Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola de Química – Departamento de Engenharia Química
Programa de Pós Graduação em Engenharia de
Processos Químicos e Bioquímicos

Comparação de Simulações CFD em Regimes Estacionário e Transiente para Alocação de Sensores de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo *Offshore*

João Phelipe Martins Barcelos

Dissertação de Mestrado

Orientadores

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

Fevereiro de 2018

Comparação de Simulações CFD em Regimes Estacionário e Transiente para Alocação de Sensores de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo Offshore

João Phelipe Martins Barcelos

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia 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).

Aprovada por:

_____

Carlos Andre Vaz Junior, D.Sc.

_____

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

_____

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

Orientada por:

_____

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

_____

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Fevereiro de 2018

Barcelos, João Phelipe Martins.

Comparação de Simulações CFD em Regimes Estacionário e Transiente para Alocação de Sensores de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo Offshore / João Phelipe Martins Barcelos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2018.

xvi, 198 p.; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2018. Orientador(es): Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein.

1. Dispersão de Gases. 2. Posicionamento de Detectores. 3. Fluidodinâmica Computacional. 4. Dissertação (Pós-Graduação – UFRJ/EQ/TPQB). 5. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D. e Tânia Suaiden Klein, Ph.D.

Dedico este título aos meus familiares, amigos e a Deus. Aos meus pais, irmão, amigos e a minha noiva pelo incentivo e compreensão em relação ao tempo dedicado a esta dissertação.

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

Sylvester Stallone em Rocky Balboa

AGRADECIMENTOS

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

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

A minha noiva por ser uma pessoa especial e amável.

Aos meus orientadores Ricardo de Andrade Medronho e Tânia Suaiden Klein pelo conhecimento passado, experiências trocadas, ideias e sugestões.

A todos que me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, em particular à Bureau Veritas que permitiu a utilização do software POND4 de sua autoria, disponibilizou o conteúdo bibliográfico e a experiência adquirida para engrandecer o estudo.

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ/UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPARAÇÃO DE SIMULAÇÕES CFD EM REGIMES ESTACIONÁRIO E TRANSIENTE PARA ALOCAÇÃO DE SENSORES DE GASES INFLAMÁVEIS EM UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO OFFSHORE

João Phelipe Martins Barcelos

Fevereiro de 2018

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

As novas tecnologias de exploração e produção de petróleo em ambiente *offshore* são cada vez mais empregadas na busca de novas fontes de energia. Nesta atividade existem riscos associados a vazamentos de gás na planta de processo que causam preocupação com relação aos danos e às consequências que podem ser gerados. Neste trabalho, empregou-se a Fluidodinâmica Computacional como ferramenta na predição do comportamento da dispersão de gases leves a partir de um cenário de vazamento típico de uma unidade do tipo FPSO. Foi avaliado um ponto de vazamento no sistema de compressão de gases levando em consideração suas condições operacionais, *layout* da unidade e condições ambientais presentes em unidades reais em operação. A fim de avaliar o comportamento final e o desenvolvimento temporal da dispersão gasosa no ambiente confinado de unidades *offshore*, 36 casos de vazamento foram simulados em regime estacionário, com malha refinada localmente e com malha adaptativa, e transiente. Os resultados dessas três abordagens foram comparados entre si, indicando que apresentam diferenças, por vezes significativas, mas que a forma qualitativa das plumas é semelhante e permite a análise da dispersão dos gases inflamáveis leves. Inicialmente, propôs-se então, com base nos resultados das simulações estacionárias, uma malha de 5 detectores capaz de identificar 100% dos casos simulados. Através das simulações transientes, identificou-se que a malha proposta levava muito tempo para identificar todos os possíveis cenários de vazamento. Foram então propostas malhas de 5 detectores capazes de identificar todos os cenários em até 20 e até 5 segundos. Foi identificado que essas malhas também são capazes de identicar todos os casos simulados no regime estacionário. Além disso, a partir dos resultados estacionários e transientes, foi proposta uma correlação capaz de classificar os pontos de detecção estimando a eficácia dos mesmos com relação às propriedade físicas de interesse, pondendo assim, classificar a efetividade de qualquer ponto observável dentro do domínio de simulação.

