2 - *Puff* formado por um vazamento instantâneo (CCPS**, 2000).**

O modelo de *puff* pode ser usado para descrever uma pluma, ou seja, a pluma pode ser descrita como vazamento de contínuos *puffs*. 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 *puff* deve ser usado.

4.1.2. Modelo de Jatos

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, mas conserva o seu momento, tal que o fluxo de momento em qualquer plano normal ao eixo é constante (Lees, 1996).

Se o momento de um material sendo emitido de um orifício é alto, a dispersão, na fase inicial, é devido ao momento e a emissão é descrita como um jato (*momentum jet*). Se o momento é baixo, seja pelo fato do momento inicial ser baixo ou por ele 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.

Próximo ao jato formam-se regiões de recirculação que acarretam em bastante penetração de ar. Segundo Wilkening *et al.* (2007), esse é o principal mecanimo de mistura entre o gás vazado e o ar ao seu redor.

A maior parte dos modelos de plumas lida com o caso de um jato inicial cujo momento diminui tal que a emissão submete-se à transição para uma pluma gravitacional (Wilkening *et al.*, 2007). Muitos dos trabalhos em plumas são relacionados à emissões de chaminés e estão mais interessados em aspectos ambientais do que de segurança (Lees, 1996).

De observações experimentais, pode ser postulado que os efeitos de obstáculos na dispersão de jatos com altos momentos são (HSE, 2001):

- Uma perda no momento à frente do jato, devido a perdas por fricção do fluido ao passar pelo obstáculo e também através da geração de turbulência gerada após a passagem pelo mesmo;
- Como conseqüência do aumento de turbulência, a taxa total de penetração do fluido ambiente no jato aumenta, resultando em uma rápida diluição. Se o fluido do jato for inflamável, esse fenômeno poderá levar o fluido a concentrações dentro da faixa dos limites de explosividade.

Segundo HSE (2004), vários modelos integrais estão disponíveis para prever a dispersão de jatos livres (não obstruídos) na atmosfera, por exemplo, JINX (Advantica), AEROPLUME (Shell) e TECJET (DNV). Modelos simples também foram recentemente desenvolvidos para jatos obstruídos (HSE, 2001), embora suas validações para aplicações em ambientes altamente congestionados, encontradas em todas instalações *offshore*, sejam incertas.

Wakes (2003) estudou, baseado em trabalhos experimentais, vazamentos em pequenos orifícios dentro de uma área de produção em plataformas *offshore*, investigando aspectos de modelagem da saída de jatos do orifício e as condições de entrada do gás no domínio. Uma série de simulações numéricas dos jatos foi conduzida com o auxílio da Fluidodinâmica Computacional, onde se chegou as seguintes conclusões:

1) O uso de jatos axisimétricos para simular vazamentos em estruturas *offshore* não é recomendado em simulações com propósitos de segurança. Jatos axisimétricos são bastante comuns em simulações de vazamentos e dispersões gasosas, sendo até mesmo considerados boas aproximações. Porém algumas simplificações sérias, do ponto de vista de segurança, podem estar sendo feitas como: estimativas conservadoras do tempo que fluidos inflamáveis, a partir do vazamento, levariam para atingir superfícies quentes; tamanho subestimado e taxa de crescimento incorreto da nuvem de mistura explosiva ar/hidrocarbonetos e posicionamento incorreto dos detectores de gás.
2) Mais investigações devem ser feitas sobre um modelo de turbulência mais apropriado, particularmente para a obtenção de melhores indicações do comportamento do jato, especialmente em ambientes confinados. O modelo de turbulência utilizado foi o modelo de duas equações κ–ε que provou-se (Wakes *apud* Shih *et al.*, 1995) ser o melhor para simulações de jatos planares e axisimétricos. Porém existem autores que não o recomendam para modelar jatos e escoamentos sob ação de altos gradientes de pressão (Rigas, 2004).
3) Existe um comportamento muito distinto no escoamento do jato em orifícios de gaxetas de formatos diferentes (formato do orifício). Sugeriu-se que uma melhor pesquisa é necessária para estabelecer padrões.
4) Numa simulação com tal tipo de vazamento, deve sempre que possível ser utilizado, um perfil de velocidade correto de entrada do gás no domínio. No trabalho, o autor obteve o correto perfil de velocidade, simulando o escoamento no interior da tubulação para os diferentes tipos de vazamentos nas gaxetas. Os resultados obviamente não foram perfis de velocidade constantes, nem mesmo axisimétricos (em um determinado caso). Tais perfis de velocidades de entrada do gás no domínio foram então utilizados nas simulações numéricas dos jatos.

Nos resultados obtidos por Wakes (2003) nas simulações numéricas dos jatos, foram comparados os ângulos de espalhamento do jato, a velocidade na linha central e o perfil de velocidade através do jato, bem como a comparação visual para os casos onde a velocidade de entrada do gás é variável e para o caso onde tal velocidade é constante. Em ambos os casos simulados, da velocidade de entrada do gás variável e constante, os ângulos foram superestimados, porém para o primeiro as diferenças não foram tão gritantes.

O autor obteve em suas simulações perfis de velocidade no jato consideravelmente menores que os encontrados experimentalmente, o que fornece estimativas conservadoras sobre o comportamento do jato.

A principal conclusão retirada da comparação visual foi o fato de que as aparências dos jatos obtidos com perfis de velocidades de entrada constantes foram bem distintas das encontradas experimentalmente, ao contrário dos jatos obtidos em simulações cujos perfis de velocidade de entrada variavam.

Atualmente, não é dado muito foco ao formato dos orifícios, ao perfil de velocidade de entrada de gás no domínio ou à simetria do jato em simulações computacionais de vazamentos com dispersões gasosas que objetivam mapear as nuvens inflamáveis. É difícil saber, durante a análise de risco, como será o furo em todos os possíveis pontos de vazamento de gás em uma plataforma *offshore*. Só a partir desse dado podem-se inferir os corretos perfis de velocidade de entrada de gás no domínio, bem como a simetria do jato formado após a liberação. Isto na realidade seria um trabalho muito dispendioso e sem claros objetivos.

No Capítulo 8 são apresentados alguns resultados numéricos obtidos em simulações de vazamentos de gás através de orifício circular, onde variáveis como ângulo de espalhamento, velocidade na linha central do jato, perfil de velocidade do jato e perfil de concentração de gás também ao longo da linha central do jato, são estudadas objetivando analisar o comportamento do jato, tratado como incompressível e com pequena compressibilidade, e sua influência na dispersão gasosa.

5. MECÂNICA DOS FLUIDOS

Neste capítulo são abordados os principais conceitos de mecânica dos fluidos, que estão relacionados ao trabalho. Os fundamentos aqui apresentados têm como finalidade fornecer uma base para a compreensão e a modelagem dos casos de dispersão de gases.

5.1. Escoamentos Turbulentos

A maioria dos escoamentos encontrados na natureza e em aplicações práticas de 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).

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). Tais escoamentos têm as seguintes características (Santos, 2007):

- Irregularidade: o escoamento é irregular, randômico e caótico. Não são moléculas do fluido que se deslocam aleatoriamente na direção do escoamento e ortogonal a ela, mas ‘pacotes de fluido’ ou ‘macro-moléculas’ denominados turbilhões. O tamanho dos turbilhões determina a escala da turbulência;
- Difusividade: em escoamentos turbulentos a difusividade aumenta, significando maior transferência das propriedades de transporte;
- Altos números de Reynolds;
- Tridimensional: tal escoamento é sempre tridimensional e anisotrópico;
- Dissipativo: o escoamento é altamente dissipativo, pois parte da energia cinética (pequenos turbilhões) é transformada em energia interna (aquecimento) devido às tensões de cisalhamento que são intensificadas no regime turbulento. Vale lembrar que um fluido estático ou em movimento uniforme possui suas forças cisalhantes nulas;

- Continuidade: a continuidade é mantida, já que as menores escalas de turbilhões ainda são maiores que o livre caminho médio das moléculas.

A turbulência não se mantém por ela mesma, mas depende do ambiente para obter energia. A produção de novos turbilhões por meio de fornecimento de energia substitui aqueles perdidos pela dissipação viscosa (CEFT/FEUP, 2006).

5.2. Modelagem Matemática

A princípio, as equações da continuidade e movimento descrevem tanto os escoamentos laminares quanto os turbulentos, sem a necessidade de informações adicionais. Contudo, escoamentos turbulentos com valores reais de número de *Reynolds* alcançam grandes escalas de comprimento e tempo, e geralmente envolvem escalas de comprimento muito maiores do que os pequenos volumes finitos que podem ser usados em uma análise numérica (CFX, 2007).

Para escalas de tempo maiores que a escala das flutuações turbulentas, a turbulência exibe propriedades médias. O conceito de tensão de *Reynolds* (Reynolds, 1895), usa a idéia de escoamento médio como ponto de partida para a resolução da maioria dos problemas de escoamento industriais. Essa idéia consiste em expressar qualquer propriedade do escoamento através de uma quantidade média e outra de flutuação turbulenta. Isto é, todas as variáveis podem ser escritas como a soma de suas médias e suas flutuações:

$$\Phi = \overline{\Phi} + \Phi' \qquad (5.1)$$

Onde Φ é o valor da variável em um instante t, $\overline{\Phi}$ é a sua média temporal e Φ' é a flutuação turbulenta naquele instante t. A Figura 5.1 faz uma comparação entre escoamentos laminar e turbulento, usando o conceito de tensão de *Reynolds*.

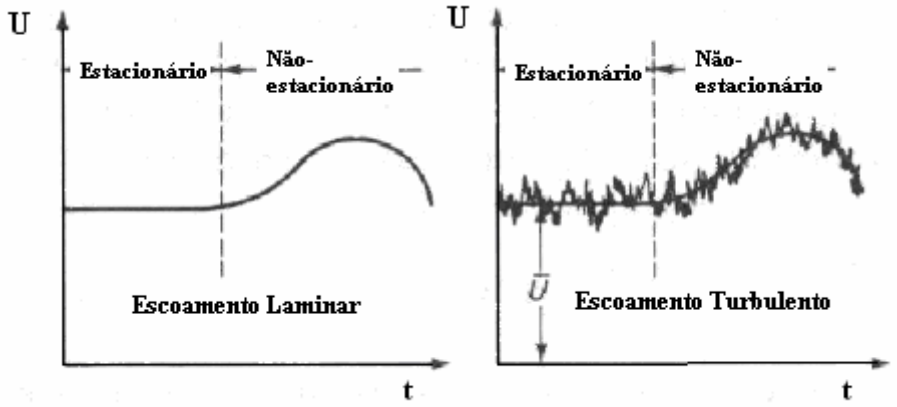


Figura 5.1 - Comparação das flutuações em escoamentos laminar e turbulento (CEFT/FEUP, 2006).

Pode-se, então, de acordo com *Reynolds* decompor a velocidade:

$$U_z = \overline{U_z} + u_z \tag{5.2}$$

Onde $\overline{U_z}$ é o valor médio das velocidades calculado sobre um grande número de flutuações. Essas flutuações devem ser obtidas num período de tempo pequeno o suficiente para captar as mudanças na função, mas grande o suficiente para captar os períodos das flutuações, daí então poderá se obter a função média suavizada. No nosso caso temos a velocidade suavizada no tempo.

$$\overline{U_z} = \frac{1}{t_0}\int_{t-1/2t_0}^{t+1/2t} U_z(s) \quad ds \tag{5.3}$$

De acordo com a definição acima obtemos:

$$\overline{u_z} = 0\,;\ \overline{\overline{u_z}} = 0\,;\ \overline{\overline{U_z u_z}} = 0\,;\ \overline{u_z}\cdot\overline{u_z} \neq 0 \tag{5.4}$$

A equação do movimento de *Navier-Stokes* é escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho \boldsymbol{U} = -[\nabla \bullet \rho \boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}] - \nabla p - [\nabla \bullet \boldsymbol{\tau}] + \rho \boldsymbol{g} \tag{5.5}$$

Onde em negrito temos os vetores, **U** e **g**. A função $\boldsymbol{\tau}$ é um tensor de 2ª ordem.

A média temporal é independente do tempo, logo, a equação da continuidade ou conservação de *Navier-Stokes* ficará (Bird *et al.*, 2002):

$$\frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \nabla \bullet \overline{\rho \cdot \boldsymbol{U}} = 0 \tag{5.6}$$

Sendo que, para fluidos incompressíveis:

$$\nabla \bullet \overline{\boldsymbol{U}} = 0 \text{ e } \nabla \bullet \overline{\boldsymbol{u}} = 0 \tag{5.7}$$

Desconsiderando as flutuações sobre a massa específica e viscosidade, de forma que seus efeitos sobre a turbulência possam ser desprezados, e aplicando-se a média temporal na equação do movimento (5.5), e das equações (5.4) e (5.7), a equação de *Navier-Stokes* de conservação de momento ficará então, segundo Bird (2002):

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\overline{\boldsymbol{U}} = -\left[\nabla \bullet \rho\overline{\boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}}\right] - \nabla\overline{p} - \left[\nabla \bullet \left(\overline{\boldsymbol{\tau}}^{V} + \overline{\boldsymbol{\tau}}^{T}\right)\right] + \rho\boldsymbol{g} \tag{5.8}$$

Simplificando a expressão acima tem-se:

$$\nabla \bullet \overline{\boldsymbol{\tau}}^{V} = -\nabla \bullet \left(\mu \nabla \overline{\boldsymbol{U}}\right) \tag{5.9}$$

Se μ for constante poderemos simplificar o operador $\nabla \bullet \nabla = \nabla^2$ (operador Laplaciano) para:

$$\nabla \bullet \overline{\boldsymbol{\tau}}^{V} = -\mu \nabla^2 \overline{\boldsymbol{U}} \tag{5.10}$$

$$\nabla \bullet \overline{\boldsymbol{\tau}}^{T} = -\nabla \bullet \rho\overline{\boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}} \tag{5.11}$$

Logo, substituindo as equações (5.10) e (5.11) na equação (5.8), teremos a equação do movimento para fluido incompressível de viscosidade constante:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\overline{\boldsymbol{U}} = -\left[\nabla \bullet \rho\overline{\boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}}\right] - \nabla\overline{p} + \mu\nabla^2\overline{\boldsymbol{U}} + \nabla \bullet \rho\overline{\boldsymbol{u} \otimes \boldsymbol{u}} + \rho\boldsymbol{g} \tag{5.12}$$

Onde $\bar{\boldsymbol{\tau}}^{V}$ é o tensor relacionado ao fluxo do momento viscoso e $\bar{\boldsymbol{\tau}}^{T}$ é o tensor do fluxo de momento turbulento, também chamado de Tensores de *Reynolds* (*Reynolds stresses*). A única diferença entre a equação do movimento instantânea, equação (5.5), e a média temporal da equação do movimento, equação (5.8), é o termo que envolve o divergente do tensor turbulento. Este divergente mostrado na equação (5.11) é conhecido como força turbulenta e representa a força de inércia extra, causada pela aceleração convectiva das velocidades flutuantes.

5.2.1. Modelos de Turbulência

Para permitir que os efeitos da turbulência sejam previstos, foram desenvolvidos os modelos de turbulência. Podem-se utilizar duas abordagens para se resolver os problemas da modelagem da turbulência:

- Modelagem estatística clássica (simulação numérica do comportamento médio dos escoamentos turbulentos);
- Modelagem de sub-malha (simulação numérica de grandes escalas, onde as grandes estruturas são resolvidas explicitamente e as menores são simplificadas por modelos).

Dentro da modelagem estatística clássica, para se descrever os tensores de *Reynolds*, dois tipos de modelos são os mais utilizados:

- Modelos baseados na viscosidade turbulenta;
    - Modelo à equação zero - *Zero Equation*;
    - Modelos a duas equações (κ–ε, RNG κ–ε e κ-ω).
- Modelos dos Tensores de *Reynolds* - *Reynolds Stress Model* (SST e SSG).

O problema de fechamento das equações (*closure problems*) consiste em se ter uma quantidade de equações suficientes para resolver todas as variáveis desconhecidas. Aos usuários de fluidodinâmica computacional cabe o fornecimento de um método para determinação dos tensores de *Reynolds* que descreva adequadamente o maior número de

situações dentro do escoamento desejado. As equações utilizadas para fechar o sistema definem o tipo de modelo de turbulência.

Ao aplicar um código comercial de CFD em algum problema específico, o usuário deve fazer algumas escolhas na geração da malha e na seleção dos modelos físicos. Um dos problemas mais desafiadores em análises da dinâmica dos fluidos computacional é modelar o escoamento turbulento. Até agora não existe nenhum modelo de turbulência universal que seja confiável para todas as aplicações. Assim, os códigos comerciais de CFD oferecem uma larga gama de modelos a serem escolhidos. A escolha depende tanto da física do problema a ser modelado, quanto da malha computacional que pode ser usada com os recursos computacionais disponíveis (Baraldi *et al*., 2007).

Isso confirma que sempre é requerida uma validação de códigos comerciais de CFD para selecionar os modelos físicos mais aceitáveis, bem como as malhas computacionais para cada aplicação específica.

Rigas *et al*. (2004) estudaram modelos de turbulência na dispersão de gases pesados sobre obstáculos, experimental e numericamente, com o auxílio de CFD. Mostraram que, em geral, os resultados obtidos através da simulação numérica foram bons e coerentes, quando comparados aos resultados experimentais. E concluíram que, assim como em HSL (2003) para dispersão de gases em áreas fechadas de turbinas a gás, os modelos κ–ε e SST mostraram-se melhores na resolução numérica. Os modelos κ–ε, SST e SSG superestimaram as máximas concentrações reportadas, ou seja, são mais conservativos, em contrapartida o modelo κ–ω subestimou tal propriedade.

Em 2007, Baraldi *et al.* estudaram, em um trabalho de validação do código CFX 5.7, dois modelos de turbulência (κ–ε e SST), com o objetivo de modelar o vazamento e dispersão de Hélio. Os resultados das simulações foram comparados a experimentos. Do ponto de vista quantitativo, a concordância dos dados experimentais, com os dados da simulação foi satisfatória, mas nem sempre excelentes. Embora o modelo κ–ε seja o mais comumente usado em aplicações de CFD, não apresentou resultados com muita precisão. Alternativamente, o modelo de turbulência SST foi empregado fornecendo

melhores resultados, especialmente em regiões dentro do jato, e com um esforço computacional cerca de uma ordem de grandeza menor.

No presente trabalho, pela grande quantidade de simulações a serem efetuadas, optou-se por modelos mais simplificados e de menor demanda computacional, no caso modelos baseados na viscosidade turbulenta, a saber: o modelo *k-ε* a duas equações, bem como o modelo à equação zero. A seguir ambos são melhor detalhados.

5.2.2. Modelos de Viscosidade Turbulenta

A hipótese original de que as tensões de *Reynolds* são proporcionais à viscosidade turbulenta proposta por *Boussinesq* (1877) é admitida nestes modelos, levando a uma relação similar ao do comportamento do escoamento laminar de fluidos newtonianos. A viscosidade turbulenta não é uma propriedade física do fluido, mas sim uma medida do nível de turbulência. A média temporal não é mostrada nas equações a seguir, para simplificação dos modelos.

No modelo de viscosidade turbulenta o tensor de *Reynolds* pode ser definido como:

$$\boldsymbol{\tau}^T = \mu_T \nabla \mathbf{U}^T \tag{5.13}$$

Colocando-se na forma generalizada proposta por *Kolmogorov* (1942), o tensor de *Reynolds* pode ser avaliado através da seguinte equação:

$$\boldsymbol{\tau}^T = -\rho\overline{\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}} = -\frac{2}{3}\rho k\boldsymbol{\delta} - \frac{2}{3}\mu_T \nabla \bullet \mathbf{U}\boldsymbol{\delta} + \mu_T\left(\nabla\mathbf{U} + (\nabla\mathbf{U})^T\right) \tag{5.14}$$

Pode-se definir: *u* é a flutuação turbulenta da velocidade, *U* é a velocidade média, τ^T é a tensão cisalhante, $k = \frac{1}{2}\boldsymbol{u}^2$ é a energia cinética turbulenta, μ_T é a viscosidade turbulenta, e δ é o delta de *Kroenecker*.

Substituindo a definição de tensão turbulenta de *Kolmogorov* (5.14) na equação média temporal da equação do movimento (5.8), obtém-se a equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho \boldsymbol{U} + \nabla \bullet \rho(\boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}) = \boldsymbol{B} - \nabla p' + \nabla \bullet \left\{ \mu_{eff} \left[\nabla \boldsymbol{U} + (\nabla \boldsymbol{U})^T \right] \right\} \tag{5.15}$$

Onde $\boldsymbol{B}$ é a soma de todas as forças de campo, e a viscosidade efetiva μ_{eff} é definida como:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_T \tag{5.16}$$

Como μ é a viscosidade absoluta, μ_T é a viscosidade turbulenta. *p'* é a pressão modificada, que pode ser definida por:

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho\kappa + \nabla \bullet \boldsymbol{U}\left(\frac{2}{3}\mu_{eff} - \zeta \right) \tag{5.17}$$

Onde ζ é a viscosidade *bulk*.

5.2.2.1. Modelo à Equação Zero (*Zero equation*)

O modelo à equação zero para a viscosidade turbulenta calcula o valor global de μ_T através de fórmulas empíricas, utilizando a velocidade média do escoamento e a escala de comprimento geométrico, gerando resultados aproximados (Hirsch, 1990). Porém, é um modelo de predição limitado, pois a escala de comprimento deve ser especificada empiricamente (Speziale, 1996 e Deschamps, 2002).

Neste modelo não há resolução de equação de transporte adicional, o que implica em simplicidade e rapidez de resolução, porém, não é um modelo que forneça soluções acuradas, tornando-o adequado para sistemas e geometria muito simples; sendo muito utilizado como condição inicial para a resolução de outros modelos de turbulência mais complexos. Utiliza-se tal modelo para escoamentos turbulentos completamente

desenvolvidos. Não são adequados, por exemplo, para escoamentos em áreas delimitadas de turbinas a gás (HSL, 2003).

Modelos deste tipo foram propostos independentemente por *Prandtl* (1945) e *Kolmogorov* (1942), para preverem a viscosidade turbulenta como um produto da escala de velocidade e da escala de comprimento. Com este modelo há somente um valor de viscosidade turbulenta para todo o domínio (ou sub-domínio) do fluido. Abaixo, apresenta-se a equação do modelo à equação zero do CFX (2007):

$$\mu_t = \rho\, f_\mu U_t l_t \tag{5.18}$$

Onde, ρ é a massa específica do fluido, f_μ é uma constante de proporcionalidade, U_t é a escala de velocidade turbulenta, e l_t é a escala de comprimento turbulento.

A escala de velocidade turbulenta é considerada como a velocidade máxima do fluido. A escala de comprimento turbulento, nesse modelo, é dada através da seguinte expressão:

$$l_t = \frac{V_D^{1/3}}{7} \tag{5.19}$$

Onde V_D é o volume total do domínio (ou sub-domínio).

5.2.2.2. Modelo κ–ε

Os modelos de turbulência a duas equações são largamente usados, por oferecerem uma boa combinação entre poder numérico e exatidão computacional (Rigas, 2004). As escalas de velocidade e de comprimento são resolvidas usando equações de transporte distintas, donde advém o nome para esses modelos.

Nesse tipo de modelo, a viscosidade turbulenta é modelada como o produto entre as escalas de velocidade e de comprimento turbulento. A escala de velocidade turbulenta é

calculada através da equação de transporte para a energia cinética turbulenta e, a escala de comprimento turbulenta é estimada de duas propriedades do campo turbulento, como energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação (Rigas, 2004).

O modelo κ–ε é o padrão utilizado em indústrias (HSL, 2003), sendo estável e robusto numericamente, porém é um modelo deficiente nas seguintes situações (Deschamps, 2002 e Rigas, 2004):

- Escoamento na presença de curvatura de linhas de corrente;
- Escoamento sob a ação de gradientes de pressão muito grandes;
- Escoamentos com regiões de separação;
- Jatos;
- Escoamentos sob ação de campos de forças.

Ele gera uma turbulência isotrópica, sendo impróprio para a simulação de escoamentos circulares mais complexos (com anisotropia), já que superestimam a tensão turbulenta, prevendo de forma errada as velocidades tangencial e axial.

Neste modelo a viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{\kappa^2}{\varepsilon} \tag{5.20}$$

Onde C_μ é uma constante, κ é a energia cinética turbulenta e ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta.

Abaixo são apresentadas as equações modificadas da continuidade e da conservação de momento para o modelo κ–ε, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \boldsymbol{U}) = 0 \tag{5.21}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \boldsymbol{U} + \nabla \bullet \rho(\boldsymbol{U} \otimes \boldsymbol{U}) - \nabla \bullet \left(\mu_{eff} \nabla \boldsymbol{U}\right) = \boldsymbol{B} + \nabla p'' + \nabla \bullet \left(\mu_{eff} \nabla \boldsymbol{U}\right)^T \tag{5.22}$$

Onde μ_{eff} é dada pela equação (5.16) e a pressão modificada (p") é dada pela equação:

$$p'' = p + \frac{2}{3}\rho\kappa \tag{5.23}$$

Os valores de κ, que entrarão na equação da viscosidade turbulenta (5.20) podem ser calculados pela seguinte equação:

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{U}\kappa) = \underbrace{\nabla \bullet \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \nabla \kappa \right)}_{I} + \underbrace{P_k}_{II} - \underbrace{\rho\varepsilon}_{III} \tag{5.24}$$

O termo I representa a transferência de energia cinética por difusão e o termo III, a dissipação de energia cinética por cisalhamento. O termo II, a variável P_k, é a produção de turbulência devido às forças viscosas (cisalhamento) e de empuxo, que é modelada segundo a equação:

$$P_k = \mu_T \nabla \mathbf{U} \bullet \left(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \bullet \mathbf{U} \left(3\mu_T \nabla \bullet \mathbf{U} + \rho\kappa \right) + P_{kb} \tag{5.25}$$

Os valores de ε são encontrados a partir da equação diferencial de transporte abaixo:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \nabla \bullet (\rho \mathbf{U}\varepsilon) = \nabla \bullet \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(C_{\varepsilon 1} P_\kappa - C_{\varepsilon 2} \rho\varepsilon \right) \tag{5.26}$$

Os valores das constantes $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_κ e σ_ε estão na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Valores das constantes da equação da taxa de dissipação turbulenta (CFX, 2007)

Variáveis	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_κ	σ_ε
Faixa de valores	1,44 - 1,55	1,92 - 2,00	1,0	1,3

5.3. Simulação Numérica Direta (DNS)

A abordagem mais exata para a simulação de turbulência é a resolução das equações de *Navier-Stokes*, sem que sejam utilizadas as médias dos parâmetros ou qualquer outro

tipo de aproximação, com exceção das aproximações inerentes aos métodos numéricos de discretização, cujos erros podem ser estimados e controlados. Assim, a DNS (*Direct Numerical Simulation*) resolve as equações de *Navier-Stokes* para todos os parâmetros do movimento do escoamento turbulento.

Do ponto de vista conceitual, esse tipo de abordagem é a mais simples, porém é a mais difícil de ser implementada na prática, pois segundo HSL (1997), precisa que todas as escalas de comprimento e tempo do movimento turbulento sejam capturadas pela simulação, requerendo um mesh com 10^{15} a 10^{18} células e mais de 1 milhão de passos de tempo, necessitando grande capacidade de processamento e memória computacional.

Somente situações relativamente simples de escoamentos turbulentos foram resolvidas, até o momento, através de DNS. Isso se deve à característica tridimensional e transiente do escoamento turbulento, com a presença de vórtices, e com escalas de comprimento e tempo que requerem níveis de discretização espacial e temporal extremamente pequenos para as suas corretas caracterizações (Deschamps, 2002).

5.4. Escoamentos Gasosos

5.4.1. Escoamentos Compressíveis

A massa específica de um fluido pode variar com a pressão e a temperatura. Para os líquidos a dependência da pressão é pequena, sendo considerados em muitos casos incompressíveis. Para os gases, a influência da temperatura e pressão sobre a massa específica é significativa.

A compressibilidade torna-se importante nos escoamentos de alta velocidade ou com grandes mudanças de temperatura. Grandes variações de velocidade envolvem grandes variações de pressão. Nos escoamentos de gases, estas variações de pressão são acompanhadas de significativas alterações na massa específica e de 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 (HSL, 1997 e 2003).

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.

5.4.2. Vazamento na Fase Gasosa (Lees, 1996)

A vazão mássica inicial (m_0) de gás, considerado ideal, passando através de um orifício é dada pela expressão:

$$m_0 = C_D \cdot A \cdot \psi_0 \cdot \left[p_0 \cdot \rho_0 \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{0,5} \qquad (5.27)$$

onde:

- C_D - coeficiente de descarga (assumido como 0,61 – Lees, 1996);
- A - área transversal ao orifício;
- p_0 - pressão do gás a montante do vazamento;
- ρ_0 - massa específica do gás a montante do vazamento;
- γ - relação entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante (C_p /C_v);

O valor de ψ_0 é definido pelas razões entre as pressões interna e externa, ou seja, conforme a relação entre a pressão do gás e a atmosférica (p_a) por uma das duas equações:

- Escoamento subsônico:

$$\frac{p_0}{p_a} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{5.28}$$

então:

$$\psi_0 = \left\{\frac{2}{\gamma-1}\cdot\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\cdot\left(\frac{p_a}{p_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}}\cdot\left[1-\left(\frac{p_a}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]\right\}^{0,5} \tag{5.29}$$

- Escoamento sônico ou supersônico:

$$\frac{p_0}{p_a} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{5.30}$$

então: $\psi_0 = 1$

O escoamento é usualmente considerado supersônico quando:

$p_0 >> p_a$ e ainda: $1,1 < \gamma < 1,4$.

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 0,61 para o coeficiente de descarga, a equação (5.27) pode ser reescrita conforme:

$$\frac{m_0}{A} = 0,61\cdot\left[p_0\cdot\rho_0\cdot\gamma\cdot\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\right]^{0,5} \tag{5.31}$$

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.

6. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

Para escoamentos de fluidos, o modelo matemático é estabelecido com base nas equações de conservação da quantidade de movimento, de massa e de energia. Tais equações, quando submetidas às condições de contorno e iniciais apropriadas, representam, matematicamente, um dado problema particular. A solução analítica destas equações somente é possível para escoamentos muito simples. Para analisar problemas reais, lança-se mão do uso de métodos numéricos. Assim, a resolução numérica das equações da continuidade e do movimento bem como da conservação da energia, é o que pode ser chamada de fluidodinâmica computacional (Vianna, 2004).

Os erros gerados na solução numérica podem levar a pouca ou a nenhuma representatividade da solução, quando comparada com a realidade física. Logo, a ferramenta numérica é adequada e confiável quando se está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais e de um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico. Vale ressaltar que a correta visualização e interpretação das soluções geradas são tão importantes quanto a solução em si (Maliska, 1995, HSL, 2003 e Rigas *et al*.,2004).

Soluções obtidas com CFD contêm uma grande quantidade de informação sobre o campo de escoamento, por exemplo, velocidades, pressões, massa específica, concentrações, etc. A dinâmica de fluidos computacional é largamente aplicável e pode ser usada em muitas disciplinas diferentes, de projetos de aviões, carros ou válvulas artificiais de coração, à previsão de tempo e modelagem ambiental (HSL, 2002).

Simulações de CFD oferecem compreensão do comportamento do escoamento em situações onde é impraticável ou mesmo impossível realizar experimentos. A princípio é possível testar diferentes cenários com pouco esforço extra. CFD e experimentos devem ser vistos como maneiras complementares de investigar situações de escoamento. É importante que os modelos utilizados sejam validados contra experimentos bem controlados, bem definidos e repetitíveis. Se os modelos não foram validados, a confiança nos resultados obtidos de cálculos com códigos de CFD é baixa, e os

resultados devem ser usados com prudência. Códigos de CFD são ferramentas imensamente poderosas e úteis se aplicadas corretamente (HSL, 2002).

Osenbroch *et al*. (2002), ao estudar a validação do modelo de dispersão de gás implementado no código EXSIM, usaram diferentes locais e orientações de vazamento de gás, bem como diferentes velocidades e direções de vento. O modelo de turbulência utilizado foi o κ–ε. Os modelos de dispersão se mostram capazes de capturar bem as tendências dos escoamentos no módulo, porém previram os volumes inflamáveis dentro de um fator de 2, ou seja, superestimaram este parâmetro.

Estudos em CFD foram realizados em simulações 2D e 3D, com vazamento de metano e hidrogênio de uma tubulação entre dois edifícios, com e sem vento (Wilkening *et al.*, 2007). Em estudo preliminar, foram comparados os modelos κ–ε e LES (*Large Eddy Simulation*), sendo os resultados bem similares. Optando-se, então, por utilizar o modelo LES. Comparando os resultados das simulações 2D e 3D, observou-se que algumas tendências e indicações úteis podem ser obtidas também de simulações 2D, por exemplo, a razão entre quantidade inflamável e a quantidade total vazada parece depender mais do gás e especialmente dos limites de flamabilidade que do próprio cenário de vazamento, sendo com ou sem vento ou sendo simulações 2D ou 3D. Para HSL (1997), em certos casos uma suposição de bidimensionalidade pode ser aplicável, porém se um escoamento estritamente tridimensional for considerado 2D, o código o forçará a ser como tal, o que pode mascarar importantes comportamentos.

Segundo HSL (2002), as principais desvantagens associadas ao uso de CFD vêm das limitações impostas pelos *hardwares* computacionais disponíveis, por exemplo, atualmente é impraticável, se não impossível, simular exatamente um escoamento turbulento com combustão.

O primeiro passo para a aplicação de CFD é a modelagem do problema físico, determinando as grandezas que atuam sobre o sistema e como o afetam, além da determinação dos limites de estudo do problema. Este problema físico é modelado matematicamente através das leis de conservação de movimento, massa e energia. Esses

modelos irão explicar o sistema estudado, além de prever o seu comportamento em diferentes situações (Oliveira *et al.*, 2003).

Códigos de CFD são estruturados em torno de algorítmos numéricos que podem resolver problemas de escoamentos de fluidos. Os códigos contêm geralmente quatro elementos principais: um gerador de geometria e malha, um pré-processador, um processador ou *solver*, e um pós-processador. A Figura 6.1 mostra os elementos principais do *software* CFX da ANSYS, utilizado no presente trabalho.

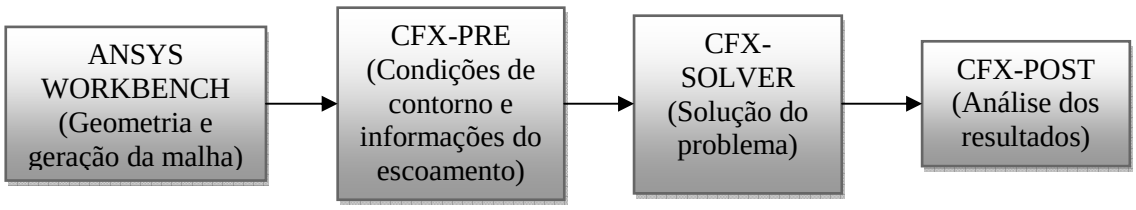


Figura. 6.1 - Etapas para uma simulação de CFD usando o CFX da ANSYS (Rigas, 2004).

Na simulação computacional define-se a geometria da região de interesse e efetua-se a discretização do domínio, ou seja, é gerada a malha computacional. Segundo HSL (2003), uma importante aproximação nesta etapa é a seleção dos objetos na geometria que serão resolvidos explicitamente pelo *grid* do CFD e aqueles que serão ignorados, além de identificar os pequenos objetos, cujos efeitos no escoamento devem ser levados em consideração, mas que não são atualmente práticos de serem resolvidos pelo *grid*. Eles requerem uma representação dada pela modelagem de sub-malha, também comentada mais adiante.

No pré-processador o usuário tem como principais atividades: selecionar os fenômenos físicos e químicos que precisem ser modelados, definir as propriedades dos fluidos e especificar as condições de contorno.

No *solver* pode existir uma de três estratégias de resolução: diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos. A diferença entre as três estratégias de resolução está na aproximação e no processo de discretização das equações. De uma forma geral os métodos numéricos seguem os seguintes passos para a resolução dos problemas:

- Aproximação de variáveis desconhecidas do escoamento por uma média usando funções simples;
- Discretização pela substituição de aproximações em equações governantes do escoamento e manipulações matemáticas subseqüentes;
- Linearização do sistema de equações algébricas resultantes;
- Solução do sistema linearizado de equações algébricas.

Na etapa de pós-processamento utiliza-se um *software* de visualização para avaliar os resultados da solução numérica. É possível obter resultados pontuais, vetoriais ou, até mesmo, animações complexas, facilitando assim o entendimento dos fenômenos físicos presentes na simulação, viabilizando a identificação da veracidade dos resultados obtidos. As principais características desta etapa final da simulação são: capacidade de visualizar a geometria e a malha; a capacidade de visualizar gráficos de vetores e de contornos; gráficos sobre superfícies tridimensionais; visualizar linhas de correntes e trajetória de partículas e a compreensão da dinâmica do escoamento (Santos, 2007).

6.1. Representatividade da Solução Numérica

As características necessárias para que a solução numérica seja representativa, ou seja, que tenha significado físico e que reproduza a realidade do escoamento, estão listadas abaixo (Ferziper, 1996) e (Versteeg *et al.*, 1995):

- Consistência: a consistência de uma solução é verificada pela diferença entre a equação discretizada e a exata, através do erro de truncamento. O erro de truncamento de um método consistente deve ser zero, quando o limite do tempo e espaço tenderem a zero;
- Estabilidade: o método de solução numérica é estável se não houver aumento dos erros ao longo do processo de solução numérica, ou seja, se os resultados não divergirem;
- Convergência: é a propriedade de um método numérico de produzir uma solução que se aproxima da solução exata das equações diferenciais, quando o espaçamento da malha, o tamanho do volume de controle ou do elemento tender

a zero. Um método pode atingir uma solução convergente, mas a solução pode ser dependente da malha, isto é, se a malha mudar a solução muda. No entanto, deve exixtir um tamanho de malha mínimo na qual a solução é independente dela;

- Conservação: um método iterativo pode convergir para uma solução de duas formas: quando o critério de convergência raiz do erro quadrático (RMS) das equações resolvidas for atingido, ou quando atingir um critério de convergência para o fechamento do balanço das equações simuladas, baseando-se nas leis de conservação. No CFX a conservação pode ser avaliada pelo resultado dos balanços de momento, massa e energia, que é mostrado num arquivo específico, ao término da simulação;
- Precisão: Existem três tipos de erro nas soluções numéricas de problemas de escoamento de fluidos, a saber: os *erros de modelagem*, introduzidos na solução por meio das suposições feitas nas derivações das equações de transporte, pela simplificação da geometria, do domínio e das condições de contorno; *erros de discretização*, introduzidos na solução por aproximações do sistema de equações discretizadas; *erros de convergência*, que são calculados pela diferença entre as soluções iterativas e exatas dos sistemas de equações algébricas. É essencial controlar e estimar erros de convergência e discretização antes de julgar a validade dos modelos de fenômenos físicos;
- Viabilidade da solução: devemos ter modelos projetados especificamente para resolução de alguns fenômenos muito complexos como, por exemplo, para turbulência, combustão, e escoamento multifásico, a fim de que os resultados tenham significado físico, e de que as soluções não divirjam.

6.2. Discretização do Domínio (Malha Computacional)

Para tratar o modelo computacionalmente é necessário expressar de forma adequada a equação e a região (domínio) em que elas são válidas. Como não se pode obter soluções numéricas sobre uma região contínua, devido aos infinitos pontos da mesma, inicialmente o domínio é discretizado, isto é, dividido em pontos. Somente nesses

pontos as soluções serão obtidas. Ao conjunto de pontos discretos dá-se o nome de malha computacional (*grid* ou *mesh*).

As equações são resolvidas gerando variáveis com valores discretos, em cada elemento, e a solução de um elemento será utilizada como condição de contorno para o elemento adjacente. Devido a isso, devemos ter uma malha apropriada, com refinamento em regiões cujos gradientes de variação das variáveis são mais elevados, para que se possam captar essas variações, como ocorrem nas regiões de parede (Fahien, 1983). A distribuição adequada dos pontos no domínio é fundamental para se obter uma solução numérica representativa do escoamento (HSL, 2003).

Ao contrário do que possa parecer, o problema da geração de malha não é trivial, principalmente em regiões tridimensionais. A obtenção de um mesh adequado pode se tornar, então, um problema mais complexo do que calcular o escoamento do fluido.

Existem vários tipos de malhas, como as estruturadas e as não-estruturadas (Figura 6.2), cada qual se adequando melhor para um determinado tipo de problema.

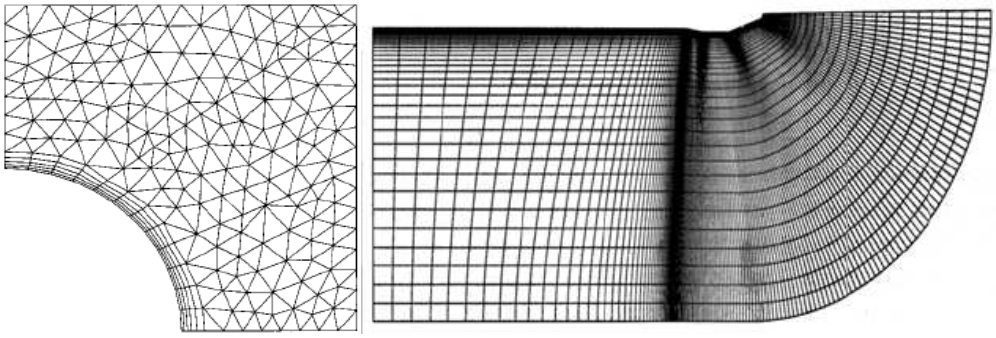


Figura. 6.2 – Malhas não-estruturada e estruturada não-uniforme, respectivamente (HSL, 2002) e (Simões et al., 2003).

As malhas estruturadas apresentam uma regularidade na distribuição espacial de seus pontos. Um exemplo de malha estruturada é a malha hexaédrica, composta somente por volumes hexaédricos. Elas podem ser uniformes, quando seus pontos estão igualmente espaçados ou não-uniformes, quando seus pontos são espaçados de acordo com a necessidade do domínio, possibilitando aglutinação ou espaçamento dos pontos em

áreas em que se espera que a variação espacial da solução seja grande, e afastados nas regiões onde a solução apresenta pequena variação espacial.

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.

Métodos de discretização se caracterizam pela forma de aplicação do método numérico. Os métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Elementos Finitos (MEF) e de Volumes Finitos (MVF) são os mais utilizados. Ao contrário dos métodos analíticos, que fornecem uma solução exata e fechada para as equações diferenciais de interesse e para um número infinito de pontos, os métodos numéricos resolvem essas derivadas para um número limitado de pontos, que compõem o *grid*, substituindo-as por expressões algébricas e aplicando-as para cada elemento de volume (Oliveira *et al.*, 2003).

Praticamente todos os principais pacotes de CFD hoje disponíveis para a solução de problemas de escoamento de fluidos com transferência de calor empregam o MVF. A interpretação física das equações resultantes, bem como a possibilidade de aplicá-lo diretamente sobre os *meshes* com espaçamentos não-uniformes, em problemas 2D ou 3D, são razões que explicam a sua popularidade (Maliska, 1995).

6.2.1. Modelos de Sub-malha

Uma planta real é muito complexa, com tubulações, tanques e outros equipamentos de várias formas e tamanhos, não sendo possível atualmente, resolver numericamente todas as partes da geometria, devido à demanda de memória computacional e velocidade do processador. Segundo HSL (2002), em 2002, um PC de alta performance era capaz de conter um modelo com um milhão de células, levando cerca de uma semana para sua solução. Um *mesh* tridimensional contendo um milhão de nós permitiria apenas, por exemplo, 100 nós em cada coordenada direcional. Para um típico módulo *offshore* ou

uma planta química, isto permitiria células entre 0,1 e 1,0 m de comprimento, o que é claramente muito grosseiro para representar precisamente todos os objetos presentes.

Assim, modelos de sub-malha, chamados de PDR (*Porosity/Distributed Resistence*), foram introduzidos para modelar os efeitos de objetos que são menores que o espaçamento da malha. Muitos códigos de CFD incluem essa formulação nas equações governantes. Obstáculos em escala de sub-*grid,* como por exemplo, tubulações com pequenos diâmetros, são representados por uma fração volumétrica, uma fração de área, e um coeficiente de arraste e oferecem maior resistência ao escoamento e menor área de escoamento, e um aumento na taxa de turbulência. Esses efeitos devem ser modelados, mas implicam em incertezas adicionais (HSL, 2000, 2002 e 2003).

Em 2003, HSL mostrou que a escolha de quais objetos a serem resolvidos pela malha deve ser feita por um usuário de CFD experiente, levando em consideração as possíveis locações dos vazamentos e os efeitos dos obstáculos na ventilação. Como regra considerou-se que tubulações e objetos que têm a escala de comprimento característico maior que 1/20 da raiz quadrada do volume do módulo devem sempre ser resolvidos pela malha. Um exemplo seria o diâmetro de uma tubulação. Objetos cujo diâmetro é 1/100 da raiz quadrada do volume do módulo estavam no tamanho limite de objetos que poderiam ser resolvidos por uma malha em simulações práticas. Esses objetos menores devem apenas ser resolvidos se eles são passíveis de serem atingidos pelo jato de gás.

Como um exemplo, em uma área de 1000 m^3, objetos na ordem de 0,5 m devem sempre ser resolvidos pela malha e objetos na ordem de 0,1 m, dependendo do seu posicionamento e do seu efeito sobre a ventilação, devem ser resolvidos pela malha. Objetos que não são resolvidos pela malha devem ser modelados usando algum tipo de aproximação de porosidade, se eles têm significativos efeitos sobre o escoamento do vento ou na propagação dos jatos de gás. O nível de congestão, adicionalmente ao tamanho do obstáculo, também deve ser levado em consideração, desde que um grande número de pequenos tubos pode ter mais efeitos que uma pequena quantidade de grandes tubulações.

7. MATERIAIS E MÉTODOS

7.1. *Software* e *Hardware*

O *software* de fluidodinâmica computacional utilizado nas simulações numéricas conduzidas neste trabalho foi o CFX 11.0 e a construção das geometrias e malhas pelo *Workbench* 11.0, ambos da *ANSYS Technology*.

Os computadores utilizados nas simulações foram do tipo Pentium Dual Core 2,4 GHz da Intel, com memória RAM de 1,0 Gb.

7.2. Variáveis de Interesse na Modelagem do Problema Físico

Na simulação da dispersão de gases em uma plataforma de petróleo é importante conhecer os perfis de velocidade do vento e do gás vazado, gerados no volume de controle adotado, mas procura-se conhecer principalmente as concentrações dos gases liberados em um vazamento, as características da pluma formada após a dispersão, e a possível formação de zonas com acúmulo de gás.

As frações volumétricas analisadas foram 0,01 e na faixa de 0,05 a 0,15, que relacionam-se, respectivamente, com o limite de detecção de sensores comerciais (20% do LEL) e com os limites de inflamabilidade do gás, gerando os respectivos volumes chamados de detectável e inflamável.

7.3. Geometria e Malha computacional

A escolha do domínio computacional e sua malha estão associadas às condições de contorno disponíveis, aos recursos computacionais e com a veracidade da solução numérica (Santos, 2007).

A geometria utilizada foi idealizada e adaptada a partir das plataformas de petróleo em funcionamento na Petrobras. Assim, a geometria adotada baseou-se no *layout* simplificado de uma plataforma semi-submersível.

A Figura 7.1 mostra o modelo simplificado de plataforma utilizado nas simulações, destacando-se o sistema de compressão, que é o local mais provável para vazamentos e foi escolhido para o estudo de casos. A este modelo foi adicionado um contorno equivalente ao ar ambiente no entorno da plataforma. Para que este volume não ficasse demasiadamente grande, a parte superior do *flare* foi descartada (Figura 7.2).

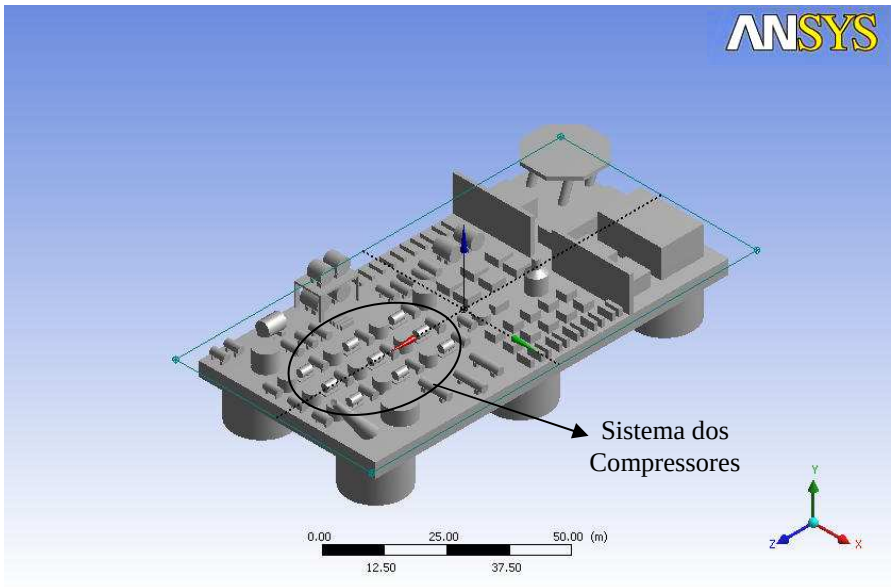


Figura 7.1 - Geometria simplificada de uma plataforma semi-submersível.

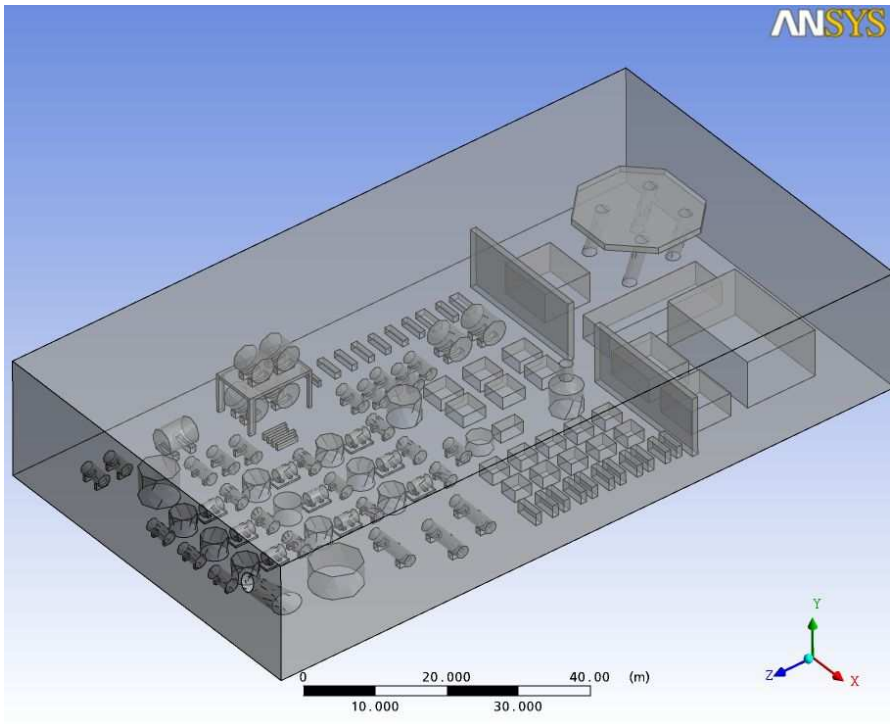


Figura 7.2 - Geometria inscrita no contorno da plataforma.

A qualidade da representação geométrica tem efeito significativo nos resultados das simulações. Embora isso talvez seja mais crítico em simulações de explosões, também é importante em simulações de vazamentos e dispersão (Strϕm *et al.*, 1999). 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 (Vianna, 2005).

Um ponto a ser destacado na geometria da plataforma é o tronco de cone colocado nos orifícios de vazamento (Figura 7.3). O escoamento através do orifício, dependendo das condições a montante e jusante do mesmo, pode ser sônico ou supersônico, como apresentado no Capítulo 5. Além disso, existe um enorme gradiente de velocidade e pressão nesta região. Tais características aumentam bastante o grau de complexidade das soluções numéricas, se considerada a compressibilidade do gás vazado nas simulações. Assim, uma recomendação do trabalho de Pupe *et al.* (2006) foi a utilização deste artifício geométrico nos orifícios de vazamento, de maneira que o escoamento seja subsônico na entrada de gás no domínio, o que facilita a simulação numérica.

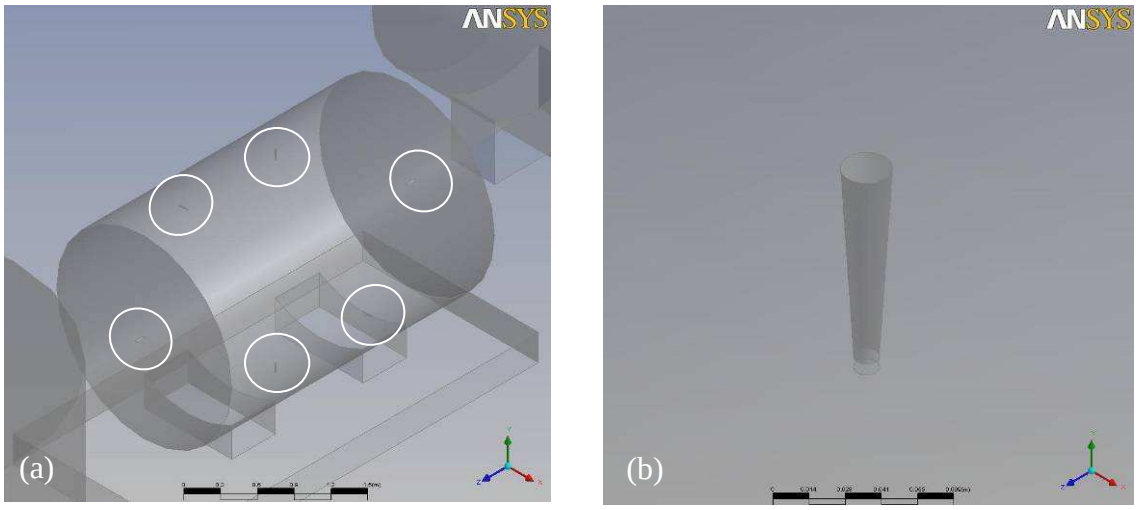


Figura. 7.3 – (a) Locais dos troncos de cone no compressor e (b) em detalhe.

Essa simplificação é possível, mantendo-se constante a vazão mássica de gás em ambos os orifícios do tronco de cone e fixando a área do maior orifício, de maneira que a velocidade do gás neste orifício seja menor que 420 m/s, ou seja, ao entrar no domínio,

o escoamento esteja em condições subsônicas. Isto não implica em mudanças nos perfis de escoamento do jato, neste estudo, pois a geometria (ângulo) desse tronco de cone foi obtida pelo estudo do jato de gás em CFD, mostrado no Capítulo 8.

Uma aproximação parecida é encontrada em HSL (2003 e 2005), onde o detalhe da região perto da fonte do vazamento não foi modelado. Essa aproximação, chamada de `pseudo-fonte`, permite uma visão qualitativa da interação entre o jato e a ventilação local. Assim, a modelagem em CFD do jato começou a jusante do ponto de vazamento, onde se assumiu que a pressão retornou ao nível do ambiente, sendo que o escoamento pode ainda ser modelado como subsônico, sônico ou supersônico. Esta pode ser uma boa aproximação para supor incompressibilidade no escoamento do vento.

Foram usadas malhas do tipo não-estruturadas híbridas, constituídas basicamente por elementos tetraédricos, porém com camadas de células prismáticas nas regiões próximas às paredes (*inflated boundaries*). Baraldi *et al.* (2007) comentam que a melhor capacidade de previsão da malha híbrida facilmente justifica o custo computacional extra envolvido no uso do mesma, porém a geração deste tipo de malha pode ser muito mais dispendiosa computacionalmente que um *grid* puramente tetraédrico.

O tamanho da malha é um parâmetro importante em CFD, já que o método dos volumes finitos teoricamente é um método consistente (Maliska, 1995), ou seja, quanto maior o número de nós, mais precisos serão os resultados da simulação. Mas, em HSL (2002), vemos que quando simulações de dispersão e explosão em grandes áreas como plantas químicas ou instalações *offshore* são efetuadas, a geometria é geralmente dividida em uma malha com células de 1,0 m^3 de volume. Isto é feito por razões práticas, ou seja, tempo de execução aceitáveis. No entanto, análises de sensibilidade do tamanho do *mesh* 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.

Um estudo sobre a influência da malha na dispersão gasosa em um módulo de dimensões 28,0 m x 12,0 m x 8,0 m, realizado por Osenbroch *et al*. (2002), não mostrou

uma clara dependência dos resultados com diferentes *grids*, um grosseiro (17280 células no módulo) e outro mais refinado (28000 células no módulo), contrariando o esperado.

Portanto, para garantir que os resultados obtidos sofrerassem a mínima influência deste parâmetro, as malhas foram refinadas até que os mesmos variassem pouco com o aumento do número de nós. O esforço computacional também foi considerado e, para os casos simulados, cada iteração gastou cerca de 1 minuto e 45 segundos para ser completada, utilizando as máquinas descritas anteriormente.

Assim, usando a ferramenta de geração de malha (CFX-MESH), o mesh obtido tem cerca de 148 mil nós e 626 mil elementos, e pode ser visualizado na Figura 7.4.

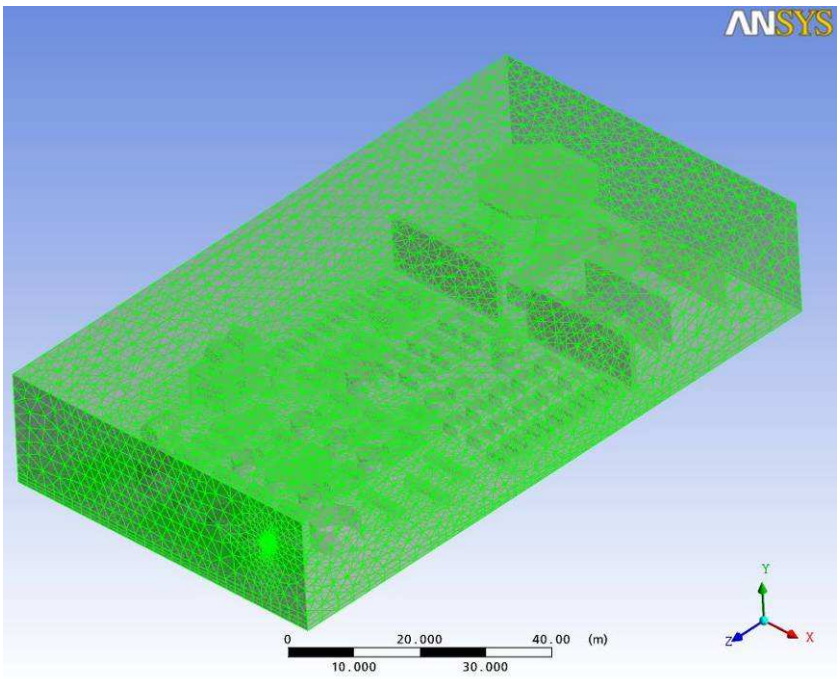


Figura. 7.4 - Malha gerada no CFX-MESH a partir da geometria usada.

Um fator relevante levado em consideração foi a preocupação em se fazer um refino especial nas regiões do vazamento, por conta do grau de complexidade aí esperado para o escoamento (HSL, 2003), como pode ser visto na Figura 7.5a. Enquanto que no restante do domínio, onde se tem o escoamento da pluma gasosa, se utilizou malha mais grosseira, pois não são esperados fortes gradientes nestas regiões. Neste sentido, a malha computacional teve um espaçamento mínimo de 1,0 cm na posição do vazamento (Figura 7.5b) e 3,0 m em outros contornos mais distantes.

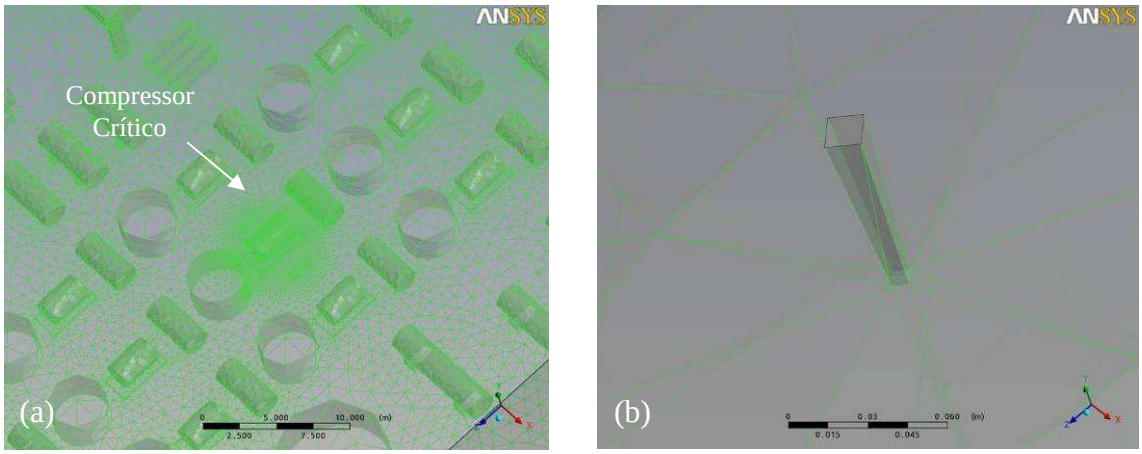


Figura. 7.5 – (a) Detalhe do refino especial na malha das regiões do vazamento e (b) malha do tronco de cone.

7.4. Condições de Contorno do Vazamento

Os possíveis locais de vazamento devem ser identificados com o auxílio de uma análise preliminar de perigo da plataforma em questão. No presente trabalho, o ponto de liberação de gás foi determinado através dos estudos de maior probabilidade de vazamento em plataformas *offshore*, apresentado no Capítulo 3. Como já mencionado, os compressores são os pontos que oferecem maior probabilidade de vazamentos, logo foi tomado o compressor mais congestionado como o ponto crítico de vazamento na geometria proposta. Este é o compressor do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores (Figura 7.5a).

Sugere-se, sempre que possível, serem analisadas seis direções ortogonais para o vazamento nos pontos selecionados (Strϕm *et al.*, 1999). A quantidade de gás próxima à concentração estequiométrica é muito sensível a pequenas variações na direção, taxa, localização e tipo de vazamento. Por exemplo, Bakke *et al.* (2003) mostraram um caso que mudando a direção do vazamento em 90^{o}, o volume de gás próximo ao estequiométrico mudou de um preenchimento de 10% para 65% do módulo em questão. Foi montado um esquema para a possível visualização de como os vazamentos foram tratados no compressor (Figura 7.6). A identificação dos vazamentos foi feita com a ajuda da orientação dos eixos disponível no *Workbench* 11.0, ou seja, o eixo X contém os vazamentos nas direções Leste (X) e Oeste (Xm), o eixo Y contém os vazamentos

para Cima (Y) e para Baixo (Ym) e o eixo Z contém os vazamentos nas direções Sul (Z) e Norte (Zm). Os índices *m* nas identificações representam as direções negativas dos eixos, adotados nas simulações.

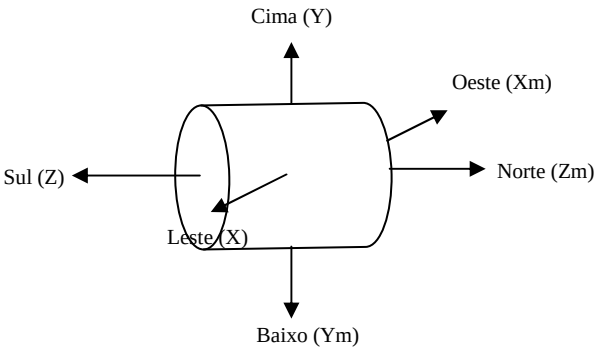


Figura. 7.6 - Direções de possíveis vazamentos no compressor.

O diâmetro de 10 mm adotado para o orifício de vazamento foi estimado no estudo do Capítulo 3, a partir de dados obtidos das estatísticas de vazamentos de hidrocarbonetos do HSE (2001).

Considerando a pressão média interna de um compressor no segundo estágio de compressão estimada em 150 kgf/cm², e o escoamento do gás será contra a pressão atmosférica, tem-se, pela equação (5.30), que o escoamento será sônico. Se considerada a compressibilidade do gás, espera-se que com o artifício adotado na geometria, inserindo o tronco de cone, o escoamento seja tratado na simulação como subsônico.

Entretanto, como o objetivo principal das simulações numéricas neste trabalho é obter dados suficientes para aplicar a metodologia de alocação de detectores de gases inflamáveis, optou-se pela realização de um maior número de simulações menos complexas a poucos cenários computacionalmente mais complicados. Então, todas as simulações realizadas, listadas na tabela 7.5, foram tratadas como incompressíveis o que implica em menor complexidade das soluções numéricas e em escoamentos subsônicos.

Portanto, utilizando a equação (5.31), considerando a pressão a montante do vazamento como a pressão média no compressor, ou seja, p_0 = 150 kgf/cm², a área transversal do orifício, calculada em função do diâmetro de 10 mm, A = 7,85 x 10^{-5} m^2, a massa específica do gás nas condições do compressor, ρ_0 = 129,4 kg/m^3, e a razão dos

coeficientes específicos do gás, γ = 1,29, chega-se a uma vazão mássica m_0 de 1,39 kg/s. Para efeitos de comparação dos resultados, serão simulados também, para uma direção de vento e 6 direções de vazamento, pequenos liberações de gás com vazão na ordem de 10% da calculada acima, ou seja, 0,139 kg/s.

Para essas vazões, o vazamento é considerado, pela classificação do HSE mostrada no Capítulo 3, como maior e significativa, respectivamente, em termos de potencial de danos às instalações e às pessoas.

7.4.1. Definição das Condições Meteorológicas da Região da Plataforma

A ventilação natural em uma instalação marítima é afetada pelo arranjo e quantidade de equipamentos e também pelo número de aberturas e suas localizações no perímetro do *deck* (HSL, 2005). Assim, as condições de ventilação dentro do módulo também influenciam a dispersão gasosa e requerem uma boa representação, de tal maneira que sejam provenientes de dados meteorológicos da região de estudo (Ronold *et al.*, 1993 e Strϕm *et al.*, 1999), tornando a simulação numérica mais realista.

Nesse caso, estão relacionadas a uma determinada região da Bacia de Campos. Para efeitos de estudo foi introduzido, também, para cenários de vento Noroeste, o mais crítico em estudos de Pupe *et al.* (2006), um vento de baixa intensidade (0,5 m/s), representando um tempo calmo. As condições meteorológicas estabelecem a intensidade (velocidade média) e probabilidades de ocorrência (Tabela 7.1).

Tabela 7.1 - Direções do vento e suas respectivas velocidades médias (SIMO - Petrobras S/A)

Direção	Velocidade Média (m/s)	Probabilidade (%)
Norte	8,23	18,66
Sul	6,54	10,36
Leste	6,13	13,63
Oeste	5,69	3,30
Nordeste	8,22	33,38
Sudoeste	6,99	7,27
Noroeste	4,78	2,58
Sudeste	6,10	10,82

Neste ponto, torna-se importante comentar que a situação mais concervativa, em estudos de dispersão gasosa, seria considerar a menor velocidade para todas as direções de vento utilizadas.

Considerando que a plataforma utilizada no presente trabalho foi idealizada a partir de plataformas semi-submersíveis, não foi possível prever o real posicionamento da mesma com relação à Rosa-dos-Ventos. Assim, considerou-se que a plataforma tem seu Norte de Projeto alinhado com o Norte Verdadeiro. A Figura 7.7 apresenta a Rosa-dos-Ventos para a plataforma em estudo. É importante notar que o vento na direção Norte, por exemplo, provém do Norte e vai para o Sul da plataforma, e o mesmo serve para as demais direções de vento.

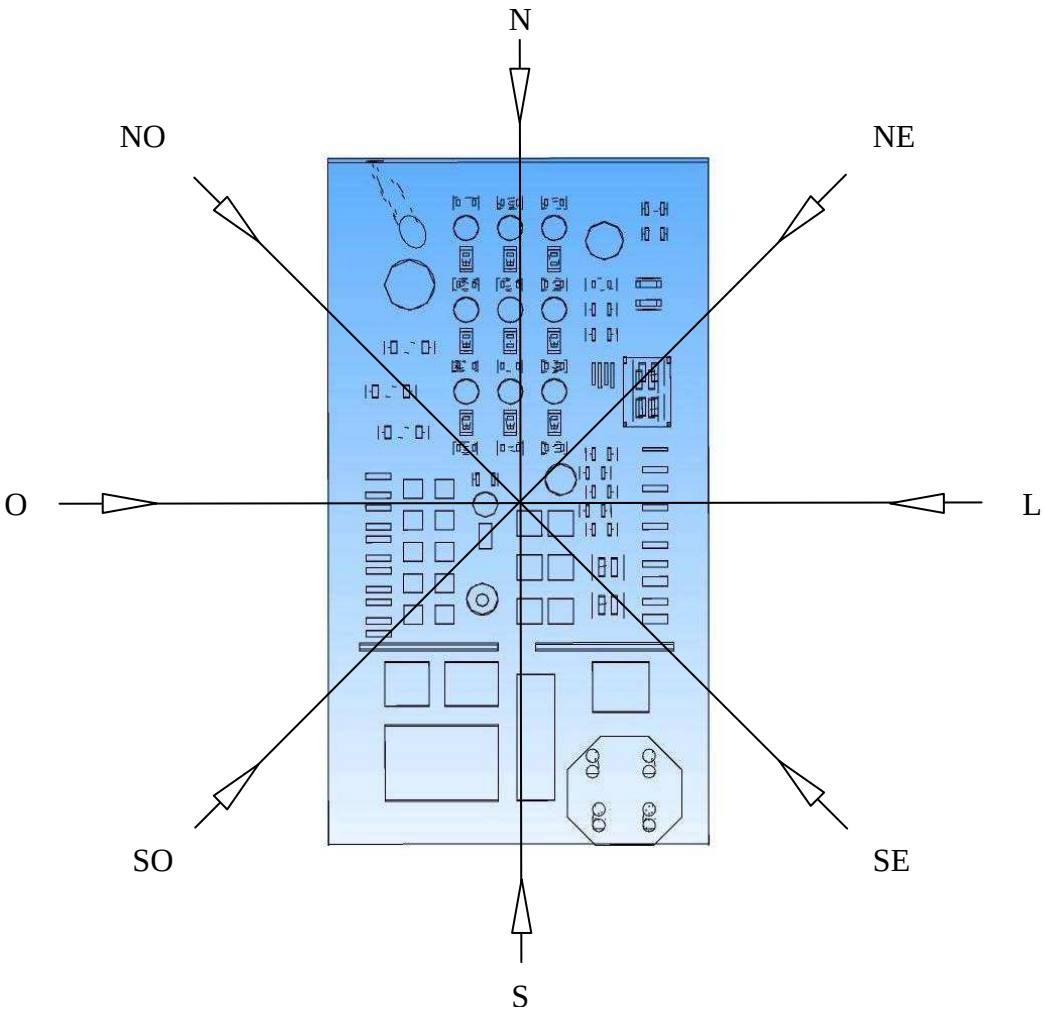


Figura. 7.7 – Rosa-dos-Ventos da plataforma.

Assim, no CFX-MESH foram definidas as regiões 2D, ou seja, as faces do volume de controle que correspondem a cada coordenada da Rosa-dos-ventos, que devem ser consideradas no CFX-PRE, para a modelagem do problema (Figura 7.8).

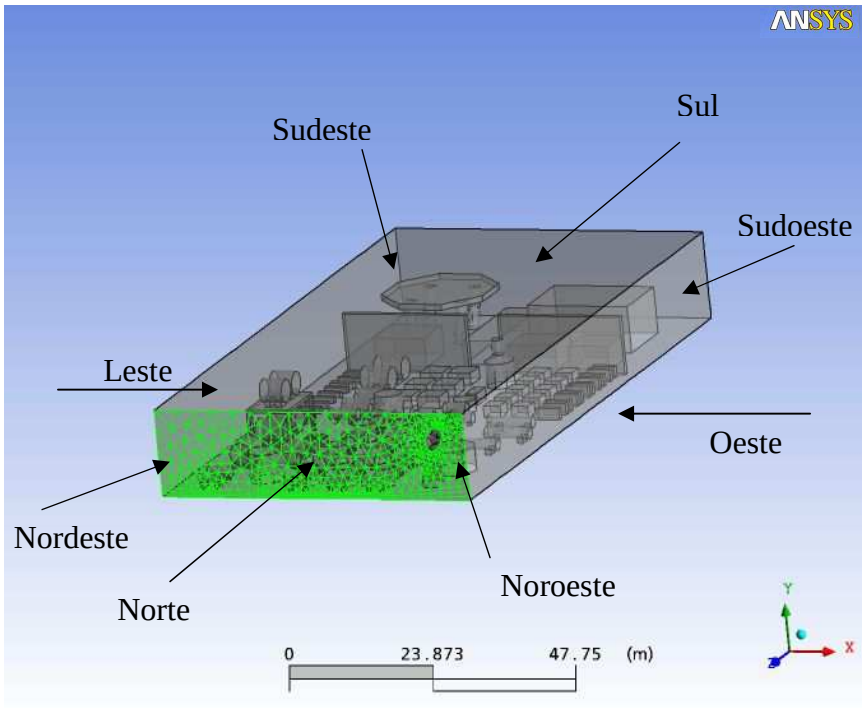


Figura. 7.8 - Malha da direção de entrada no volume de controle escolhida como Norte e as 8 direções de vento usadas no estudo.

Assim como Osenbroch *et al.* (2002) e Wilkening *et al.* (2007), os campos de escoamento dos ventos foram simulados separadamente conforme os dados da tabela 7.1, onde todos os parâmetros como velocidades e turbulência são armazenados. Os campos dos ventos, que têm perfil plano na entrada, atingiram o estado estacionário e foram, então, aplicados como arquivos iniciais para as simulações com vazamentos.

Desta forma, as soluções numéricas convergem com maior facilidade, pois obteve-se um ganho em tempo computacional de aproximadamente 966 horas, pelo fato das simulações somente dos ventos (8 direções + vento fraco) gastarem, em média, cerca de 26 horas para convergir, e dos vazamentos (60 cenários), utilizando os campos de escoamento dos ventos como arquivos iniciais, 3 horas. Já uma simulação sem essa condição inicial, ou seja, considerando a solução do vento e do vazamento ao mesmo tempo, demora em média 23 horas.

7.4.2. Caracterização das Substâncias Envolvidas

É importante que seja adotada, para o gás vazado, uma composição típica do gás natural extraído dos campos que serão produzidos pela plataforma em estudo. Neste caso foi criado no CFX-PRE, um componente chamado ‘gás natural’, que possui a composição apresentada na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Composição do gás natural.

Material	Fração Molar
C_1	0,750
C_2	0,125
C_3	0,070
C_4	0,030
C_5^+	0,010
CO_2	0,005
N_2	0,010

7.5. Parâmetros da Simulação

Durante a formulação do problema no CFX-PRE foi necessário especificar como a simulação seria tratada em relação ao regime de escoamento. Segundo HSL (2003), em geral é suficiente realizar cálculos estacionários para analisar o tamanho das nuvens geradas, porém não é possível observar como elas irão variar com o tempo, ou seja, como o vento diluirá o gás após o vazamento. Foi preciso também, especificar como o CFX-SOLVER iria tratar as faces do volume de contorno durante as simulações. As regiões 2D poderiam ser tratadas das seguintes formas: *inlet, outlet, opening* ou *wall* (*free slip* ou *no slip*, sem ou com aderência, respectivamente).

Quando uma região 2D é tratada como *inlet*, significa que o fluido especificado entrará no volume de controle. No caso de *opening* o fluido poderá entrar ou sair do volume de controle.

Para o problema em questão devem ser estabelecidas condições de contorno para quatro regiões: a entrada de gás no volume de controle (vazamento do gás especificado na Tabela 7.2), a entrada do vento, as saídas do vento e as paredes. A entrada de gás e a entrada de vento (uma determinada região 2D) foram especificadas no CFX como regiões do tipo *inlet*, as saídas do vento como regiões do tipo *opening* e as paredes (equipamentos, estruturas e chão da plataforma) como *wall*.

Recomenda-se em simulações deste tipo, não utilizar a condição *outlet*, pois usando-a, o fluido especificado estaria limitado a apenas sair do volume de controle, o que não corresponde à realidade encontrada em ambientes *offshore*. Assim, a utilização da condição *opening* para as saídas do vento é indicada para que os resultados obtidos sejam mais realistas, nesta condição o fluido se encontra livre para entrar ou sair do equipamento, sendo que a direção do movimento será determinada pelas equações de conservação.

Na região definida com entrada de gás devem ser estabelecidas a vazão mássica e a concentração do gás. Na região de entrada do vento é estabelecida apenas a velocidade do mesmo, já que é um único componente (ar), e nas regiões de saída do vento apenas a pressão externa ao contorno da plataforma, que neste caso é a pressão atmosférica. Para as paredes foi utilizada a condição de não deslizamento (*no slip*) implicando que o fluido imediatamente junto à parede tenha velocidade igual a ela, sendo que nas simulações realizadas, as paredes são estáticas, ou seja, a velocidade do fluido na parede será nula. A Tabela 7.3 indica as condições citadas acima, sendo que os perfis de vazão mássica do gás, velocidade do vento e pressão nas saídas são considerados constantes.

Tabela 7.3 – Condições de contorno

Regiões 2D	**Condições de Contorno**
Vazamento de Gás (*Inlet*)	m_0= 1,39 kg/s e 0,139 kg/s
Entrada do Vento (*Inlet*)	v = conforme Tabela 7.1 e 0,5 m/s
Saídas do Vento (*Opening*)	p_{set} = 0 atm $^{(*)}$
Equipamentos, estruturas e piso da plataforma (*Wall*)	-

$^{(*)}$ $p_{real} = p_{set} + p_{ref}$

Outros parâmetros utilizados na etapa de pré-processamento (CFX-PRE) das simulações deste trabalho são mostrados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Parâmetros da simulação

Parâmetro	**Valor**
Pressão de Referência	1 atm
Tipo de Simulação	Estacionária e Isotérmica
Modelo de Turbulência: Domínio	κ–ε
Modelo de Turbulência: Entrada de Gás	*Zero Equation*
Condições iniciais no domínio	Fração volumétrica de ar = 1
Regime de Escoamento	Subsônico
Tipo de Escoamento	Incompressível
Método de Discretização (Esquema Advectivo)	Specified Blend Factor (β = 0,75)
Escala de Tempo	Physical Timescale (0,3 s)
Critério de convergência	RMS (Raiz do desvio quadrático médio)
Resíduo máximo permitido	1 x10^{-5}
Nº máximo de iterações	1000

7.6. Planejamento Experimental

Todas as simulações foram realizadas usando a mesma geometria e malha da plataforma idealizada, onde os parâmetros que variaram foram: direção da entrada do vento e sua respectiva velocidade e a direção do vazamento. Na Tabela 7.5 estão especificadas as simulações realizadas.

Para 8 direções de vento, 6 direções de vazamento e apenas um ponto ou equipamento com vazamento, são necessárias 48 simulações para se ter um mapa completo da dispersão gasosa da liberação no compressor. Acrescentando as simulações com vento de 0,5 m/s e aquelas com pequenos vazamentos de 0,139 kg/s, cada uma para 6 direções de vazamento, chega-se a um total de 60 cenários simulados. Esse número é extremamente alto e dispendioso em termos computacionais.

Assim, quando existir um número maior de pontos de vazamento, sugere-se, quando possível, diminuir as direções de vazamento em cada ponto, fazendo uma análise mais

criteriosa de cada cenário envolvido. Neste sentido, foi realizado um estudo no capítulo seguinte, do cenário mais crítico para a direção do vazamento.

Tabela 7.5 - Especificação das simulações realizadas.

Cenário	Direção do Vento	Velocidade do Vento (m/s)	Direção do Vazamento	Obsevação
1	Norte	8,23	X	
2	Norte	8,23	mX	
3	Norte	8,23	Y	
4	Norte	8,23	mY	
5	Norte	8,23	Z	
6	Norte	8,23	mZ	
7	Sul	6,54	X	
8	Sul	6,54	mX	
9	Sul	6,54	Y	
10	Sul	6,54	mY	
11	Sul	6,54	Z	
12	Sul	6,54	mZ	
13	Leste	6,13	X	
14	Leste	6,13	mX	
15	Leste	6,13	Y	
16	Leste	6,13	mY	
17	Leste	6,13	Z	
18	Leste	6,13	mZ	
19	Oeste	5,69	X	
20	Oeste	5,69	mX	
21	Oeste	5,69	Y	
22	Oeste	5,69	mY	
23	Oeste	5,69	Z	
24	Oeste	5,69	mZ	
25	Nordeste	8,22	X	
26	Nordeste	8,22	mX	
27	Nordeste	8,22	Y	
28	Nordeste	8,22	mY	
29	Nordeste	8,22	Z	
30	Nordeste	8,22	mZ	
31	Sudoeste	6,99	X	
32	Sudoeste	6,99	mX	
33	Sudoeste	6,99	Y	
34	Sudoeste	6,99	mY	
35	Sudoeste	6,99	Z	
36	Sudoeste	6,99	mZ	
37	Noroeste	4,78	X	
38	Noroeste	4,78	mX	

39	Noroeste	4,78	Y	
40	Noroeste	4,78	mY	
41	Noroeste	4,78	Z	
42	Noroeste	4,78	mZ	
43	Sudeste	6,10	X	
44	Sudeste	6,10	mX	
45	Sudeste	6,10	Y	
46	Sudeste	6,10	mY	
47	Sudeste	6,10	Z	
48	Sudeste	6,10	mZ	
49	Noroeste	0,50	X	Vento fraco
50	Noroeste	0,50	mX	Vento fraco
51	Noroeste	0,50	Y	Vento fraco
52	Noroeste	0,50	mY	Vento fraco
53	Noroeste	0,50	Z	Vento fraco
54	Noroeste	0,50	mZ	Vento fraco
55	Noroeste	4,78	X	m = 0,139 kg/s
56	Noroeste	4,78	mX	m = 0,139 kg/s
57	Noroeste	4,78	Y	m = 0,139 kg/s
58	Noroeste	4,78	mY	m = 0,139 kg/s
59	Noroeste	4,78	Z	m = 0,139 kg/s
60	Noroeste	4,78	mZ	m = 0,139 kg/s

Com todo o problema formulado, no CFX-PRE foram gerados os arquivos com os modelos e condições de contorno adotadas, e estes foram simulados com a ajuda do CFX-SOLVER. No capítulo a seguir são apresentados os resultados.

7.7. Metodologia Proposta

A metodologia proposta resume-se basicamente em definir uma rede inicial de detectores de gases inflamáveis, simular os cenários de vazamento, classificar os pontos de detecção e otimizar a malha de detectores com os pontos melhor classificados.

7.7.1. Definição do Sistema de Detecção

Serão utilizados detectores equidistantes, numa malha 5 m x 5 m, como apresentado na Figura 7.9. Esta proposta advém de estudos que mostram que quando uma nuvem estequiométrica de 6 m de comprimento de metano sofre ignição, a velocidade da chama não excede 100 m/s em um grande volume não-confinado, com ou sem

obstruções, ou em um volume confinado e ventilado com níveis de obstrução representados por razões de bloqueio (volume bloqueado/volume total) maiores que 0,4. Sobrepressões resultantes de velocidades de chama menores que 100 m/s serão menores que 150 mbar, consideradas inferiores a níveis onde ocorrem danos. Porém, onde existe um alto grau de confinamento, além de obstáculos, velocidades da chama podem exceder 125 m/s em uma nuvem de 6 m, e o espaçamento dos detectores deve ser reduzido como apropriado (HSE, 1993; Kelsey *et al.*, 2002 e HSE, 2004).

Assim, o sistema de detecção deve identificar os vazamentos antes que uma nuvem de gás explosivo (metano) de 6 m de comprimento seja formada. Tal nuvem, sofrendo ignição, já causa danos significativos a pessoas ou equipamentos.

O domínio computacional da plataforma utilizada neste estudo tem 109 m de comprimento por 60,5 m de largura e 20 m de altura, assim, a malha inicial terá 231 pontos de detecção ou detectores (não considerando redundância, ou seja, considera-se apenas um detector por cada ponto de detecção proposto).

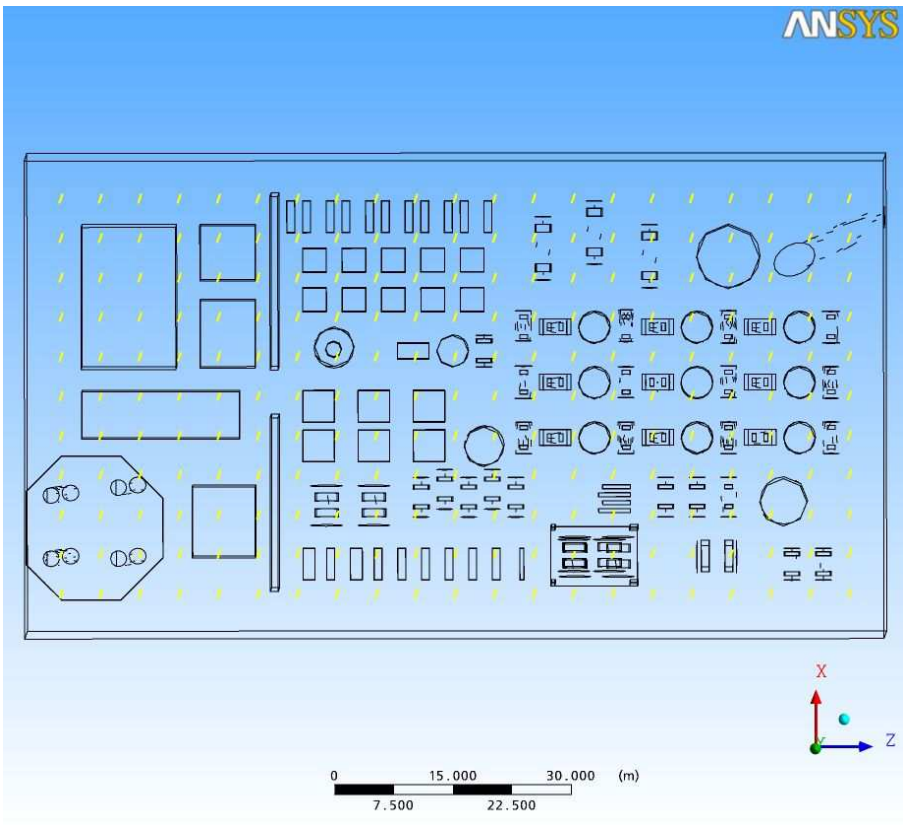


Figura. 7.9 - Rede de 5 m x 5 m de pontos de detecção inicialmente proposta.

7.7.2. Classificação dos Detectores

A classificação de cada detector proposto será definida de acordo com a ordenação de cada cenário de vazamento simulado, ou seja, quanto maior for a quantidade de cenários detectados e suas frequências, melhor classificados serão os pontos de detecção que os identificou. A ponderação de cada cenário de vazamento será efetuada de acordo com a frequência do vazamento, probabilidade do vento e intensidade (ou consequência) da explosão, da seguinte maneira:

- Frequência do vazamento (f_{vaz}): determinada de acordo com a frequência de ocorrência vazamento do sistema ou equipamento em estudo. No presente trabalho, o equipamento com vazamento é representado por um compressor, que como mostrado no Capítulo 3, possui uma frequência de 6,52 x 10^{-2} falhas por equipamento por ano. Como apenas um ponto de vazamento está sendo estudado, serão consideradas que todas as direções de vazamento (Norte, Sul, Leste, Oeste, Cima e Baixo) possuem esta frequência;
- Probabilidade do vento (p_{vento}): determinada de acordo com a probabilidade de ocorrência de cada direção de vento, como mostrado na Tabela 7.1.
- Intensidade da explosão: determinada por alguns parâmetros, como congestão (tubulações, estruturas, equipamentos, cabos, etc), confinamento (paredes, *decks*, equipamentos largos, etc) e tamanho da nuvem de gás explosivo (tamanho de parte da nuvem em condições estequiométricas), sendo os dois primeiros difíceis de serem representados de forma realista e precisa nas análises (Bakke *et al.*, 2003). Portanto, como cada cenário gerará uma nuvem explosiva com um determinado volume, será considerado que a intensidade da explosão é diretamente proporcional ao volume da mesma. Assim, cada cenário é ponderado (w_{expl}), de acordo com o volume inflamável (V_{inf}) gerado, pela equação (7.1), sendo que o valor de 113 no denominador, representa o volume (m^3) de uma nuvem esférica com 6 m de diâmetro. Desta maneira é dado peso 1 para nuvens explosivas de volumes desprezíveis.

$$w_{expl} = 1 + \left(\frac{V_{inf}}{113} \right) \tag{7.1}$$

A classificação de cada cenário simulado, ou seja, seu fator de ponderação (FW_{cen}), é calculada, portanto, pelo produto da frequência do vazamento, probabilidade do vento e intensidade da explosão (equação 7.2).

$$FW_{cen} = f_{vaz} \cdot p_{vento} \cdot w_{expl} \tag{7.2}$$

Por fim, tem-se que cada ponto de detecção proposto terá sua classificação final (C_{pto}) determinada pela equação 7.3, ou seja, pelo somatório dos fatores dos cenários detectados por aquele ponto, sendo *n* o número de cenários identificados.

$$C_{pto} = \sum_{0}^{n} FW_{cen} \tag{7.3}$$

7.7.3. Sistema Otimizado de Detecção

O sistema de detecção é otimizado, tanto em sua localização, quanto na quantidade de pontos de detecção, primeiramente eliminando aqueles que não detectarem nenhum cenário simulado, bem como aqueles que detectarem apenas cenários redundantes, ou seja, cenários já detectados por outros pontos melhor classificados.

Além disso, pode-se reduzir ainda mais a quantidade de pontos de detecção, observando um gráfico do número de pontos de detecção melhor classificados pela porcentagem de cenários detectados. Assim, se a tolerância mínima de cenários detectados aceita for 100%, tem-se a malha proposta inicialmente reduzida apenas dos pontos que não detectaram nenhum cenário e dos pontos que detectaram apenas cenários redundantes. Porém, se essa tolerância for menor que 100 %, a partir desse gráfico pode-se propor um sistema de detecção de gás, composto apenas pelos pontos de detecção melhor classificados, que suprem esta tolerâcia desejada.

Pode-se, e até se recomenda, realocar alguns pontos para locais que não tiveram as nuvens identificadas, melhorando ainda mais a rede de detecção de gases da plataforma.

É possível também, atuando a favor da segurança, ao invés de rearranjar, simplesmente adicionar pontos de detecção extras nesses locais.

7.7.4. Altura do Sistema Otimizado de Detecção

Uma questão também importante é a altura de cada ponto de detecção da malha de sensores. Parece mais razoável usar pontos de detecção, da malha já otimizada, em alturas distintas, determinadas com o auxílio das simulações, a usar mais de uma malha em diferentes alturas, o que aumentaria demasiadamente o número de pontos de detecção.

Assim, este trabalho propõe com o auxílio do CFX-POST, alocar linhas perpendiculares ao piso da plataforma (paralelo ao eixo Y do domínio), nos pontos pré-determinados de detecção (Figura 7.10). Através de gráficos que mostram como a concentração de gás varia ao longo dessas linhas (Figura 7.11), tem-se para cada ponto de detecção a altura relacionada ao nível de alarme (detecção) dos detectores (20% do LEL ou 1% volume ou fração volumétrica de 0,01), para cada cenário de vazamento. Portanto, dentre as alturas dos cenários detectados por um determinado ponto, escolhe-se a menor para representar sua verdadeira altura, garantindo que todos os pontos da rede de detecção identificarão os cenários de liberação de gás, cujas alturas relativas ao nível de alarme sejam superiores as suas respectivas alturas verdadeiras. Isto se justifica pelo simples fato dos gráficos, como o mostrado na Figura 7.11, serem decrescentes, ou seja, a fração volumétrica de gás (gases leves) diminui com o acréscimo da altura, em relação ao piso da plataforma.

Por exemplo, considere-se que um determinado ponto da rede de detecção identificou o gás inflamável em apenas dois cenários de vazamento, sendo que no primeiro o nível de detecção foi y_1 = 2,5 m, e para o outro foi y_1’ = 1,0 m. Um segundo ponto, também da malha de detecção, identificou esses mesmos cenários, porém a y_2 = 3,0 m e a y_2’ = 0,9 m, respectivamente. O trabalho propõe que o primeiro ponto de detecção esteja a 1,0 m do piso da plataforma, já o segundo ponto deve estar a 0,9 m, garantindo desta forma, a identificação dos dois cenários de liberação de gás, por ambos os pontos de detecção.

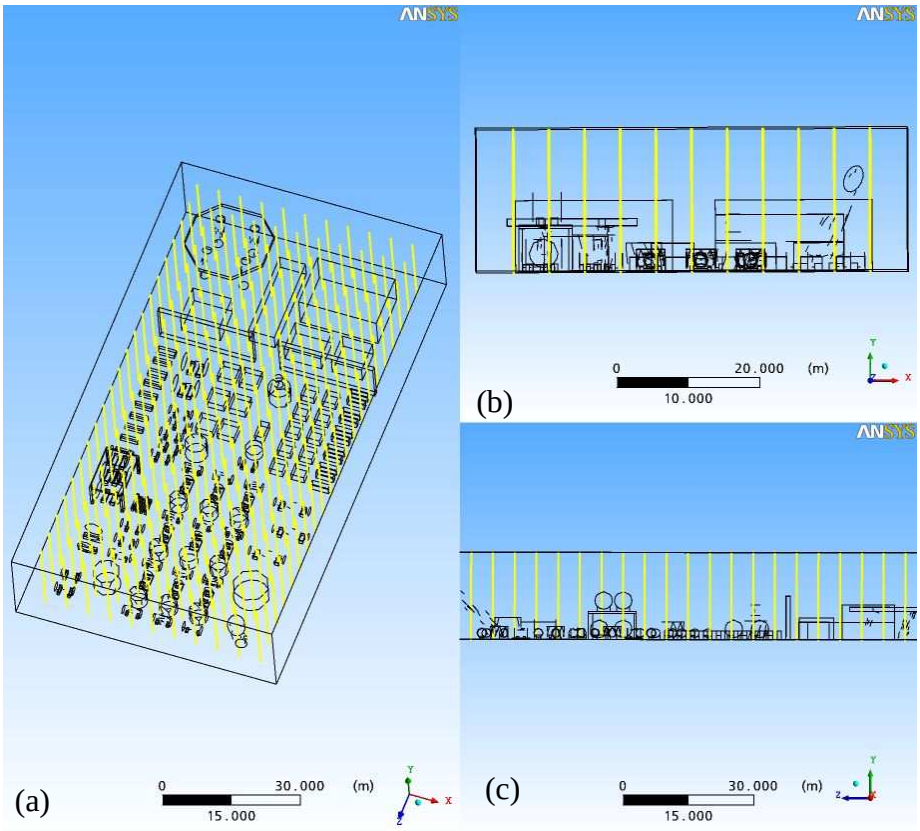


Figura. 7.10 – (a) Detalhe das linhas nos pontos de detecção, (b) vista frontal e (c) vista lateral.

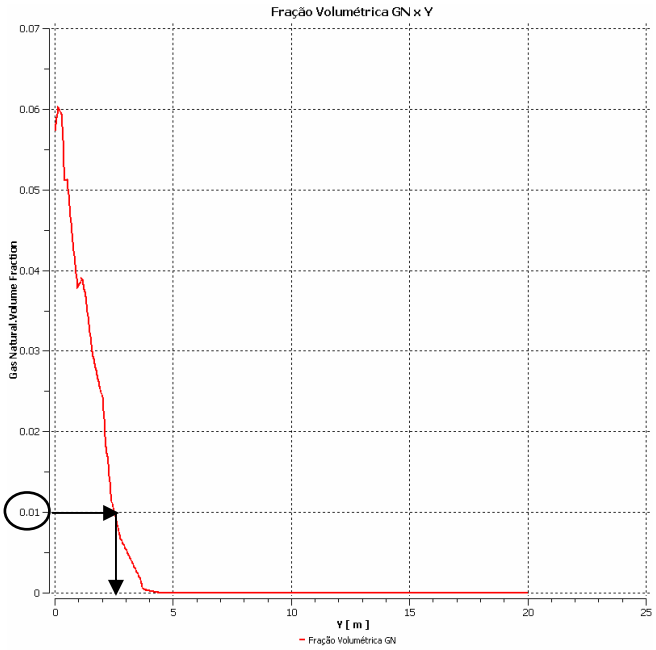


Figura. 7.11 – Exemplo do gráfico da fração volumétrica de gás variando ao longo de uma linha, mostrando a altura de 2,5 m relacionada ao nível de detecção para um determinado cenário.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO

8.1. Estudo do Jato em CFD

O objetivo principal desta seção foi obter, através de simulações numéricas, o ângulo do jato na saída do orifício, necessário para dimensionar o tronco de cone, já comentado no capítulo anterior. Foi possível, também, estudar o comportamento do jato, analisando como ele influenciará a dispersão de gás, já que toda pluma gasosa, em vazamento através de um orifício, é precedida pelo mesmo.

Segundo Wakes (2003), as seguintes variáveis são importantes em simulações de CFD de jatos: ângulo de espalhamento, velocidade na linha central do jato, perfil de velocidade do jato e, quando existem resultados experimentais, a comparação visual.

Testes numéricos foram realizados com o intuito de estudar as variáveis citadas acima, tanto para escoamento incompressível, como para levemente compressível (considerando apenas o efeito da temperatura na massa específica), em cenários sem a variável vento.

A geometria construída para este estudo é bastante simples, tendo um quadrado de 0,1 m de lado como base e 1,0 m de altura (Figura 8.1a). A malha utilizada foi do tipo não-estrudada, apenas com elementos tetraédricos, com um refino especial ao longo do eixo de escoamento do jato (Figura 8.1b), totalizando cerca de 107 mil nós e 591 mil elementos. Com exceção do orifício (*inlet*) e do chão (*wall*), todas as outras regiões 2D são *opening*. As condições de contorno e os demais parâmetros das simulações estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 8.1 e 8.2.

Tabela 8.1 – Condições de contorno do estudo do jato

Regiões 2D	**Condições de Contorno**
Jato de Gás (*Inlet*)	v = 340 m/s; T = 20 ^{o}C
Outras regiões 2D (*Opening*)	p_{set} = 0 atm $^{(*)}$; T = 25 ^{o}C
Chão do domínio (*Wall*)	-

$^{(*)}$ $p_{real} = p_{set} + p_{referência}$

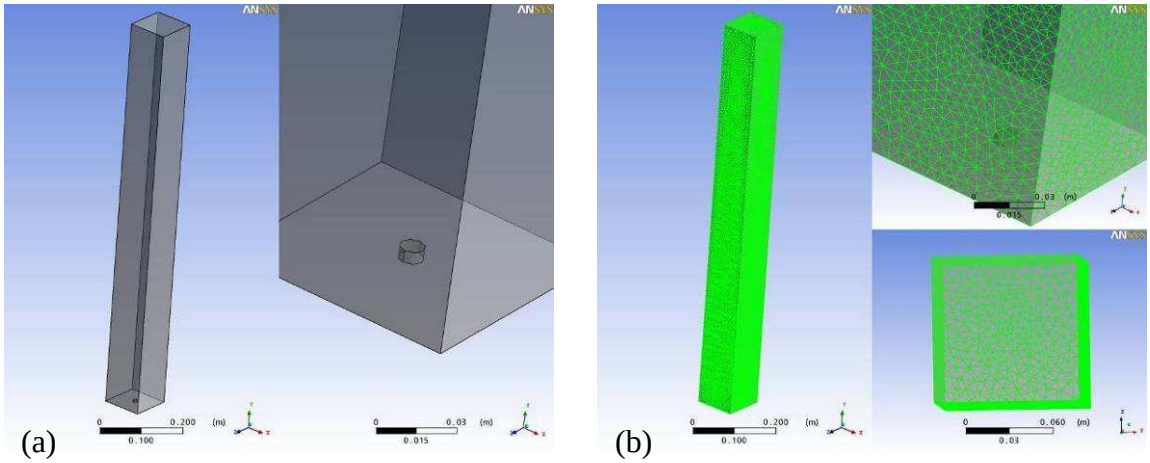


Figura. 8.1 – (a) Geometria e (b) malha utilizadas no estudo do jato.

Tabela 8.2 – Parâmetros da simulação do estudo do jato

Parâmetro	**Valor**
Pressão de Referência	1 atm
Tipo de Simulação	Estacionária e Não-isotérmica
Modelo de Turbulência: Domínio	κ–ε
Modelo de Turbulência: Entrada de Gás	*Zero Equation*
Condições iniciais no domínio	Fração volumétrica do ar = 1 e T = 25 ^{o}C
Regime de Escoamento	Subsônico
Tipo de Escoamento	Incompressível / Levemente compressível
Método de Discretização (Esquema Advectivo)	High Resolution
Escala de Tempo	Auto Timescale
Critério de convergência	RMS (Raiz do erro quadrático)
Resíduo máximo permitido	1 x10^{-5}
Nº máximo de iterações	1000

Com o auxílio do CFX-POST, os seguintes resultados foram extraídos deste estudo teórico e numérico:

O ângulo de espalhamento é uma variável extremamente importante, pois se relaciona diretamente com o tamanho da nuvem de gás explosivo que se formará, sendo que quanto maior o ângulo mais ar se mistura ao hidrocarboneto, consequentemente maior será a nuvem, além da mistura explosiva ser alcançada mais rapidamente. Para Wakes (2003), se tal propriedade for subestimada, as margens de segurança da plataforma não serão suficientes e os detectores de gás podem estar posicionados erroneamente.

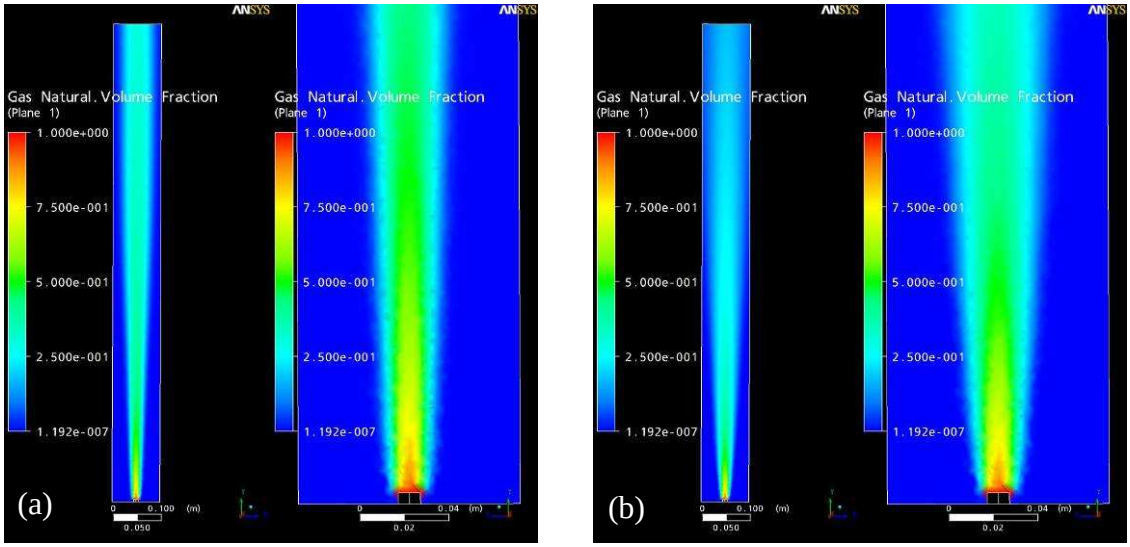
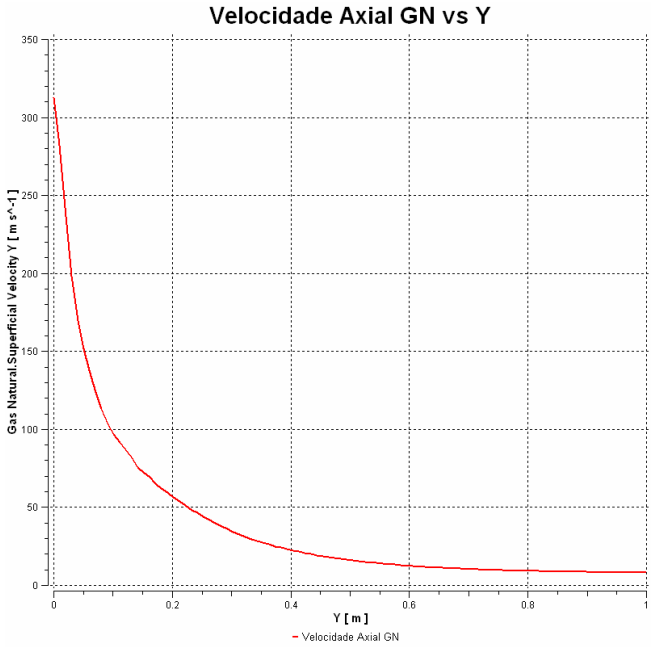


Figura. 8.2 – Ângulo de espalhamento do jato para escoamentos (a) incompressível e (b) levemente compressível.

Foi possível comparar os valores obtidos para o ângulo de espalhamento de 3º para escoamento sem compressibilidade (Figura 8.2a) e 7º para escoamento fracamente compressível (Figura 8.2b), com os valores sugeridos pela literatura, como o valor teórico de 18º (Lees, 1996) e os valores experimentais entre 12-16º (Wakes, 2003). Portanto, isto sugere que no escoamento levemente compressível há um maior espalhamento do gás vazado, o que neste critério, em termos de segurança, o torna mais crítico que para o caso de escoamento incompressível. Utilizou-se o valor de 7º para a construção da geometria do tronco de cone, mostrada na Figura 7.3. Esta é uma escolha conservativa, já que nuvens menores serão formadas demandando mais do sistema de detecção, por outro lado nuvens inflamáveis demorariam mais para serem formadas.