Abstract of the Master Dissertation presented to Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos – EQ/UFRJ, as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPARISON OF STEADY STATE AND TRANSIENT CFD SIMULATIONS FOR POSITIONING OF FLAMMABLE GAS DETECTORS IN OFFSHORE OIL PROCESSING UNIT.

João Phelipe Martins Barcelos

February, 2018

Supervisors: Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

Tania Suaiden Klein, Ph.D.

The new technologies of offshore oil production are increasingly implemented in the search for new sources of energy. In this field, the inherent risks associated to gas leaks cause concern about the damage and the consequences that can be generated. This work use the Computational Fluid Dynamics to predict the behavior of light gas dispersion from a typical leak scenario of a FPSO unit. One leak point located in gas compression system was evaluated taking into account the system operational conditions, the unit design and the environment conditions. In order to evaluate the final behavior and the temporal development of the gas cloud in the confined environment as well as in offshore units, 36 leakage cases in steady state, with local refining mesh and adaptative mesh strategy, and transient simulations were performed. The results of these three approaches were compared, indicating differences, sometimes significant, but that qualitative cloud form are similar and allows the analysis of the dispersion of light flammable gases. First of all, with steady state simulations results, it was proposed a detection mesh composed of 5 detectors capable of identifying 100% of considered scenarios. Through the transient simulations, it was identified that the proposed detection mesh took a long time to identify all possible leak scenarios. It was proposed detection meshes with 5 detector capable of identifying all scenarios within 20 and also 5 seconds. It was verified that these meshes are also able to identify all the steady state simulated cases. Furthermore, from the steady state and transient results, it was proposed a correlation capable to ranking the detection points estimating the efficacy of these points according to the interest physical properties. With this correlation is possible to classify the effectiveness of any observable point within the simulation domain.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 MOTIVAÇÃO 1
1.2 OBJETIVO 7

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8

2.1 UNIDADE FLUTUANTE DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO *OFFSHORE* 8
2.1.1 FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) 8
2.1.2 Etapas de Processamento 8
2.1.3 Sistemas de Ancoragem 12
2.2 VAZAMENTOS 13
2.2.1 Modelos de Fonte 16
2.2.2 Modelos de Dispersão Atmosférica 21
2.3 DETECÇÃO DE GASES 29
2.3.1 Detecção do Vazamento 30
2.3.2 Limites de Inflamabilidade e Níveis de Ação 31
2.3.3 Localização dos Detectores e Efetividade de Detecção 33
2.4 MECÂNICA DOS FLUIDOS 41
2.4.1 Conservação da Massa 41
2.4.2 Conservação da Quantidade de Movimento 42
2.4.3 Escoamentos Turbulentos 43
2.5 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL 49
2.5.1 Etapas da Simulação CFD 49
2.5.2 Malha Computacional 51
2.5.3 Malha Adaptativa 52

3 METODOLOGIA 54

3.1 RECURSOS COMPUTACIONAIS 54
3.2 ESTUDO DE DISPERSÃO DE GASES 54
3.2.1 Geometria e Malha Computacional 55
3.2.2 Definição das Condições Meteorológicas 58
3.2.3 Seleção dos Cenários, Parâmetros e Condições de Contorno 60
3.2.4 Teste de Sensibilidade de Malha 65
3.2.5 Malhas Adaptativas 68
3.2.6 Metodologia do Posicionamento de Detectores 69
3.2.7 Efetividade de Detecção - Simulações Transientes 75

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 77

4.1 TESTE DE SENSIBILIDADE DE MALHA 77
4.1.1 Teste de Resíduos 77
4.1.2 Teste de Passo de Tempo 82
4.2 MALHA ADAPTATIVA 85
4.3 RESULTADOS DOS VAZAMENTOS 87
4.3.1 Resultados dos Vazamentos Estacionários 88
4.3.2 Resultados dos Vazamentos Transientes 96
4.3.3 Resultados da Malha Adaptativa 99
4.3.4 Observações Gerais 102
4.4 ALOCAÇÃO DE DETECTORES 112
4.4.1 Alocação dos Detectores (Simulações Estacionárias) 112