A velocidade na linha central (Figura 8.3) dá uma indicação do comportamento do jato. Em termos de segurança, informa como a velocidade do jato declina com a distância do ponto de origem da liberação, ou seja, implica em quão longe o jato pode ir enquanto se mistura ao ar, podendo tornar-se perigosamente explosivo. Neste sentido, percebe-se que o escoamento incompressível fornece dados mais conservativos, pois suas velocidades são maiores que para o caso de escoamento com pouca compressibilidade. Isto também pode ajudar no posicionamento dos detectores de gás.

(a)



(b)

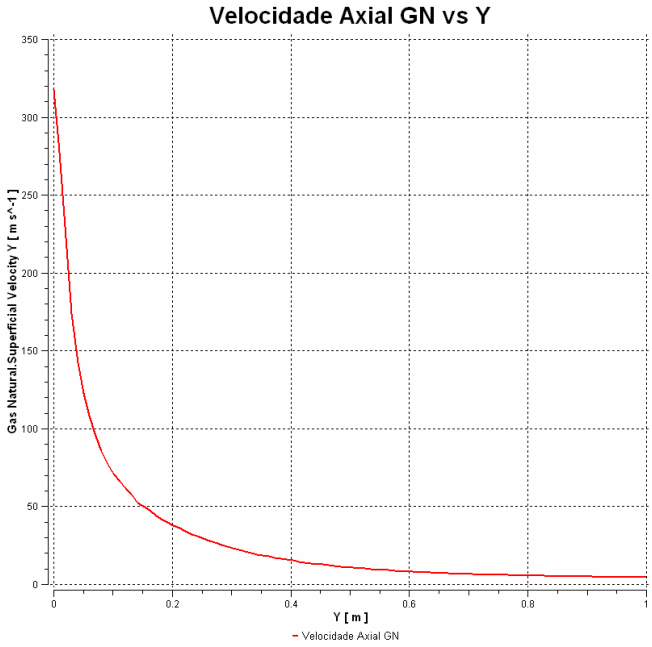
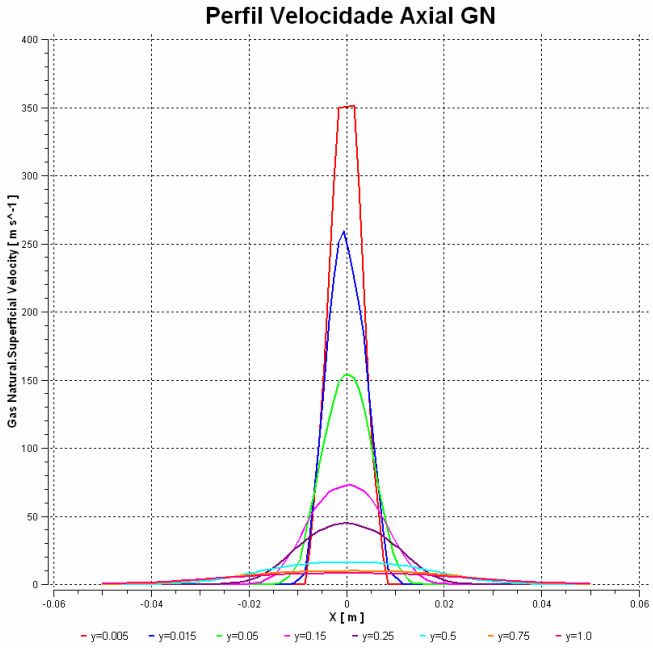


Figura. 8.3 – Perfil de velocidade na linha central do jato para escoamento (a) incompressível e (b) levemente compressível.

O perfil de velocidade também indica um importante fenômeno associado ao comportamento do jato. Ele é bastante dependente do perfil de velocidade de entrada do gás no domínio. Portanto, sendo o perfil constante ou variável, este se perpetuará no perfil de velocidade do jato (Wakes, 2003). Neste estudo, os casos simulados tiveram apenas o perfil constante de velocidade de entrada do gás no domínio.

(a)



(b)

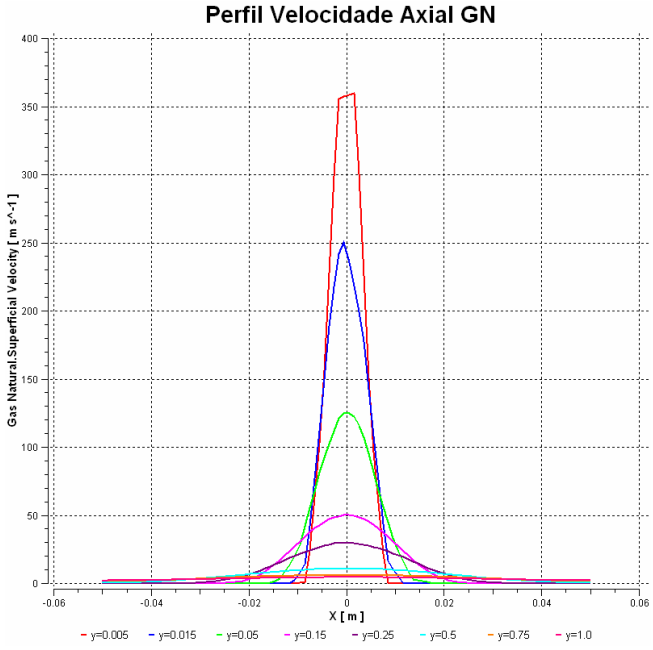


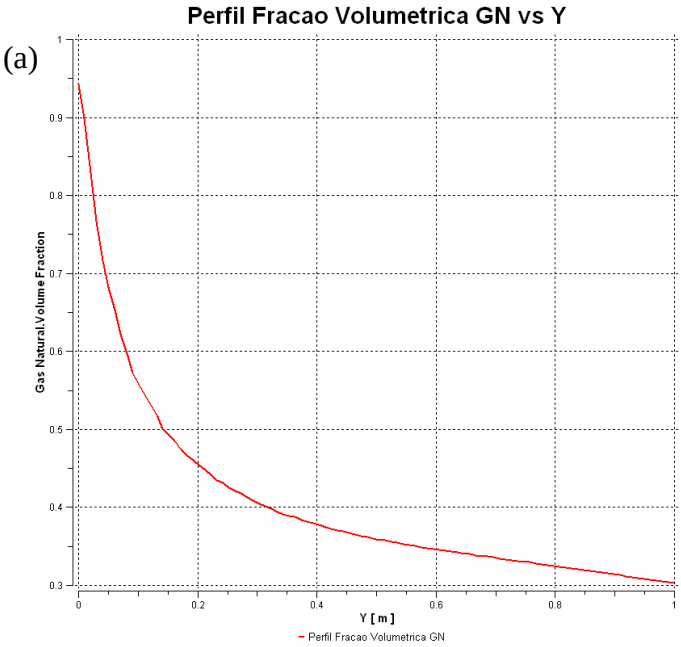
Figura. 8.4 – Perfil de velocidade do Jato, em diferentes alturas, para os escoamentos (a) incompressível e (b) levemente compressível.

A Figura 8.4 apresenta o perfil de velocidade do jato em diferentes alturas, desde 0,005 m até 1,0 m do ponto do vazamento. Nota-se que existem distinções para esta variável nos diferentes tipos de escoamento, principalmente a partir de 0,05 m (curva verde),

onde a diferença na máxima velocidade chega a ser de aproximadamente 30 m/s (25%). Então, além do jato atingir distâncias mais longas no escoamento sem compressibilidade, podendo formar maiores nuvens explosivas, se ele atingir algum obstáculo no seu percurso, devido à maior intensidade do mesmo, ou seja, maior momento do jato poderá resultar em maiores misturas hidrocarboneto/ar, aumentando o risco de explosão.

Uma outra variável interessante de ser estudada é a variação da fração volumétrica do gás vazado, também ao longo da linha central, mostrada na Figura 8.5. Este parâmetro indica a partir de qual posição a nuvem de concentração explosiva se formará. Observa-se que a concentração de gás a 1,0 m do ponto de origem do vazamento é 0,30 para escoamento incompressível e 0,18 para o caso de pequena compressibilidade, ou seja, a nuvem inflamável ocorre mais distante do ponto de vazamento do gás para o caso não compressível, o que pode ser mais para crítico para a segurança. Tal condição influenciará diretamente na escolha da localização dos pontos de detecção de gás.

(a)



(b)

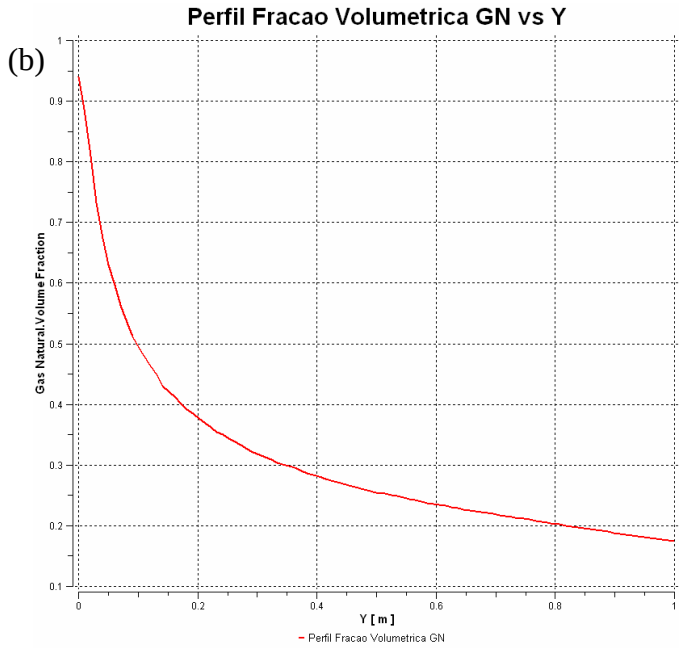


Figura. 8.5 – Variação da fração volumétrica de gás na linha central do jato para escoamento (a) incompressível e (b) levemente compressível.

8.2. Estudo de Casos: Vazamento no Compressor do Segundo Estágio de Compressão do Segundo Trem de Compressores

Numa análise preliminar de perigo, baseada em dados estatísticos do HSE, identificou-se o compressor como um caso crítico a ser estudado. Assim, adotou-se o compressor

do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores como o ponto de vazamento para a realização do estudo de casos.

Efetuando as simulações estacionárias listadas na Tabela 7.5, pretende-se obter dados suficientes para a aplicação da metodologia proposta para alocação de detectores em plataformas *offshore*.

Propõe-se que os resultados sejam apresentados a priori em função dos pontos de vazamento, separados pelas direções de vento e, por fim, pelas direções de vazamento. Neste estudo, tem-se apenas um ponto de vazamento, assim os resultados são apresentados em função da direção do vento, seguido das direções de vazamento, sendo apontado o cenário de maior risco em cada direção.

A princípio são apresentados os resultados dos campos de escoamento do vento nas formas de linhas de corrente e vetores velocidade, ambos ao longo de todo domínio da plataforma. Desta forma, é possível visualizar, com uma grande clareza, os caminhos percorridos pela corrente de ar na plataforma, bem como quaisquer pontos de eventuais recirculações, caminhos preferenciais e até mesmo regiões com estagnações de ar, propícias à formação de misturas hidrocarboneto/ar explosivas, colocando em risco tanto a integridade de equipamentos e bens da plataforma, mas principalmente a saúde das pessoas a bordo.

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. A 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 %.

O espalhamento/dispersão do gás após a liberação, a concentração do mesmo em função da posição, e o volume das nuvens de gás nas concentrações de detecção e inflamável, respectivamente, são os principais fatores que serviram para mensurar o potencial risco dos cenários estudados. Conseqüentemente, quanto maior o espalhamento do gás, maior será a área submetida ao risco inerente a este fenômeno, pois o volume gasoso inflamável é, teoricamente, diretamente proporcional ao grau de dispersão. No caso da concentração do gás, aumentando esse parâmetro em áreas de possível acesso de pessoas, maior será o risco a que estas estarão submetidas.

Na sequência do capítulo, são apresentados apenas os resultados para o caso de ocorrência mais provável, que também é o mais crítico (vento na direção Nordeste); para o segundo caso de maior criticidade em termos de volume da nuvem de gás em concentrações dentro dos limites de explosividade (vento na direção Norte), assim como para os casos com vento fraco (0,5 m/s) e com pequeno vazamento (vazão de 0,139 kg/s), ambos com vento para Noroeste. Os demais resultados estão em anexo.

Para uma melhor discussão das próximas seções, a Tabela 8.3 apresenta um resumo dos resultados dos volumes detectável e inflamável de gás para todos os cenários simulados, seus fatores de ponderação (FW_{cen}) já calculadas, e se a rede com espaçamento eqüidistante de 5 m inicialmente proposta os identificou.

Tabela 8.3 – Volumes detectável e inflamável, fatores de ponderação e identificação dos cenários simulados.

Cenário	Direção do Vento	Velocidade (m/s)	Direção do Vazamento	Volume Detectável (m^3)	Volume Inflamável (m^3)	FW_{cen}	Malha 5m x 5m detectou?
1	Norte	8,23	X	15,8	4,7E-02	0,01217	S
2	Norte	8,23	Xm	34,5	4,6E-02	0,01217	S
3	Norte	8,23	Y	5,1	4,2E-02	0,01217	N
4	Norte	8,23	Ym	395,5	62,3	0,01888	S
5	Norte	8,23	Z	149,2	3,9E-02	0,01217	S

6	Norte	8,23	Zm	38,4	4,4E-02	0,01217	N
7	Sul	6,54	X	27,9	4,8E-02	0,00676	S
8	Sul	6,54	Xm	39,3	4,6E-02	0,00676	S
9	Sul	6,54	Y	6,6	4,2E-02	0,00676	N
10	Sul	6,54	Ym	956,6	102,6	0,01289	S
11	Sul	6,54	Z	49,4	3,1E-02	0,00676	S
12	Sul	6,54	Zm	41,5	4,4E-02	0,00676	N
13	Leste	6,13	X	18,3	4,6E-02	0,00889	N
14	Leste	6,13	Xm	138,0	4,6E-02	0,00889	S
15	Leste	6,13	Y	5,1	4,2E-02	0,00889	N
16	Leste	6,13	Ym	463,4	50,0	0,01282	S
17	Leste	6,13	Z	60,4	3,8E-02	0,00889	S
18	Leste	6,13	Zm	37,7	4,4E-02	0,00889	N
19	Oeste	5,69	X	156,6	4,8E-02	0,00215	S
20	Oeste	5,69	Xm	30,4	4,6E-02	0,00215	S
21	Oeste	5,69	Y	6,5	4,2E-02	0,00215	N
22	Oeste	5,69	Ym	399,5	39,0	0,00289	S
23	Oeste	5,69	Z	52,5	3,8E-02	0,00215	S
24	Oeste	5,69	Zm	35,1	4,4E-02	0,00215	N
25	Nordeste	8,22	X	29,6	4,8E-02	0,02177	S
26	Nordeste	8,22	Xm	134,0	4,6E-02	0,02177	S
27	Nordeste	8,22	Y	5,2	4,2E-02	0,02177	N
28	Nordeste	8,22	Ym	297,2	41,0	0,02966	S
29	Nordeste	8,22	Z	165,4	3,8E-02	0,02177	S
30	Nordeste	8,22	Zm	30,4	4,4E-02	0,02177	N
31	Sudoeste	6,99	X	164,0	6,0E-02	0,00474	S
32	Sudoeste	6,99	Xm	27,7	4,6E-02	0,00474	S
33	Sudoeste	6,99	Y	6,5	4,2E-02	0,00474	N
34	Sudoeste	6,99	Ym	387,2	41,8	0,00649	S
35	Sudoeste	6,99	Z	52,5	3,8E-02	0,00474	S
36	Sudoeste	6,99	Zm	134,1	4,4E-02	0,00474	S
37	Noroeste	4,78	X	120,1	4,8E-02	0,00168	S
38	Noroeste	4,78	Xm	29,6	4,6E-02	0,00168	S
39	Noroeste	4,78	Y	6,6	4,2E-02	0,00168	N
40	Noroeste	4,78	Ym	556,4	46,2	0,00237	S
41	Noroeste	4,78	Z	244,3	5,6E-02	0,00168	S
42	Noroeste	4,78	Zm	23,6	4,4E-02	0,00168	N
43	Sudeste	6,10	X	20,4	4,7E-02	0,00706	N
44	Sudeste	6,10	Xm	171,0	4,6E-02	0,00706	S
45	Sudeste	6,10	Y	5,1	4,2E-02	0,00706	N
46	Sudeste	6,10	Ym	567,3	69,4	0,01139	S
47	Sudeste	6,10	Z	54,4	3,1E-02	0,00706	S
48	Sudeste	6,10	Zm	61,4	4,4E-02	0,00706	N
49	Noroeste	0,50	X	39,4	4,8E-02	-	S
50	Noroeste	0,50	Xm	30,0	4,6E-02	-	S
51	Noroeste	0,50	Y	6,7	4,2E-02	-	N

52	Noroeste	0,50	Ym	522,3	43,4	-	S
53	Noroeste	0,50	Z	136,6	4,3E-02	-	S
54	Noroeste	0,50	Zm	24,7	4,4E-02	-	N
55	Noroeste	4,78	X	24,7	5,6E-02	-	N
56	Noroeste	4,78	Xm	13,3	4,6E-02	-	S
57	Noroeste	4,78	Y	2,7	4,2E-02	-	N
58	Noroeste	4,78	Ym	57,9	13,1	-	S
59	Noroeste	4,78	Z	44,0	5,6E-02	-	S
60	Noroeste	4,78	Zm	18,8	4,4E-02	-	N

Segundo HSL (2005), volumes de nuvens gasosas, que tem concentrações médias de 50 % do LEL, são considerados desprezíveis, quando são menores que 0,1 m^3. Neste sentido, nota-se pela Tabela 8.3, que os únicos cenários que apresentaram consideráveis volumes inflamáveis foram os de vazamento para baixo (Ym). Em contrapartida os menores volumes detectáveis foram gerados em liberações para cima (Y), cujos cenários não foram identificados pela malha de detectores de 5 m x 5 m.

8.2.1. Vento na Direção Nordeste

O campo de escoamento do vento na direção Nordeste, com velocidade 8,22 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura 8.6, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. A Figura B.1 no anexo B, apresenta os vetores do vento na direção Nordeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção. Na Tabela 7.1, percebe-se que esta direção de vento apresenta a maior probabilidade de ocorrência (33,38 %), além de estes cenários terem as maiores fator de ponderação (Tabela 8.3).

As Figuras 8.7 a 8.12 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

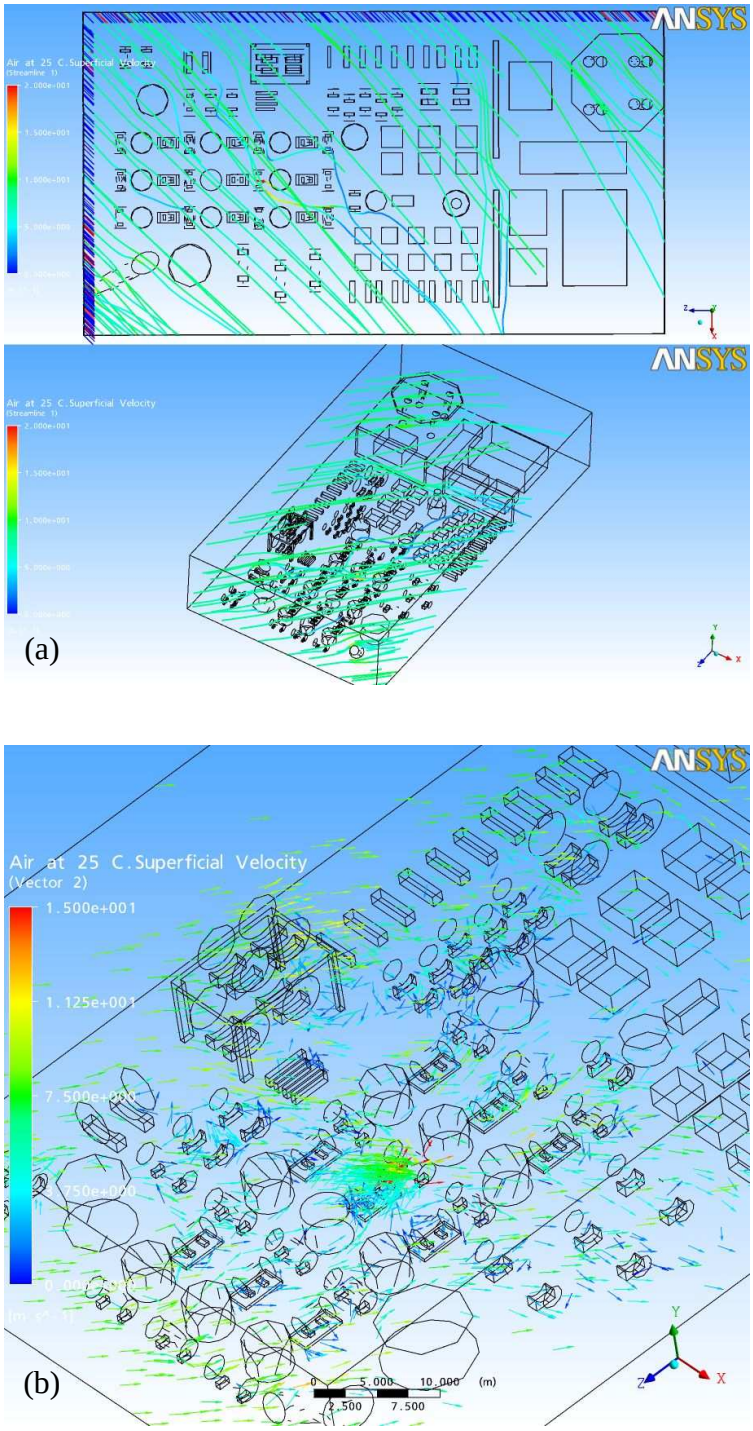


Figura. 8.6 – Campo de escoamento do vento na direção Nordeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

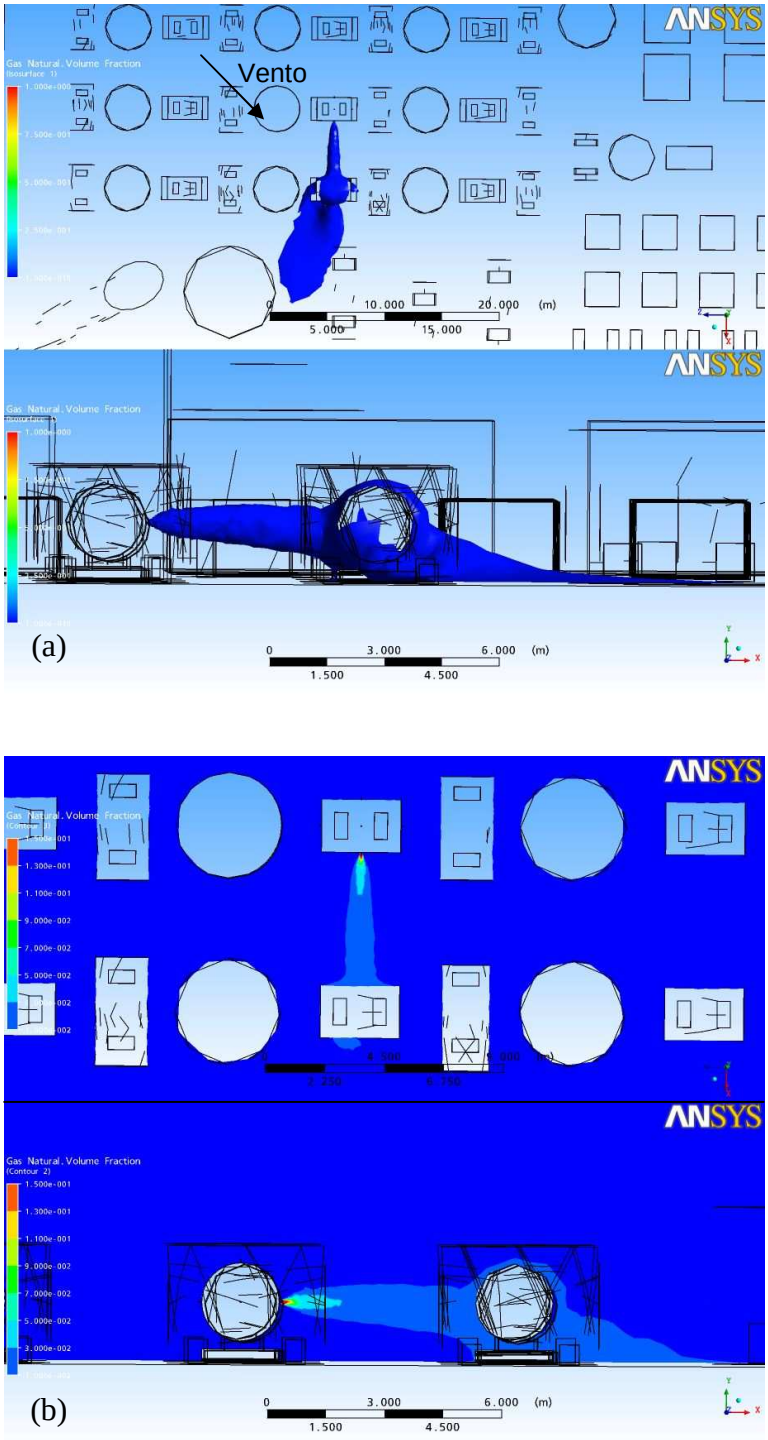


Figura. 8.7 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Leste (X).

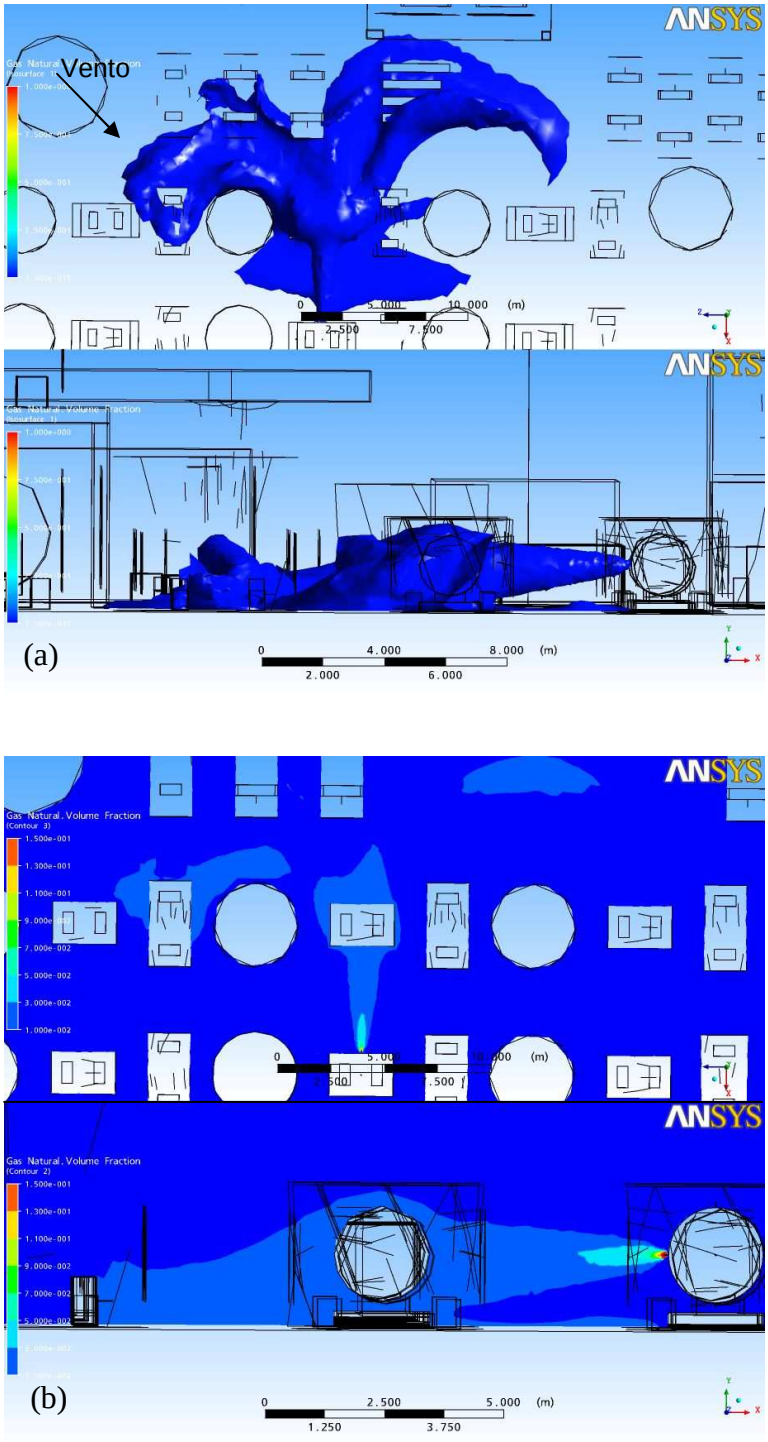


Figura. 8.8 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Oeste (Xm).

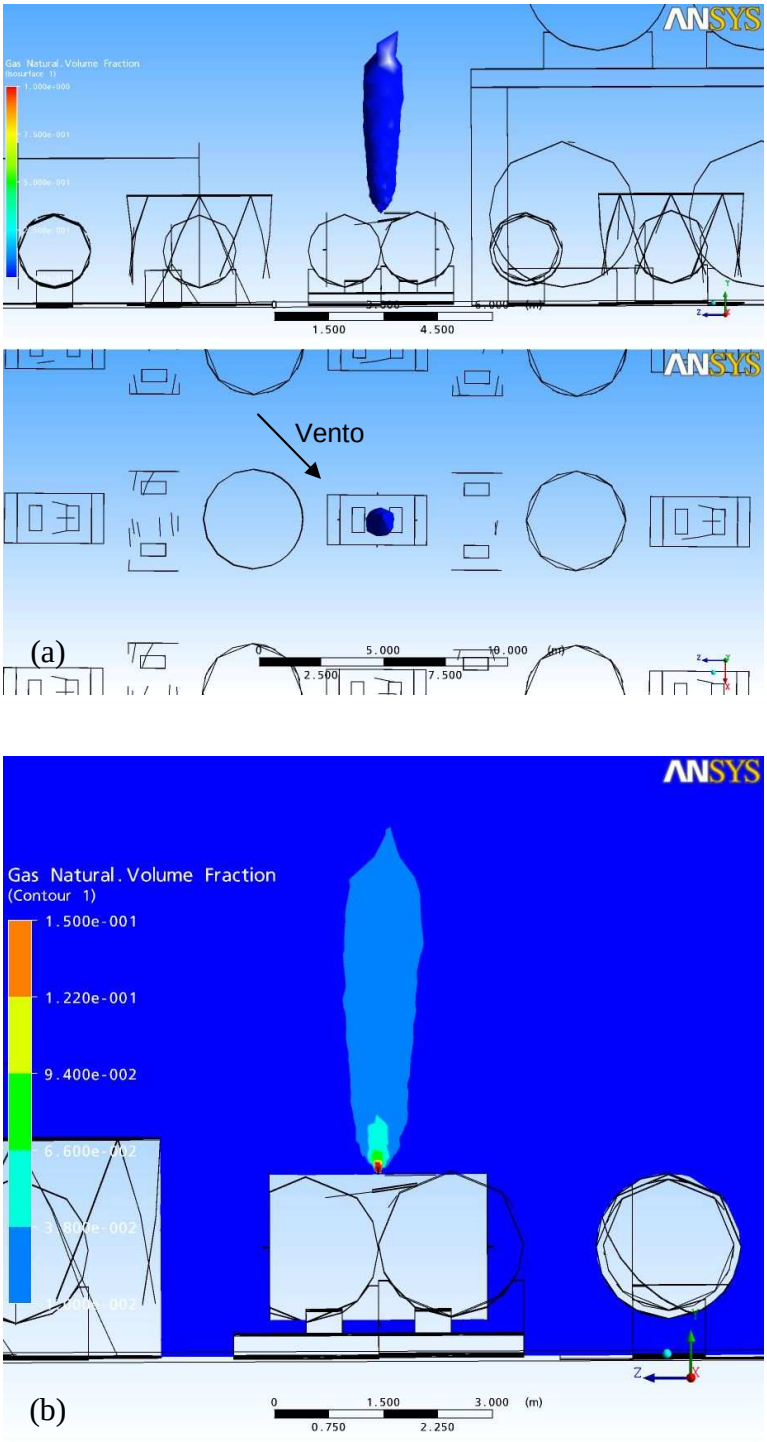


Figura. 8.9 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para cima (Y).

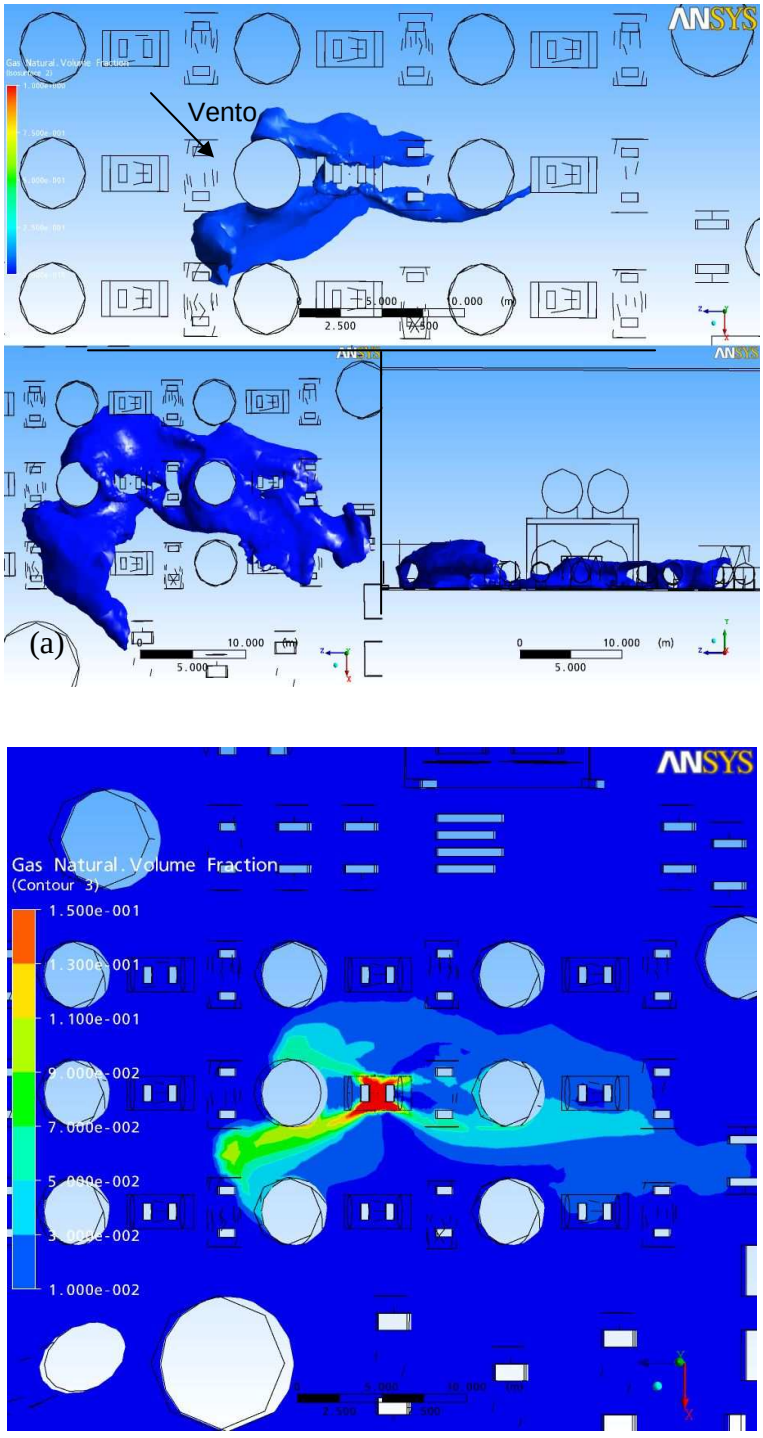


Figura. 8.10 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Nordeste e vazamento para baixo (Ym).

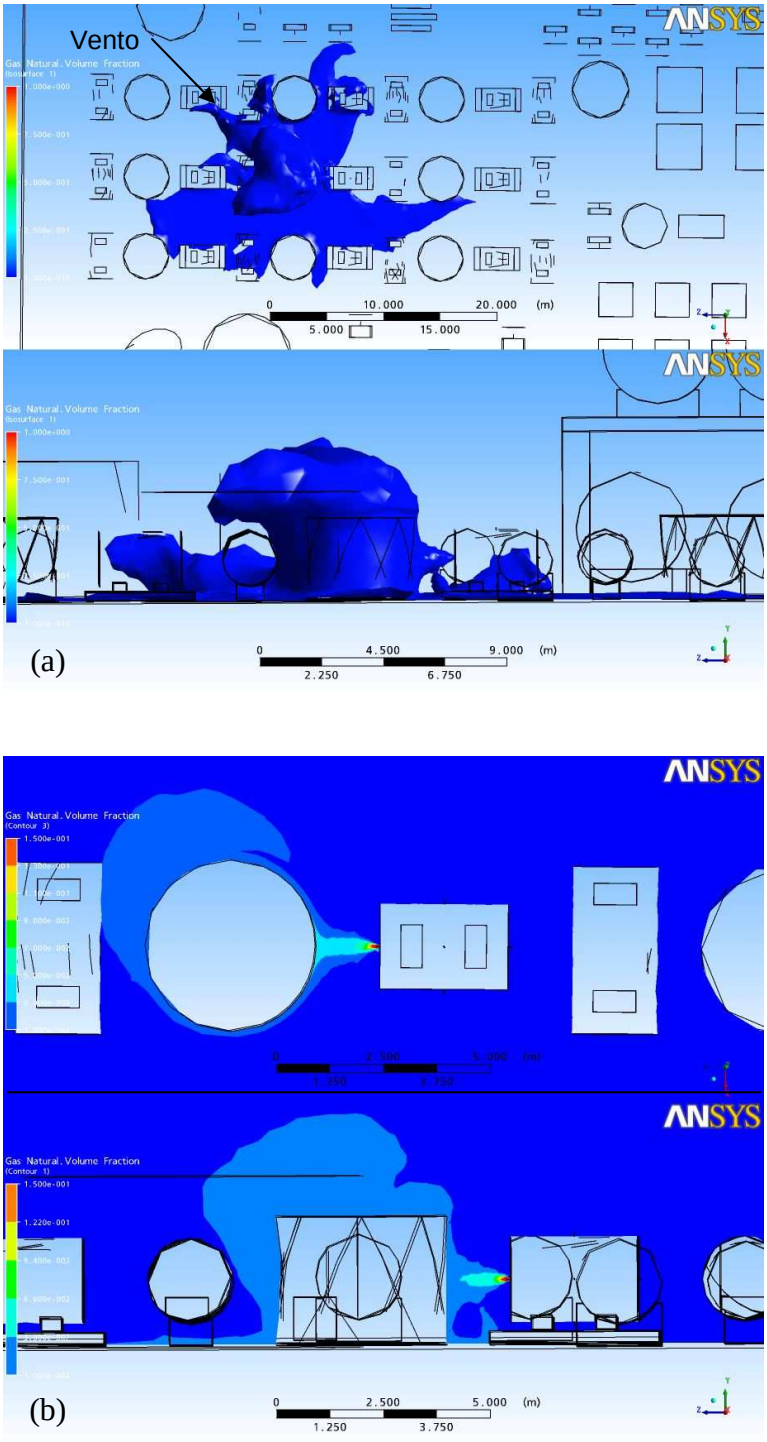


Figura. 8.11 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Sul (Z).

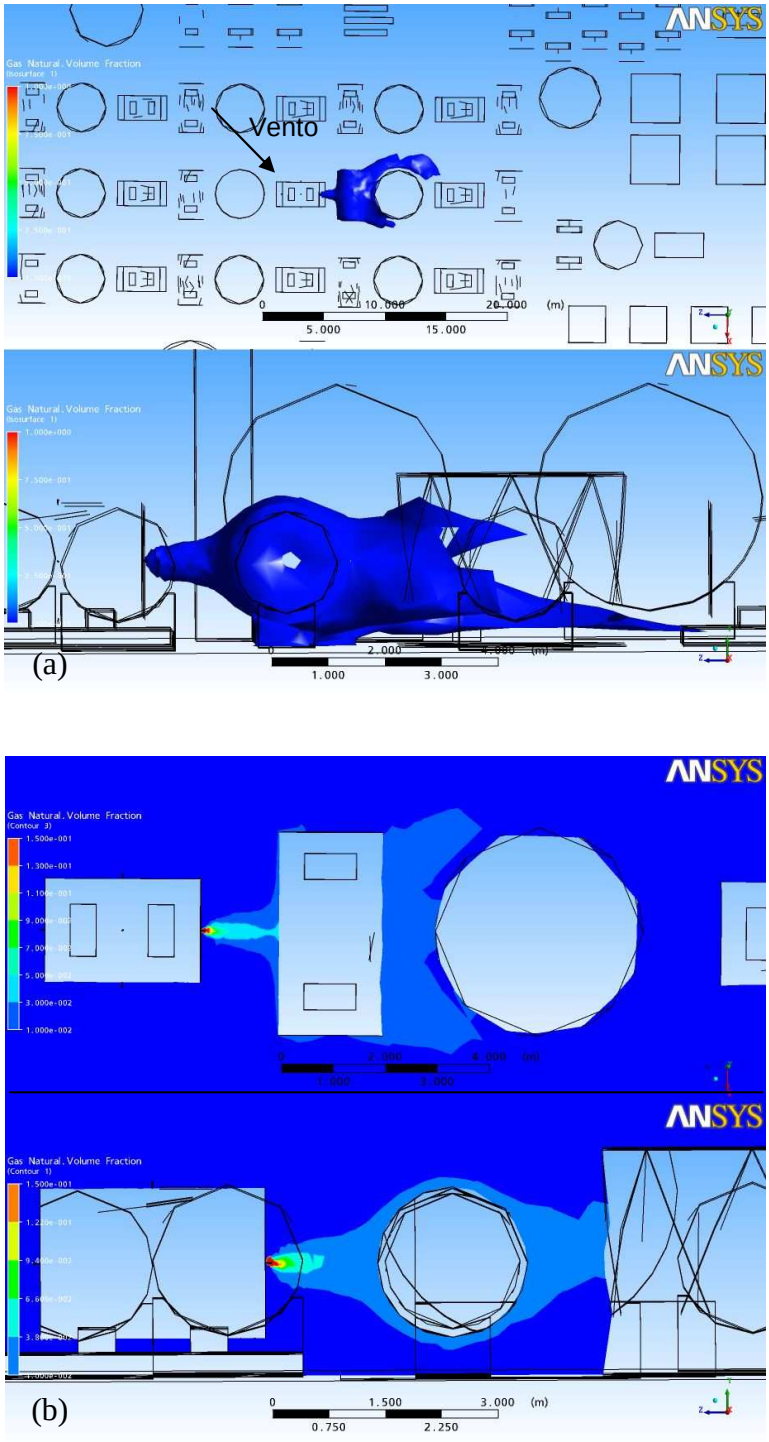


Figura. 8.12 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Nordeste e vazamento para Norte (Zm).

Para aplicações em áreas bem ventiladas ou ao ar livre, que não é o caso geralmente encontrado em áreas *offshore* altamente congestionadas, sabe-se, por trabalhos prévios em CFD a altas pressões, que uma taxa ou velocidade de ventilação modesta pode afetar

o tamanho da nuvem, dependendo da direção. Escoamentos que cruzam ou são contra-corrente reduzem significativamente o tamanho da pluma, enquanto que escoamentos co-correntes geram maiores volumes de nuvens gasosas (HSL, 2005).

Ao contrário do exposto acima, numa análise das plumas formadas nesta direção de vento, observa-se que quando o vazamento ocorre num sentido contrário ao vento, neste caso nas direções Sul (Z) (Figura 8.11) e Oeste (Xm) (Figura 8.8), a nuvem formada tende a subir, atingindo alturas bastante elevadas, superiores a 3,0 m, além de espalhar-se mais pela área dos compressores da plataforma, gerando maiores volumes capazes de serem identificados, como mostra a Tabela 8.3. Enquanto que o contrário ocorre para os vazamentos nas direções Norte (Zm) (Figura 8.12) e Leste (X) (Figura 8.7), que são a favor do vento, com plumas menos espalhadas e no máximo a 2,0 m do piso do módulo.

Não é difícil perceber que a direção de vazamento para baixo (Ym) é a mais crítica (Figura 8.10). Tem-se que a liberação para baixo apresentou a maior extensão da pluma formada após o vazamento, dentre as demais direções. O gás liberado se espalhou por toda a seção de compressão da plataforma, acarretando numa grande área exposta ao risco. Para o vento na direção Nordeste, com exceção da liberação de gás para cima (Y), o vazamento gasoso para baixo obteve a maior altura atingida pela nuvem detectável de gás, apesar dele estar direcionado para o piso da plataforma.

Embora o grau de espalhamento da nuvem inflamável seja uma das características do vazamento que leva a caracterizá-lo como o que apresenta maior risco, outro fator igualmente importante é o perfil de concentração em função da posição. Pode-se observar que praticamente toda a região em volta do compressor com vazamento possui concentração de gás dentro dos limites de flamabilidade, o que corrobora a criticidade deste vazamento.

Além disso, o vazamento para baixo foi o único que gerou uma pluma de gás explosiva não desprezível, como pode ser observado na Tabela 8.3, o que é explicado pelo fato do gás imediatamente após sair do orifício, em altíssima velocidade e com o escoamento ainda controlado pelo momento, atingir o piso, ficando parcialmente confinado entre o

pr´prio piso e o fundo do compressor, gerando recirculações, aumentando assim, a turbulência e a mistura do gás com o ar.

O estudo de caso realizado mostra que o vazamento para cima (Y) não gera um cenário crítico em nenhum aspecto. Esta direção de gás liberado, apresentou uma pluma subindo, aumentando a ação do vento, e, portanto sua diluição, e conseqüentemente, num menor volume com 0,01 de fração molar (detectável) e baixo grau de espalhamento (Figura 8.9).

É possível também observar que, para todas as direções de liberação de gás, não há uma clara influência do vento nos jatos formados logo após os orifícios de vazamento, indicando que os mesmos possuem um momento alto, não permitindo que a dispersão seja, no início, rapidamente controlada pelas forças gravitacionais e pela turbulência atmosférica.

8.2.2. Vento na Direção Norte

O campo de escoamento do vento na direção Norte, com velocidade 8,23 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura 8.13 nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. Para esta direção de vento, os cenários tiveram uma das maiores freqüências ponderadas (Tabela 8.3).

As Figuras 8.14 a 8.19 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

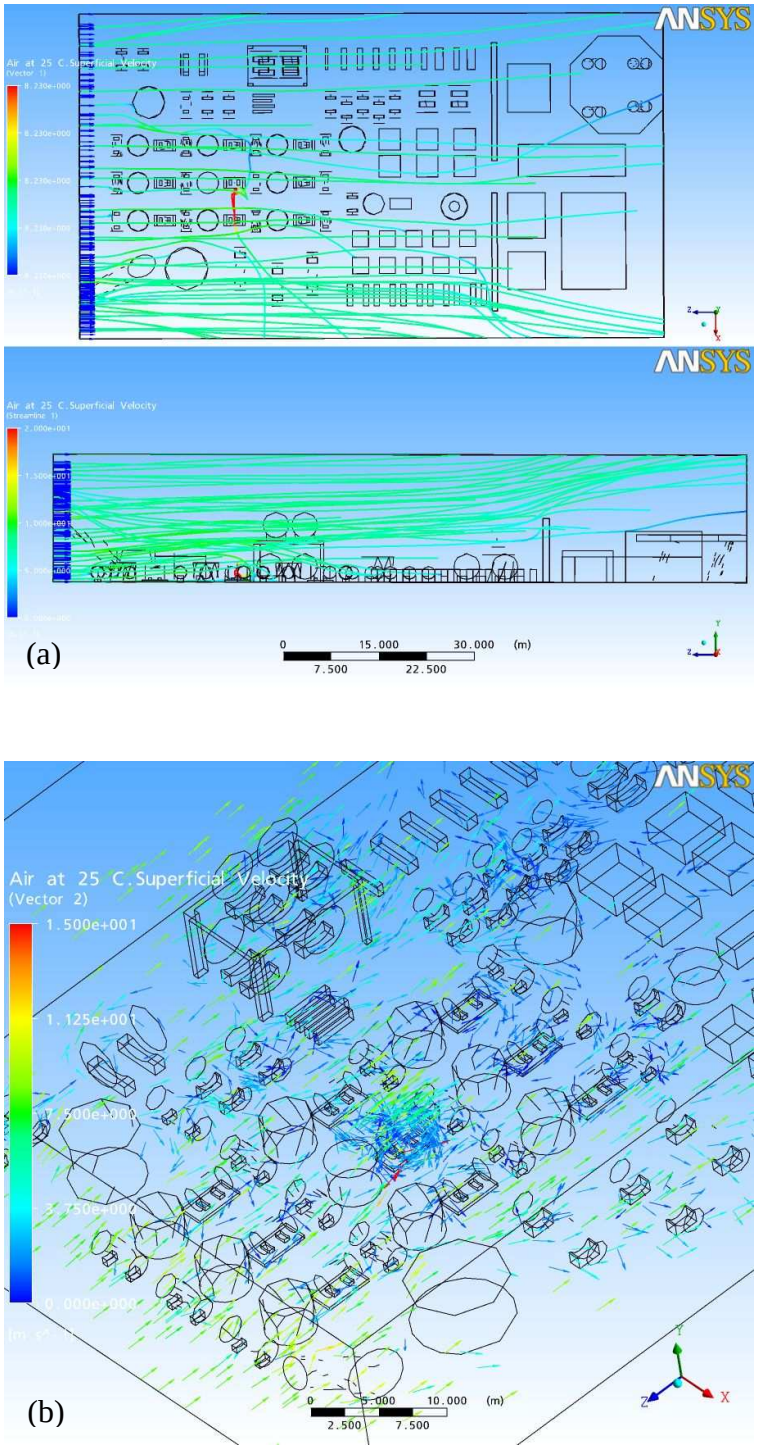


Figura. 8.13 – Campo de escoamento do vento na direção Norte nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

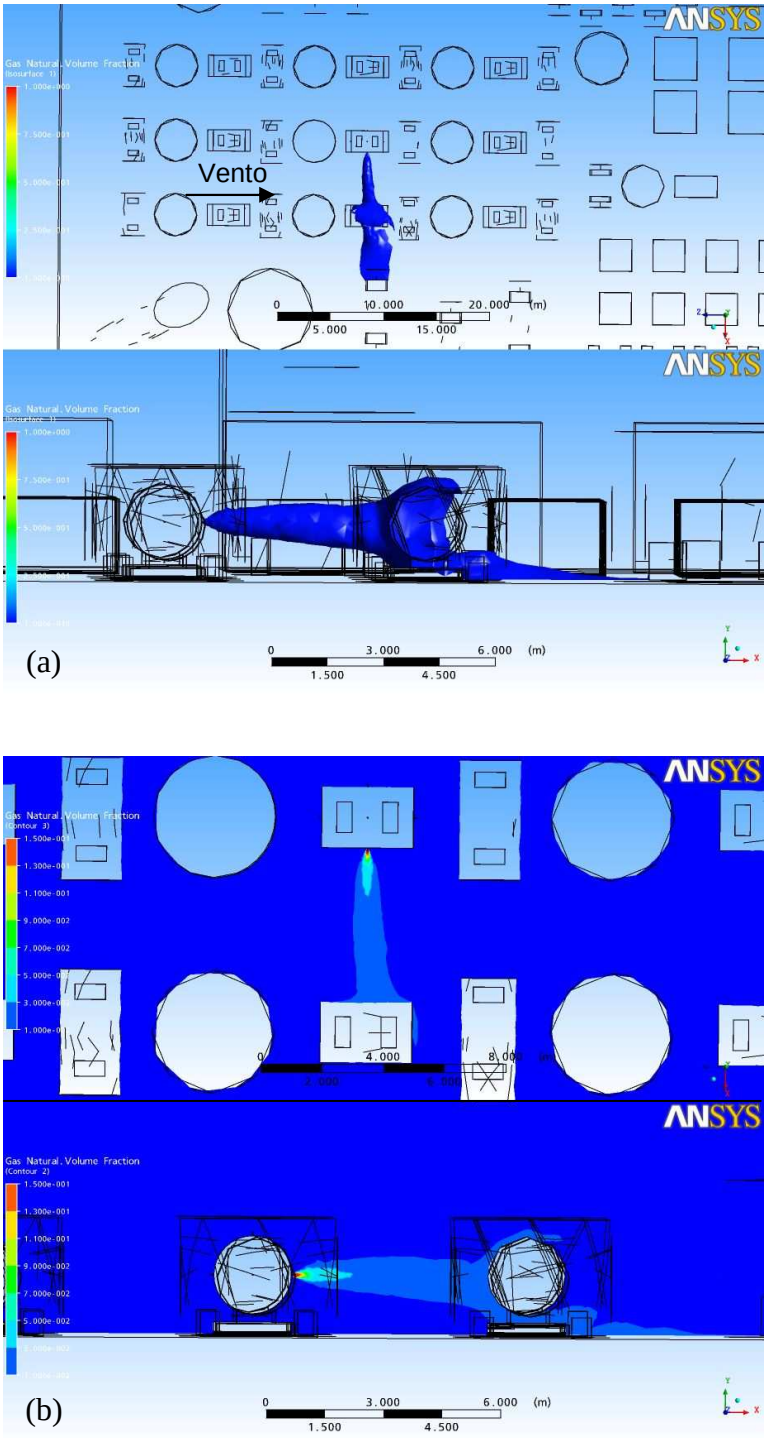


Figura. 8.14 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Leste (X).

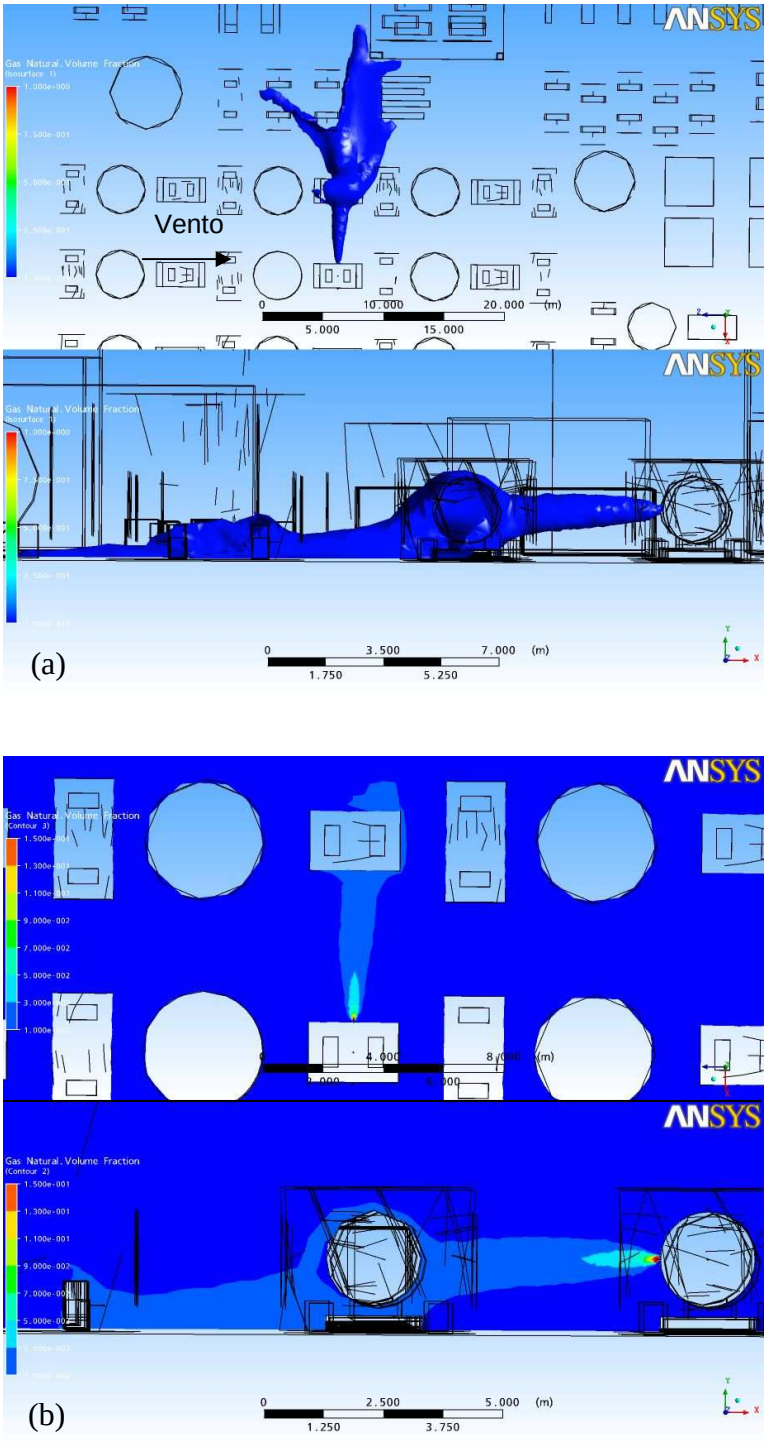


Figura. 8.15 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Oeste (Xm).

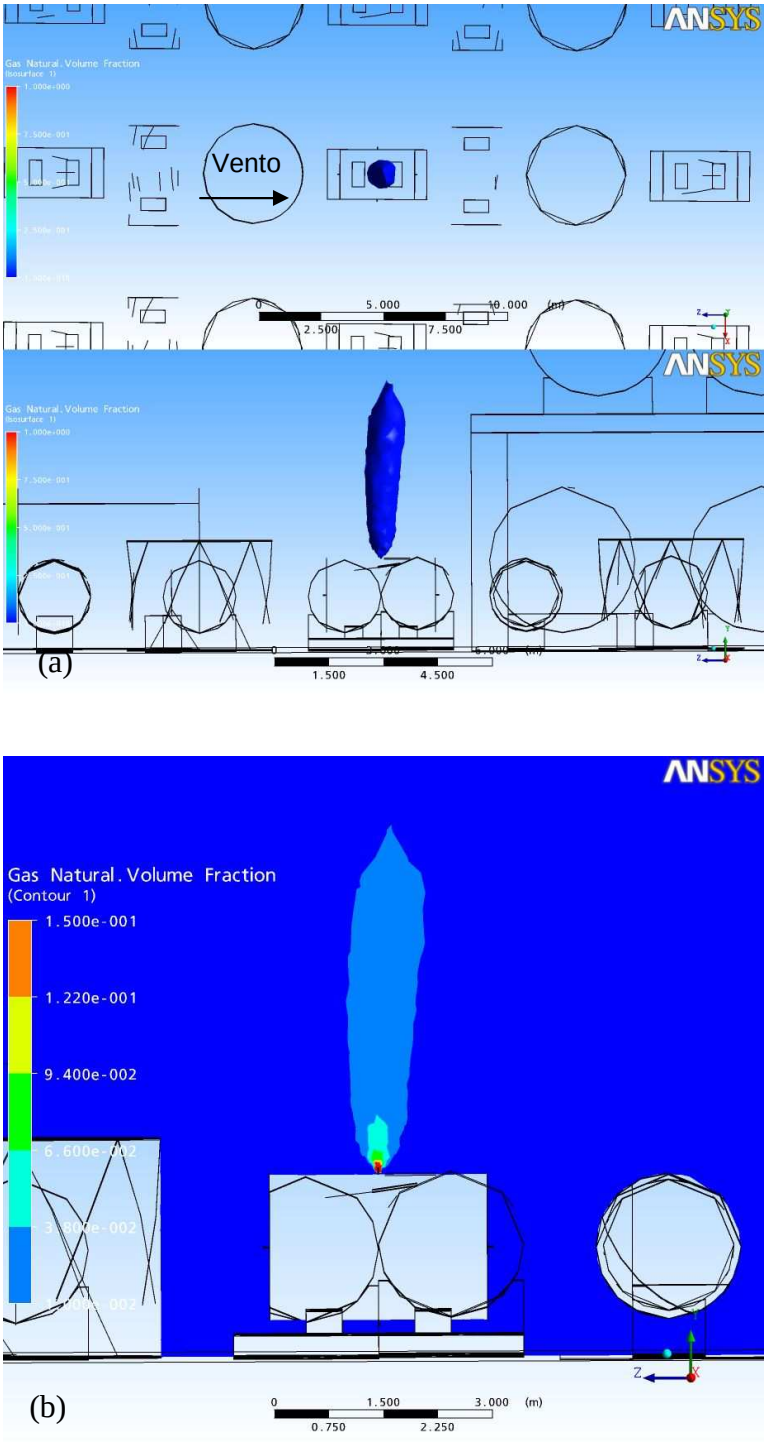
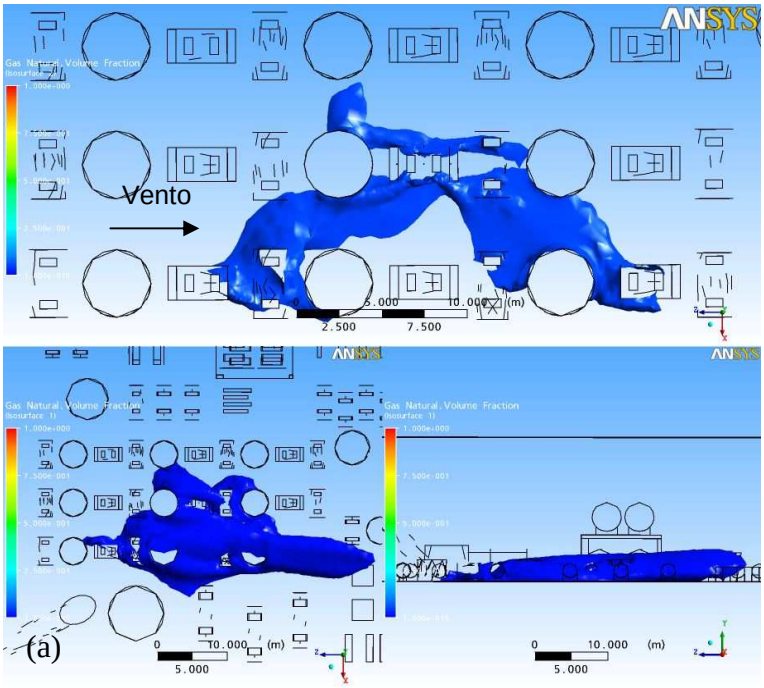


Figura. 8.16 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical da nuvem, para vento Norte e vazamento para cima (Y).



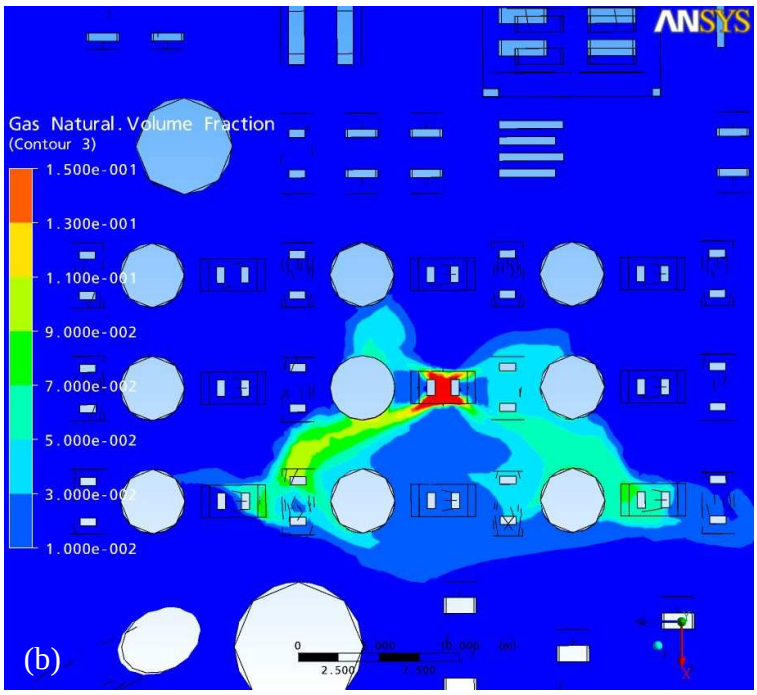


Figura. 8.17 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Norte e vazamento para baixo (Ym).

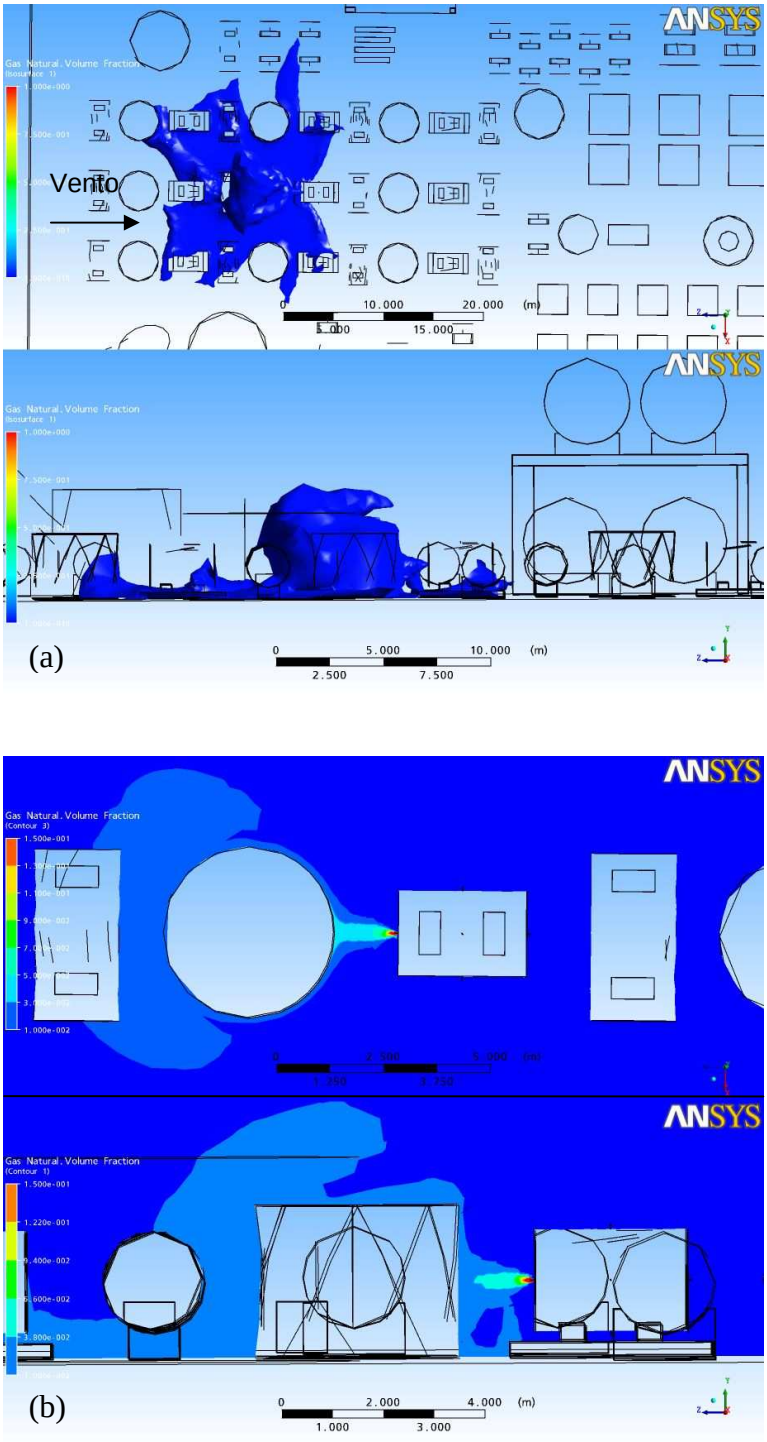


Figura. 8.18 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Sul (Z).

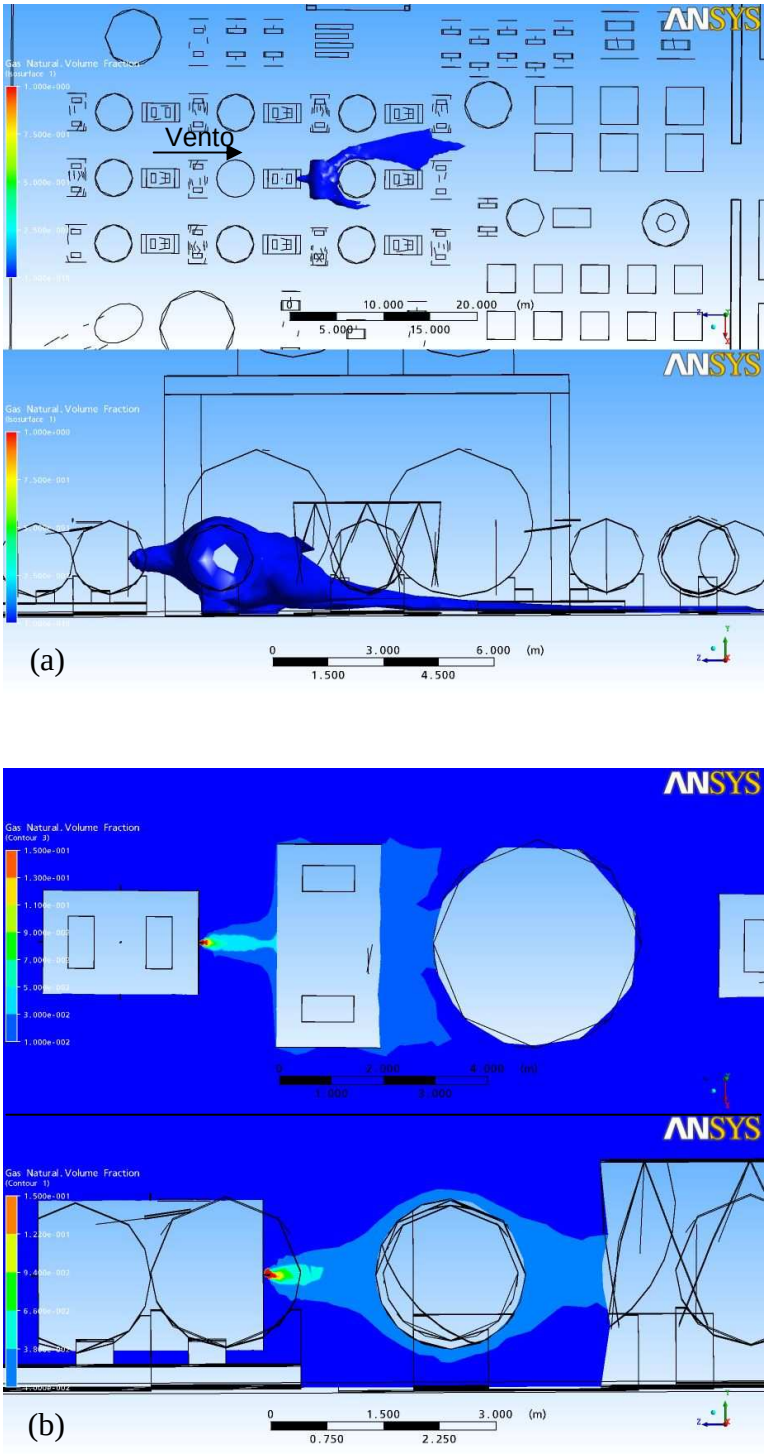


Figura. 8.19 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Norte e vazamento para Norte (Zm).

Analisando a Figura 8.13, nota-se que há formação de zonas de recirculação de ar, com baixa velocidade, devido aos equipamentos da plataforma, principalmente vasos e trocadores de calor, oferecerem resistência adicional ao escoamento do ar.

Assim como no caso anterior de vento Nordeste, onde vazamento na direção Sul (Z), contrário ao vento, formou nuvens de gás com grandes alturas e bastante espalhadas, pela Figura 8.18, pode-se observar aqui a mesma característica. Assim, para a direção Sul (Z) de liberação gasosa, a pluma atingiu altura de aproximadamente 7,0 m e gerou volume, na ordem de 150 m³ de gás com concentração a 20% do LEL. Da mesma maneira, o vazamento Norte (Zm), no mesmo sentido do vento, apresentou plumas menos espalhadas, mais diluídas e tendendo a descer para o piso da plataforma.

Também neste caso, a direção de vazamento para baixo (Ym), apresentou um maior comprimento, espalhamento, e, por conseguinte maior concentração de gás na faixa de detecção e menor diluição da nuvem, sendo, portanto, a mais crítica (Figura 8.17). Em contrapartida, a liberação para cima (Figura 8.16), como no caso do vento para Nordeste, também gerou um cenário sem qualquer criticidade.

8.2.3. Vento Fraco na Direção Noroeste

O campo de escoamento do vento na direção Noroeste, com velocidade de 0,5 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura 8.20, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. A Figura B.5 apresenta o vetor do vento na direção Noroeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção.

As Figuras 8.21 a 8.26 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

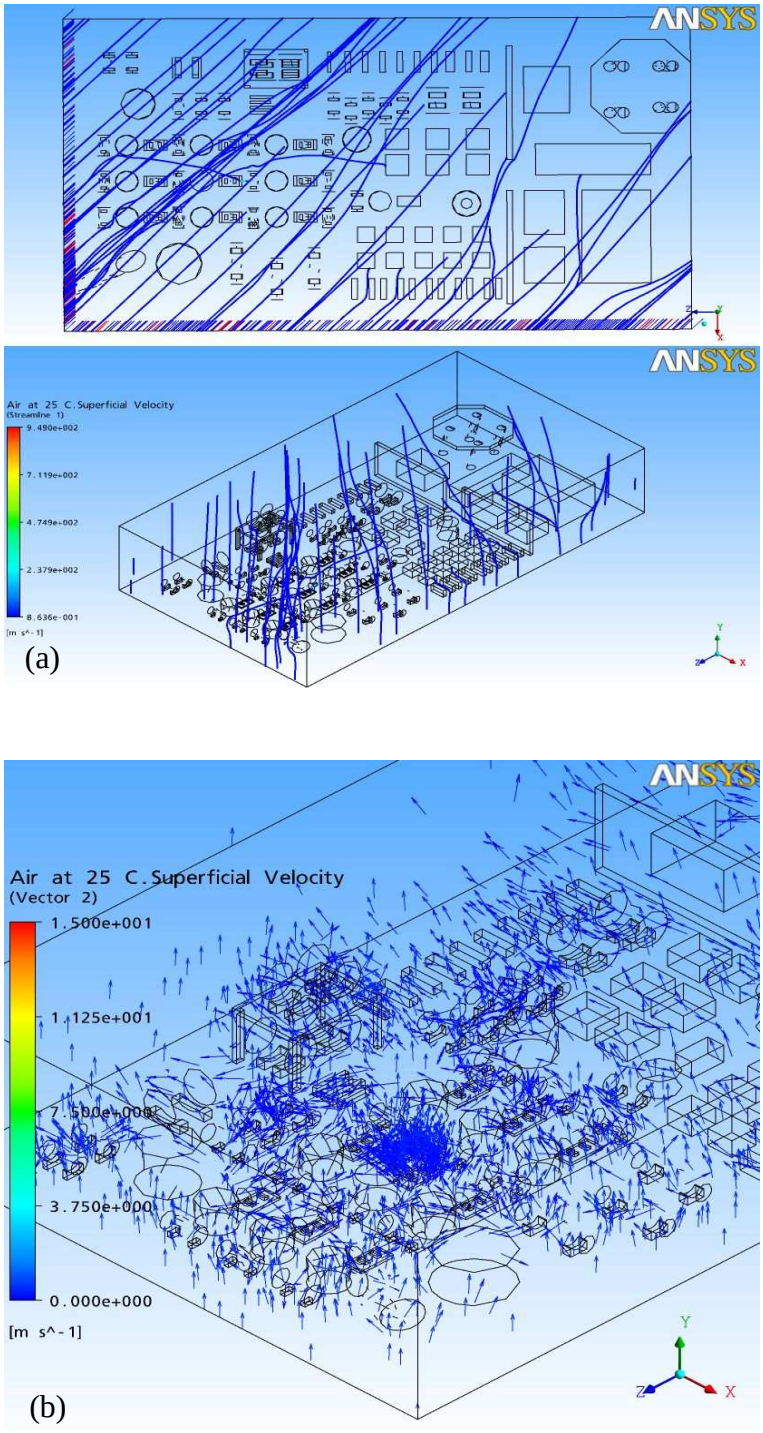


Figura. 8.20 – Campo de escoamento do vento fraco na direção Noroeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

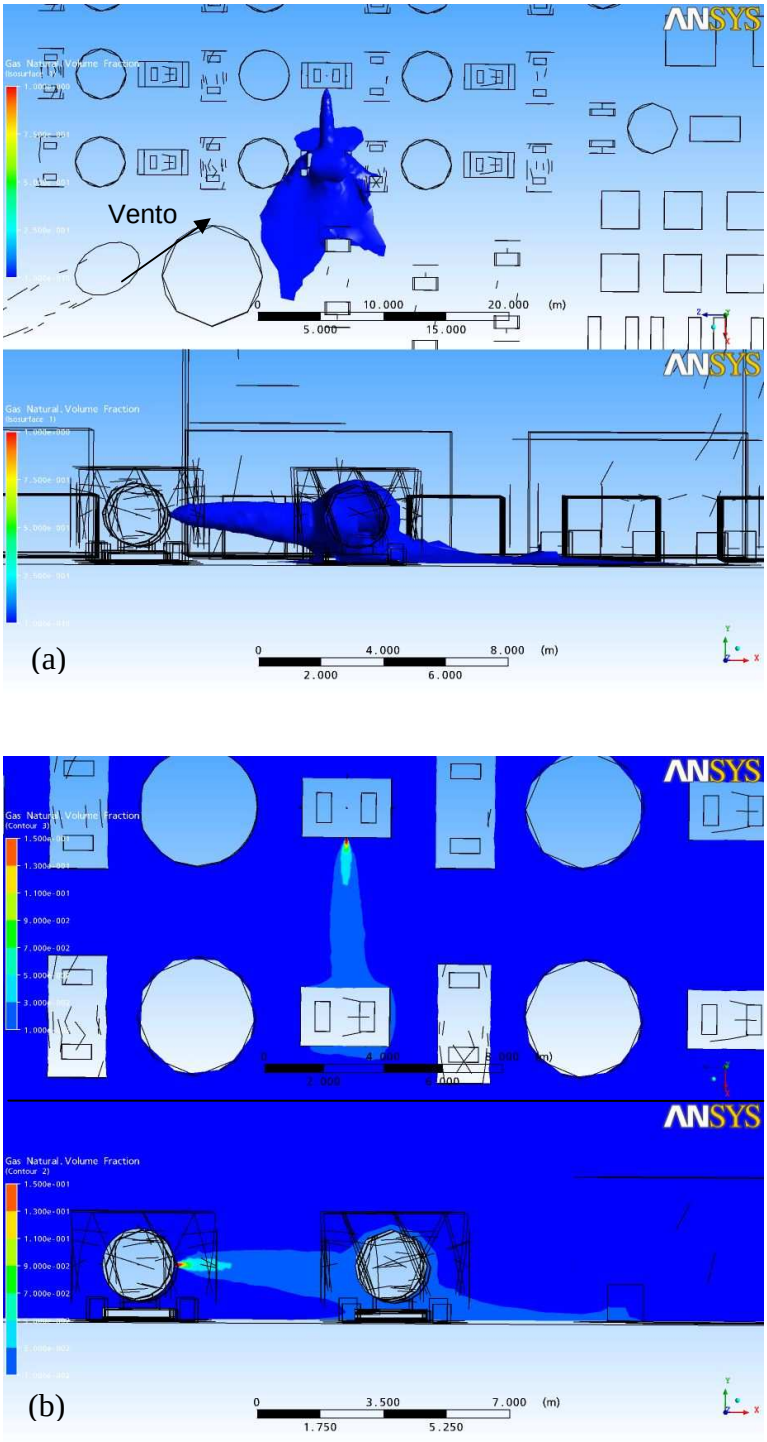


Figura. 8.21 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Leste (X).

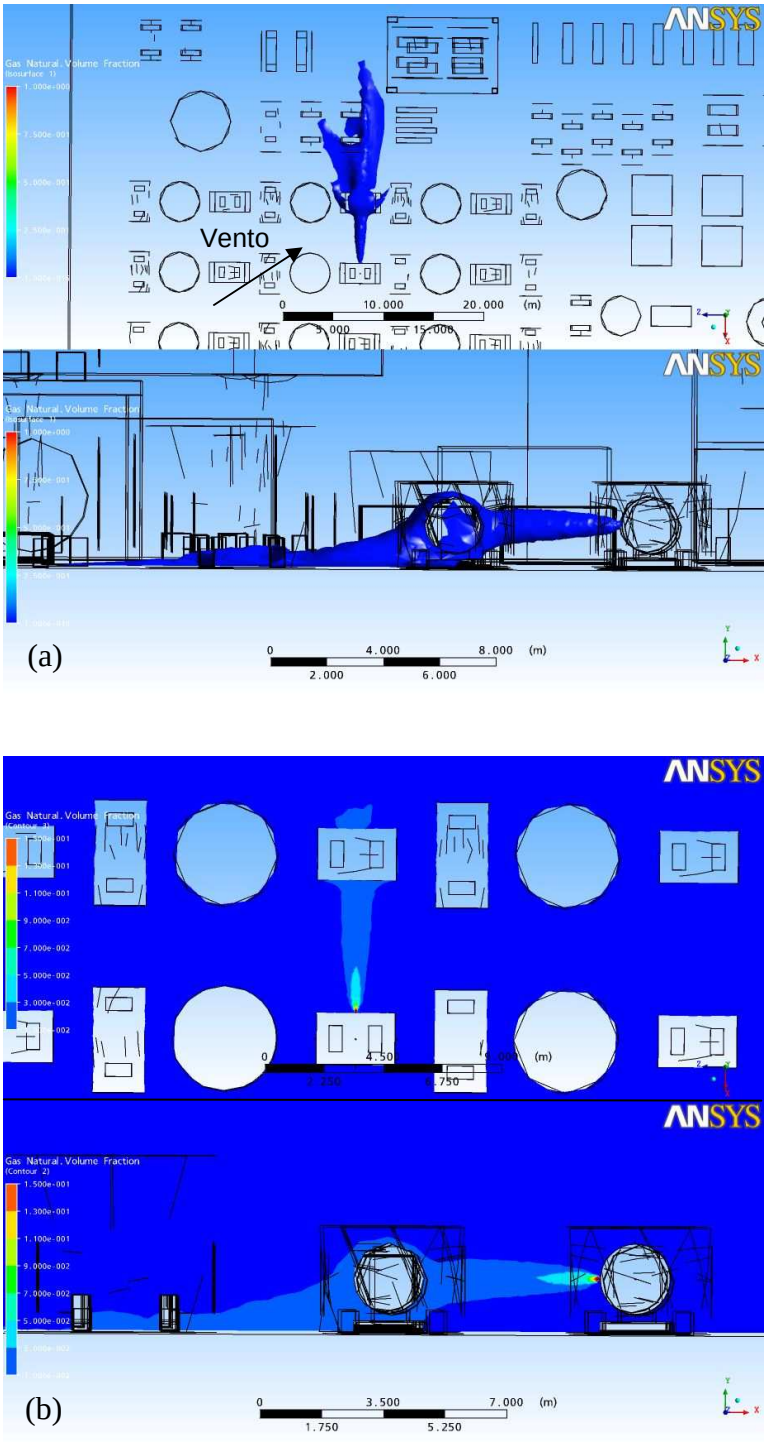


Figura. 8.22 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Oeste (Xm).

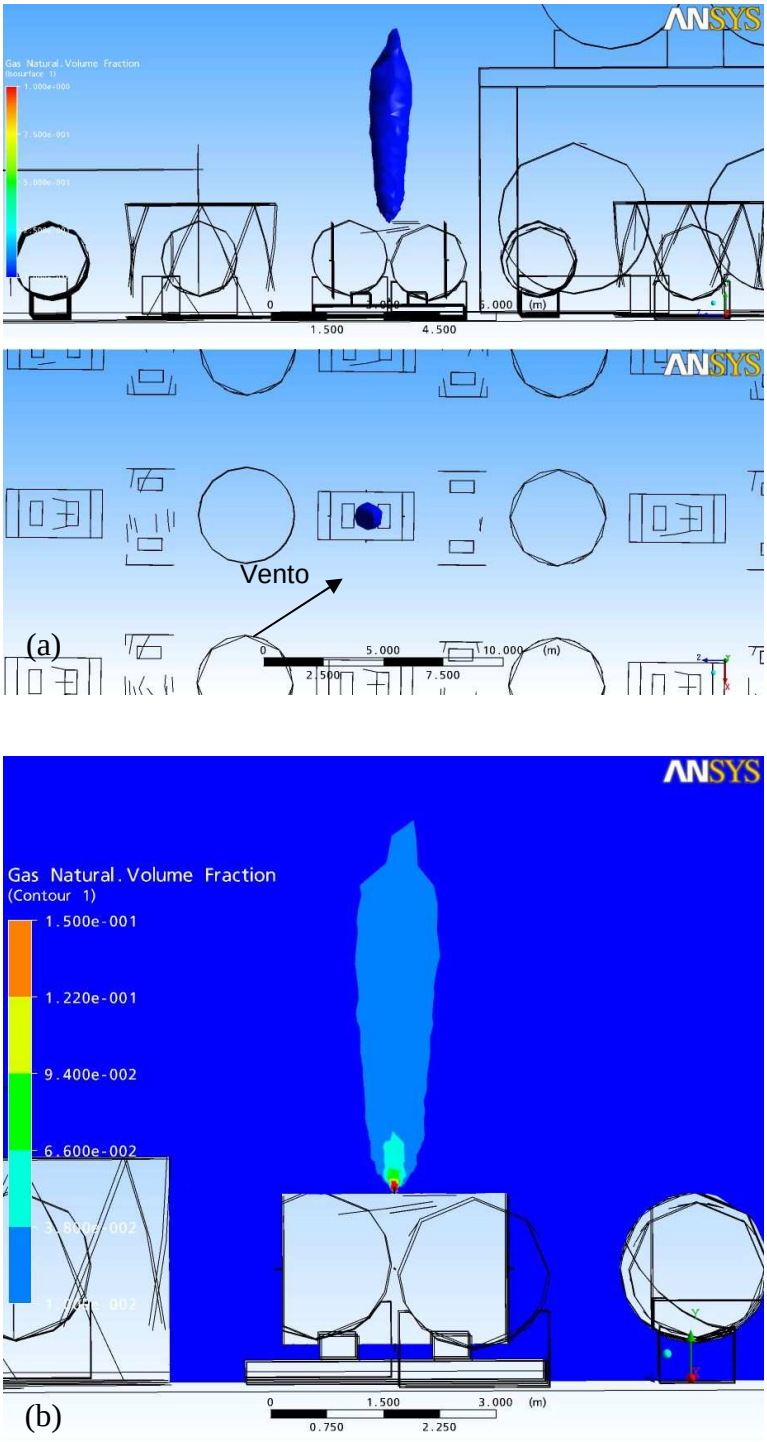


Figura. 8.23 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para cima (Y).

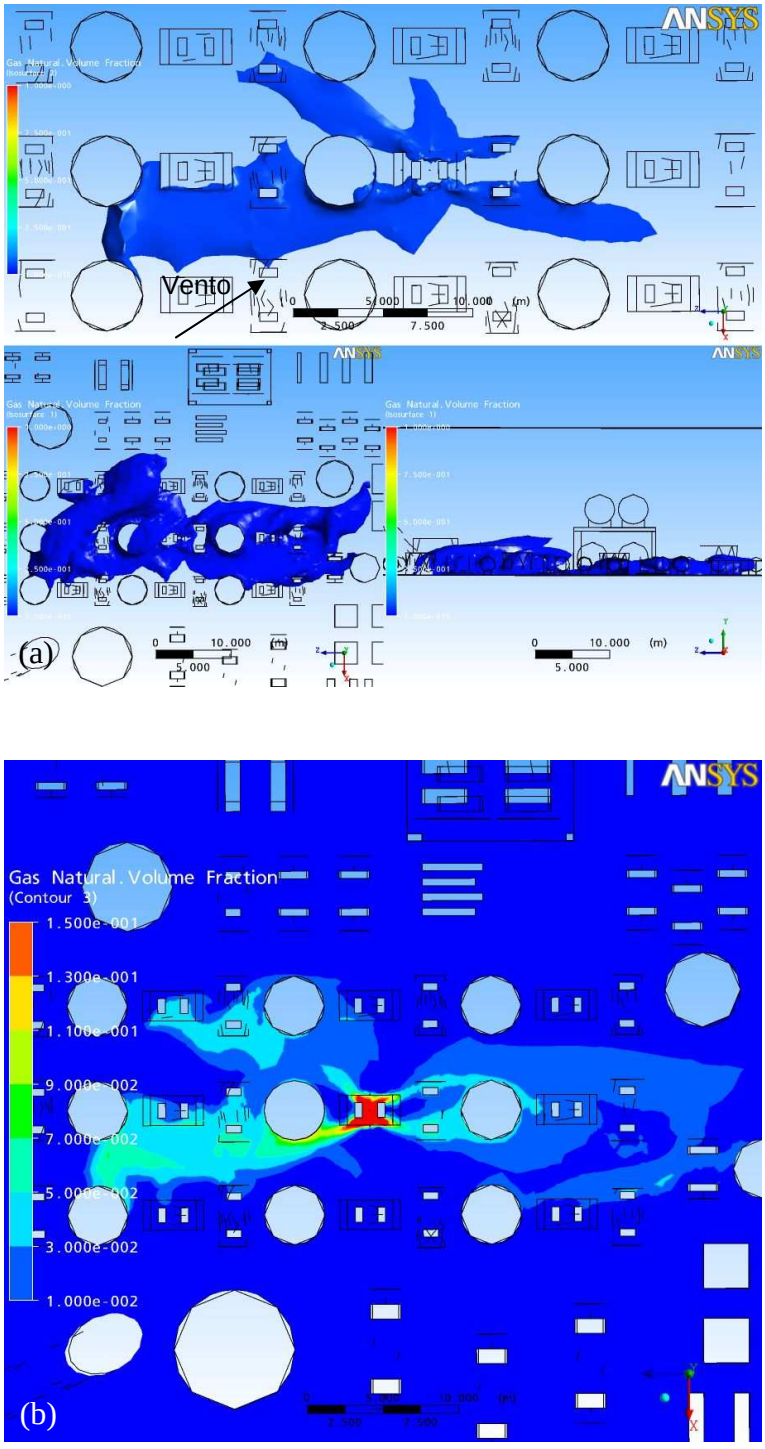


Figura. 8.24 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento fraco para Noroeste e vazamento para baixo (Ym).

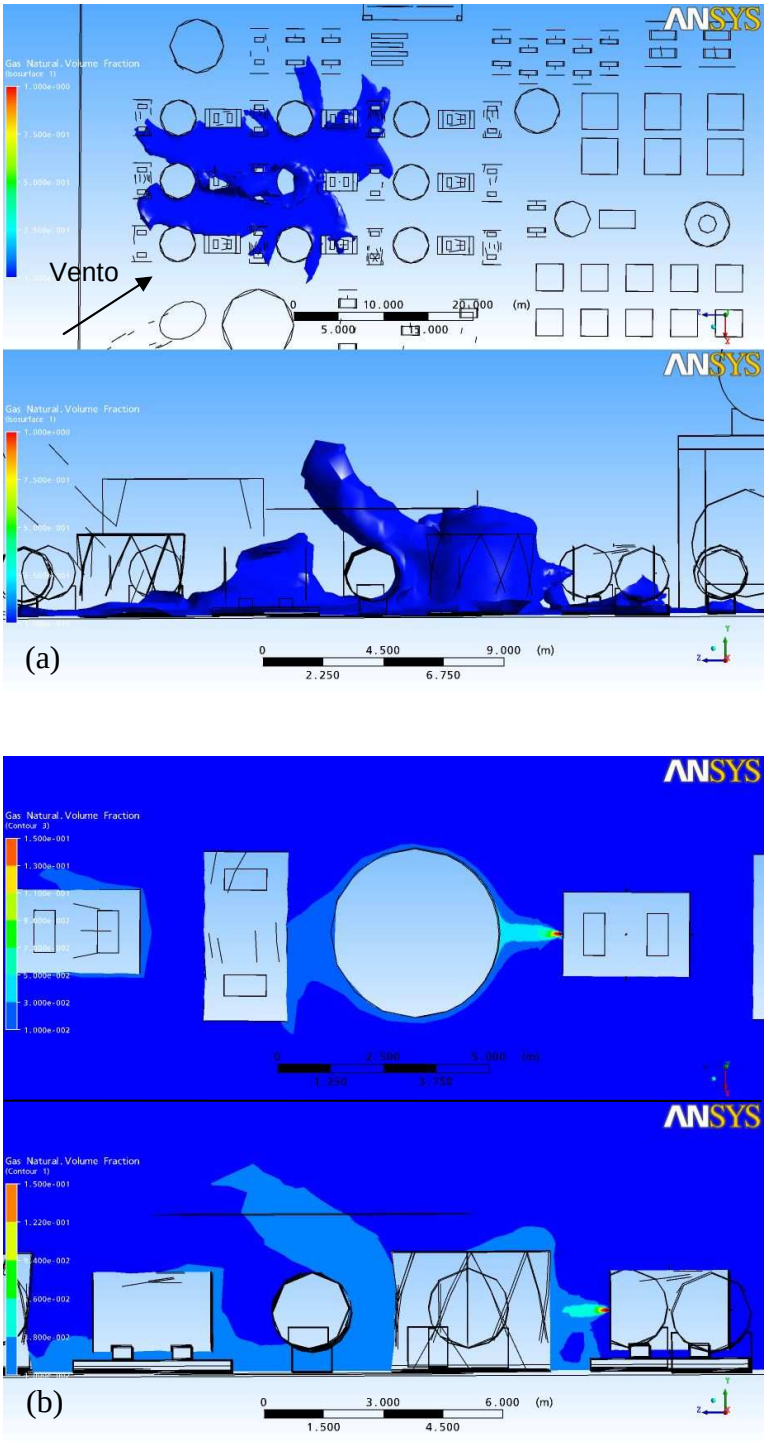


Figura. 8.25 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco para Noroeste e vazamento para Sul (Z).

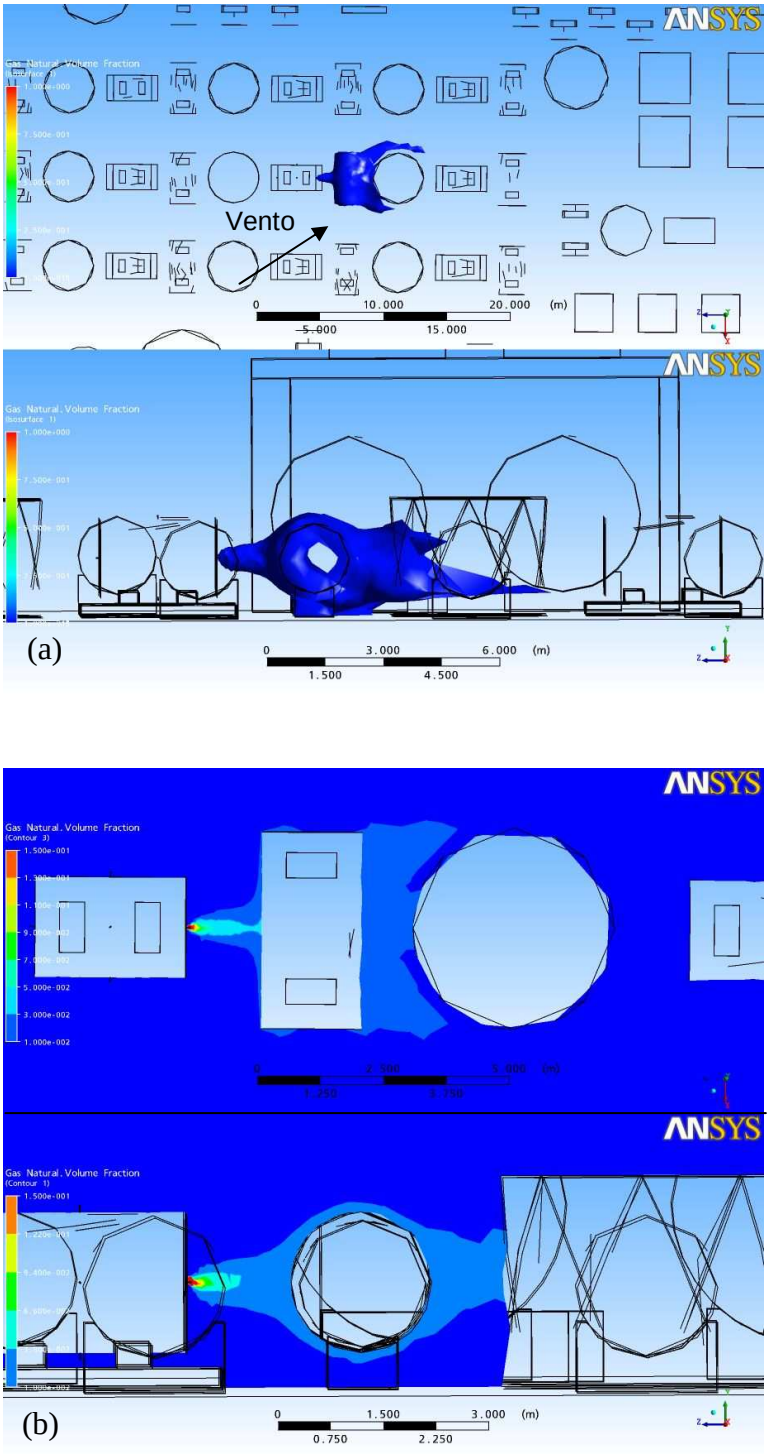


Figura. 8.26 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento fraco Noroeste e vazamento para Norte (Zm).

Com relação à segurança, tem-se que por um lado um vento forte pode ser mais crítico que um vento fraco, pois pode carregar plumas de gás inflamável a maiores distâncias,

por outro lado, um vento de baixa intensidade em áreas congestionadas, pode criar cenários propícios à formação de zonas com pouca ou nenhuma ventilação, onde misturas inflamáveis podem se acumular, principalmente em vazamentos para baixo, gerando situações de risco. Como tais zonas podem ser estáveis e perto do piso da plataforma e de equipamentos, existe um maior risco de ignição nesses cenários.

O efeito do vento com cerca de 10 % do valor utilizado originalmente na direção Noroeste não foi muito representativo em termos qualitativos. Fazendo uma comparação visual das nuvens geradas neste caso, com o caso de vento Noroeste de 4,78 m/s (Figuras A.29 a A.34, no anexo A), não se percebe grandes diferenças nas plumas.

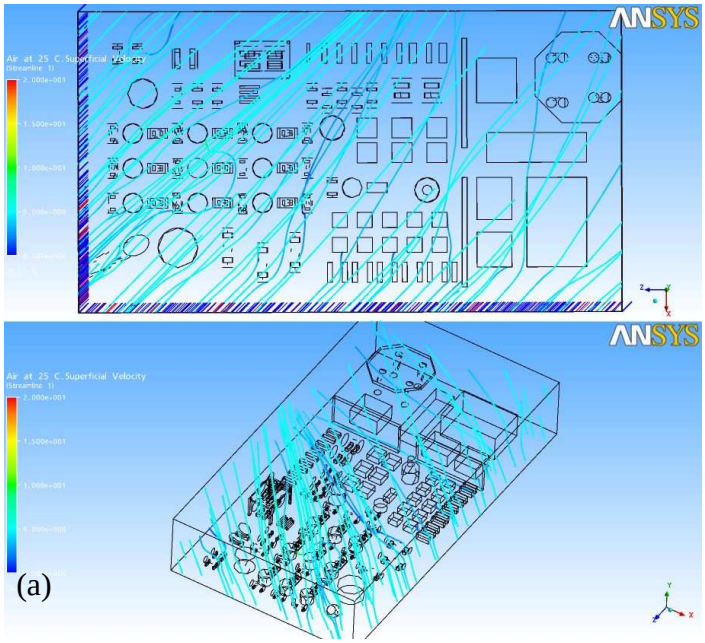
Numa análise quantitativa, nota-se, pela Tabela 8.3, que há diminuições apenas nos volumes de gás com 1% de concentração molar, nos casos de vazamentos para Leste (X) e Sul (Z), que são justamente os casos onde as liberações gasosas se dão em sentidos contrários ao vento Noroeste. Ou seja, enquanto nos vazamentos a favor do vento, tanto qualitativa, quanto quantitativamente não houve mudanças significativas, nos outros casos, a variável vento influenciou no escoamento e no volume gasoso formado após o vazamento.

Isto indica que o vento age através de um efeito inverso ao diluente, ou seja, em casos onde vazamento e vento estão em sentidos opostos, ele acaba por concentrar a nuvem de gás, aumentando a fração de ar na pluma.

8.2.4. Vento na Direção Noroeste com Pequeno Vazamento

Para o caso do vazamento a 0,139 kg/s, o campo de escoamento do vento na direção Noroeste, com velocidade de 4,78 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura 8.27, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. A Figura B.3 apresenta o vetor do vento na direção Noroeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção.

As Figuras 8.28 a 8.33 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.



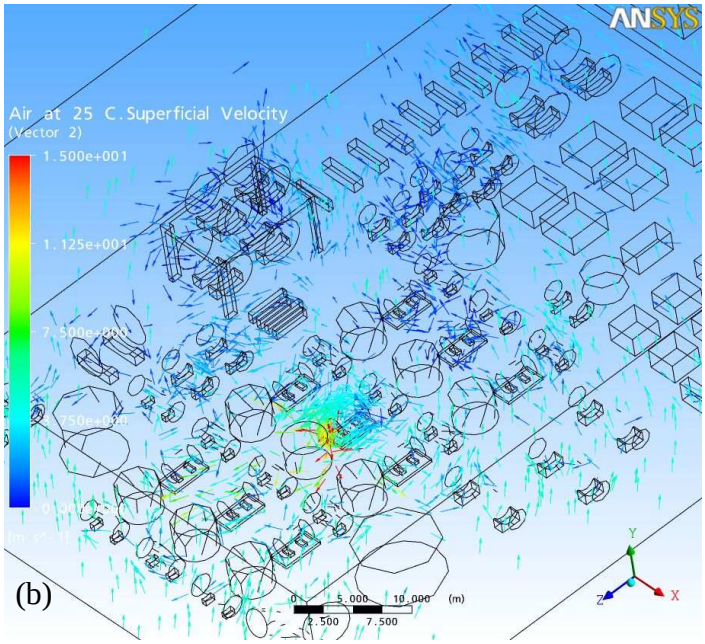


Figura. 8.27 – Campo de escoamento do vento na direção Noroeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

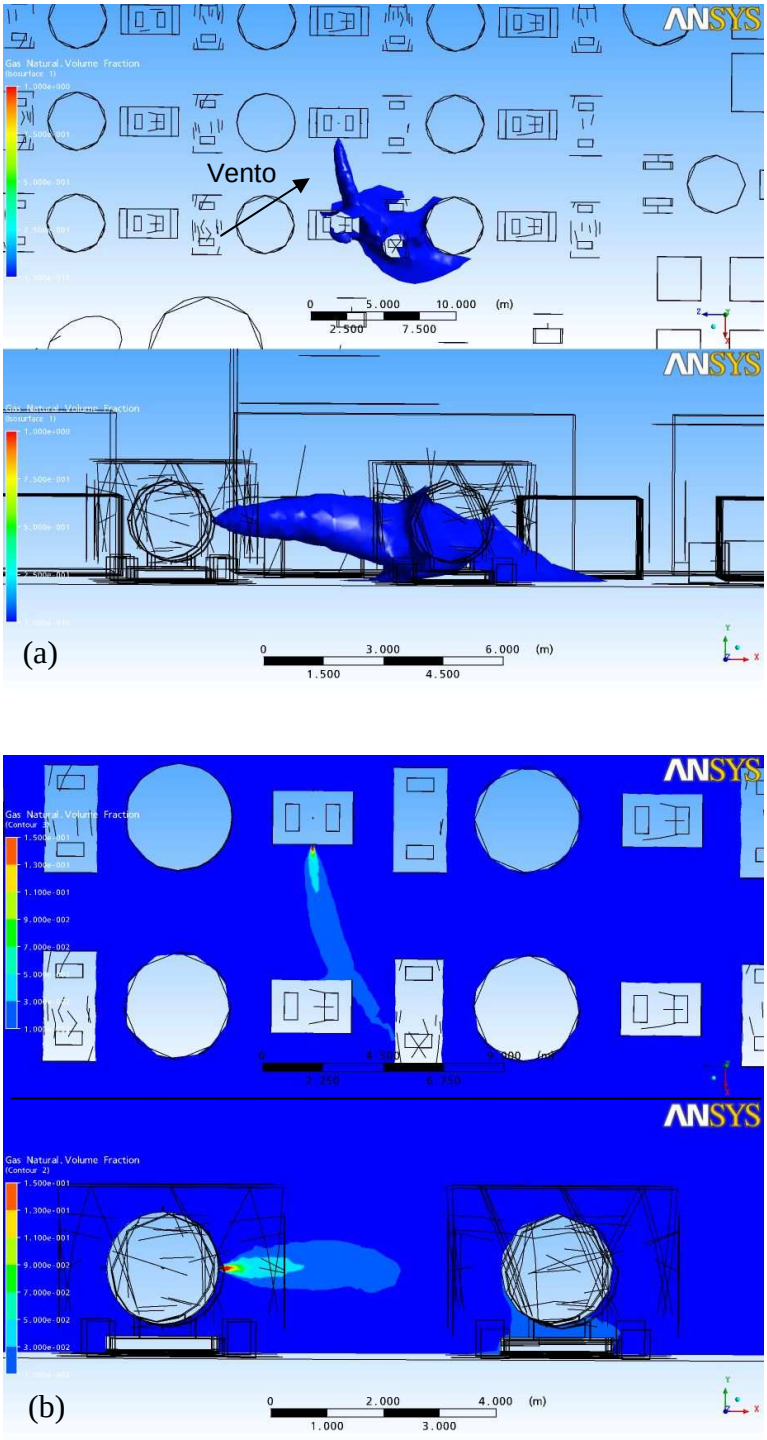


Figura. 8.28 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Leste (X).