4.4.2 Tempo de Detecção (Simulação Transiente) *116*
4.4.3 Efetividade de Detecção *131*

5 CONCLUSÕES **133**

6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES **137**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **138**

APÊNDICE **141**

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – MÓDULOS DE PROCESSAMENTO DO FPSO P-66 9
FIGURA 2.2 – FLUXOGRAMA TÍPICO DE UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO 11
FIGURA 2.3 – TURRET (A) EXTERNO - FPSO *FALCON*; E (B) INTERNO - P-53 13
FIGURA 2.4 – ESCOAMENTO CRÍTICO DE GÁS ATRAVÉS DE ORIFÍCIO 19
FIGURA 2.5 – DISTRIBUIÇÃO DO DIÂMETRO DE FURO EM VAZAMENTOS 21
FIGURA 2.6 – PLUMA FORMADA POR UM VAZAMENTO CONTÍNUO 23
FIGURA 2.7 – MODELO DE NUVEM FORMADO POR UM VAZAMENTO INSTANTÂNEO 24
FIGURA 2.8 – VAZAMENTO EM JATO 24
FIGURA 2.9 – ESQUEMA DO JATO NAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO 27
FIGURA 2.10 – ETAPAS DA SIMULAÇÃO EM CFD 50
FIGURA 3.1 – VISTA TRIDIMENSIONAL DO MODELO 3D 56
FIGURA 3.2 – VISTA DE TOPO DO MODELO 3D 56
FIGURA 3.3 – VISTA DO DOMÍNIO (*FARFIELD*) (A) VISTA 3D; (B) VISTA LATERAL 56
FIGURA 3.4 – MALHA SUPERFICIAL DO MODELO 3D 58
FIGURA 3.5 – MALHA SUPERFICIAL VISTA DE TOPO 58
FIGURA 3.6 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS DIREÇÕES DE VENTO 60
FIGURA 3.7 – COMPRESSOR SELECIONADO NO ESTUDO 61
FIGURA 3.8 – DISPERSÃO DE GASES COM A MESH 0 (GROSSEIRA) 66
FIGURA 3.9 – REGIÃO DE DENSIDADE DE MALHA LOCAL (REGIÃO DE INTERESSE) 66
FIGURA 3.10 – LINHA DE CONCENTRAÇÃO X COMPRIMENTO EM (A) VISTA SUPERIOR E (B) VISTA LATERAL 67
FIGURA 3.11 - EXEMPLO DE NUVENS SOBREPOSTAS 71
FIGURA 3.12 – MALHA REGULAR DE PONTOS ESPAÇADOS EM 0,5 *VS* 0,5 METROS 73
FIGURA 3.13 – TOLERÂNCIA DE 0,5 METRO NA IDENTIFICAÇÃO DO CENÁRIO 73
FIGURA 3.14 – ESFERA DE 2,0 METROS DE RAIO NÃO INFLUENTE 74
FIGURA 4.1 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA *MESH 0* (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 78
FIGURA 4.2 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA *MESH 1* (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 78
FIGURA 4.3 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA *MESH 2* (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 78
FIGURA 4.4 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA *MESH 3* (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 78
FIGURA 4.5 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA *MESH 4* (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 79
FIGURA 4.6 – VALORES RESIDUAIS E VOLUME DE NUVEM 79
FIGURA 4.7 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) AO FINAL DE 300 ITERAÇÕES EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3. 80
FIGURA 4.8 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 300 E 1000 ITERAÇÕES PARA A *MESH* 3 EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3. 81
FIGURA 4.9 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA RESÍDUOS (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 81
FIGURA 4.10 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 20 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 82
FIGURA 4.11 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 40 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 82
FIGURA 4.12 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 60 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 83