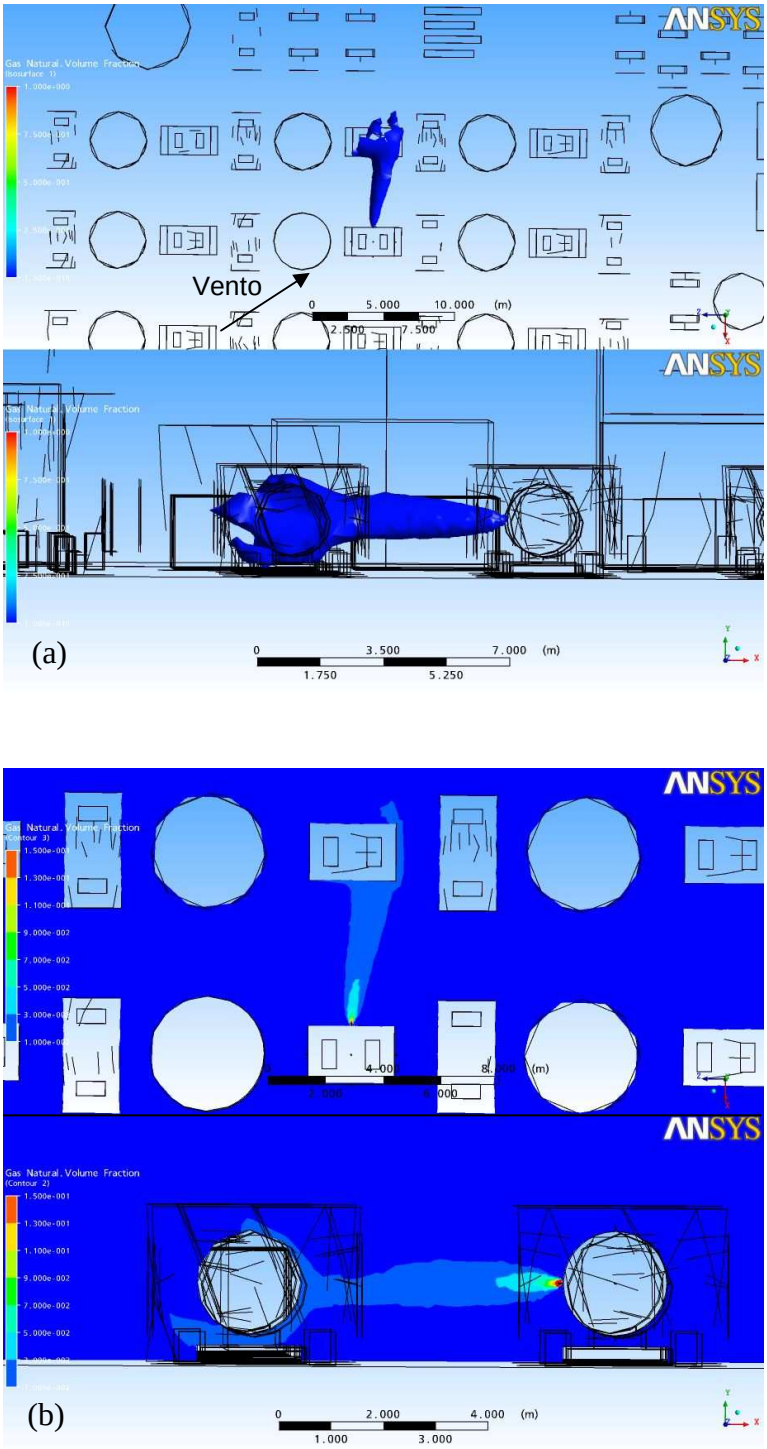


Figura. 8.29 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Oeste (Xm).

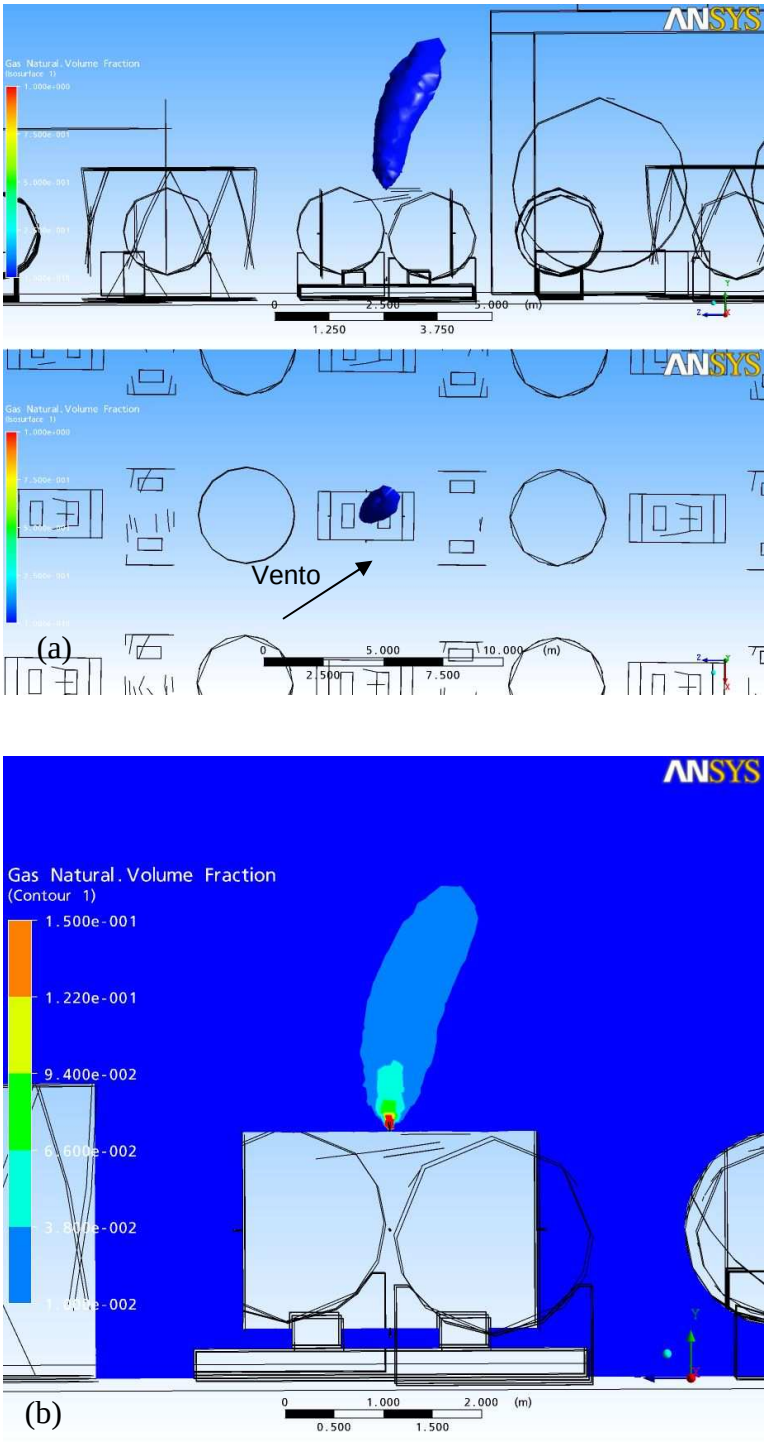


Figura. 8.30 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para cima (Y).

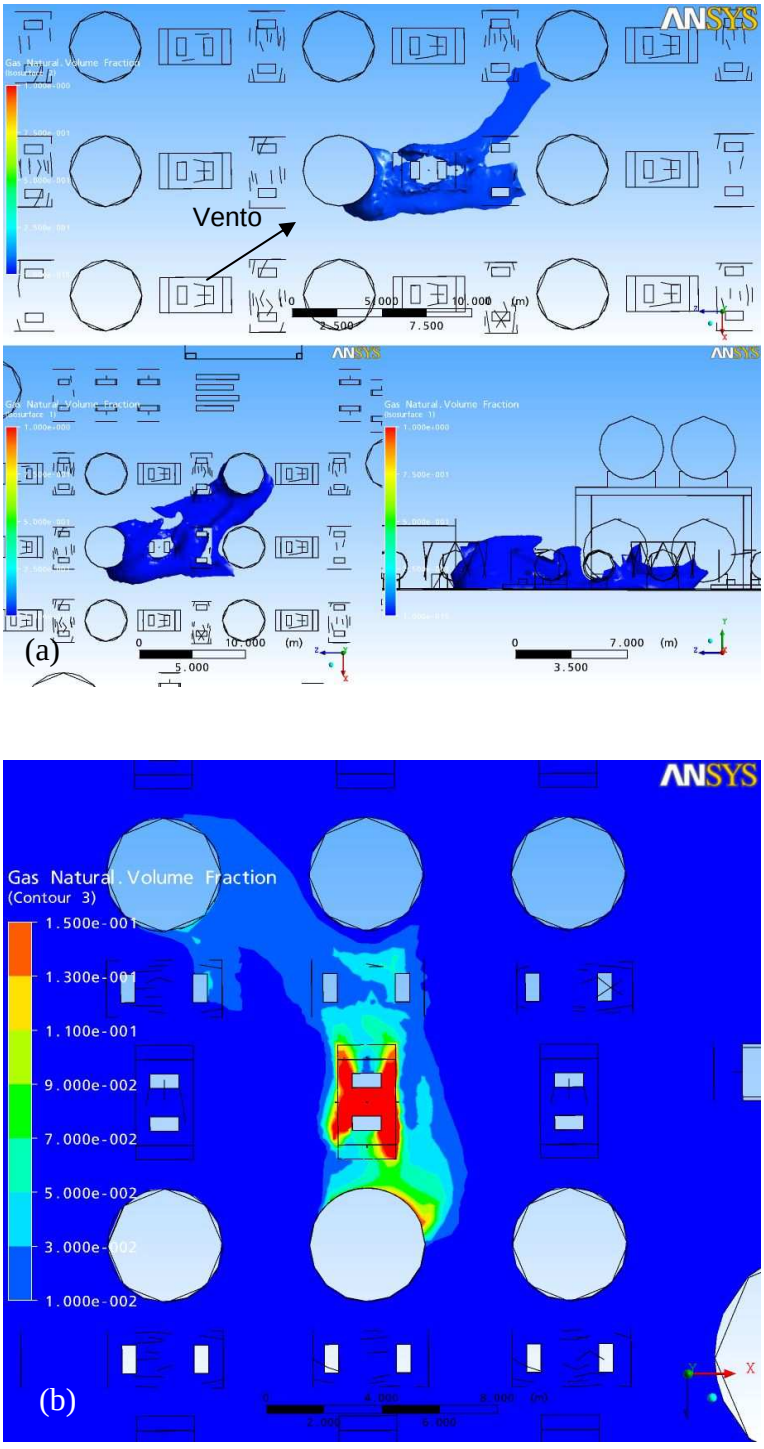


Figura. 8.31 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Noroeste e vazamento pequeno para baixo (Ym).

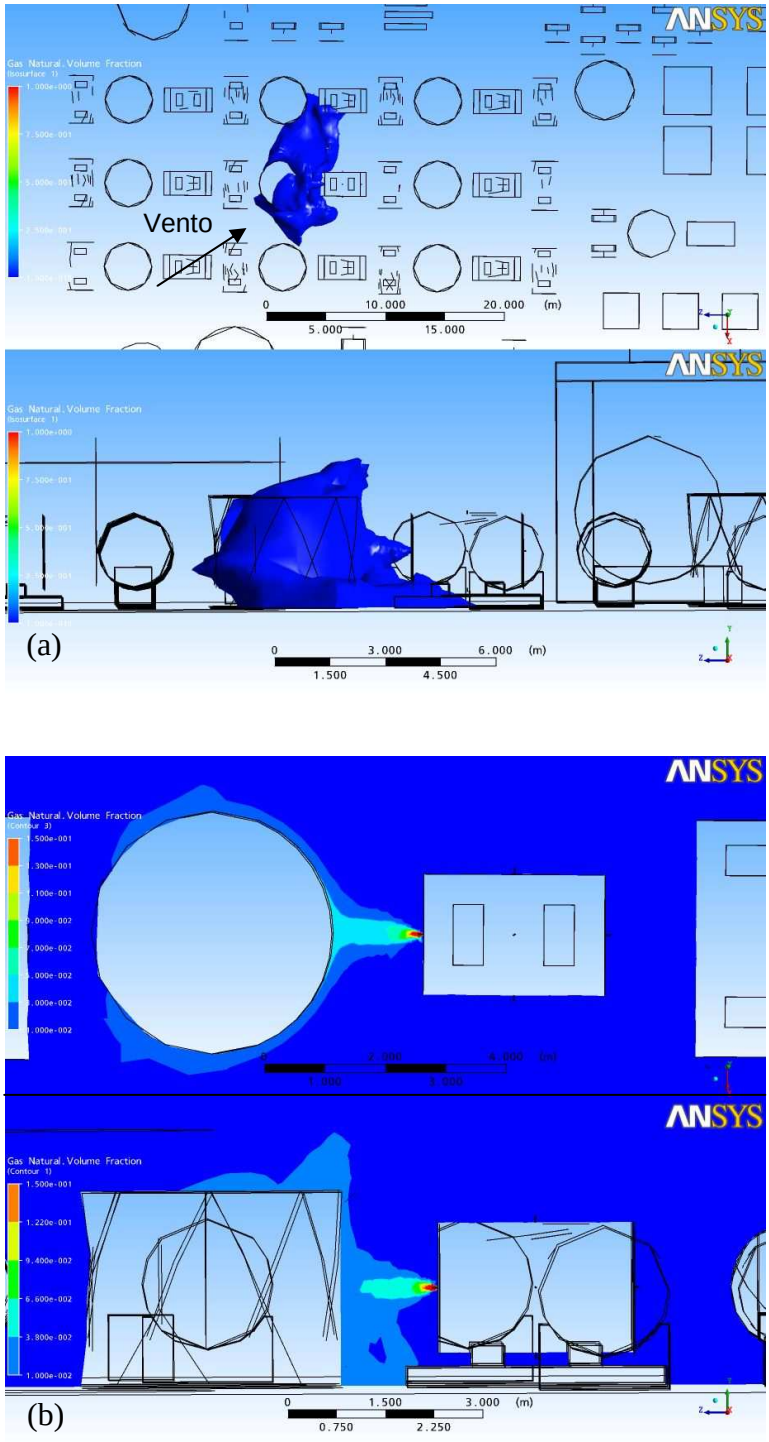


Figura. 8.32 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Sul (Z).

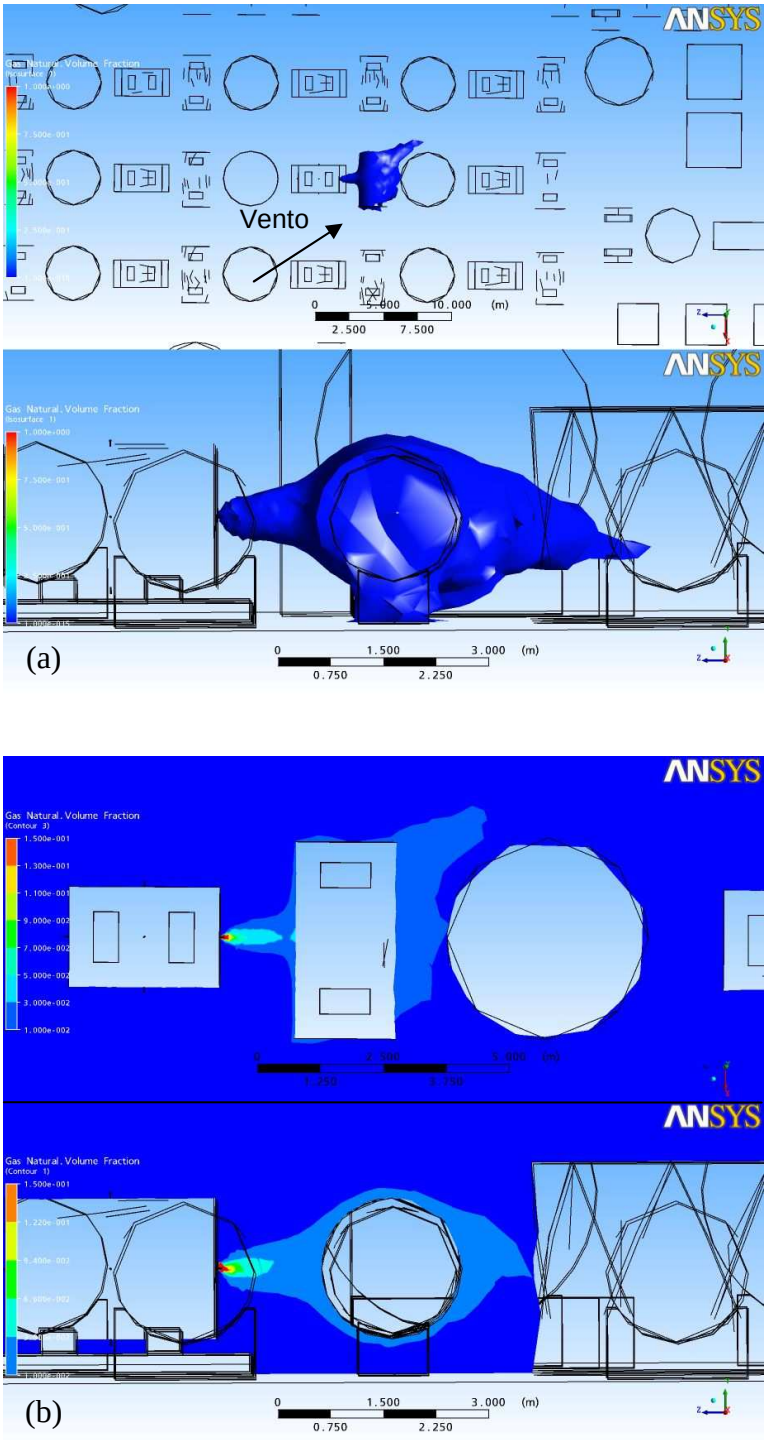


Figura. 8.33 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento pequeno para Norte (Zm).

Em HSL (2005), foi mostrado que mesmo para uma plataforma que foi bem ventilada, grandes taxas de liberações gasosas conduzirão à formação de largas nuvens de gás

explosivo. No entanto, uma vez que o vazamento parou, uma boa ventilação pode remover com eficiência o gás inflamável da plataforma. Para pequenos vazamentos, uma ventilação pobre permitirá a formação de plumas gasosas com concentrações acima do LEL. Portanto, pode-se esperar que uma ventilação efetiva remova boa parte do volume inflamável depois de um grande vazamento de gás, ou que limite o crescimento de nuvens de gases inflamáveis provenientes de pequenas liberações.

Uma liberação com vazão mássica 90 % menor (0,139 kg/s) formou nuvens muito pequenas, quando comparados aos vazamentos com vazões 1,39 kg/s, tanto na concentração correspondente ao nível de detecção, quanto para as concentrações entre os limites de explosividade, até mesmo para vazamento para baixo (Ym), o que confirma estudos efetuados por Strϕm *et al.* (1999) para vazamentos com baixas vazões. Isto se deve ao vento agir como agente dispersante das plumas, o que de fato é bom para a segurança da plataforma.

Entretanto, esses cenários tiveram um índice baixo de identificação das nuvens pela malha de detecção proposta inicialmente, justamente pelo fato de seus volumes serem pequenos, tornando-se de certa forma uma situação insegura para um ambiente *offshore*, pois qualquer mudança na intensidade ou direção do vento ou mesmo alterações do próprio processo, podem aumentar a mistura vazada de ar/hidrocarboneto, e consequentemente o volume de gás inflamável, incrementando o risco de acidentes por explosão.

Apesar do baixo volume das nuvens apresentadas, neste caso o vazamento na direção Sul (Z) contra o vento (Figura 8.32), também se mostrou mais grave que para as demais direções (excluindo o vazamento para baixo) ocasionando uma pluma de gás alta (cerca de 4,5 m) e tendendo a espalhar-se e escoar para cima.

Diferentemente das demais liberações gasosas de 1,39 kg/s, aqui é notável a influência do vento nos jatos criados após os vazamentos nos orifícios, para todas as direções de liberação, principalmente para Leste (X), Oeste (Xm) e cima (Y), respectivamente Figuras 8.28 a 8.30, indicando que o momento dos jatos, neste caso, é baixo, fazendo

com que o escoamento seja controlado, mais rapidamente, pela gravidade e turbulência atmosférica.

8.3. Localização do Vazamento no Equipamento

Este estudo teve como objetivo identificar o pior cenário com relação à direção do vazamento, tanto para um estudo preliminar de dispersão de gases em um ambiente *offshore*, quanto para o caso onde há dúvidas quanto à localização do orifício de vazamento num determinado equipamento ou linha dentro da região de interesse, ou até mesmo para diminuir o número total de simulações conduzidas para um determinado foco de liberação, reduzindo o número de direções estudadas. Assim, é possível através de uma análise qualitativa, dotada do bom senso do projetista, e quantitativa, através dos volumes das nuvens de gás detectável e inflamável, determinar o pior cenário para a direção do vazamento.

Analisando as Figuras 8.6 a 8.33, A.1 a A.41 (no anexo) e a Tabela 8.3, percebe-se que o vazamento para baixo (Ym) gerou, para todas as direções de vento, maiores dispersões e volumes, tanto das nuvens de gás com concentração de hidrocarbonetos entre os limites superior e inferior de explosividade, quanto das nuvens com concentração de gás no limite comercial de detectabilidade (20% do LEL). Portanto, dentro das condições expostas no estudo, o pior cenário para a direção do vazamento é para baixo.

Excluindo as liberações para baixo, que claramente acarretaram cenários mais críticos, observamos que quando os vazamentos são contrários ao vento, formam-se cenários mais críticos que as demais direções. Por exemplo, para as direções de ventos Norte, Sul, Nordeste e Sudeste, as liberações na direção Sul (Z) apresentam bastante risco para as pessoas a bordo e para os bens materiais da unidade marítima. A Tabela 8.3 confirma essa análise, mostrando que, para esses ventos, os maiores volumes detectáveis são decorrentes de tais vazamentos. A mesma observação pode ser efetuada, para a liberação na direção Leste (X), em relação às direções de vento Oeste, Sudoeste e Noroeste, e para a direção de vazamento Oeste (Xm), com relação aos ventos Leste, Sudeste e Nordeste.

Bakke *et al.* (2003) sugerem que suposições podem limitar o número de simulações em CFD, desde que a validação esteja documentada. Por exemplo, é importante que um cenário onde a orientação do vazamento é contrária à do vento seja simulado, já quando o vazamento e o vento estão alinhados e direcionados para fora da instalação, não é interessante simular.

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. Pois nesse cenário, como também sugere HSE (1992), Strϕm *et al.* (1999) e HSE (2001), recirculações são formadas quando um jato choca-se em um obstáculo em ambientes confinados, representados por dois anteparos em paralelo, no caso o piso da plataforma o próprio compressor, o que além de enclausurar o gás, forma uma maior mistura entre o gás vazado e o ar, aumentando consequentemente, a concentração da mistura explosiva. Adicionalmente, estudar liberações gasosas em sentidos contrários ao escoamento do vento, principalmente quando se deseja limitar o número total de simulações. Nestes casos, outros estudos devem ser efetuados para validar tais cenários, já que em HSL (2005) observaram-se tendências contrárias.

8.4. Aplicação da Metodologia de Alocação dos Detectores

8.4.1. Determinação do Sistema de Detecção Otimizado

Como apresentado na Figura 7.9, a malha de detecção de gases inicialmente proposta tem 231 detectores equidistantes, numa malha 5 m x 5 m. Porém, após a simulação dos 60 cenários de vazamento no compressor, observou-se que apenas 59 pontos de detecção foram utilizados para a identificação (detecção) de 38 cenários. Isso corresponde a apenas 26 % do total de pontos de detecção inicialmente proposto e 63 % dos cenários identificados.

Para efetuar a classificação dos pontos de detecção, não foram utilizados os casos com vento fraco (0,50 m/s) e com pequeno vazamento (vazão de 0,139 kg/s). A Tabela 8.3 apresenta o fator de ponderação (FW_{cen}) para todos os cenários simulados. Assim, classificando os 59 detectores que identificaram pelo menos um cenário, ou seja, aplicando-se a equação (7.3) para cada um desses pontos, tem-se que, para o sistema identificar todos os casos detectados (63 %), é necessária a utilização de apenas 4 pontos de detecção.

Assim, dos 231 pontos inicialmente propostos, eliminando também aqueles que detectaram apenas cenários redundantes, precisa-se de somente 1,7 % para identificar 38 cenários de vazamento, otimizando ainda mais a rede de detecção proposta. A Figura 8.34 é um *zoom* da Figura 7.7, e apresenta a localização na seção de compressão da plataforma, e a Tabela 8.4 indica as coordenadas e o *ranking* (C_{pto}), dos 4 pontos melhores classificados escolhidos para compor a rede otimizada de detecção (sensores 1, 2, 3 e 4).

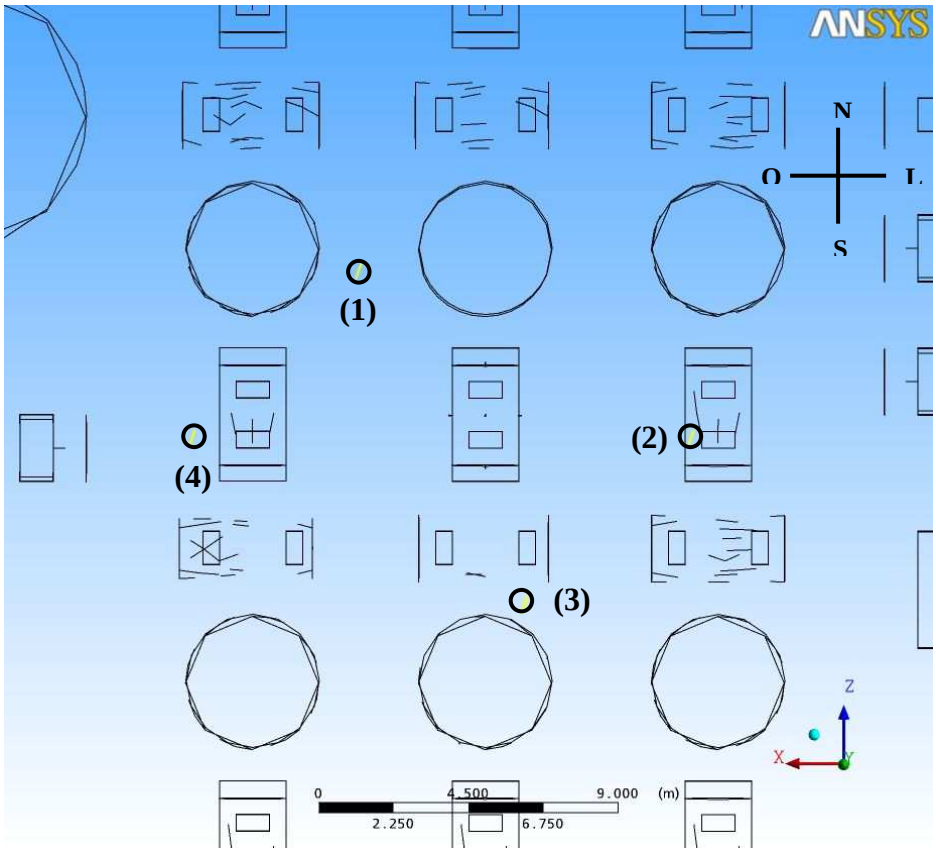


Figura. 8.34 – Sistema de detecção otimizado para o estudo de caso proposto.

Nota-se, pela Tabela 8.3, que 22 cenários (37 %) não foram identificados pela malha de detecção até então proposta. Analisando-os, observa-se que boa parte deles (10 cenários) trata-se de vazamentos de gás para cima (Y), que possuem volumes explosivos desprezíveis e de detecção muito pequenos, no máximo de 6,6 m³. Além disso, para o caso em estudo, dentre todos, os vazamentos para cima são os que apresentam menores riscos para os equipamentos e pessoas embarcadas, pois são os mais facilmente dispersos pelo vento, e suas nuvens tendem a subir, afastando-se de pontos de acúmulo, recirculação e estagnação de ar, bem como de locais, próximos ao piso da plataforma, passíveis de ocorrer ignição da nuvem explosiva. Tais vazamentos foram beneficiados, no sentido de apresentarem menores riscos, pela geometria da plataforma utilizada neste trabalho, que não possui decks superiores, ou seja, nos vazamentos para cima não há a possibilidade de o gás atingir obstáculos ou ficar confinado.

Os outros 12 casos não identificados também têm pequenas nuvens detectáveis, com volume máximo de 61,4 m³, e volume desprezível de gás inflamável. Como se esperava, pequenos vazamentos são difíceis de serem detectados. Entretanto, ainda existe o recurso de rearranjar ou adicionar alguns pontos de detecção para aumentar o número de cenários identificados.

Assim, fazendo uma análise mais criteriosa dos outros cenários não identificados, tem-se que 9 cenários correspondem a vazamentos para Norte (Zm) e 3 são liberações para Leste (X). No primeiro caso, apenas o cenário correspondente ao vento Sudoeste foi identificado (Figura A.28, no anexo A). Este é um dos casos em que vazamento e vento estão em sentidos opostos, gerando um maior espalhamento da pluma capaz de ser detectada. Já os casos não identificados de liberações para Leste (X), respectivamente, para ventos Leste, Sudeste e Noroeste com vazamento mássico 90% menor, mostrados nas respectivas Figuras A.9, A.36 e 8.28, formaram nuvens gasosas com volumes de no máximo 25,0 m³, o equivalente a uma esfera gasosa de 3,6 m de diâmetro, que pode ser considerada pequena. Cabe salientar que, exceto para o caso de vento Noroeste com pequena liberação de gás, esses vazamentos se dão no mesmo sentido do vento.

Um simples rearranjo de 2 pontos de detecção é suficiente para a identificação desses casos, sem comprometer a detecção dos demais casos que já vinham sendo identificados. Assim, é possível detectar um total de 50 casos ou 83 % dos casos simulados (Figura 8.35a), com uma rede composta pelos sensores 1, 2, 3’ e 4’ (Tabela 8.4). Dessa maneira ainda não podem ser identificados os vazamentos para cima (Y), que em termos de segurança, não oferecem muitos riscos a vidas humanas. Mas, adicionando apenas mais um ponto de detecção, chega-se ao sistema de detecção ótimo, composto pelos sensores 1, 2, 3’, 4’ e 5’ (Tabela 8.4), que identificou todos os casos simulados (Figura 8.35b).

Portanto, na Figura 8.35 é apresentada a proposta para o sistema de detecção de gases inflamáveis, para vazamento no compressor do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores, otimizado através (a) da realocação de 2 pontos e (b) com o rearranjo de dois pontos, mais adição de um ponto. Na Tabela 8.4 são mostradas as coordenadas desses pontos.

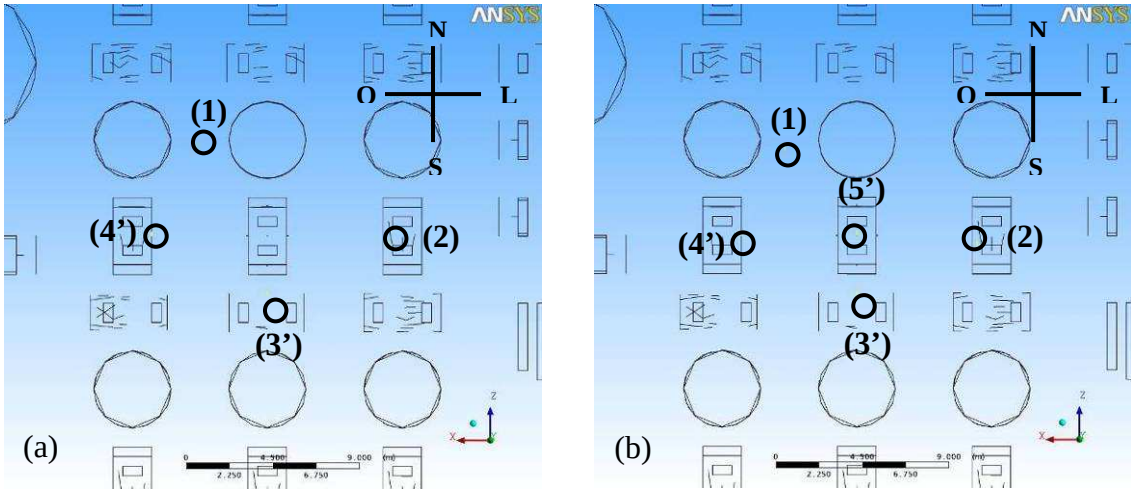


Figura. 8.35 – Sistema de detecção otimizado, (a) pelo rearranjo de 2 pontos de detecção e (b) pelo rearranjo de 2 pontos de detecção e a adição de um ponto, para o estudo de caso proposto.

Fica claro pela Figura 8.35, que a rede ótima de detecção proposta para a seção de compressão da plataforma apresenta os sensores posicionados ao redor do compressor de onde se originaram as liberações gasosas. Porém, acredita-se que sendo considerados todos os potenciais cenários de vazamento da plaforma, por meio de uma análise de

risco, um determinado detector será usado para identificar liberações provenientes de diferentes pontos de vazamento, que no estudo de casos realizado, poderia ser de um compressor vizinho ao escolhido. Portanto, extrapolando o estudo de casos efetuado, a metodologia apresentada pode ser uma ferramenta útil para avaliar e melhorar o projeto do sistema de detecção de gases de toda a plataforma.

O gráfico do número de pontos de detecção melhor classificados pela porcentagem de cenários detectados é apresentado pela Figura 8.36. Ele mostra que se a tolerância mínima de cenários detectados aceita for 100 %, tem-se a malha ótima proposta na Figura 8.35b. Mas, se essa tolerância for menor, a partir desse gráfico pode-se propor um sistema de detecção de gás, composto apenas pelos pontos de detecção melhor classificados, que suprem esta tolerâcia desejada, reduzindo a quantidade de pontos de detecção. Por exemplo, utilizando apenas os detectores 1,2 e 3', é possível identificar 81,7 % dos casos simulados.

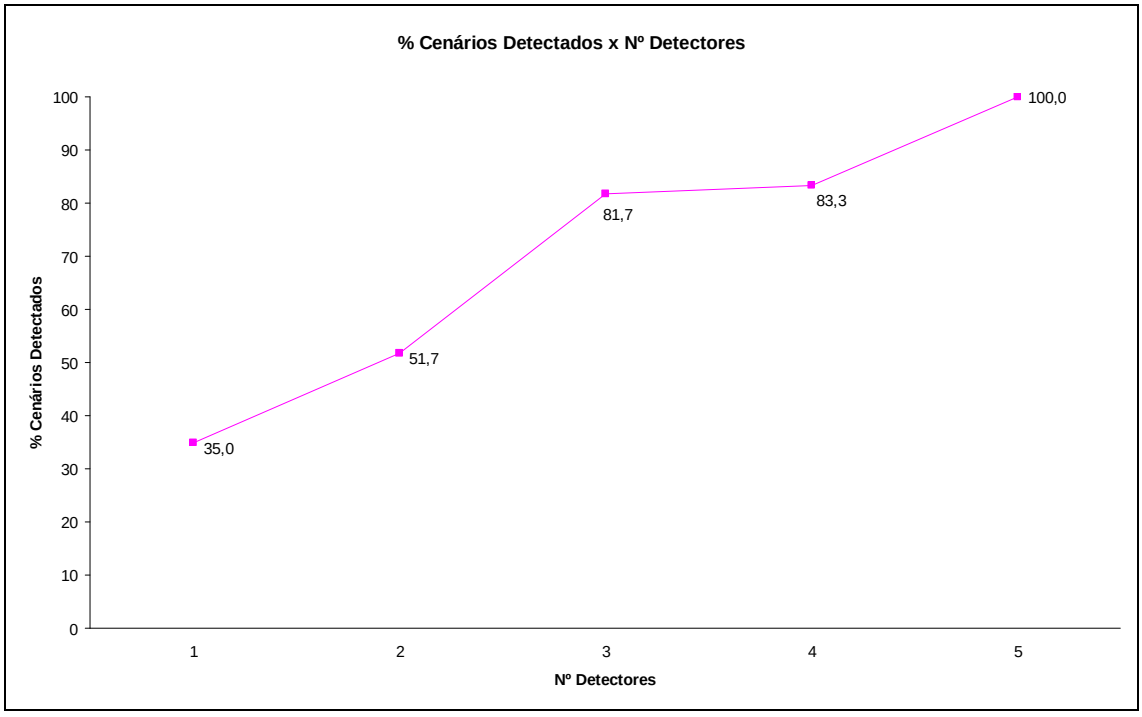


Figura. 8.36 – Gráfico da % de cenários detectados x Número de detectores usados.

8.4.2. Determinação da Altura dos Detectores do Sistema de Detecção Otimizado

Para um determinado cenário de vazamento, cada ponto de detecção que identificou esse cenário teve a altura relacionada ao nível de alarme (detecção) calculada. Assim, após a análise de todos os cenários, cada ponto utilizado no sistema de detecção apresentou uma altura mínima e máxima para o nível de alarme (Tabela 8.4). Propõe-se no presente estudo, adotar a mínima altura (y min) encontrada para cada ponto de detecção, como a altura verdadeira deste ponto, ou seja, como a coordenada y no domínio. Desta forma garante-se que os pontos da rede de detecção identificarão todos os cenários de vazamentos cujas alturas relativas ao nível de alarme (ou detecção) sejam maiores que as suas respectivas alturas verdadeiras (y min).

A Tabela 8.4 indica a localização dos sensores através das suas coordenadas (x,y,z) no domínio proposto para a plataforma, bem como a identificação, o número de cenários detectados e a classificação de cada um deles. A origem do domínio, ou seja, coordenada equivalente ao ponto (0, 0, 0) coincide com a origem da Rosa-dos-Ventos mostrada na Figura 7.7.

Tabela 8.4 – Coordenadas, número, identificação e *ranking* dos cenários detectados pelos sensores.

Sensores	x (m)	y máx (m)	y mín (m)	z (m)	Número de Cenários Identificados	Cenários Identificados	C_{pto}	Obs.
1	4,75	3,60	1,00	30,50	21	4,5,10,11,16,17,19,22,23,28,29, 31,34,35,40,41,46,47,52,53 e 59	0,1695	
2	-5,25	3,30	1,90	25,50	19	2,5,8,11,14,17,20,23,26,28, 29,32,35,38,44,47,50,53 e 56	0,1584	
3	-0,25	3,70	1,30	20,50	13	4,10,16,22,28,29,34,36,40,46,52,53 e 58	0,1239	
3’	1,00	3,70	1,30	22,90	13 + 9	4,10,16,22,28,29,34,36,40,46,52,53 e 58 + 6,12,18,24,30,42,48,54 e 60	-	
4	9,75	2,60	0,40	25,50	9	1,4,7,17,19,25,37,46 e 49	0,0769	
4’	7,00	2,60	0,40	26,00	9 + 3	1,4,7,17,19,25,37,46 e 49 + 13,43 e 55	-	
5’	1,00	> 2,00	2,00	26,00	10	3,9,15,21,27,33,39,45,51 e 57	-	*

* Y mínimo equivalente a altura do compressor.

9. CONCLUSÕES

Uma geometria simplificada de uma plataforma *offshore* real foi idealizada, para a visualização do comportamento de nuvens de gás provenientes de vazamentos em um determinado módulo da unidade, com o intuito de obter dados para a aplicação da metodologia de localização de sensores de um sistema de detecção de gases explosivos.

Pela falta de dados mais detalhados para a realização de uma análise preliminar de perigo, recorreu-se a dados estatísticos de vazamentos do HSE, sendo constatado que o sistema de compressão de gás da plataforma tem uma maior frequência de acidentes por ano. Selecionou-se, então, para estudo, o compressor que se apresentava em posição mais crítica dentro desta área. Neste compressor foram simuladas seis situações de liberações gasosas, consideradas incompressíveis e subsônicas, para cada uma das oito direções de vento propostas, mais um caso de vento com baixa intensidade, além de cenários com vazamentos pequenos, também para as 6 direções de vazamento.

Com a análise das velocidades dos ventos, suas probabilidades e das freqüências de ocorrência de cada cenário, ficou caracterizado que a segunda pior situação seria o vento na direção Norte, enquanto que o pior caso, e também o mais provável é o vento na direção Nordeste. Dos resultados obtidos nas simulações numéricas do estudo de vazamentos no compressor do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores, conclui-se pela análise das plumas, que quando o vazamento ocorre num sentido contrário ao vento, a nuvem formada tende a elevar-se, atingindo grandes alturas, além de se espalhar mais por toda a seção de compressão da plataforma, acarretando maiores volumes detectáveis de gás. Já as liberações gasosas que estão a favor do vento apresentaram tendências contrárias. Quando comparado um vento fraco de 0,5 m/s com o vento de maior intensidade na mesma direção, também se observaram diferenças significativas nos resultados, somente nos cenários nos quais ventos e vazamentos estão em sentidos opostos de escoamento.

Através do estudo da localização do vazamento no equipamento, conclui-se que, para o estudo de casos apresentado, ou seja, considerando a geometria simplificada, a liberação

para baixo (Ym) ocasionou os piores cenários no que diz respeito ao espalhamento, volume, concentração e posição da nuvem inflamável. Dentre todas, estas liberações foram as únicas que apresentaram plumas gasosas, de concentração dentro dos limites de explosividade do gás não desprezíveis.

Portanto, quando existir um número maior de pontos de vazamento, além de ser conveniente reduzir as direções de vazamento em cada ponto, diminuindo assim o número de simulações realizadas, torna-se importante considerar um vazamento para baixo, ou dependendo da geometria, vazamentos que atinjam obstáculos e confinem o gás, e liberações em sentidos contrários ao vento. Isso foi verificado neste trabalho, apenas com o ponto de vazamento (equipamento, tubulação, etc) sobre um piso contínuo, ou seja, que não seja gradeado ou vazado, característica essa comum em algumas áreas de unidades marítimas.

Para as liberações com baixas vazões mássicas, observou-se que o vento age dispersando as plumas, que apresentaram os menores volumes gasosos deste estudo. Se por um lado isso é uma situação desejável para a segurança da plataforma, por outro lado traz problemas para o sistema de detecção de gases. Esses cenários tiveram um índice baixo de identificação das nuvens pela rede de detecção proposta, justamente pelo fato de seus volumes serem pequenos.

Detectores bem localizados podem melhorar o desempenho de um sistema de detecção de gases, o que enfatiza a necessidade de conhecer bem a dispersão dos gases envolvidos, a ventilação natural da plataforma, os decorrentes processos da instalação, e o *layout* dos equipamentos, na decisão do posicionamento dos sensores (HSE, 2004 e HSL, 2005).

De posse do mapa das plumas gasosas resultante dos cenários analisados, aplicando-se a metodologia proposta, os pontos de detecção foram classificados de acordo com a frequência do vazamento, a probabilidade do vento e intensidade da explosão. Sendo este último parâmetro avaliado de maneira quantitativa através de uma relação em que o

peso da conseqüência do acidente é considerado proporcional ao volume inflamável de gás formado em cada cenário de vazamento.

Após definidos os locais onde existem as maiores eficiências na detecção dos vazamentos e a quantidade de sensores a serem utilizados, especificamente para o estudo de casos efetuado, 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. 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.

Kelsey *et al.* (2002) comentam que qualquer classificação da efetividade do detector, ou seja, o quão rápido e confiável ele responde a um determinado perigo, e da eficiência do sistema de detecção, baseado apenas num limitado número de vazamentos, pode fornecer informações incompletas sobre a importância dos detectores individuais.

A metodologia apresentada ainda está em desenvolvimento, mas baseado no estudo de caso realizado, acredita-se que ela seja uma ferramenta útil para avaliar e melhorar o projeto do sistema de detecção de gases de toda a plataforma.

10. RECOMENDAÇÕES

Para a complementação deste estudo, sugere-se que depois de efetuada a análise preliminar de perigo, devem-se estudar todas as possíveis fontes de vazamento propostas, obtendo desta maneira um mapa completo de plumas gasosas geradas por vazamentos na plataforma. Assim, após aplicar a metodologia proposta, pode-se também validar o sistema de detecção de gases inflamáveis da plataforma (Vianna, 2005), rodando simulações de cenários ainda não considerados, como por exemplo, condições de baixa ventilação em todas as direções de vento propostas.

É importante obter mais detalhes de uma plataforma de petróleo, objetivando a utilização de uma geometria a mais próxima possível da realidade, fazendo com que os resultados das simulações gerem cenários mais confiáveis. Neste sentido, é importante que o modelo geométrico da instalação utilizado, leve em consideração todo o tipo de equipamentos e linhas. Atualmente, pode-se adotar uma geometria híbrida, onde malhas não-estruturadas, como as deste trabalho, são usadas para representar objetos grandes dentro do domínio da dispersão, e aproximações de modelos de sub-malha, como do tipo PDR, ficam reservadas para objetos menores que não podem ser resolvidos pelo mesh convencional (HSL, 2002).

Com relação às simulações numéricas, Bakke *et al.* (2003) e HSL (2002) recomendam que as análises de dispersão de gases sejam transientes. Eles citam que cálculos de dispersão em CFD no estado estacionário podem ser mais rápidos de serem executados, devido ao critério do passo de tempo menos rigoroso, porém podem gerar soluções espúrias (HSL, 1997), além de surgirem alguns problemas com tal aproximação, como o fato de que são geradas nuvens ricas de combustível que podem superestimar o risco, e os vazamentos têm menor duração.

Escoamentos incompressíveis foram assumidos nas simulações, onde variações na pressão não afetam a massa específica. Para HSL (1997 e 2000), esta é uma suposição válida para escoamentos gravitacionais com baixo números de Mach, que não foi o caso geralmente encontrado neste estudo. Assim, para se obter soluções mais confiáveis e

realistas, deve-se procurar adotar, como Osenbroch *et al*. (2002) o fizeram, escoamentos compressíveis pelo menos nas regiões de escoamento sônico e supersônico, ou seja, nas saídas dos jatos.

O modelo κ–ε é implementado em muitos, se não em todos os códigos de CFD. Para simulações em escalas reais, ele é um dos modelos mais usados desde que provou-se estável e numericamente robusto, sendo preciso o suficiente um grande número de aplicações. Porém têm algumas limitações, especialmente quando é empregado em escoamento complexos (Baraldi *et al.*, 2007). Atualmente, pelo fato dos recursos computacionais estarem melhores e mais disponíveis, torna-se conveniente realizar estudos comparativos entre os modelos κ–ε e SST, antes de escolher por um determinado modelo, visto que o segundo já mostrou ser, em algumas simulações, superior como apresentaram Rigas *et al*. (2004) e Baraldi *et al.* (2007).

Seria interessante, para a variável vento, efetuar análises de incerteza e sensibilidade, aumentando sua confiabilidade. Para Wilkening *et al.* (2007), nos casos simulados sem a variável vento, ou mesmo, com vento de baixa intensidade, as forças gravitacionais são importantes e devem ser consideradas nas simulações. Além disso, se as forças gravitacionais forem significativas, a seleção de um escoamento como sendo isotérmico pode não ser realista, mesmo tendo diferenças de temperatura pequenas (HSL, 1997).

Assim como Strϕm *et al.* (1999), o tempo de detecção dos sensores poderia ser considerado na metodologia utilizada para a localização de detectores. Para isso, é necessário que as simulações sejam transientes (HSL, 2003). Assim, quanto mais rápido o ponto identificar o nível de alarme (ou detecção), que neste trabalho é 20% do LEL, melhor seria a classificação do mesmo.

Considerando ainda a metodologia proposta para a criação do sistema de detecção de gases inflamáveis da plataforma, mais precisamente na classificação dos detectores, seria bastante importante criar uma maneira de considerar os efeitos da congestão e do confinamento na intensidade da explosão, ou seja, adotar para os parâmetros

dependentes da geometria um determinado peso no fator de ponderação, já que se sabe que os mesmos influenciam a criticidade dos cenários de vazamento.

Na etapa de otimização da rede de detecção de gases explosivos, a identificação dos pontos de detecção que não identificaram nenhum cenário de vazamento, ou aqueles que detectaram apenas cenários redundantes, bem como toda etapa de determinação da altura do sistema otimizado de detecção foram efetuados manualmente, ou seja, analisando, para cada cenário simulado, as concentrações de gás nas linhas que representam os sensores gasosos (Figura 7.10). Assim, sugere-se que a partir de uma função objetivo e dos arquivos de respostas gerados pelo *Solver* do CFX, encontre-se uma maneira de facilitar a busca pelos pontos de detecção cujas concentrações estão nos níveis de detecção, bem como suas respectivas alturas, automatizando as etapas de otimização da rede e determinação das alturas dos pontos de detecção.

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

Bakke, J.R. and Hansen, O.R. *Probabilistic Analysis Of Gas Explosion Loads*, FABIG Newsletter, Issue No 34, January 2003.

Baraldi, D., Wilkening, H. and Heitsch, M. *CFD simulations of light gas release and mixing in the BMC with CFX*, Nuclear Engineering and Design, February 2007.

Bird, R. B., Stewart, W. E., Lightfoot E. N. *Transport Phenomena*; 2nd. edition; John Wiley & Sons, Inc.; 2002.

Boussinesq, J. *Essai sur la théorie des eux courantes.* Mem. Présentés Acad. Sci. 23, 46, 1877.

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

CFX-11.0, *Manual***,** ANSYS Technology, 2007.

Deschamps, C.J. *Modelos Algébricos e Diferenciais***,** Em Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), Turbulência, Ediouro Gráfica e Editora S.A., Capítulo 3, Volume 1, Rio de Janeiro, 2002.

Fahien, F.W. *Fundamentals of Transport Phenomena***,** 193-250, Mc Graw-Hill Book Company, 1983.

Ferziper, J.H., Péric, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics***,** Springer, Berlin, 1996.

Health & Safety Executive, *Fire and Explosion Strategy – Issue 1*, Hazardous Installations Directorate, Offshore Division, 2004.

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

Health & Safety Executive, *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics And Analysis*, Hid Statistics Report, 2002.

Health & Safety Executive, *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics And Analysis*, Hid Statistics Report, 2001.

Health & Safety Executive, *A model for jet dispersion in a congested environment***,** Contract Research Report, 2001.

Health & Safety Executive, *Offshore detector siting criterion investigation of detector spacing by Lloyds Register*, Offshore Technology Report, 1993.

Health & Safety Executive, *Gas/Vapour build up in Offshore Structures*, The Steel Construction Institute, Offshore Technology Information, 1992.

Health & Safety Laboratory, *Natural ventilation of offshore modules*, Research Report 402, 2005.

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

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

Health & Safety Laboratory, *A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling*, Fire and Explosion Group**,** 2002.

Health & Safety Laboratory, *A study of the consequences of leaks from gas turbine power plant sited in a turbine hall*, Fire and Explosion Group**,** 2000.

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

Hirsch C., *Numerical Computation of Internal and External Flows*, John Wiley & Sons, England, vol. 1 (1989), vol. 2, 1990.

Kelsey, A., Ivings, M.J., Hemingway, M.A. and Walsh, P.T. *Sensitivity Studies Of Offshore Gas Detector Networks Based On Experimental Simulations Of High Pressure Gas Releases*, Institution of Chemical Engineers, Process Safety And Environmental Protection, 83(B5): 1–8, Part B, March 2005.

Kelsey, A., Hemingway, M.A., Walsh, P.T. and Connolly, S. *Evaluation Of Flammable Gas Detector Networks Based On Experimental Simulations Of Offshore, High Pressure Gas Releases*, Institution of Chemical Engineers, Vol 80, Part B, March 2002.

Kolmogorov, A.N. *The Equations of Turbulent Motion in a Incompressible Fluid***,** Isv. Acad. Sci. USSR, Phys. 6, p. 56-58, 1942.

Lees, F.P. *Loss Prevention in the Process Industries - Hazard Identification, Assessment and Control*, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 1996.

Louvar, J.F. and Crowl, D.A. *Chemical Process Safety: Fundamentals and Aplication*, 2nd Edition, Prentice Hall, Inc., 2002.

Maliska, C.R. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC Editora, Florianópolis, Brasil, 1995.

Neto, A.S. *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., Capítulo 1, Volume 1, Rio de Janeiro, 2002.

Neto, A.S. *Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos*, Em: Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), *Turbulência*, Ediouro Gráfica e Editora S.A., Capítulo 4, Volume 1, Rio de Janeiro, 2002.

Oliveira, D.S.T. de, Medronho, R.A. *Separação de Esferas Ocas do Fluido de Perfuração no Processo de Perfuração com Duplo Gradiente Utilizando Hidrociclones*. In: 3 Encontro ANP/UFRJ, 2003, Rio de Janeiro. Anais do 3 Encontro ANP/UFRJ. Rio de Janeiro : UFRJ, 2003.

Osenbroch, J., Hjertager, B.H. and Solberg, T. *Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Gas Dispersion in Offshore Modules*, 17th Annual International Conference and Workshop on Risk, Reliability and Security, 233-246, Florida, 2002.

Prandlt, L. *Über ein Neues Formelsystem für Die Ausgebildete Turbulenz*, Nachr. Akad. Wiss. Göttingen Math. Phys. Kl 1945, p.6-19, 1945.

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

Reynolds, O. *On the Dynamical Theory of incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion*, Phil. Trans. Roy. Soc. London Ser. A, 186, p.123-164, 1895.

Rigas, F. *Validation Of Turbulence Models In Heavy Gas Dispersion Over Obstacles***,** Journal of Hazardous Materials A108, 9–20, January 2004.

Ronold, A. *Modelling of flow and ventilation within petroleum process plants*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volumes 46-47, p. 675-680, 1993.

Santos, F.P. dos *Simulação numérica da fluidodinâmica de um riser de FCC*. Dissertação de Projeto Final - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

Simões, S.Q. *Pré-Separação de Areia em Plataformas de Produção de Petróleo*. Dissertação de Projeto Final- Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z. and Zhu, J. *A new κ-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows*, Computers & Fluids, 24, 227-138, 1995.

Speziale, C.G. *Modeling of Turbulent Transport Equations*, In: Gatski, T.B., Hussaini, M.Y., Lumley, J.L. (eds.), *Simulation and Modeling of Turbulent Flows*, Oxford University Press, New York, 1996.

Strϕm, O. and Bakke, J.R. *Gas Detector Location*, Safety on Offshore Installations Conference, 3.3.1 – 3.3.12, 1999.

Thomas, J.E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2004.

Versteeg, H.K., Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method***,** Longman, London, 1995.

Vianna, S.S.V. *Otimização de detectores de gás usando programação matemática e fluidodinâmica computacional*, Dissertação de Mestrado – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

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

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

Zhang, J. *Designing a cost effective and reliable pipeline leak detection system*, Pipeline Reliability Conference, Houston, November 1996.

SITES VISITADOS:

http://www2.petrobras.com.br/portugues/index.asp, acessado em 16/11/2007.

http://www.terra.com.br/brasil/2001/03/15/021.htm, acessado em 16/11/2007.

http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/plataforma.shtml, acessado em 16/11/2007.

http://paginas.fe.up.pt/~fpinho/pdfs/MFAMFTurbul1.pdf, acessado em 08/12/2007.

ANEXO A

Neste anexo serão apresentados outros resultados do caso em estudo. As mesmas características e tendências apresentadas pelas plumas gasosas, já discutidas no Capítulo 8, estão também presentes nestes resultados. Ou seja, vazamentos para baixo (Ym) são os mais críticos, apresentando volumes explosivos consideráveis, e quando o escoamento do vento tem o sentido inverso à liberação de gás, a nuvem acaba atingindo maiores alturas, se espalhando pela região do vazamento, gerando grandes volumes gasosos capazes de serem detectados. Assim, apenas alguns detalhes relevantes serão destacados.

A.1. Vento na Direção Sul

O campo de escoamento do vento na direção Sul, com 6,54 m/s, é apresentado na Figura A.1, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

As Figuras A.2 a A.7 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

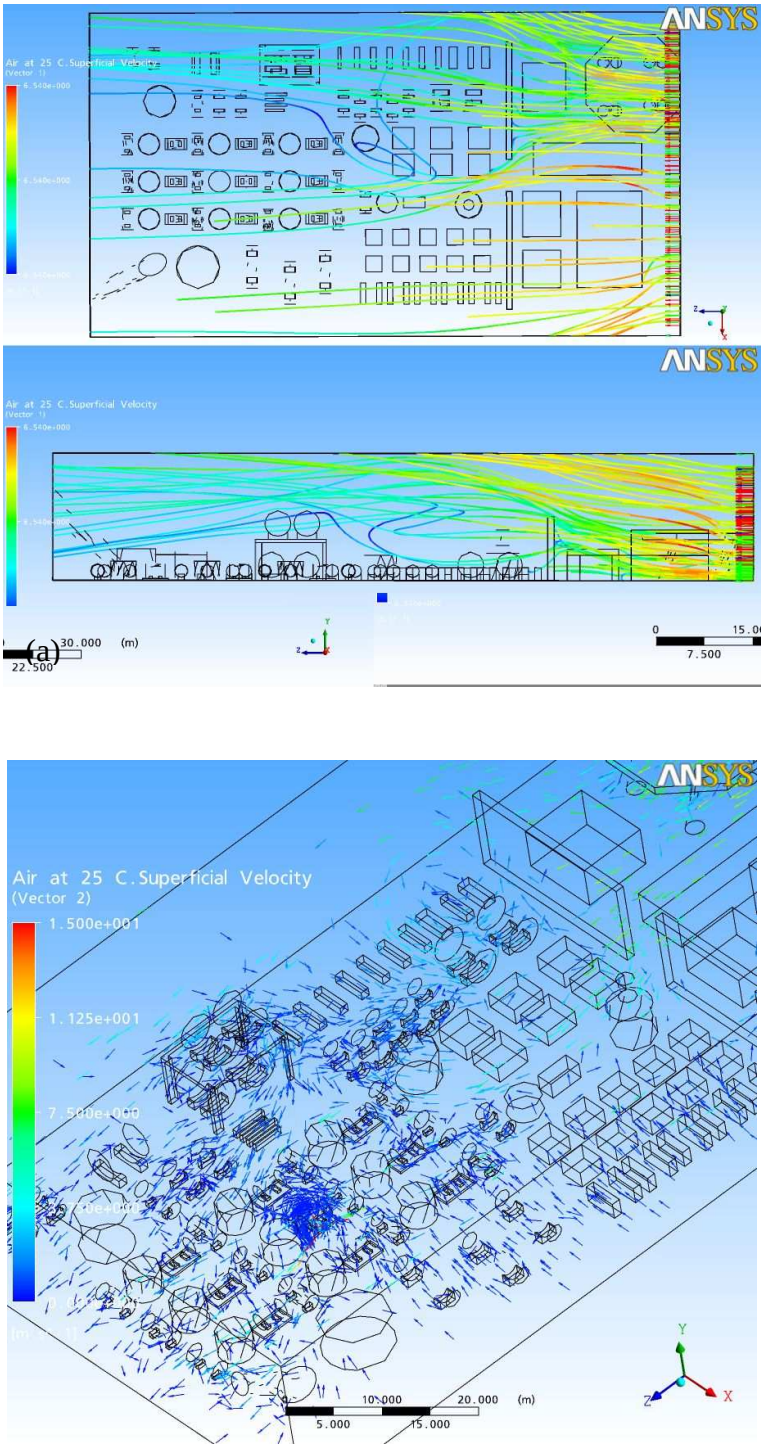


Figura. A.1 – Campo de escoamento do vento na direção Sul nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

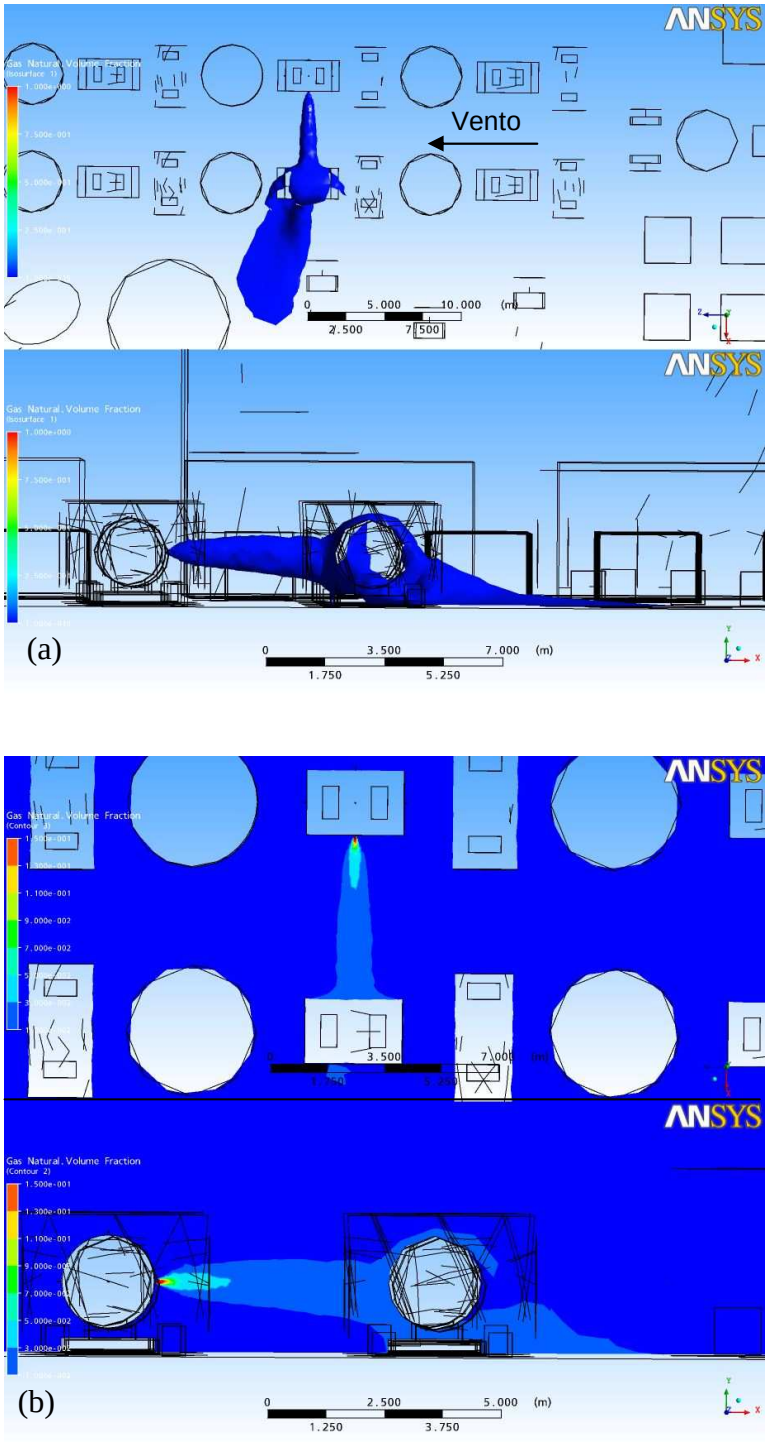


Figura. A.2 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Leste (X).

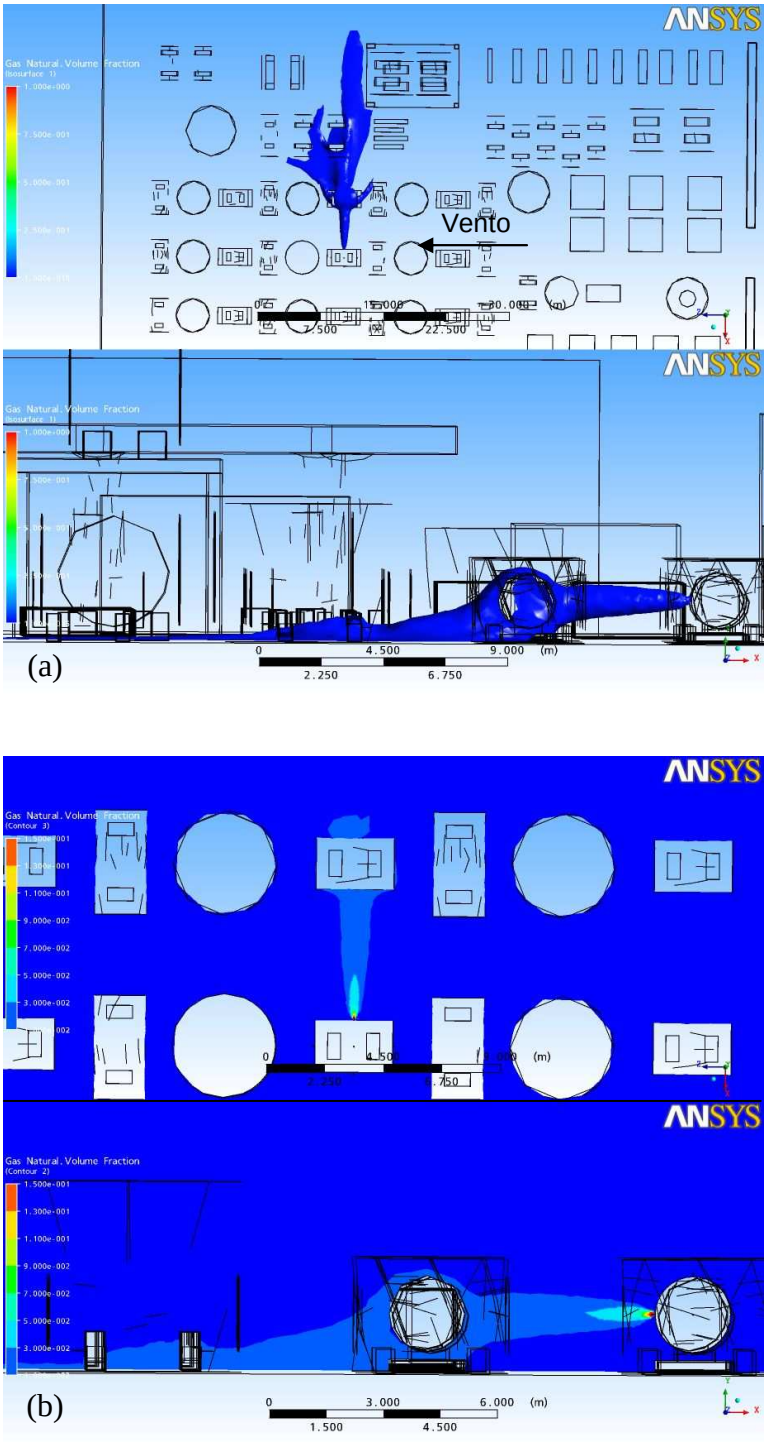


Figura. A.3 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Oeste (Xm).

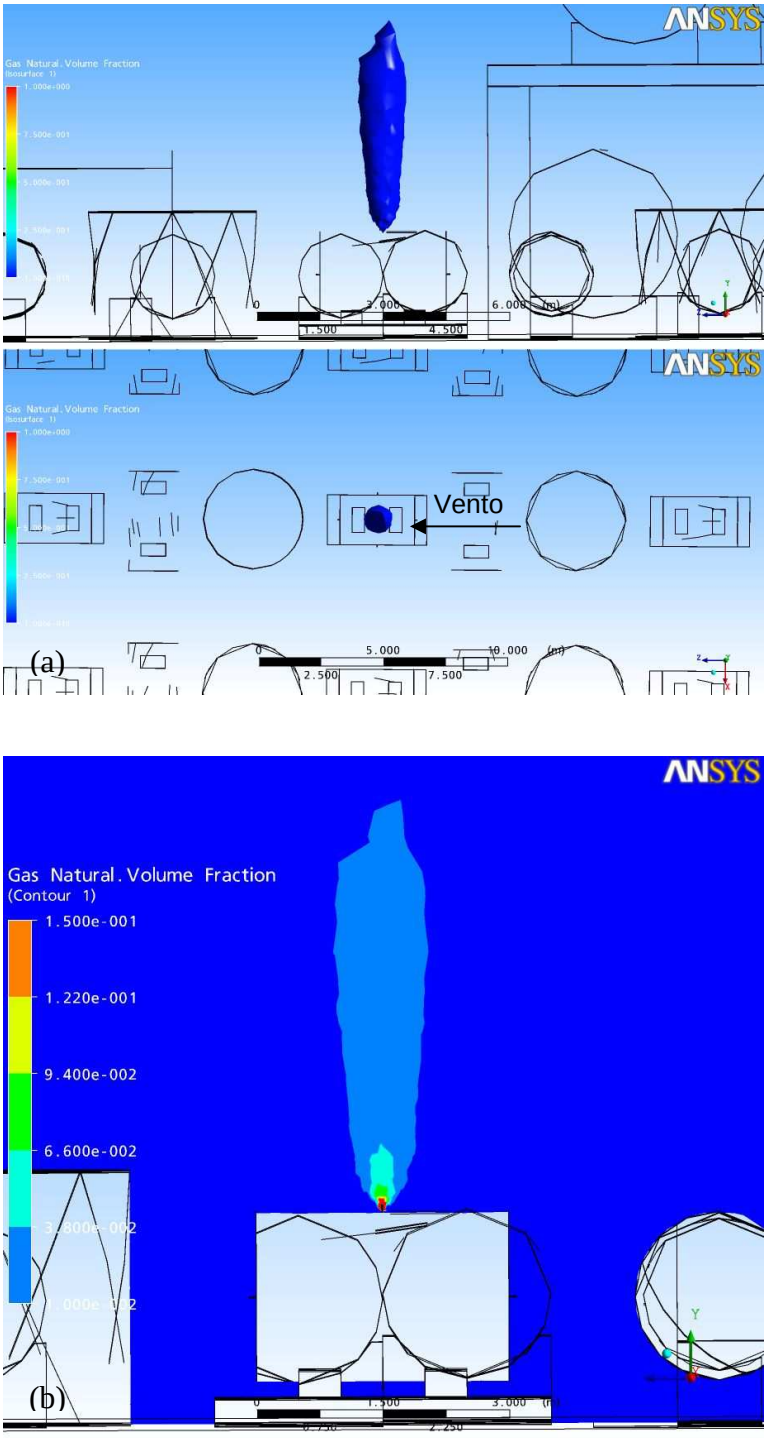


Figura. A.4 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Sul e vazamento para cima (Y).

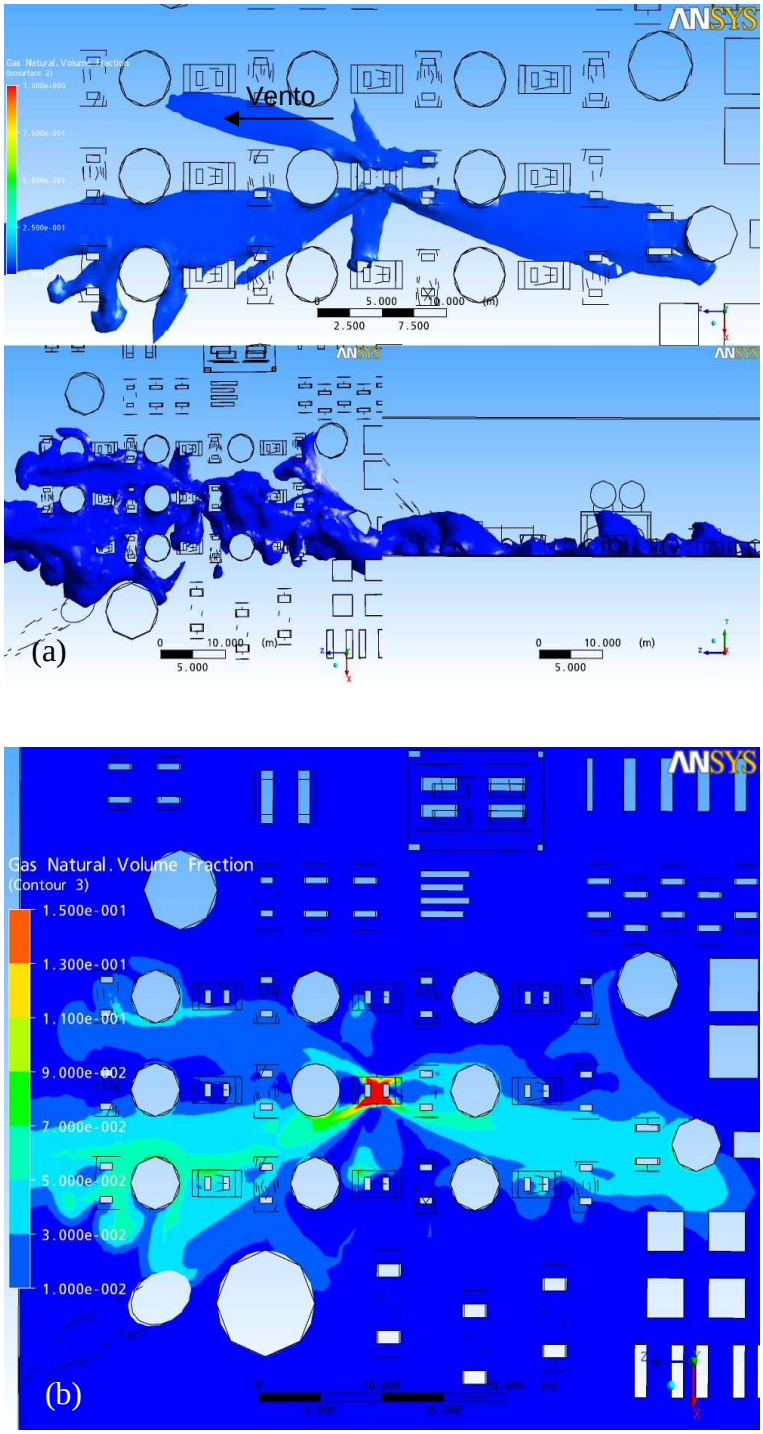
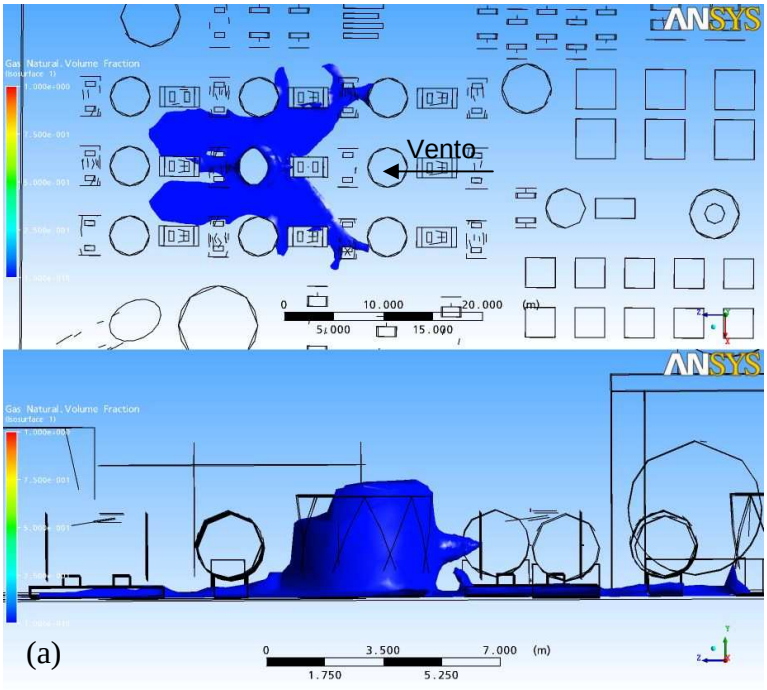


Figura. A.5 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sul e vazamento para baixo (Ym).



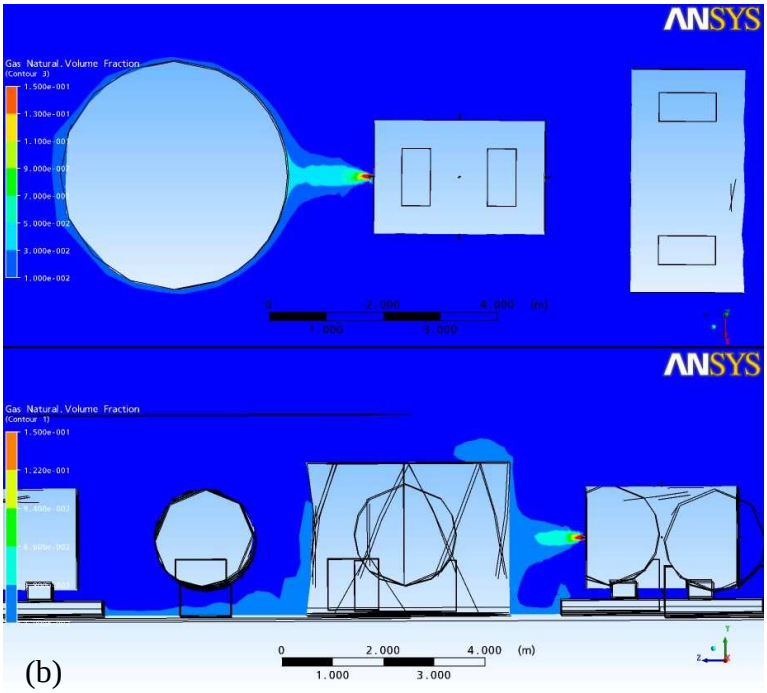


Figura. A.6 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Sul (Z).

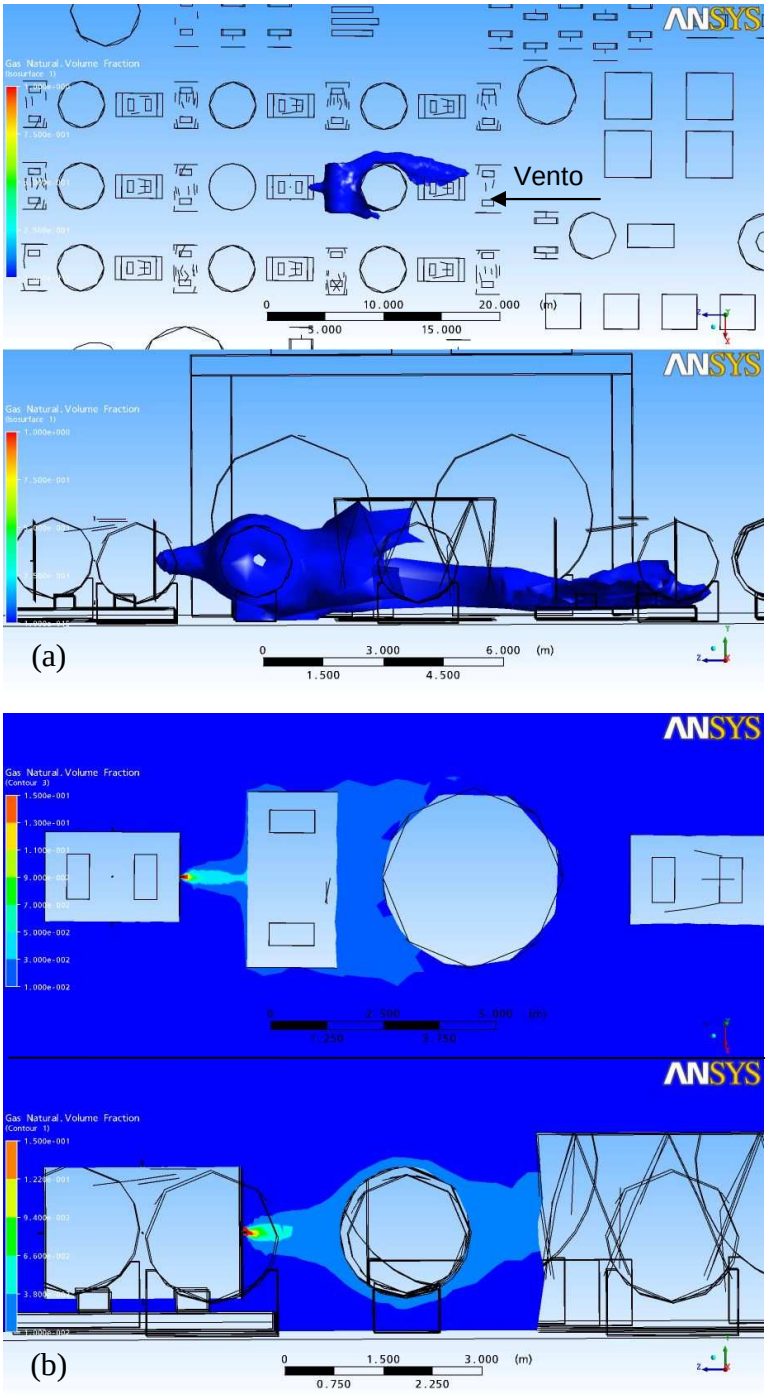


Figura. A.7 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sul e vazamento para Norte (Zm).

Uma análise da Figura A.1a mostra que poucas linhas de corrente chegam à seção de compressão devido aos impedimentos que a geometria da plataforma oferece ao escoamento do ar, principalmente as *fire-walls*. Pelo mesmo motivo, há formação de zonas de recirculação de ar com baixa velocidade, ao longo de boa parte da unidade, a

partir das *fire-walls*, que podem confinar o gás liberado, dificultando sua dispersão e agravando o cenário.

As *fire-walls* servem para impedir a extensão de incêndios eventuais para as instalações como: refeitórios, dormitórios, salas de controle e demais áreas com maior número de pessoas (Pupe *et al.*, 2006). Observa-se que estes anteparos diminuem drasticamente o fluxo do vento proveniente da região sul, ocasionando uma diminuição no poder de diluição do vento, na área de processo após a *fire-wall*, principalmente próximo ao piso, onde ocorrem recirculações que propiciam um aumento na região atingida pelo vazamento. Provavelmente, por esse motivo o vazamento para esta direção de vento originou a maior nuvem de gás inflamável formada para o estudo de caso efetuado, chegando a mais de 100 m³ de uma mistura hidrocarboneto/ar explosiva, no vazamento para baixo (Ym).

Aqui, percebe-se que pelo fato do vento atingir o local do vazamento numa baixa intensidade, o efeito da liberação gasosa estar escoando em um sentido contrário ao vento ficou menos notável, o que pode explicar os pequenos volumes encontrados em vazamentos para o Norte (Zm), quando comparados as liberações para o Sul (Z), na maioria dos cenários simulados.

A.2. Vento na Direção Leste

O campo de escoamento do vento na direção Leste, com velocidade de 6,13 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura A.8, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

As Figuras A.9 a A.14 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

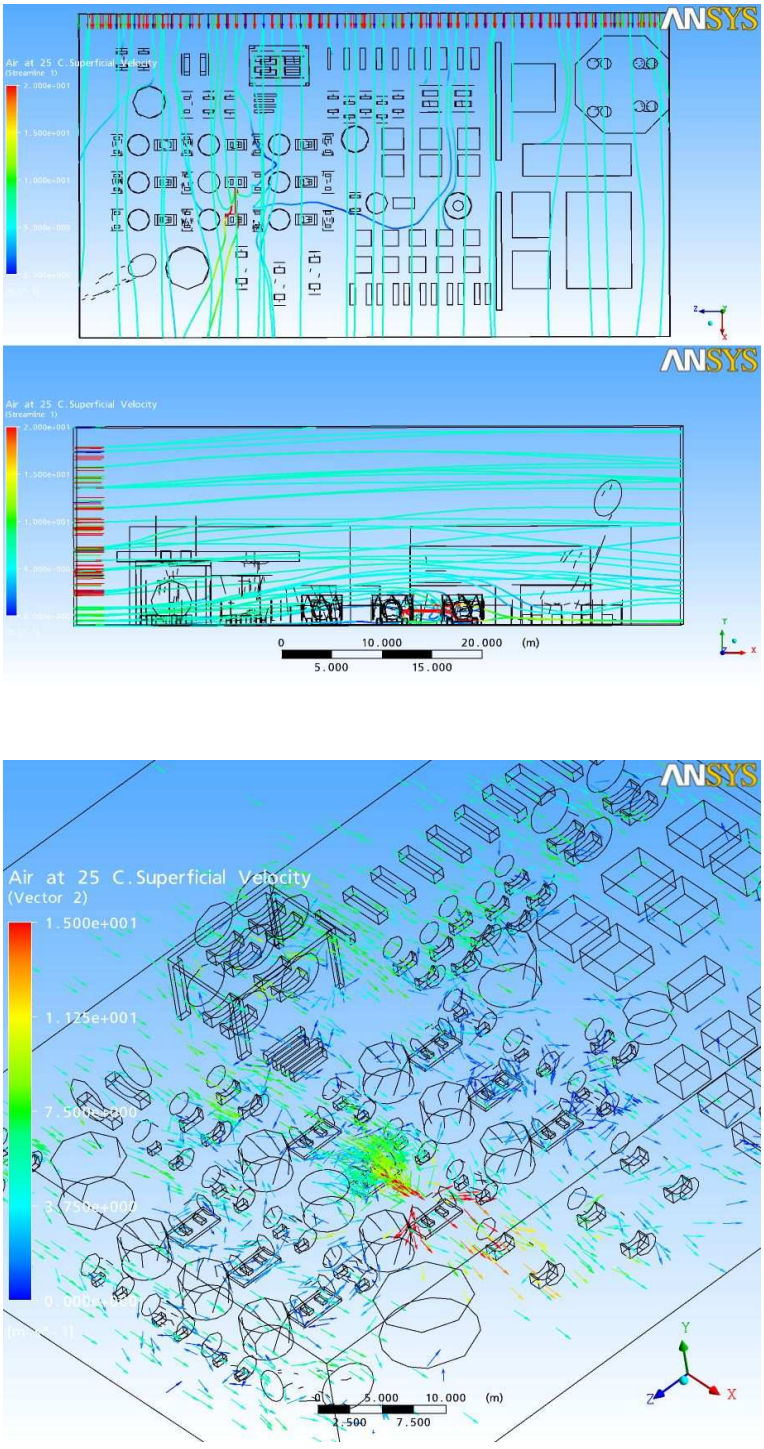


Figura. A.8 – Campo de escoamento do vento na direção Leste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

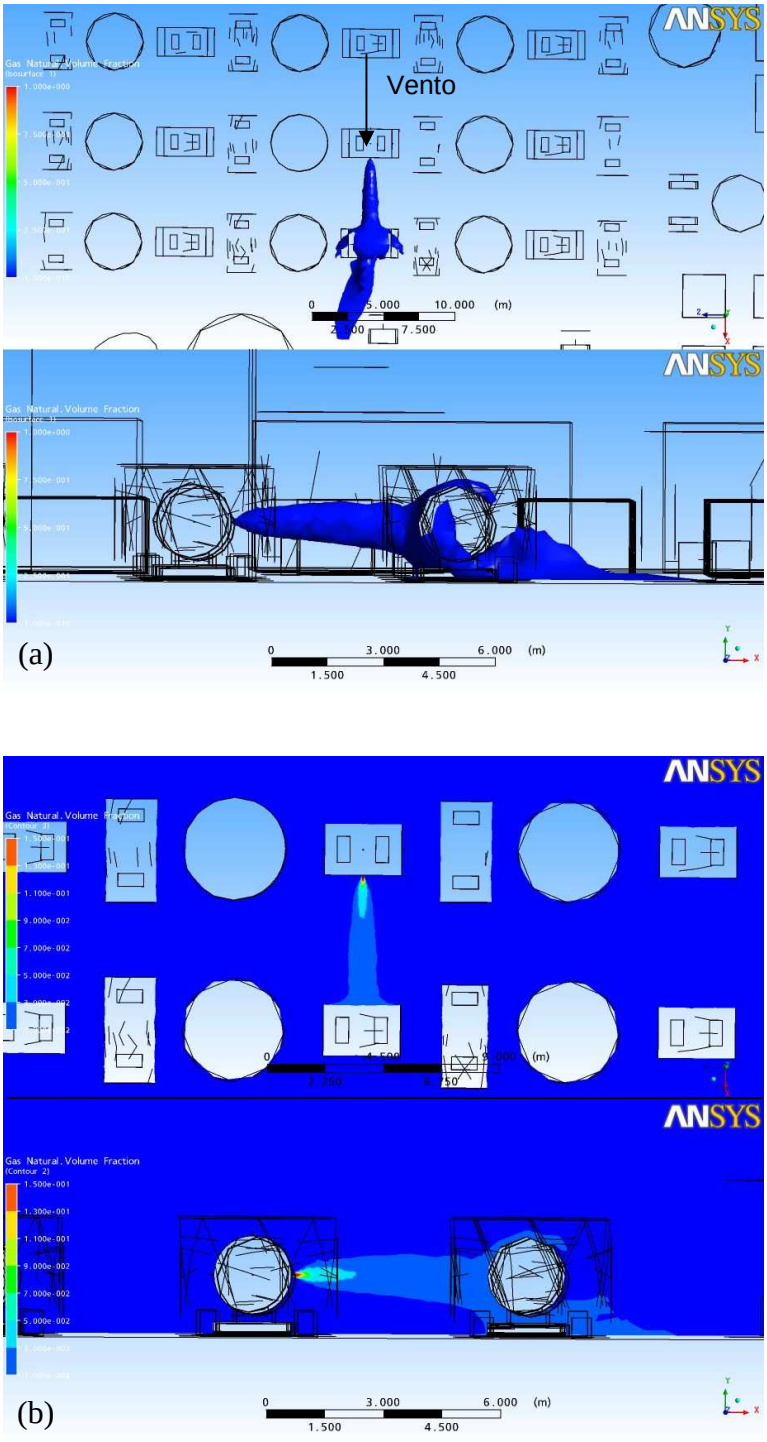
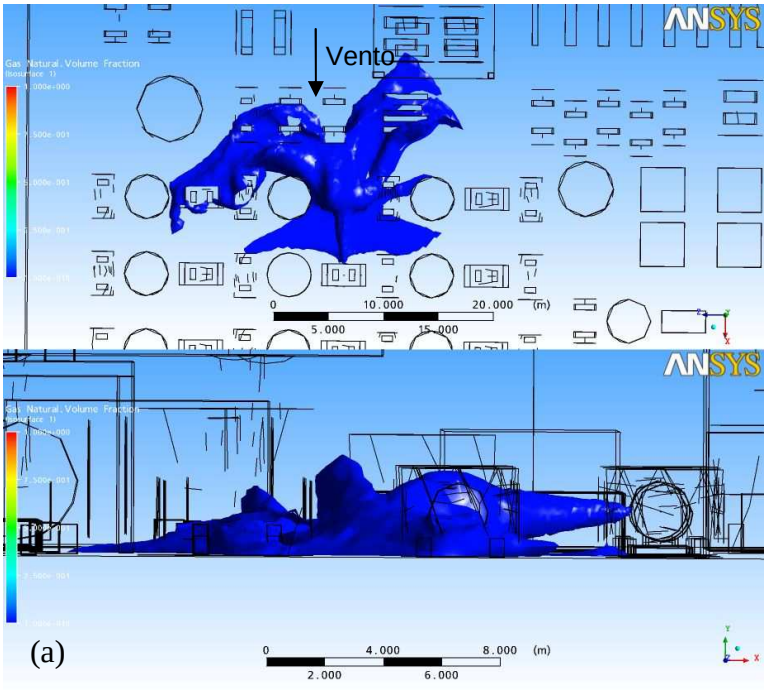


Figura. A.9 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Leste (X).



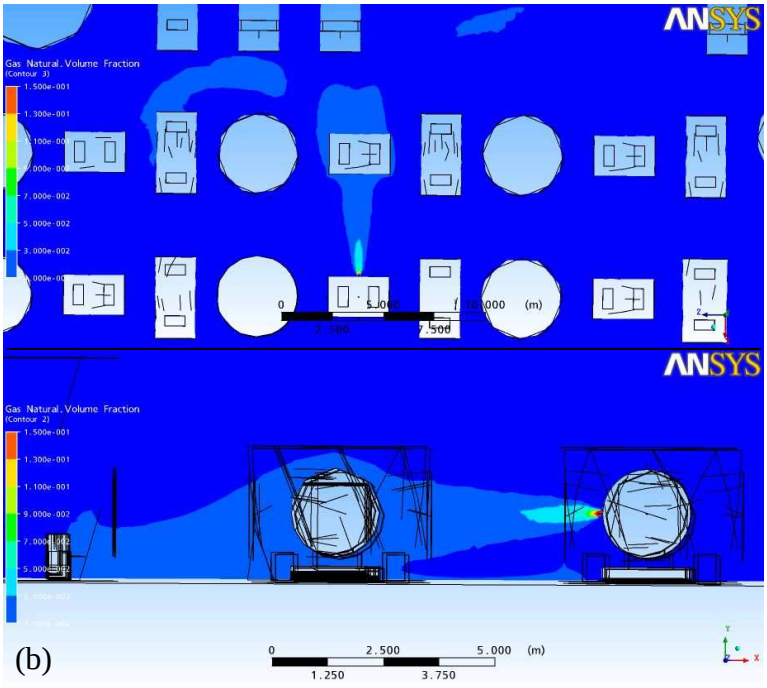


Figura. A.10 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Oeste (Xm).

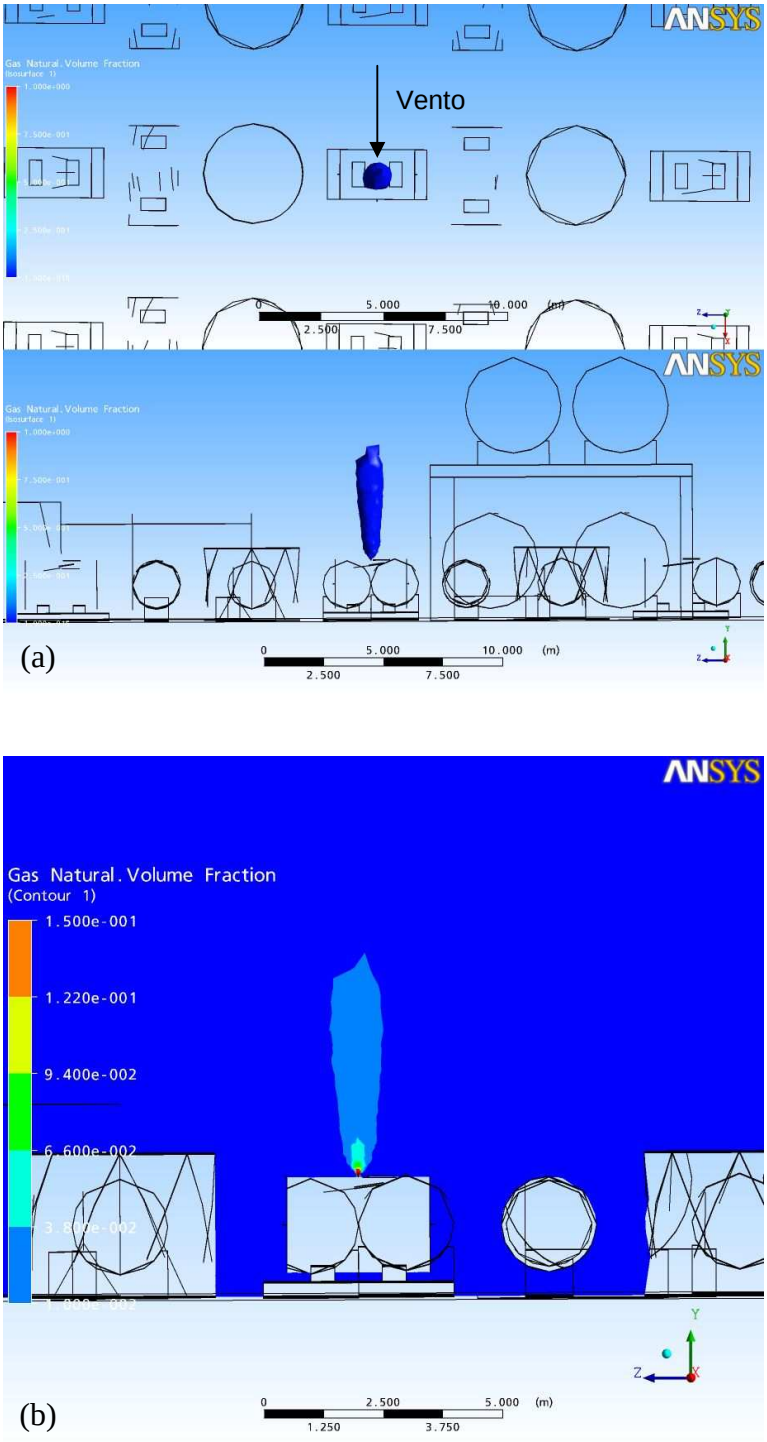


Figura. A.11 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Leste e vazamento para cima (Y).

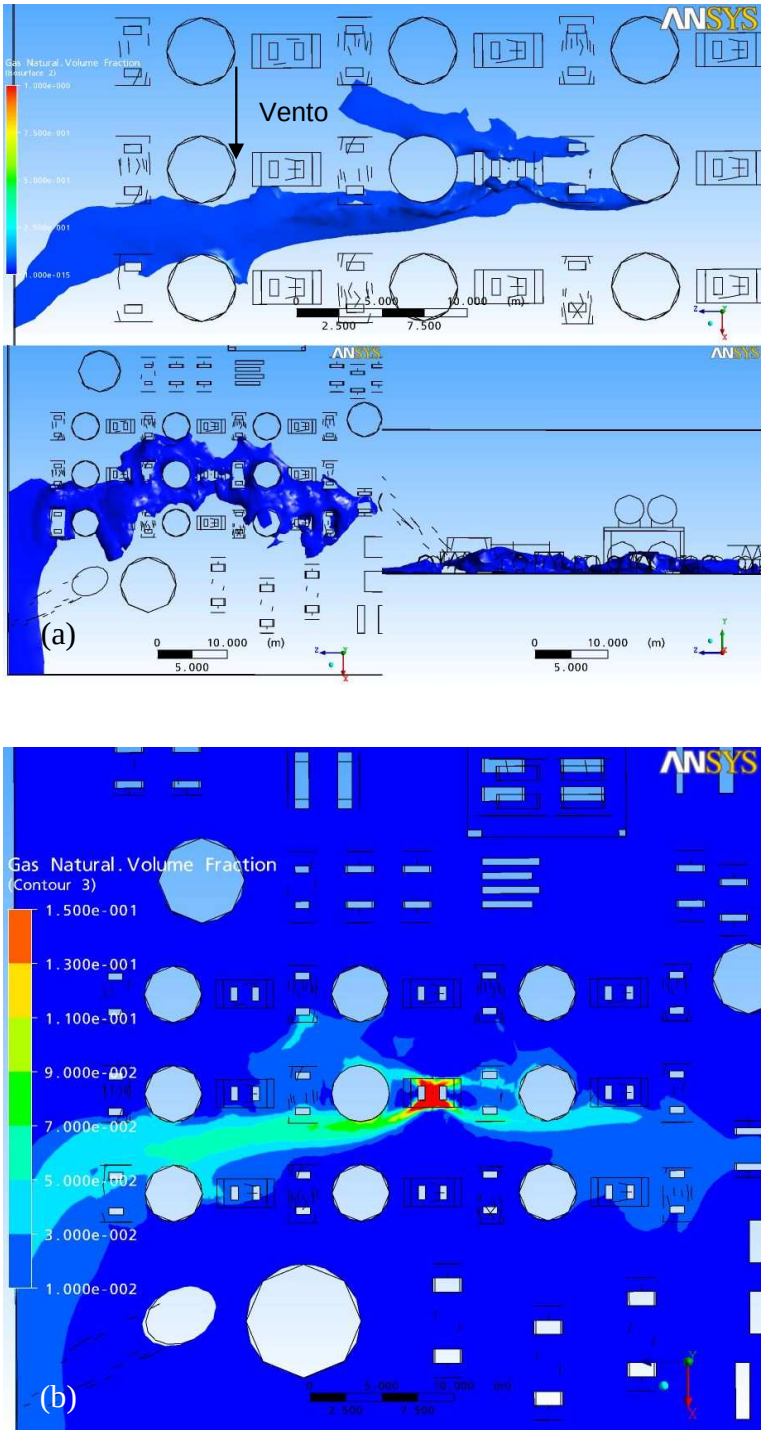


Figura. A.12 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Leste e vazamento para baixo (Ym).

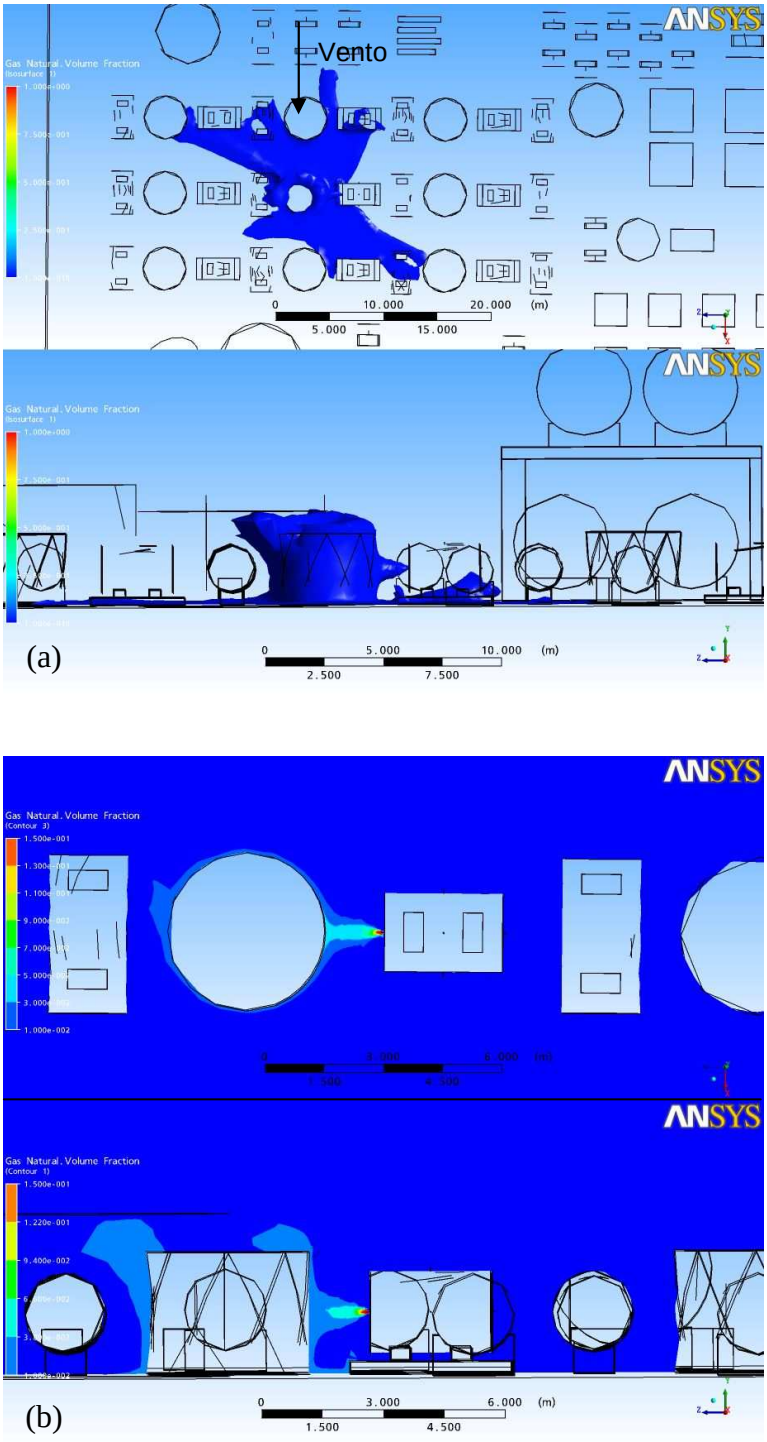


Figura. A.13 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Sul (Z).

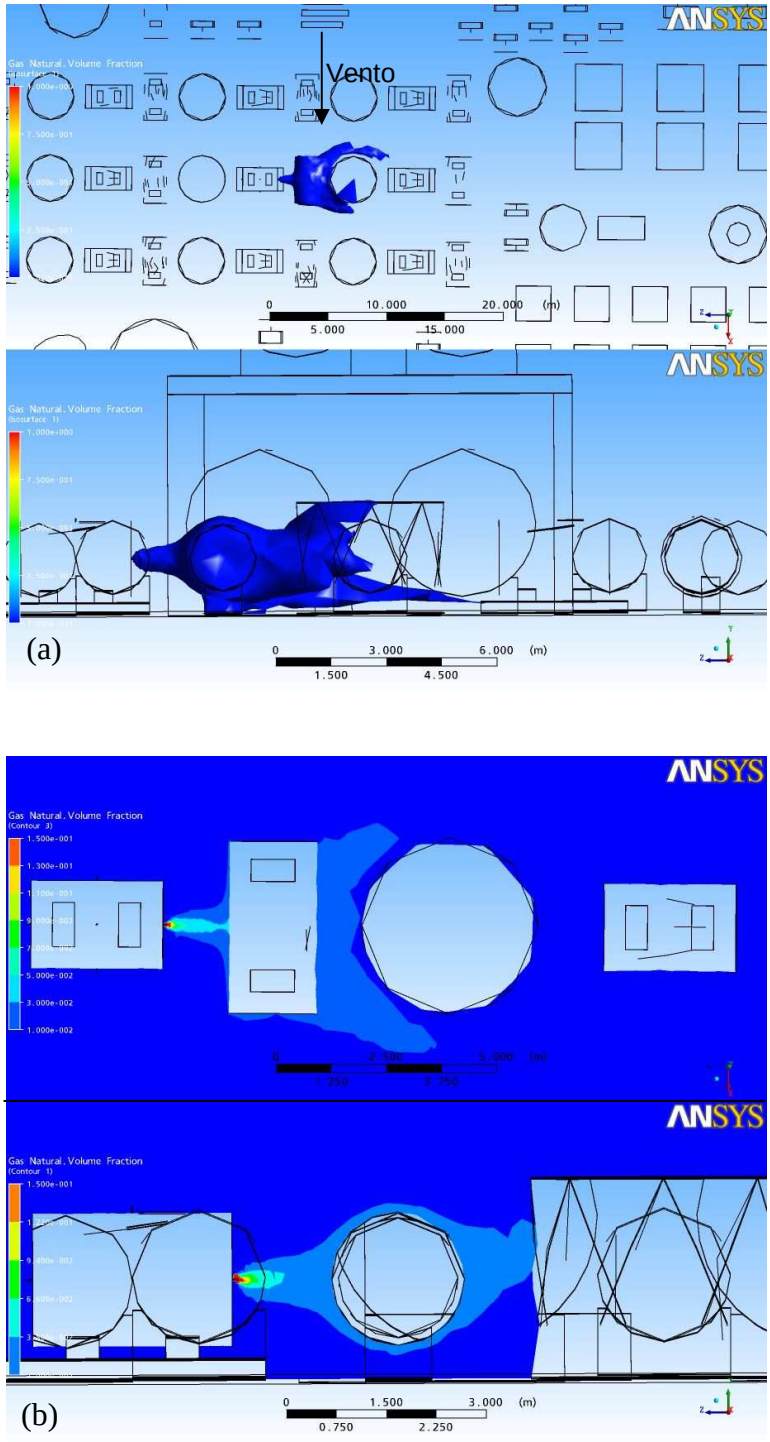


Figura. A.14 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Leste e vazamento para Norte (Zm).