FIGURA 4.13 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 80 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 83
FIGURA 4.14 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 100 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 83
FIGURA 4.15 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) APÓS 120 SEGUNDOS PARA PASSOS DE TEMPO DE 5, 1 E 0,1S EM (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 84
FIGURA 4.16 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) PARA PASSO DE TEMPO DE 1,0 S DE 80 A 150 S (A) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 84
FIGURA 4.17 – PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE HIDROCARBONETOS (HC) COM A *MESH 3* E MALHA ADAPTATIVA, PARA O ESTADO ESTACIONÁRIO, EM (1) LINHA 1, (B) LINHA 2 E (C) LINHA 3 85
FIGURA 4.18 – LOCALIZAÇÃO DOS DESVIOS NO PERFIL DE CONTRAÇÃO NA NUVEM DETECTÁVEL 86
FIGURA 4.19 – LOCALIZAÇÃO GEOMÉTRICA DOS DESVIOS NO PERFIL DE CONTRAÇÃO NA NUVEM DETECTÁVEL 87
FIGURA 4.20 – CORTES NA MALHA DE ELEMENTOS NA REGIÃO DE DESVIO DO PERFIL DE CONCENTRAÇÃO 87
FIGURA 4.21 – CASO 6 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 89
FIGURA 4.22 – CASO 7 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 90
FIGURA 4.23 – CASO 13 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 91
FIGURA 4.24 – CASO 24 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 92
FIGURA 4.25 – CASO 28 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 93
FIGURA 4.26 – CASO 32 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 94
FIGURA 4.27 – SOBREPOSIÇÃO DAS NUVENS SIMULADAS PARA OS VENTOS DE 0°, +30°, -30° E 0° EM (A) JATO +X, (B) JATO +Y, (C) JATO +Z, (D) JATO –X, (E) JATO –Y E (F) JATO -Z 95
FIGURA 4.28 – CASO 6 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 96
FIGURA 4.29 – CASO 7 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 97
FIGURA 4.30 – CASO 13 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 97
FIGURA 4.31 – CASO 24 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 98
FIGURA 4.32 – CASO 28 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 98
FIGURA 4.33 – CASO 32 AVANÇO TEMPORAL DA NUVEM INFLAMÁVEL 99
FIGURA 4.34 – CASO 6 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 100
FIGURA 4.35 – CASO 7 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 100
FIGURA 4.36 – CASO 13 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 100
FIGURA 4.37 – CASO 24 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 101
FIGURA 4.38 – CASO 28 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 101
FIGURA 4.39 – CASO 32 SOBREPOSIÇÃO (DENSIDADE LOCAL X ADAPTATIVO) 101
FIGURA 4.40 – SEMELHANÇA ENTRE OS RESULTADOS DO CASO 22 106
FIGURA 4.41 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 4 107
FIGURA 4.42 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 5 107
FIGURA 4.43 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 6 107
FIGURA 4.44 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 13 108
FIGURA 4.45 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 14 108
FIGURA 4.46 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 17 108
FIGURA 4.47 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 22 109
FIGURA 4.48 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 31 109