Observando a Figura A.8a nota-se que, ao contrário do vento na direção Sul, muitas linhas de corrente chegam à seção de compressão para o vento na direção Leste, devido a poucos impedimentos que a geometria da plataforma oferece ao escoamento do ar.

Dentre as plumas de gás na concentração de 20% do LEL, podem-se destacar aquelas em que o vazamento ocorre a favor e contra o vento, respectivamente Figuras A.9 e A.10. Aqui, tem-se um dos poucos casos em que o vazamento na direção Leste (X) não foi identificado pela rede de detecção de 5 m x 5 m inicialmente proposta. Enquanto que para o vento Leste, juntamente com os casos de ventos Nordeste e Sudeste, o vazamento na direção Oeste (Xm) formou a maior pluma detectável do estudo de casos apresentado.

Aparentemente não há motivo claro para o fato do vazamento para a direção Sul (Z) formar nuvem de fração volumétrica 0,01 (detectável) maior que o vazamento para o Norte (Zm). Como o vento se dá perpendicularmente em ambos os casos, uma explicação plausível para este fato seria a geometria do equipamento em que o jato se choca. Apesar de ambos serem cilíndricos, o jato da liberação para a direção Sul encontra um vaso vertical, enquanto o vazamento para o Norte choca-se com um vaso horizontal (trocador de calor).

A.3. Vento na Direção Oeste

O campo de escoamento do vento na direção Oeste, com 5,69 m/s, é apresentado na Figura A.15, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

As Figuras A.16 a A.21 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

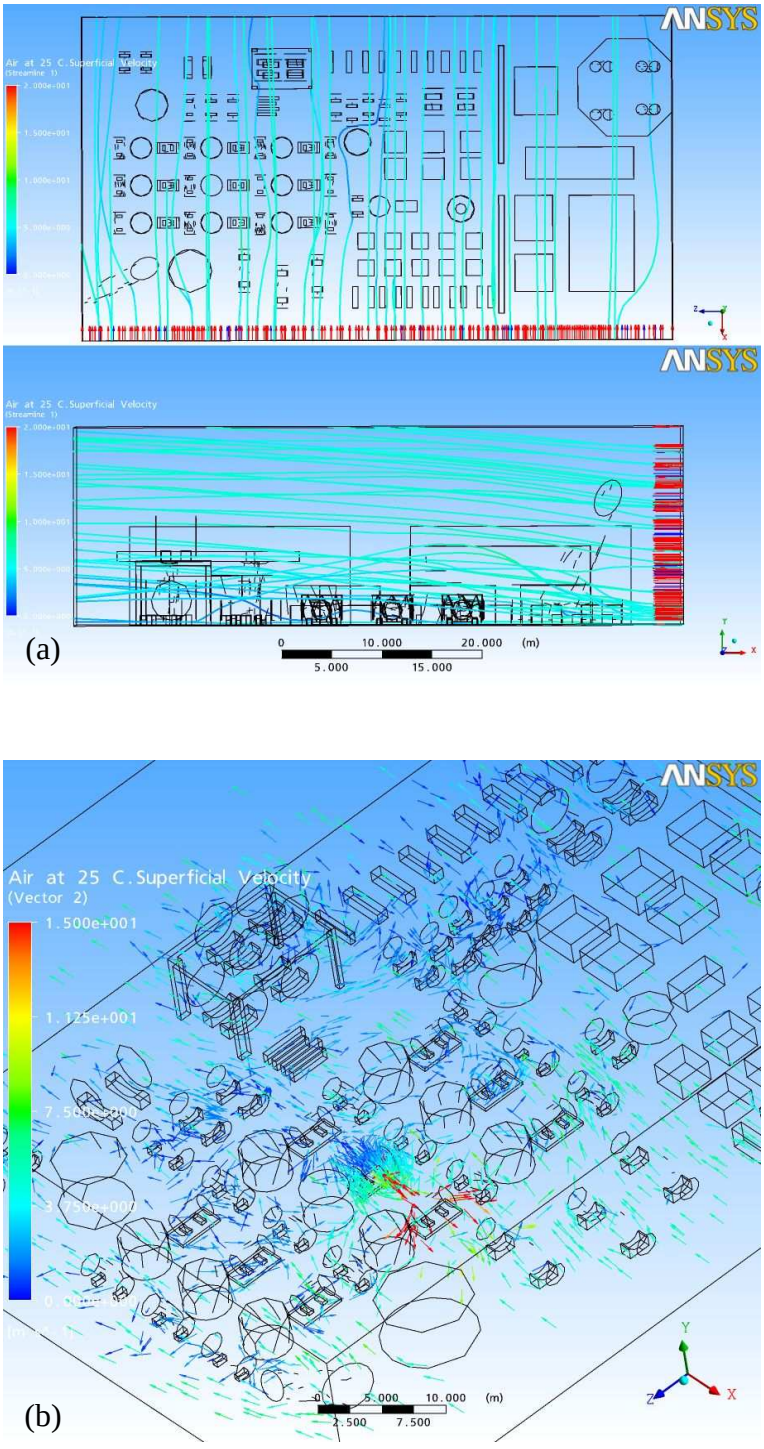


Figura. A.15 – Campo de escoamento do vento na direção Oeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

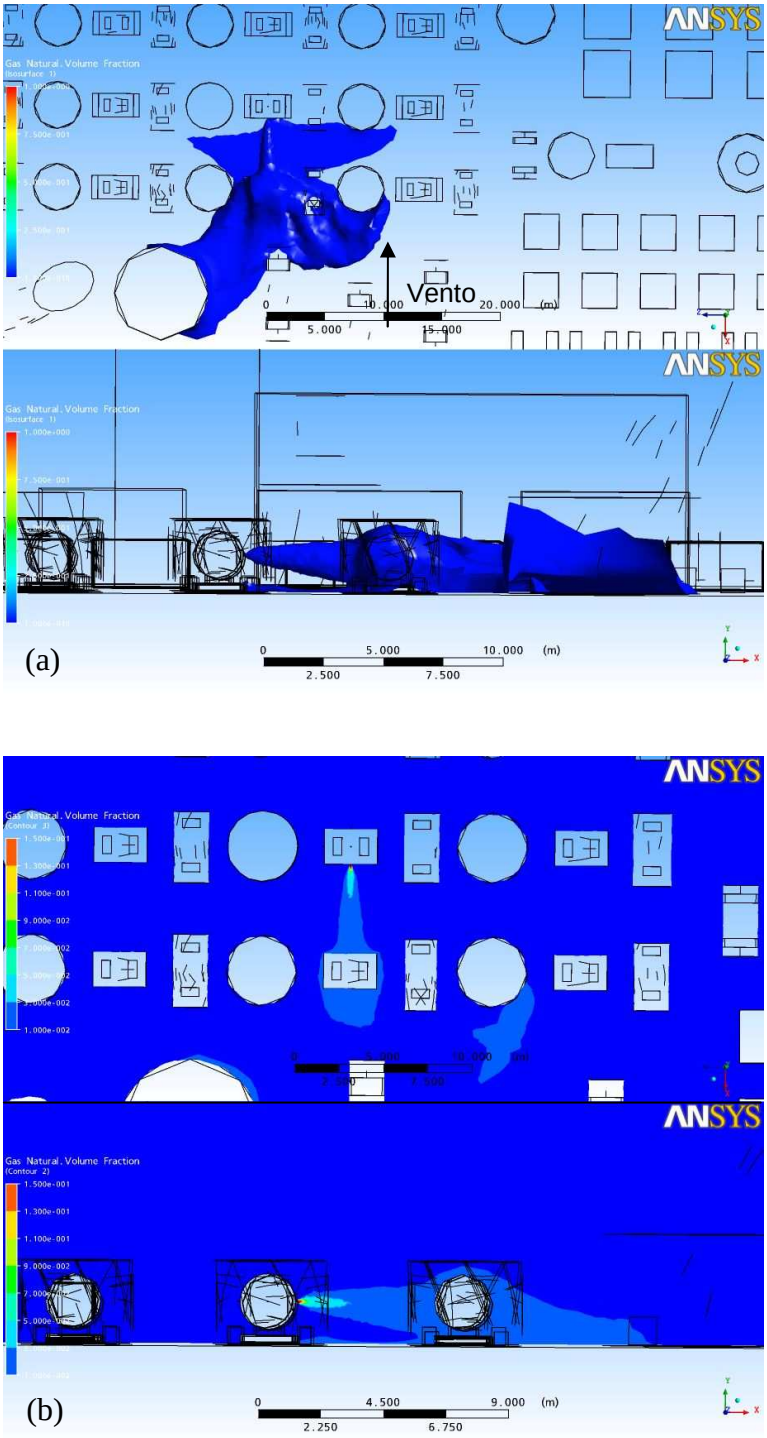


Figura. A.16 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Leste (X).

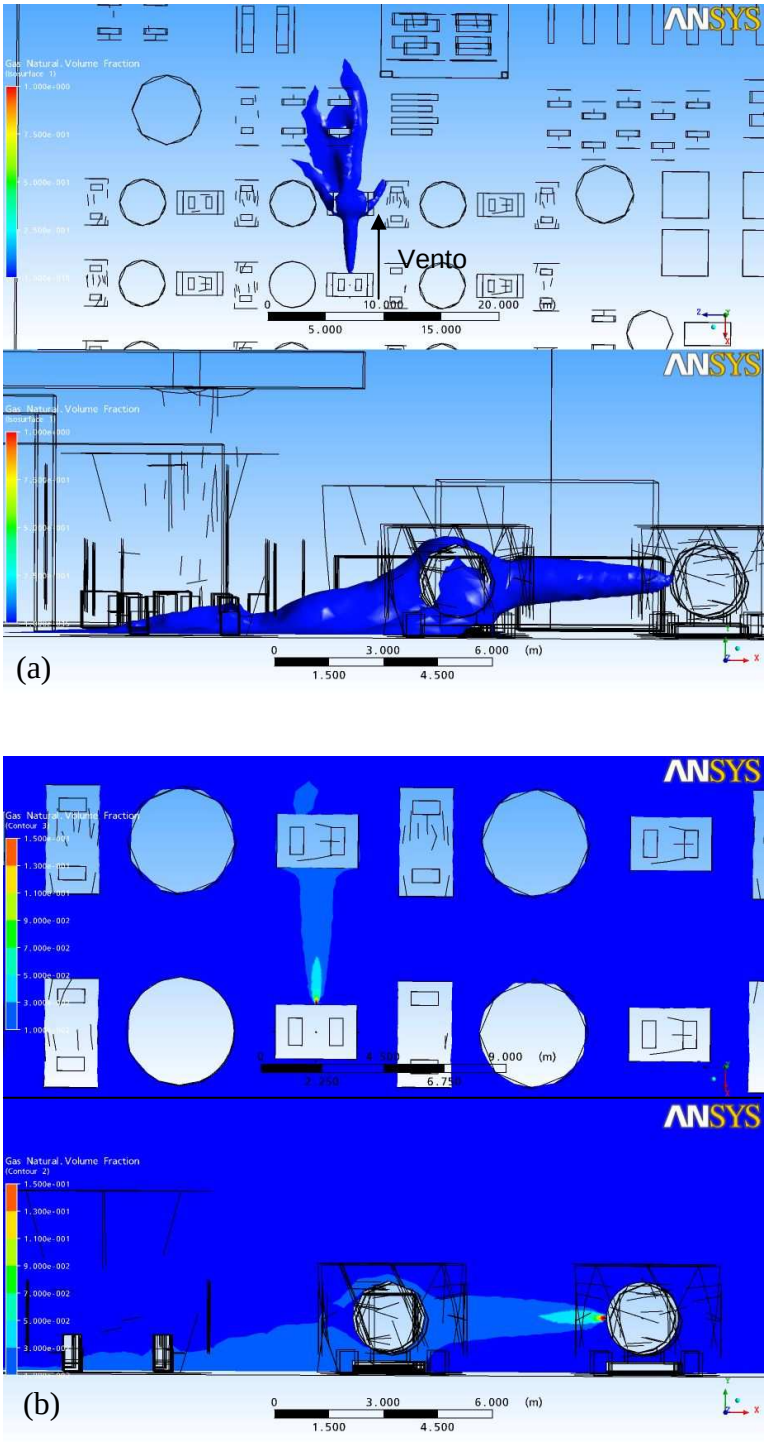


Figura. A.17 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Oeste (Xm).

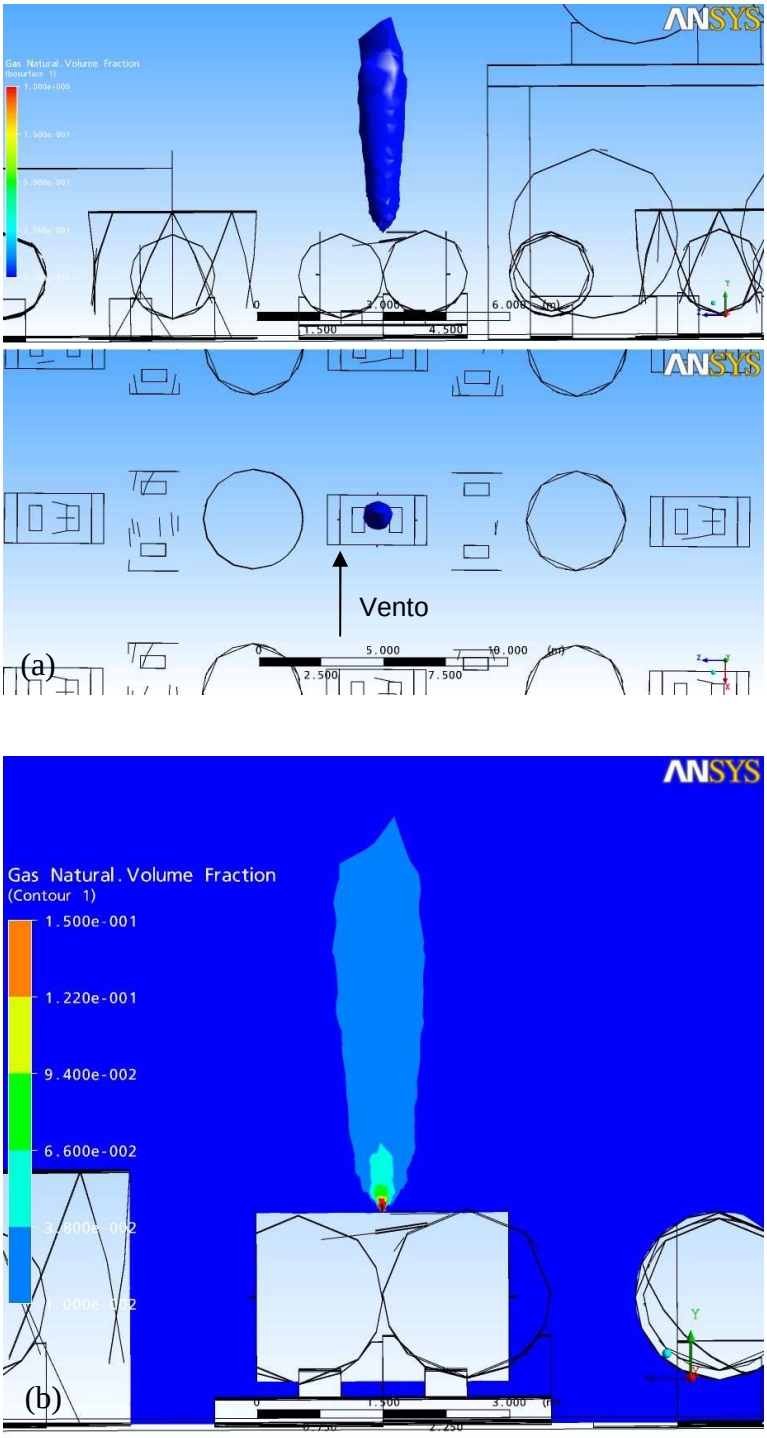


Figura. A.18 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Oeste e vazamento para cima (Y).

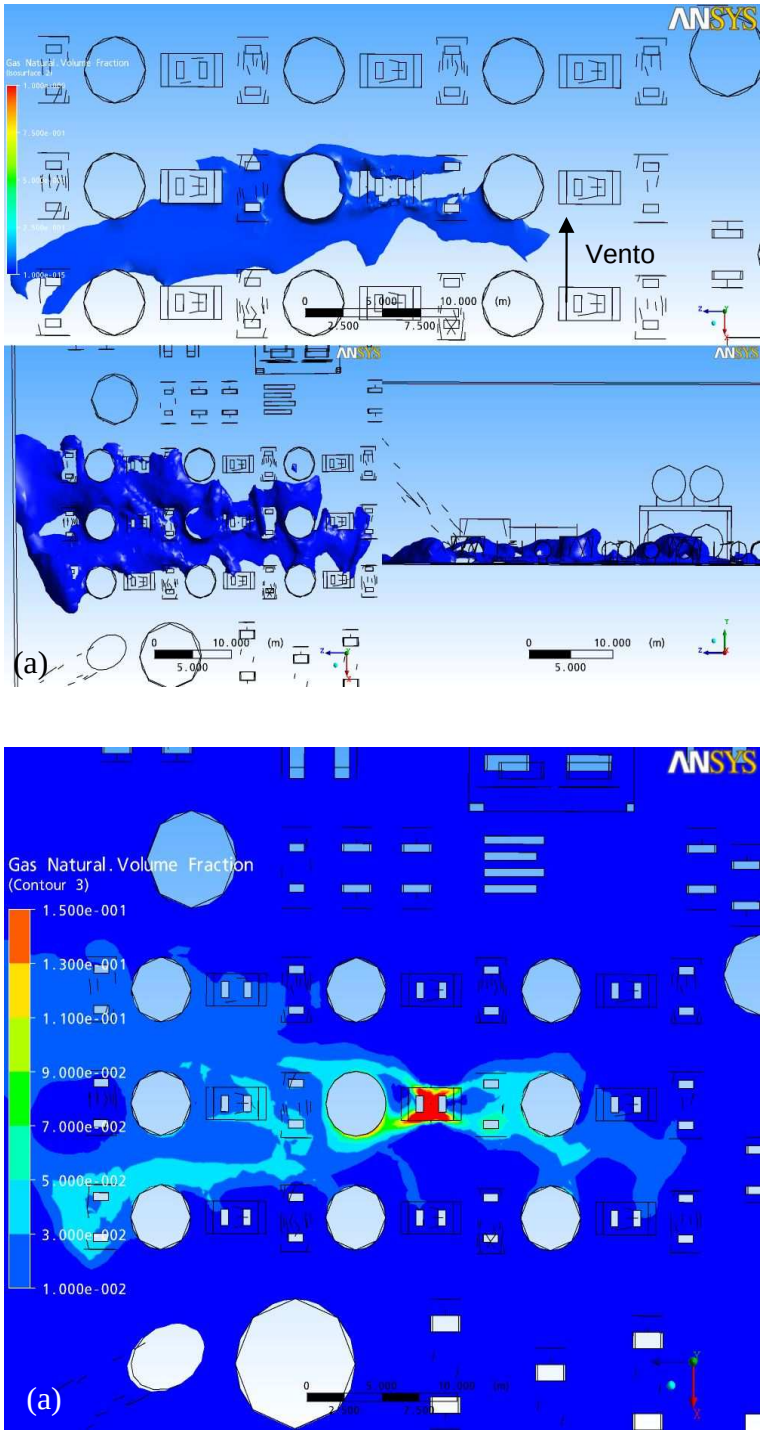


Figura. A.19 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Oeste e vazamento para baixo (Ym).

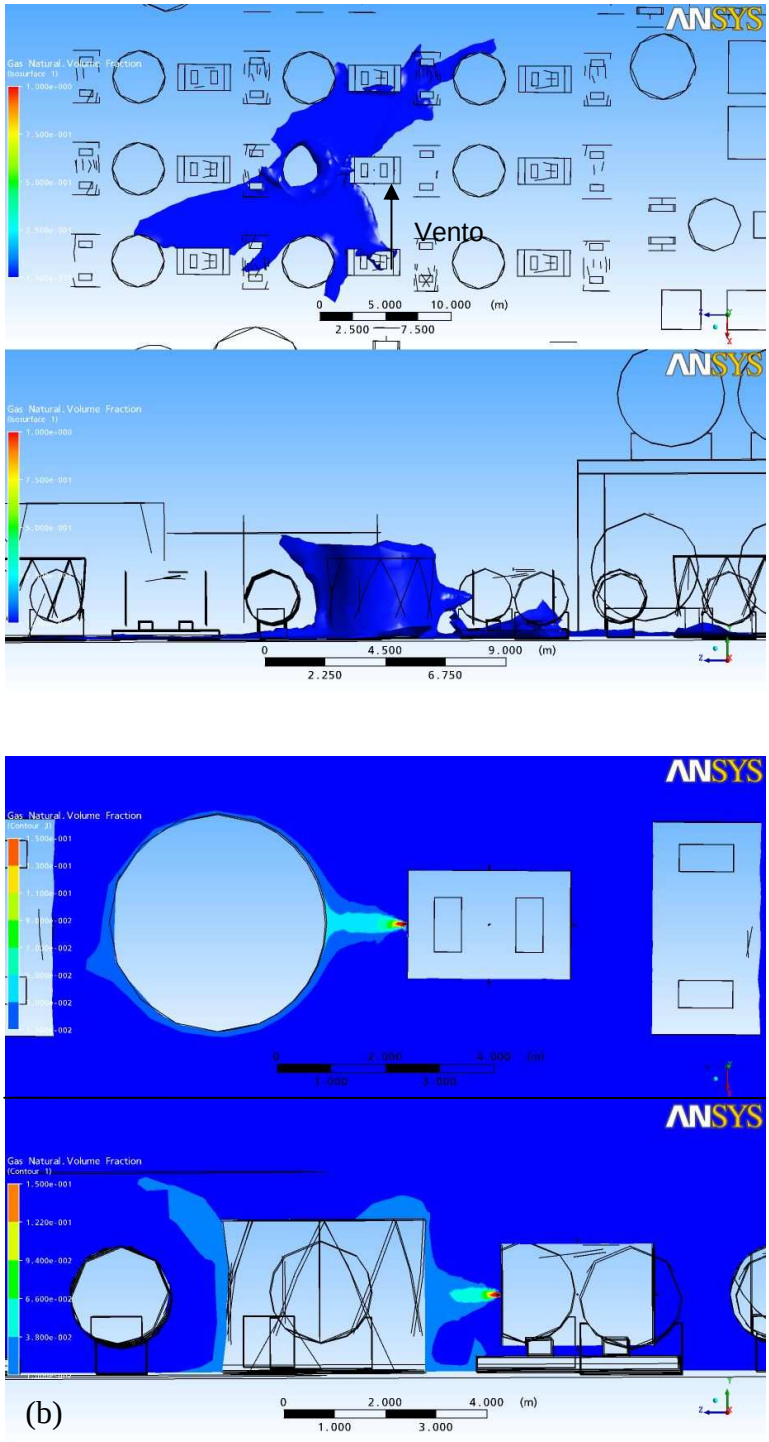


Figura. A.20 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Sul (Z).

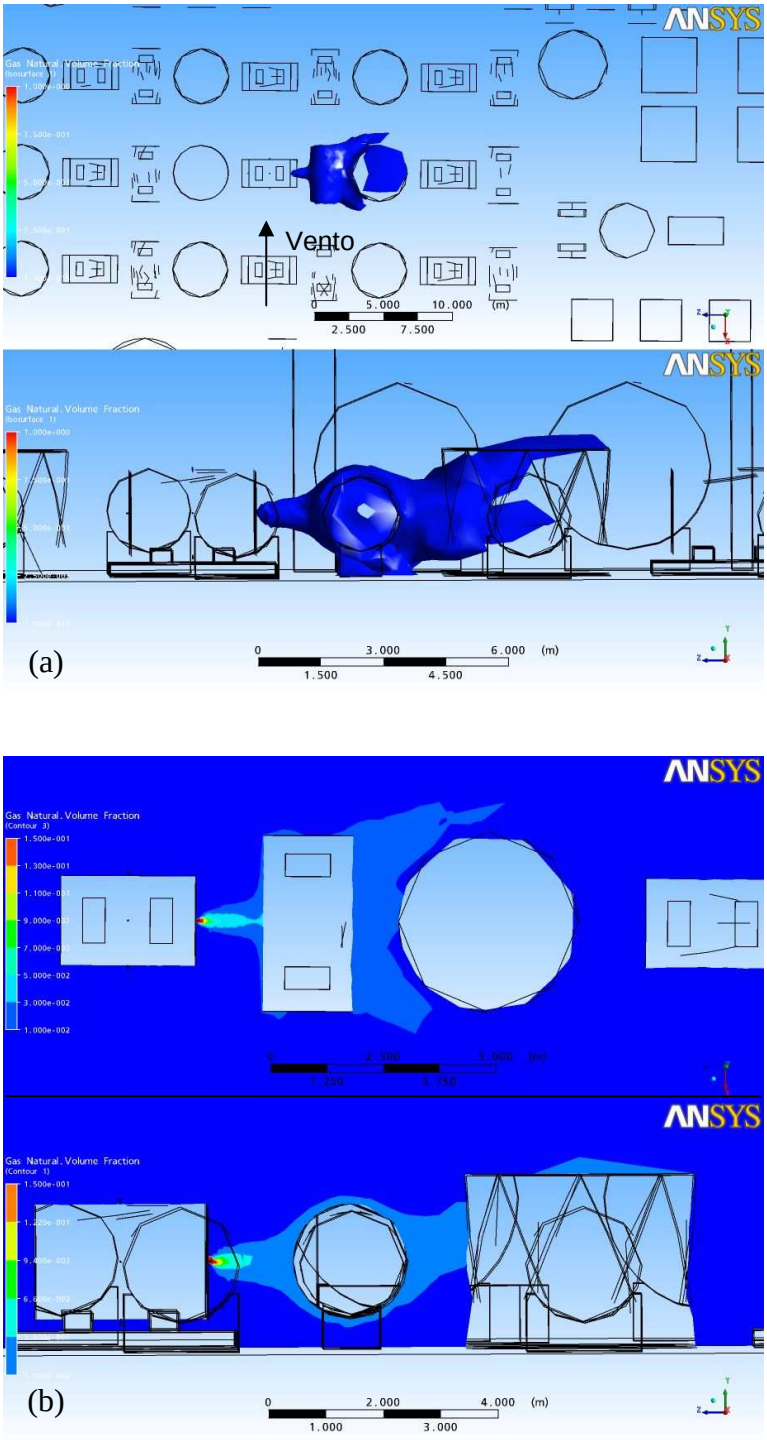


Figura. A.21 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Oeste e vazamento para Norte (Zm).

Juntamente com o vento Noroeste, o vento Oeste apresenta o menor impendimento geométrico no caminho até o compressor considerado crítico no estudo. Pela Figura A.15a percebe-se bastantes linhas de corrente atravessando a seção de compressão,

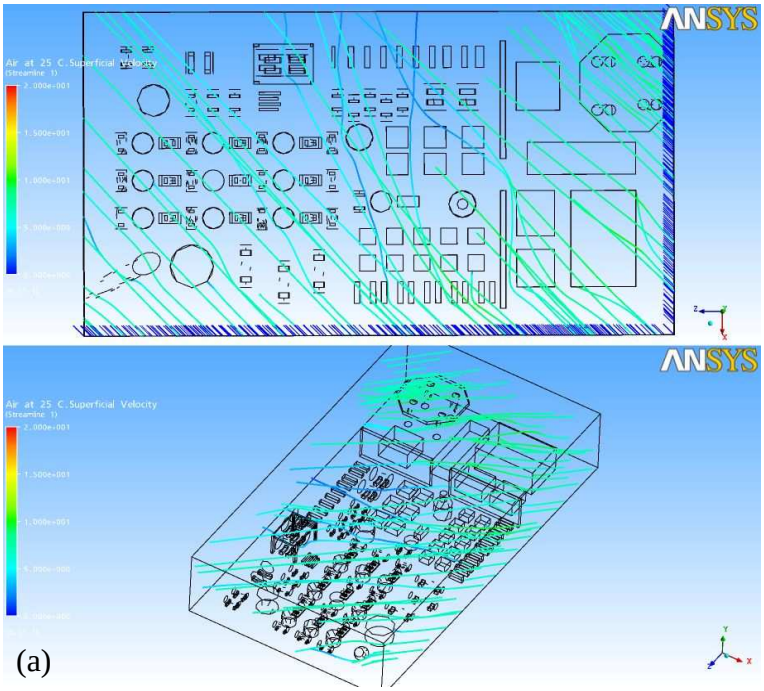
formando poucas zonas com pouca circulação, acúmulo ou recirculação de ar (Figura A.15b).

Tem-se mais uma vez, nuvens grandes para vazamentos contrários ao sentido do vento (Figura A.16), e pequenas para o oposto (Figura A.17). Aqui, pode-se observar também que a pluma detectável formada pela liberação gasosa para a direção Norte (Zm) é menor que para o vazamento para o Sul (Z), apesar de o vento estar escoando transversalmente as liberações.

A.4. Vento na Direção Sudoeste

O campo de escoamento do vento na direção Sudoeste, com velocidade de 6,99 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura A.22, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. A Figura B.2 apresenta o vetor do vento na direção Sudoeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção.

As Figuras A.23 a A.28 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.



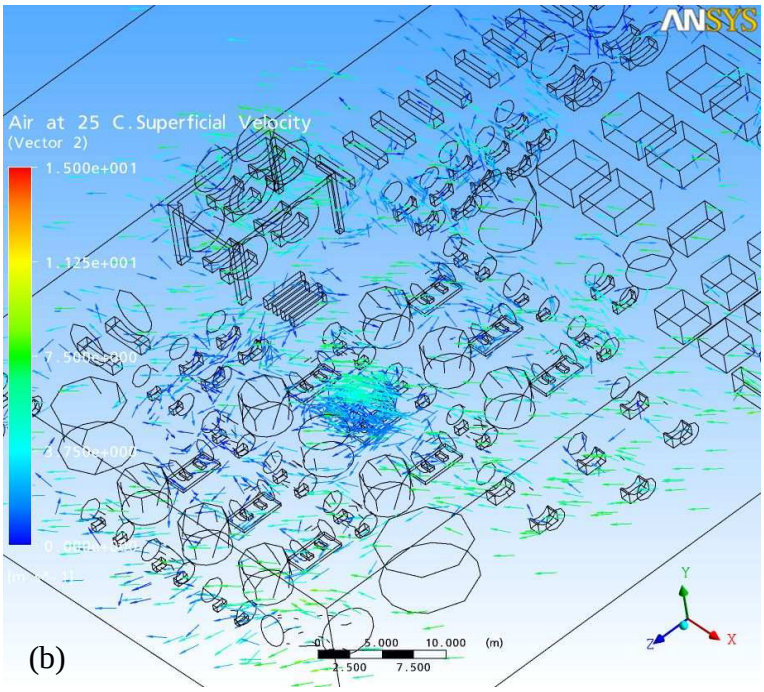


Figura. A.22 – Campo de escoamento do vento na direção Sudoeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

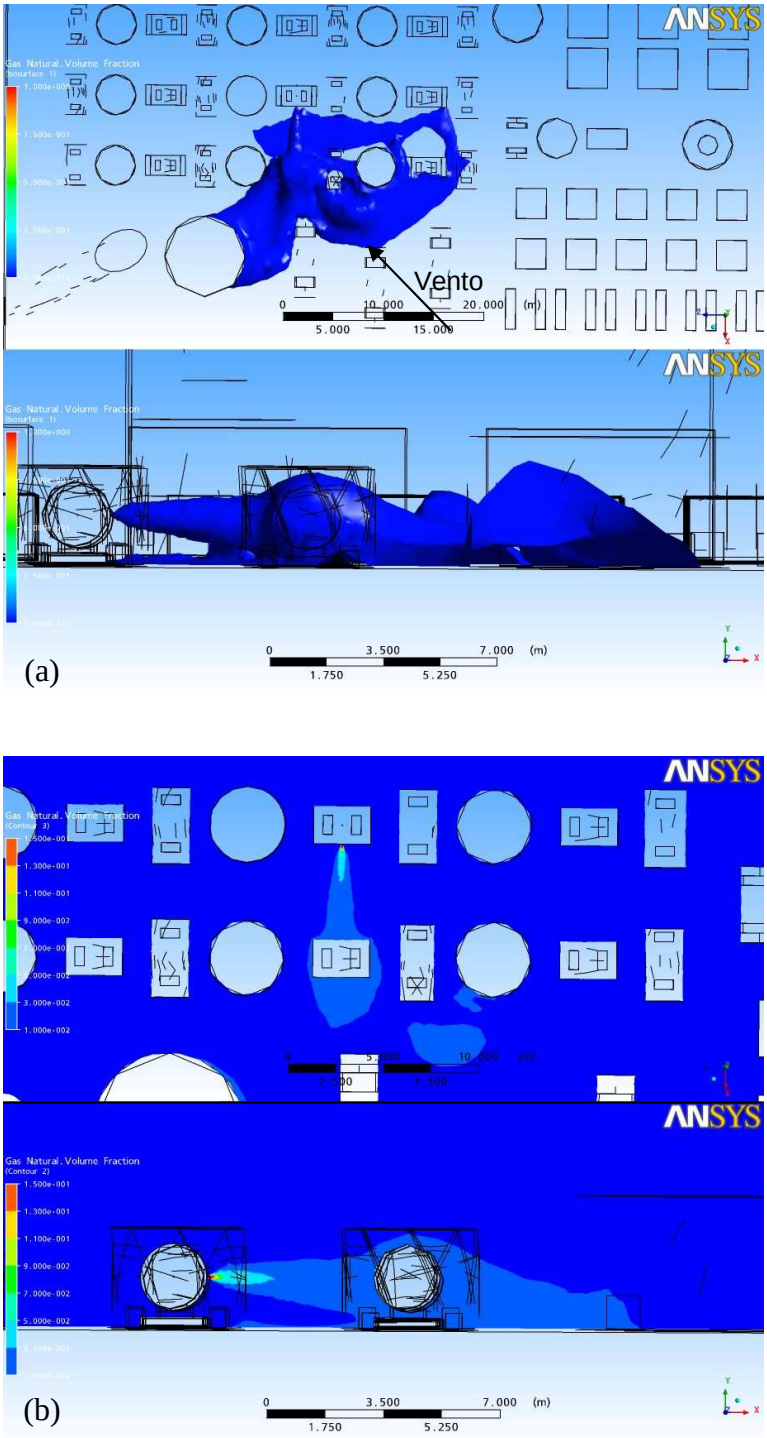


Figura. A.23 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Leste (X).

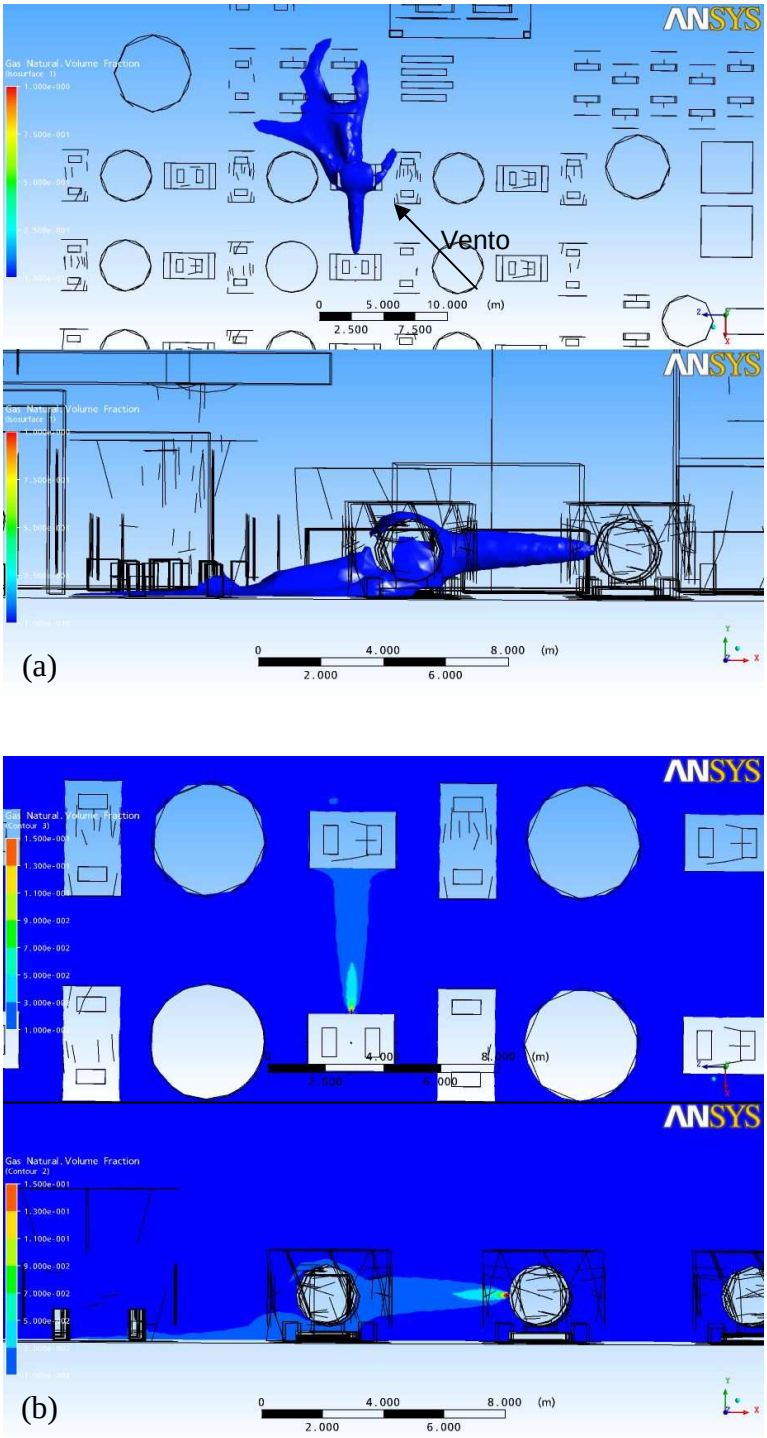


Figura. A.24 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Oeste (Xm).

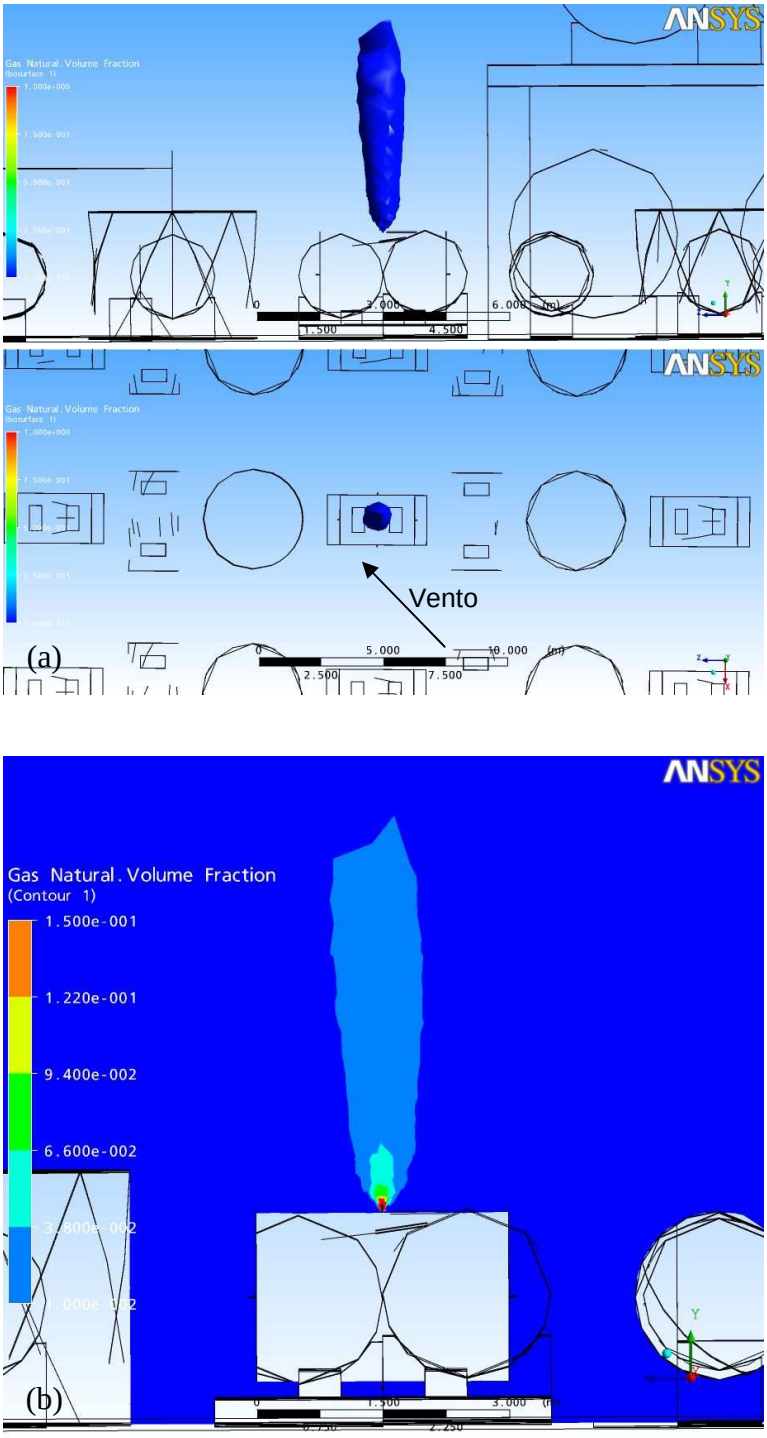
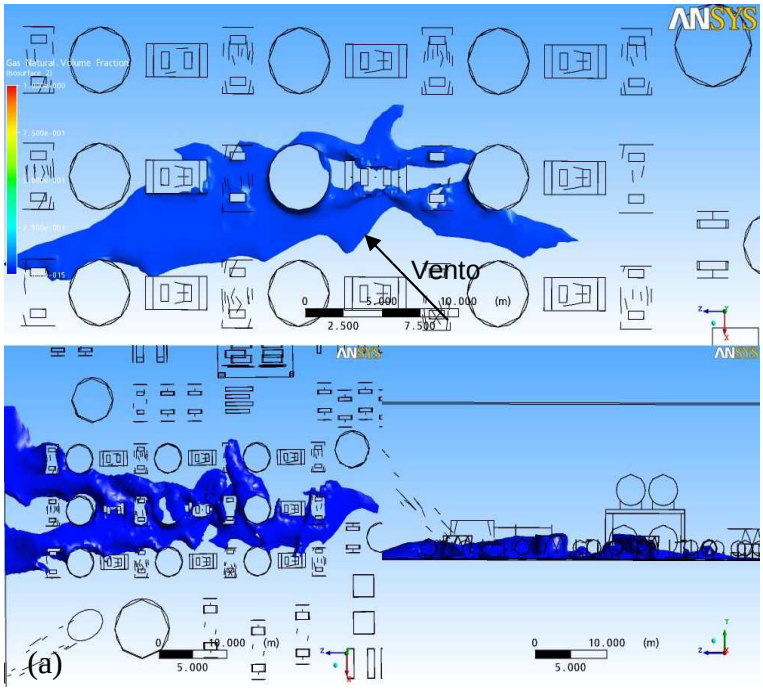


Figura. A.25 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para cima (Y).



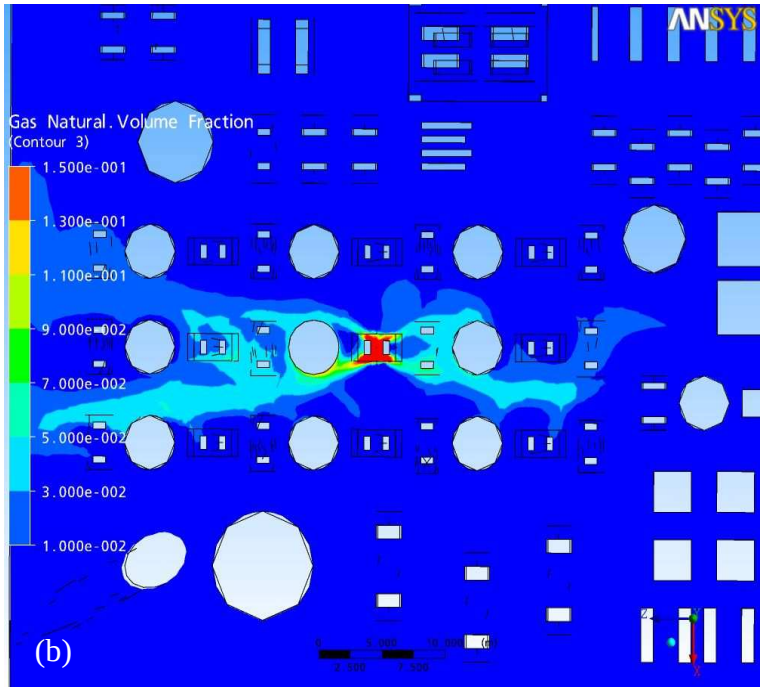


Figura. A.26 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sudoeste e vazamento para baixo (Ym).

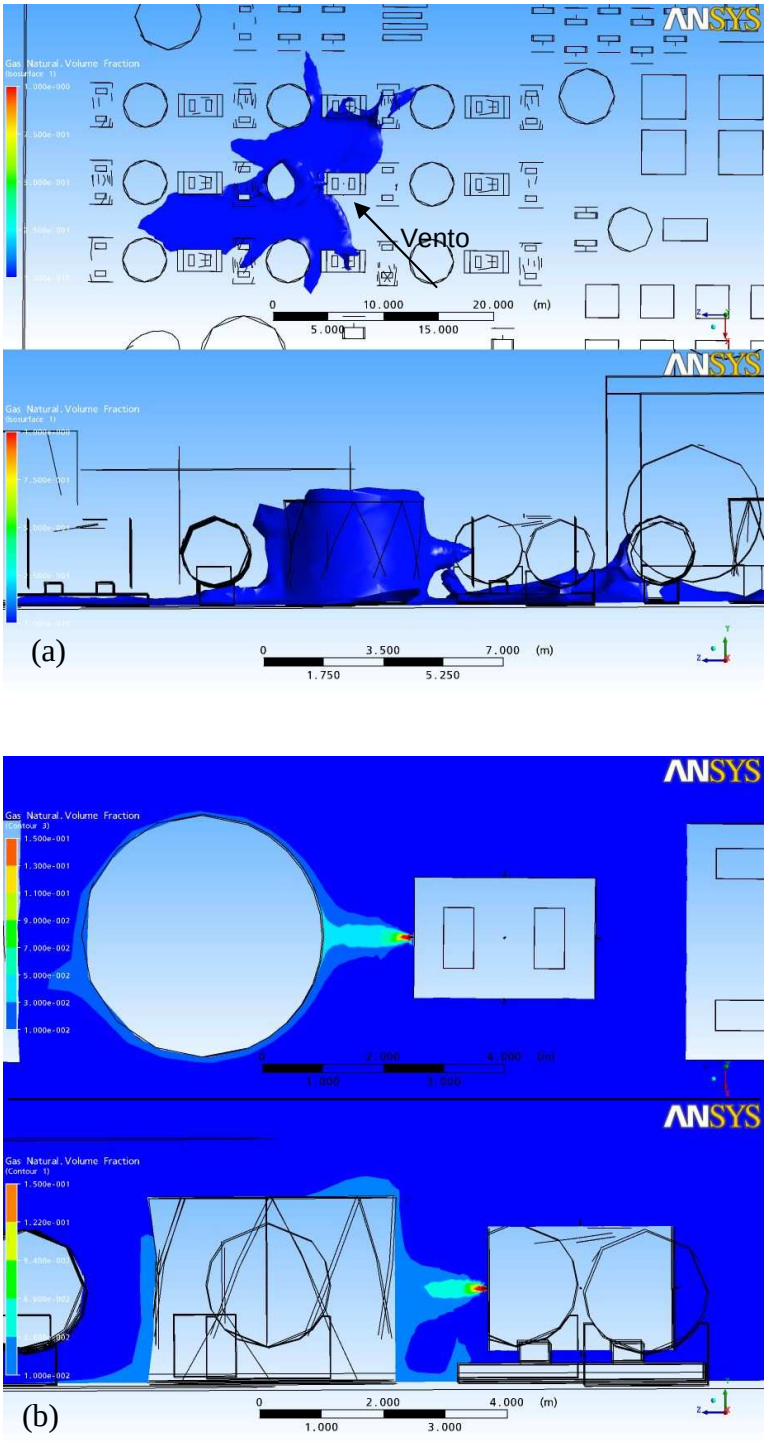


Figura. A.27 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Sul (Z).

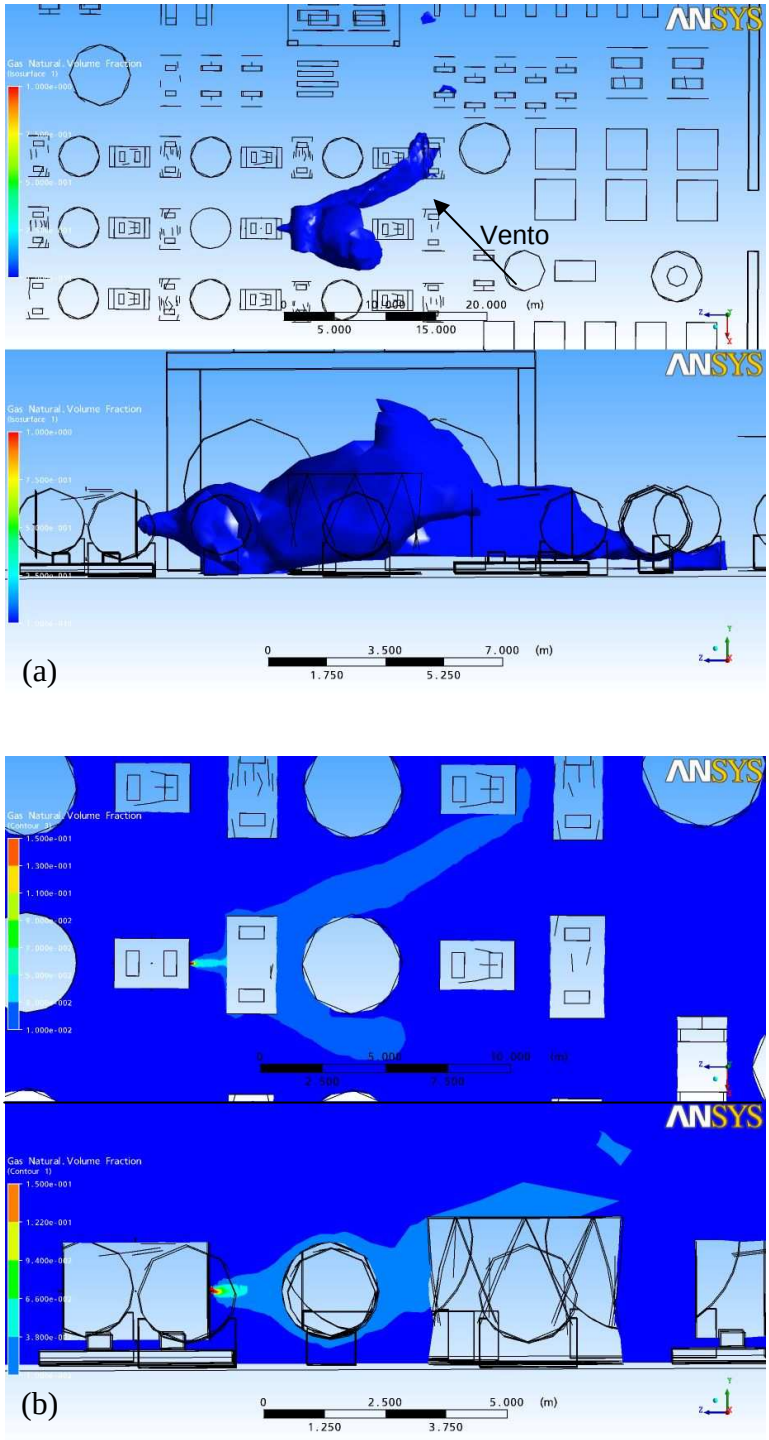


Figura. A.28 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudoeste e vazamento para Norte (Zm).

Analisando a Figura A.22 vê-se que apesar dos impedimentos que a geometria da plataforma oferece ao escoamento do ar, principalmente através das *fire-walls*, isso não o atrapalha como mostra as linhas de corrente e vetores na região de compressão.

Uma observação relevante é que esta direção de vento apresentou o maior número de cenários identificados pela rede de detectores equidistantes de 5 m apresentada inicialmente, o que pode ser confirmado pela Tabela 8.3, ou seja, até mesmo o vazamento para o Norte (Zm) foi identificado pela malha mostrada na Figura 8.34, com sua pluma atingindo mais de 5 m de altura.

A.5. Vento na Direção Noroeste

O campo de escoamento do vento na direção Noroeste, com velocidade de 4,78 m/s, ao longo do domínio da plataforma é o mesmo apresentado na Figura 8.27. A Figura B.3 apresenta o vetor do vento na direção Noroeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção.

As Figuras A.29 a A.34 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.

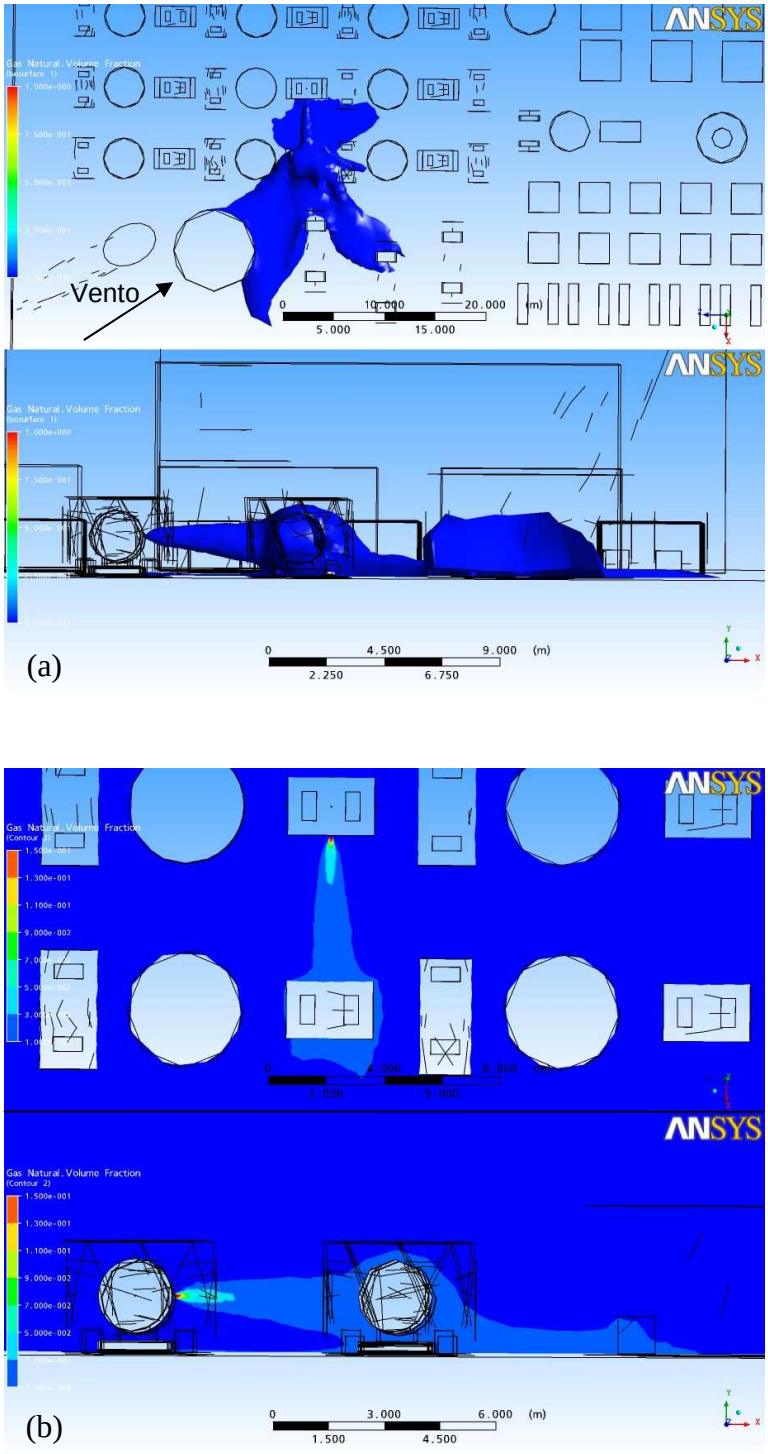
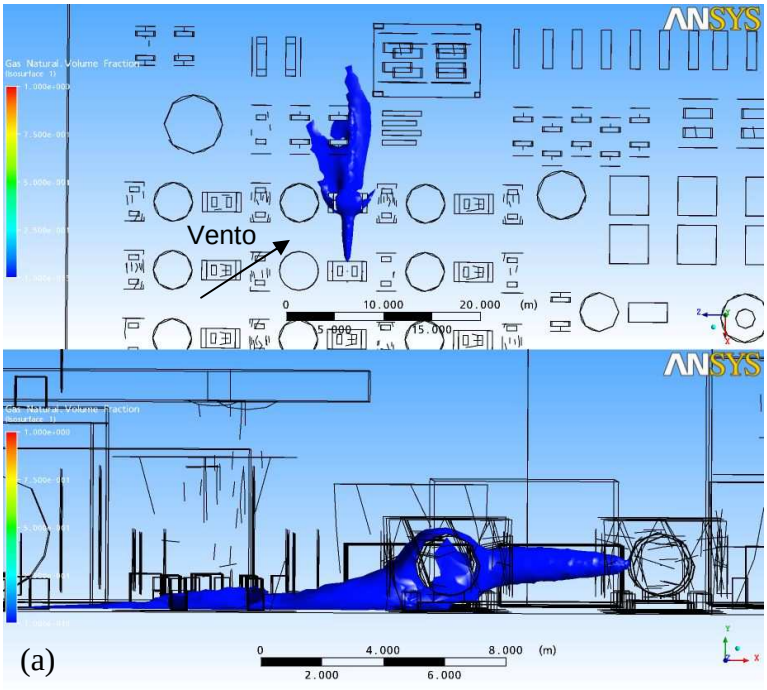


Figura. A.29 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Leste (X).



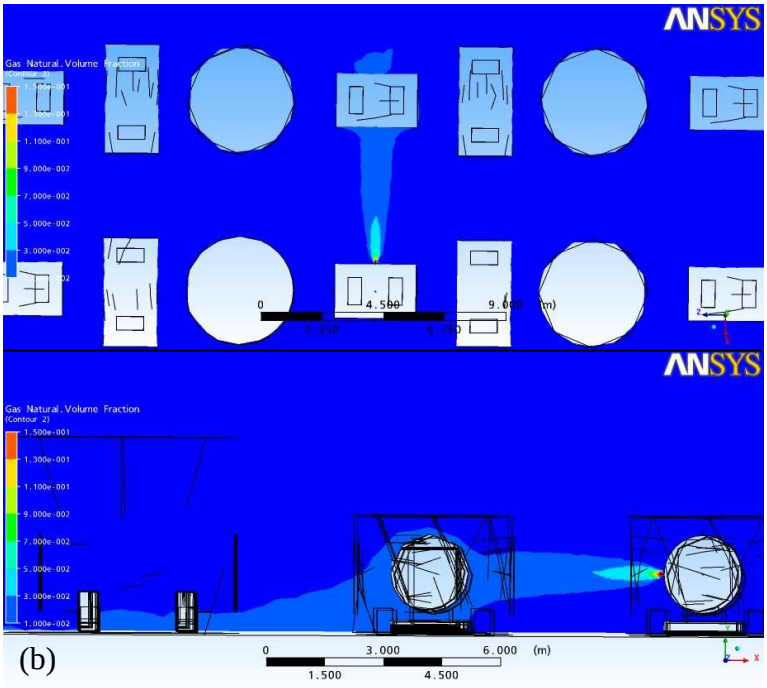


Figura. A.30 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Oeste (Xm).

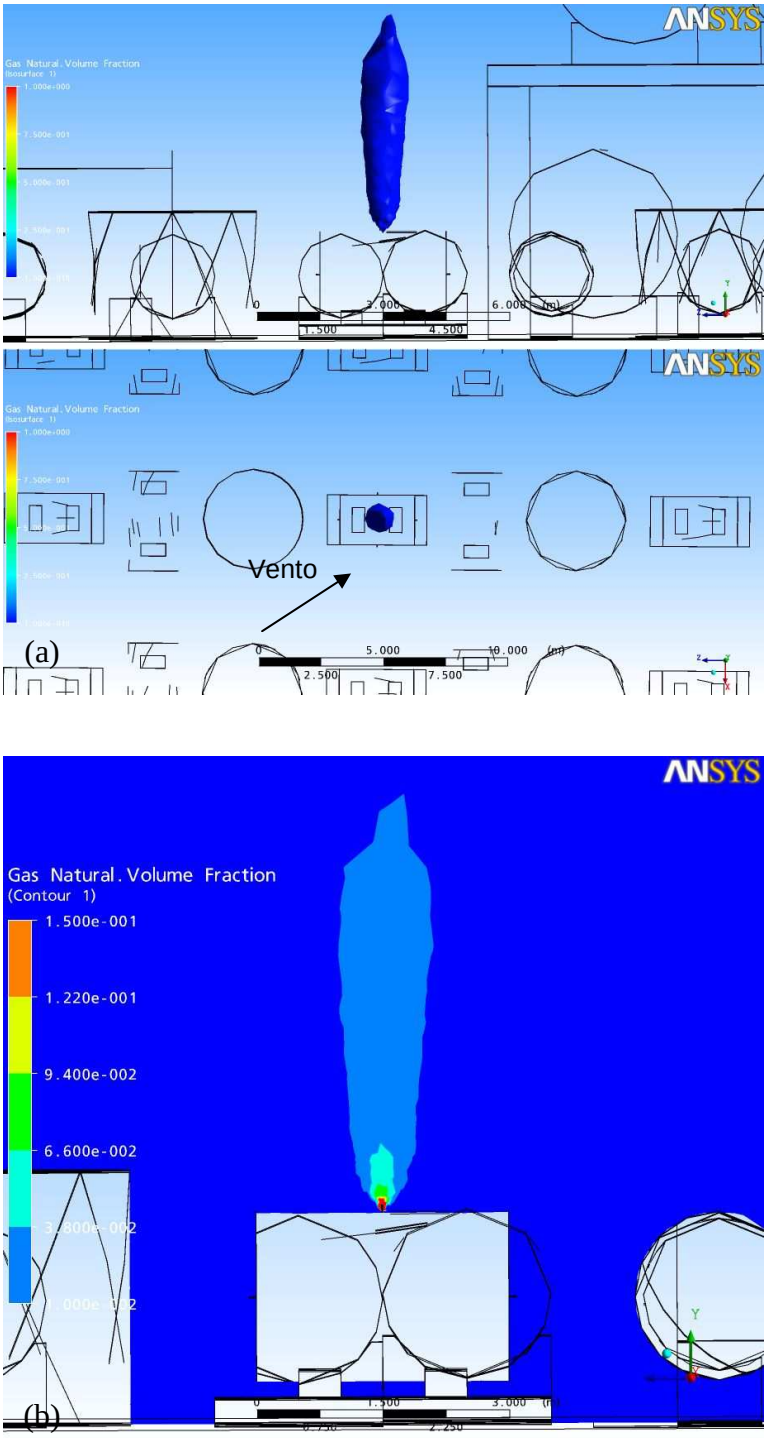
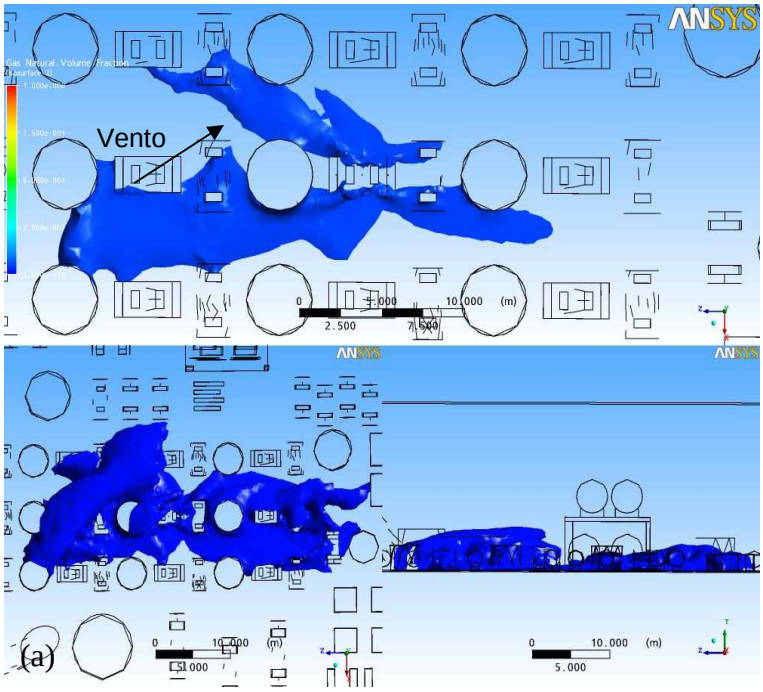


Figura. A.31 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para cima (Y).



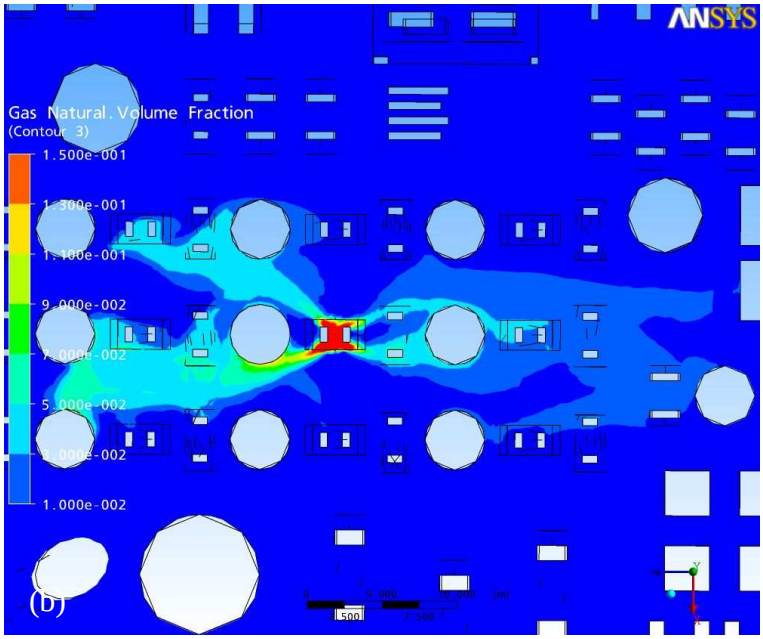


Figura. A.32 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Noroeste e vazamento para baixo (Ym).

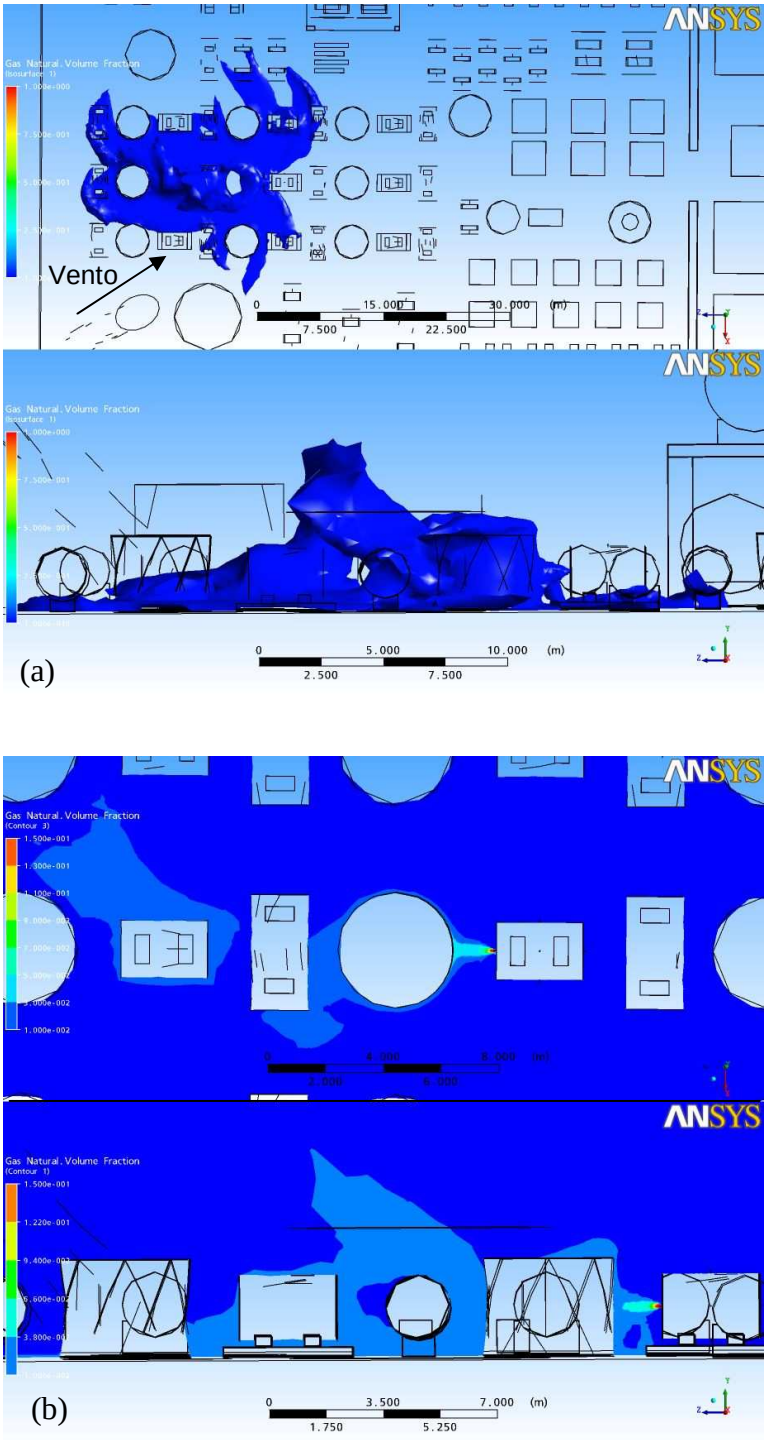


Figura. A.33 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Sul (Z).

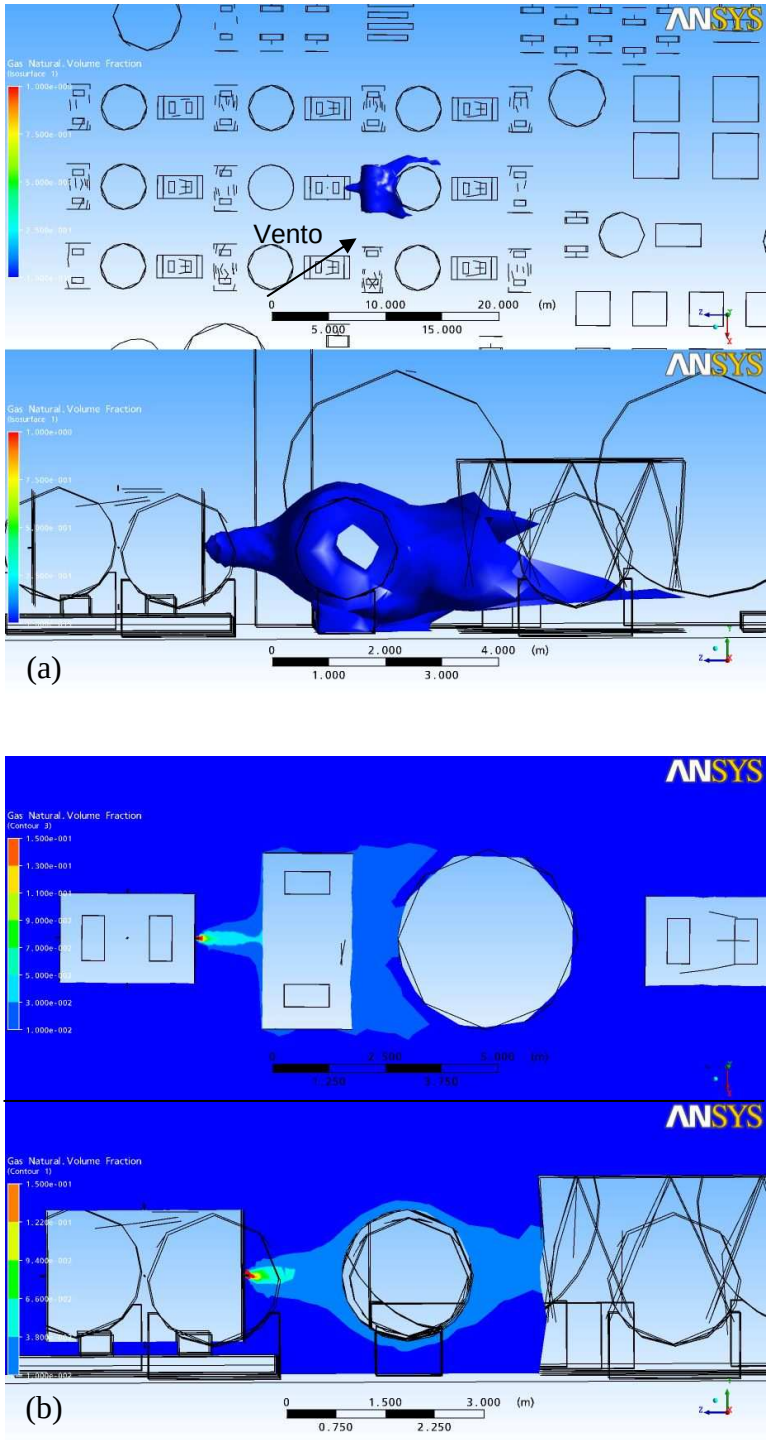


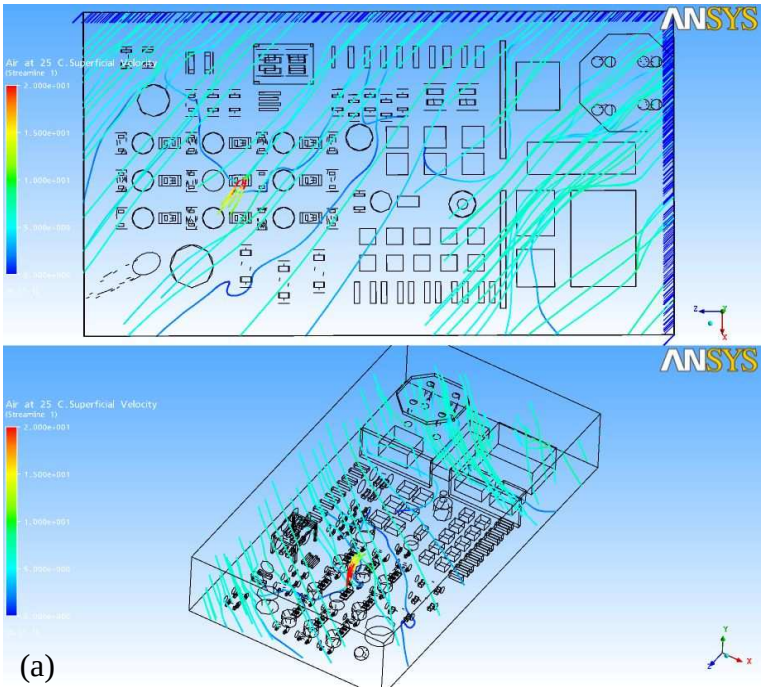
Figura. A.34 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Noroeste e vazamento para Norte (Zm).

O que pode ser destacado para esta direção de vento é a grande elevação atingida pela nuvem gasosa na concentração detectável gerada pelo vazamento na diração Sul (Figura A.33), chegando a mais de 7 m.

A.6. Vento na Direção Sudeste

O campo de escoamento do vento na direção Sudeste, com velocidade de 6,10 m/s, ao longo do domínio da plataforma é apresentado na Figura A.35, nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade. A Figura B.4 apresenta o vetor do vento na direção Sudeste, formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção.

As Figuras A.36 a A.41 mostram (a) as vistas superior e lateral das nuvens de gás com concentrações dentro do limite de alarme dos detectores, ou seja, 20% do LEL ou 1% vol. e, no caso de vazamento para baixo, a vista superior da pluma de concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade, ou seja, de 5% a 15% vol., e (b) os contornos cortes vertical e/ou horizontal das nuvens.



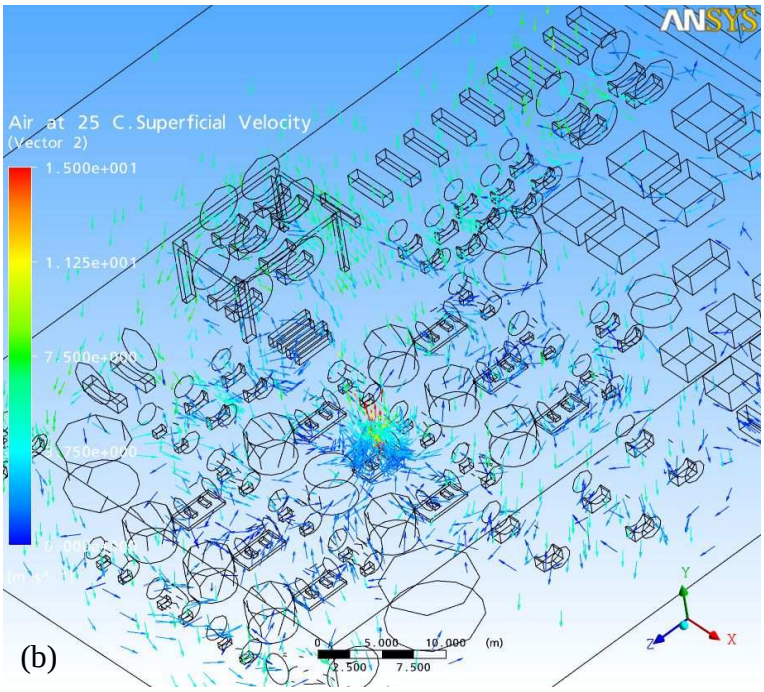


Figura. A.35 – Campo de escoamento do vento na direção Sudeste nas formas de (a) linhas de corrente e (b) vetores velocidade.

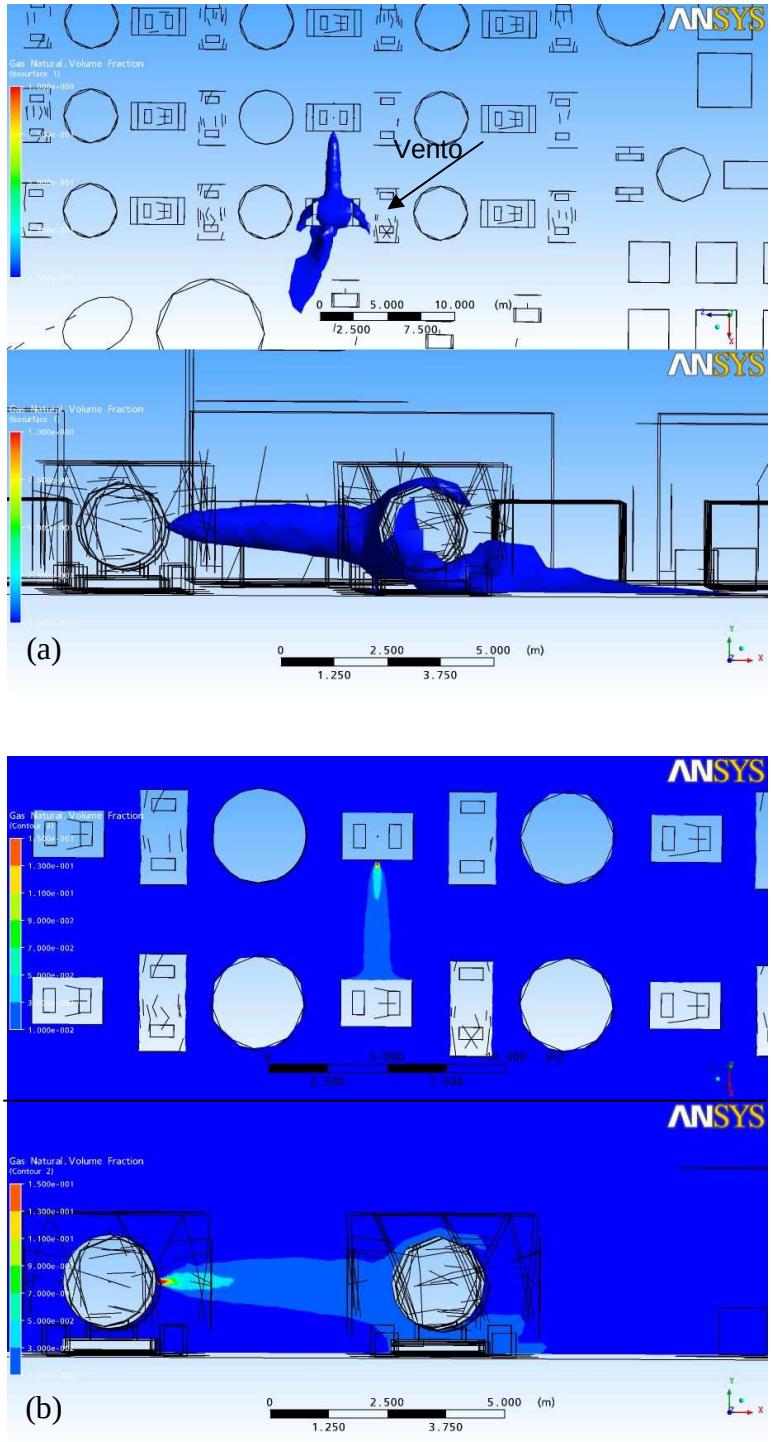


Figura. A.36 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Leste (X).

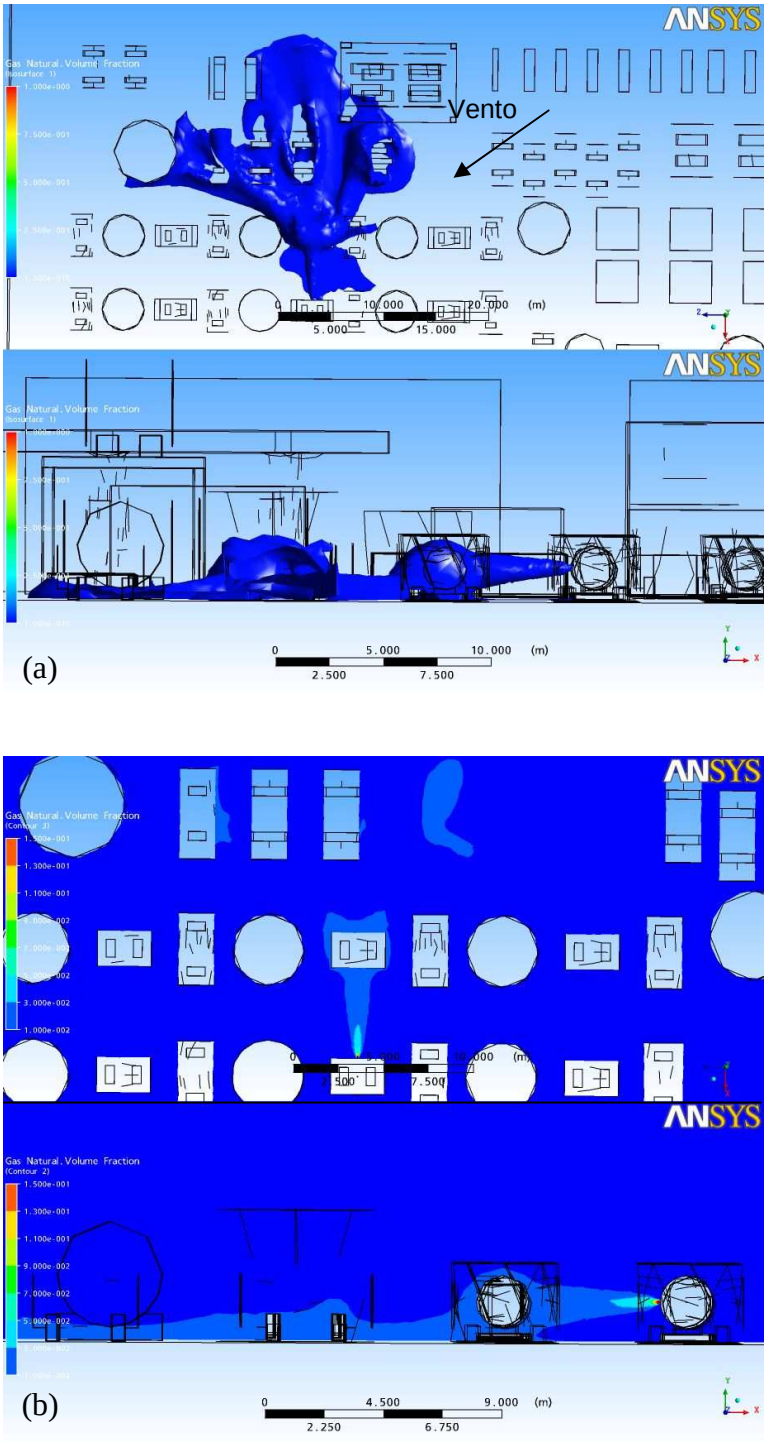


Figura. A.37 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Oeste (Xm).

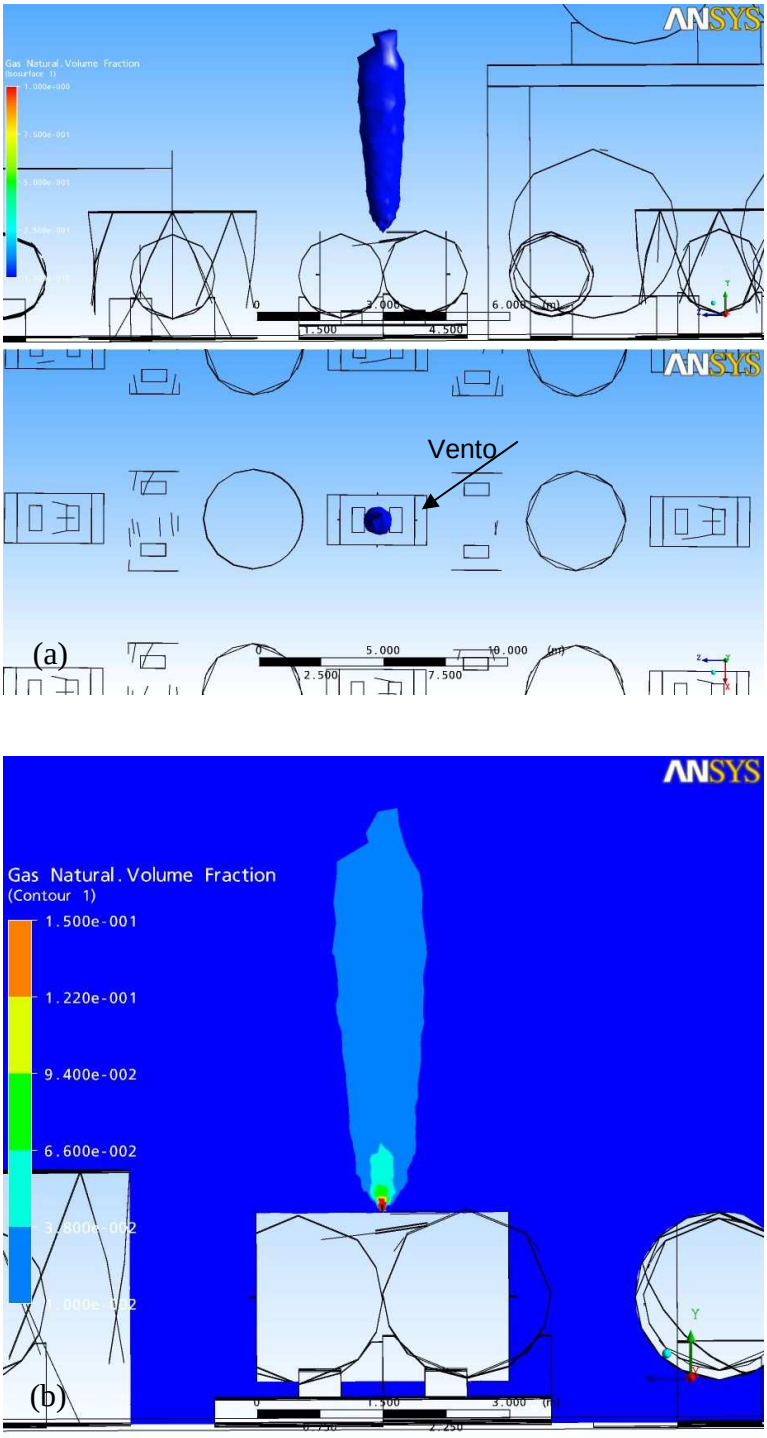


Figura. A.38 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com corte vertical da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para cima (Y).

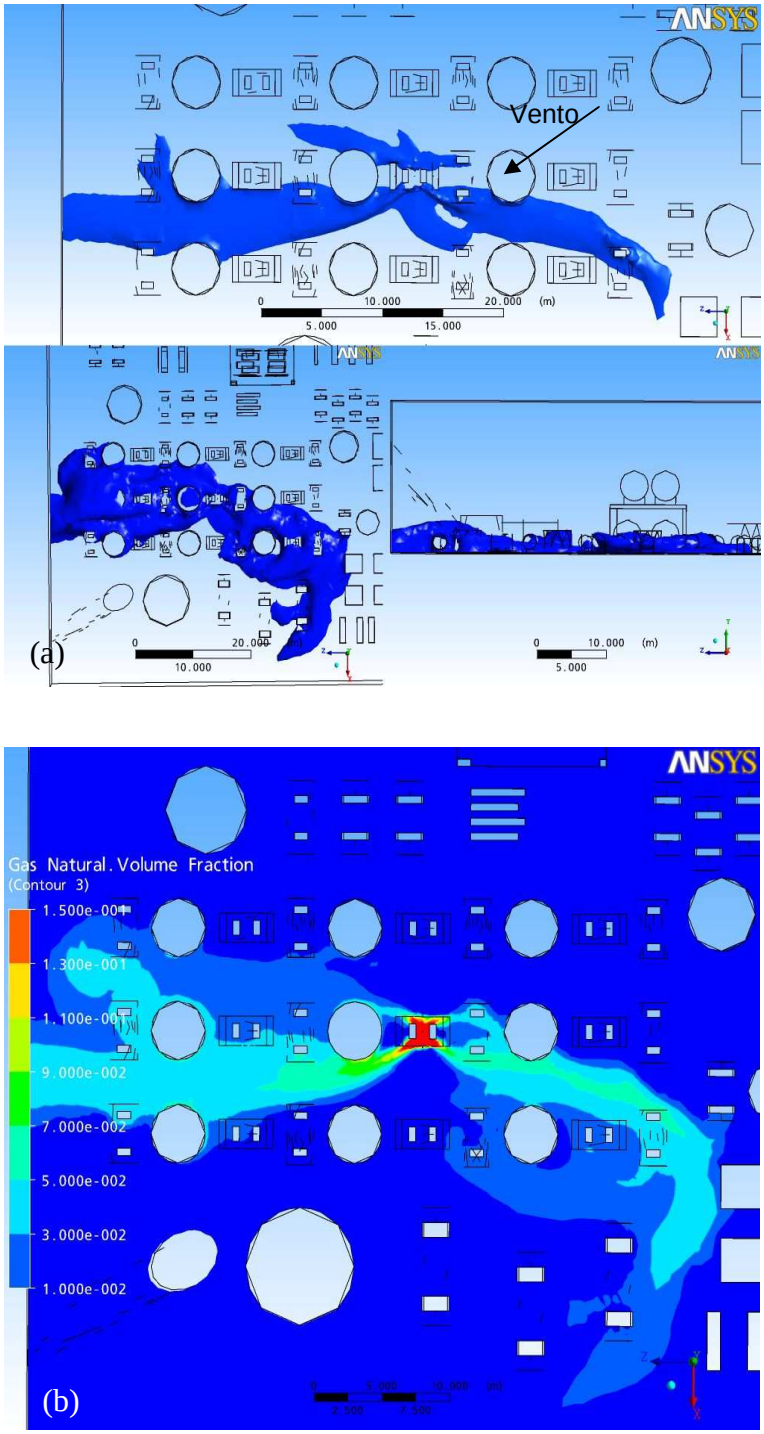


Figura. A.39 – (a) Isosuperfícies com concentrações dentro dos limites inferior e superior de explosividade (em cima) e no limite de alarme dos detectores, e (b) contorno com corte horizontal da nuvem a 0,3 m do piso, para vento Sudeste e vazamento para baixo (Ym).

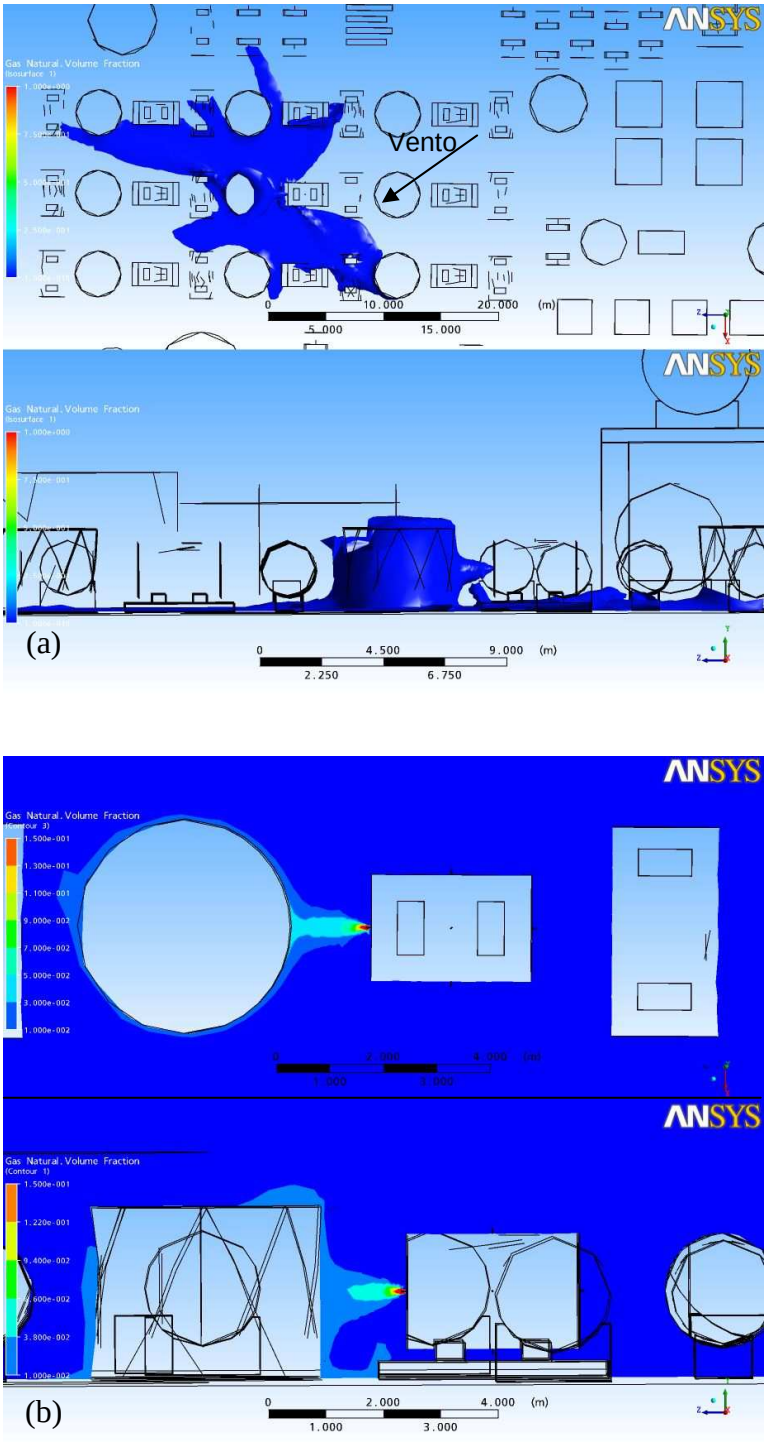


Figura. A.40 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes vertical e horizontal da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Sul (Z).

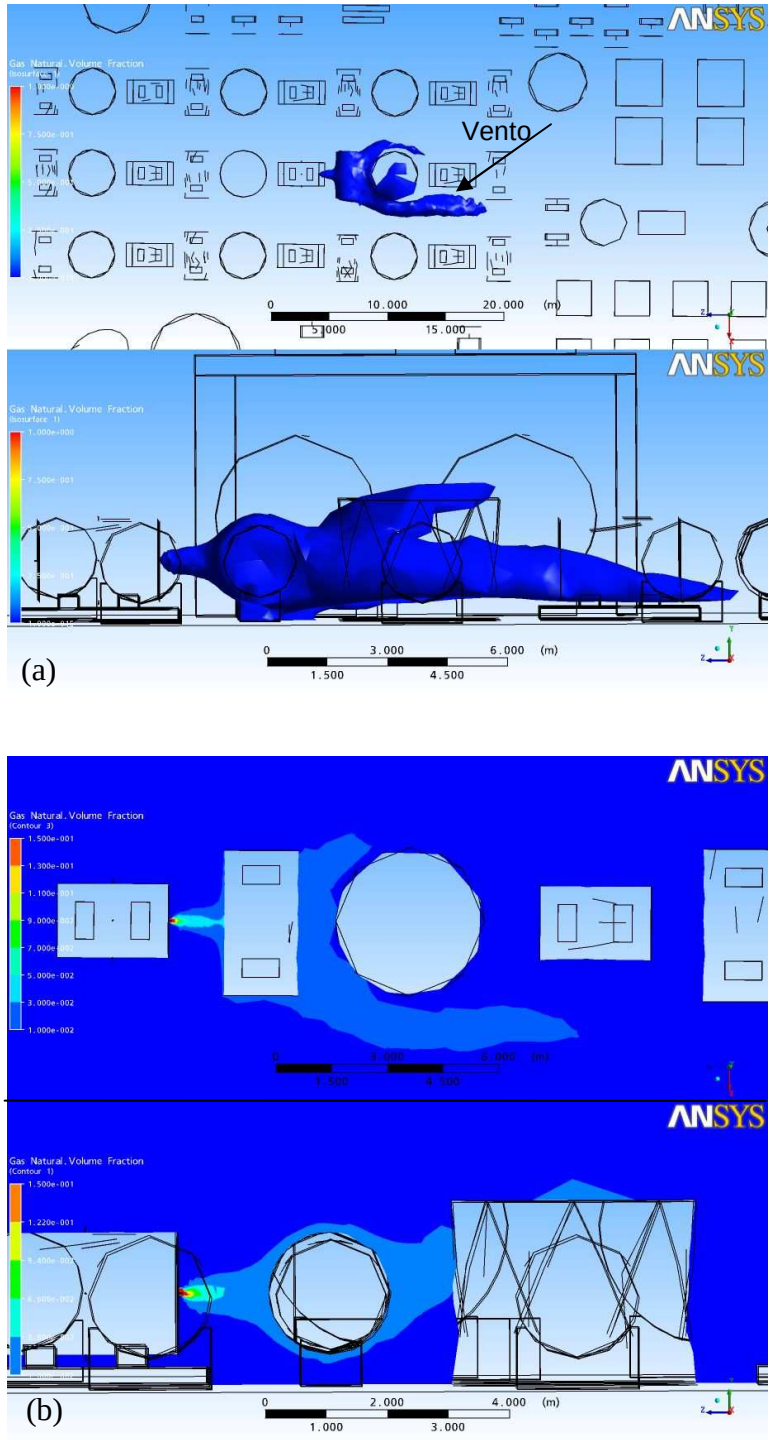


Figura. A.41 – (a) Isosuperfície com concentração no limite de alarme dos detectores e (b) contornos com cortes horizontal e vertical da nuvem, para vento Sudeste e vazamento para Norte (Zm).

Como mostra as linhas de corrente (Figura A.35a), assim como no vento na direção Sudoeste, os impedimentos que a geometria da plataforma oferece, principalmente as *fire-walls*, não atrapalharam o escoamento do ar. Porém, pela Figura A.35b que

apresenta os vetores velocidade para o escoamento do vento, observa-se que na região de compressão, mais a Noroeste da plataforma, existem zonas de recirculação de ar com baixas velocidades, o que contribuiu para estagnação do gás vazado em certas liberações, como para as direções Leste (X) e Sul (Z).

ANEXO B

Este anexo apresenta a composição dos vetores velocidade dos ventos nas direções Nordeste, Sudoeste, Noroeste, Sudeste e vento Noroeste fraco (Pupe *et al.*, 2006), necessária para a entrada dos dados do campo de velocidade no CFX 11.0.

B.1. Vento na Direção Nordeste

O vetor do vento na direção Nordeste, com velocidade de 8,22 m/s, foi formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção, respectivamente, vetores na direção Norte e Leste, ambos com 5,81 m/s. A Figura B.1 ilustra essa composição.

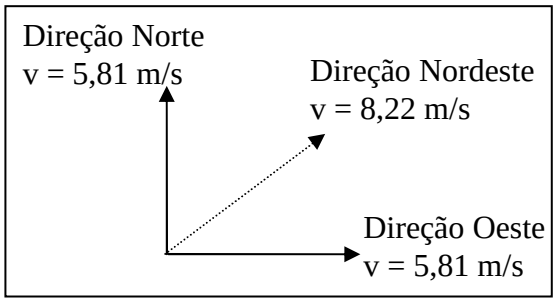


Figura. B.1 - Composição do vetor do vento na direção Nordeste.

B.2. Vento na Direção Sudoeste

O vetor do vento na direção Sudoeste, com velocidade de 6,99 m/s, foi formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção, respectivamente, vetores na direção Sul e Oeste, ambos com 4,94 m/s. A Figura B.2 ilustra essa composição.

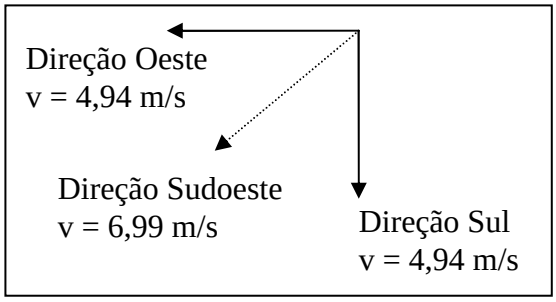


Figura. B.2 - Composição do vetor do vento na direção Sudoeste.

B.3. Vento na Direção Noroeste

O vetor do vento na direção Noroeste, com velocidade de 4,78 m/s, foi formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção, respectivamente, vetores na direção Norte e Oeste, ambos com 4,78 m/s. A Figura B.3 ilustra essa composição.

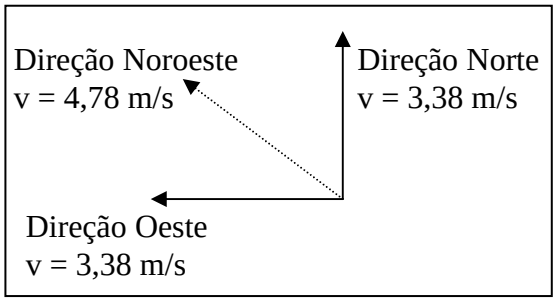


Figura. B.3 - Composição do vetor do vento na direção Noroeste.

B.4. Vento na Direção Sudeste

O vetor do vento na direção Sudeste, com velocidade de 6,10 m/s, foi formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção, respectivamente, vetores na direção Sul e Leste, ambos com 4,31 m/s. A Figura B.4 ilustra essa composição.

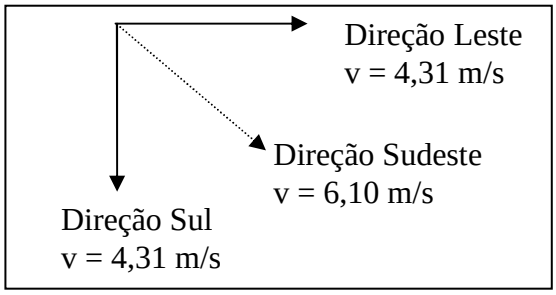


Figura. B.4 - Composição do vetor do vento na direção Sudeste.

B.5. Vento Fraco na Direção Noroeste

O vetor do vento na direção Noroeste, com velocidade de 0,50 m/s, foi formado a partir da composição dos vetores normais a esta direção, respectivamente, vetores na direção Norte e Oeste, ambos com 0,35 m/s. A Figura B.5 ilustra essa composição.

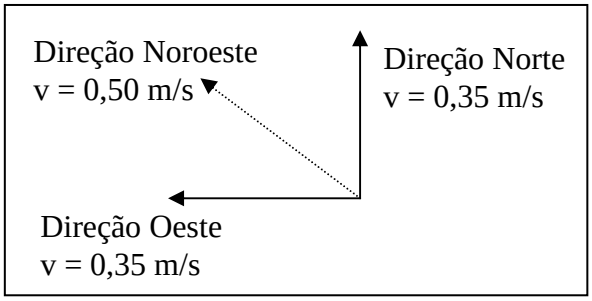


Figura. B.5 - Composição do vetor do vento fraco na direção Noroeste.