FIGURA 4.49 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S PARA O CASO 33 109
FIGURA 4.50 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 1000S PARA O CASO 4 110
FIGURA 4.51 – VOLUME OBTIDO AO LONGO DE 300S (CASO 4) PASSOS DE 1,0S E 0,1S 110
FIGURA 4.52 – ORIGEM DO SISTEMA DE COORDENADAS DOS DETECTORES 112
FIGURA 4.53 – VISTA DE TOPO DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTE QUE TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 114
FIGURA 4.54 – VISTA LATERAL DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTE QUE TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 114
FIGURA 4.55 – EXEMPLO HIPOTÉTICO VERIFICADO APÓS ANÁLISE DOS RESULTADOS 115
FIGURA 4.56 – EXEMPLO DA SAÍDA DOS DADOS DO *SOFTWARE* POND4 116
FIGURA 4.57 – NÚMERO ACUMULADO DE CASOS DETECTADOS POR TEMPO PELOS DETECTORES ALOCADOS ATRAVÉS DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES EM REGIME ESTACIONÁRIO. 117
FIGURA 4.58 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D-HC-01 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D-HC-01 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE ESTACIONÁRIA DOS VAZAMENTOS. 118
FIGURA 4.59 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D-HC-02 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D-HC-02 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE ESTACIONÁRIA DOS VAZAMENTOS. 118
FIGURA 4.60 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D-HC-03 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D-HC-03 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE ESTACIONÁRIA DOS VAZAMENTOS. 118
FIGURA 4.61 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D-HC-04 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D-HC-04 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE ESTACIONÁRIA DOS VAZAMENTOS. 119
FIGURA 4.62 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D-HC-05 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D-HC-05 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE ESTACIONÁRIA DOS VAZAMENTOS. 119
FIGURA 4.63 – VISTA DE TOPO DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 20 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 122
FIGURA 4.64 – VISTA LATERAL DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 20 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 122
FIGURA 4.65 – NÚMERO ACUMULADO DE CASOS DETECTADOS POR TEMPO QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 20 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS. 122
FIGURA 4.66 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D20-HC-01 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D20-HC-01 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 20 SEGUNDOS 123
FIGURA 4.67 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D20-HC-02 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D20-HC-02 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 20 SEGUNDOS 123
FIGURA 4.68 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D20-HC-03 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D20-HC-03 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 20 SEGUNDOS 124
FIGURA 4.69 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D20-HC-04 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D20-HC-04 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 20 SEGUNDOS 124
FIGURA 4.70 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D20-HC-05 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D20-HC-05 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 20 SEGUNDOS 124
FIGURA 4.71 – VISTA DE TOPO DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 5 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS. 127

FIGURA 4.72 – VISTA LATERAL DO POSICIONAMENTO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 5 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 127
FIGURA 4.73 – NÚMERO ACUMULADO DE CASOS DETECTADOS POR TEMPO QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 5 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 127
FIGURA 4.74 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D5-HC-01 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D5-HC-01 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 5 SEGUNDOS. 128
FIGURA 4.75 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D5-HC-02 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D5-HC-02 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 5 SEGUNDOS. 128
FIGURA 4.76 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D5-HC-03 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D5-HC-03 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 5 SEGUNDOS. 129
FIGURA 4.77 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D5-HC-04 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D5-HC-04 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 5 SEGUNDOS. 129
FIGURA 4.78 – TEMPO MÁXIMO NECESSÁRIO PARA O DETECTOR D5-HC-05 IDENTIFICAR CADA CENÁRIO DE VAZAMENTO. O D5-HC-05 FOI DETERMINADO POR ANÁLISE TRANSIENTE DOS VAZAMENTOS NO TEMPO DE 5 SEGUNDOS. 129
FIGURA A.1 – CASO 1 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 142
FIGURA A.2 – CASO 2 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 143
FIGURA A.3 – CASO 3 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 144
FIGURA A.4 – CASO 4 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 145
FIGURA A.5 – CASO 5 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 146
FIGURA A.6 – CASO 8 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 147
FIGURA A.7 – CASO 9 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 148
FIGURA A.8 – CASO 10 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 149
FIGURA A.9 – CASO 11 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 150
FIGURA A.10 – CASO 12 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 151
FIGURA A.11 – CASO 14 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 152
FIGURA A.12 – CASO 15 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 153
FIGURA A.13 – CASO 16 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 154
FIGURA A.14 – CASO 17 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 155
FIGURA A.15 – CASO 18 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 156
FIGURA A.16 – CASO 19 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM 157

FIGURA A.17 – CASO 20 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....158
FIGURA A.18 – CASO 21 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....159
FIGURA A.19 – CASO 22 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....160
FIGURA A.20 – CASO 23 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....161
FIGURA A.21 – CASO 25 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....162
FIGURA A.22 – CASO 26 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....163
FIGURA A.23 – CASO 27 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....164
FIGURA A.24 – CASO 29 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....165
FIGURA A.25 – CASO 30 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....166
FIGURA A.26 – CASO 31 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....167
FIGURA A.27 – CASO 33 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....168
FIGURA A.28 – CASO 34 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....169
FIGURA A.29 – CASO 35 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....170
FIGURA A.30 – CASO 36 EM (A) VISTA LATERAL (B) VISTA SUPERIOR E (C) CORTE DE CONCENTRAÇÃO NO INTERIOR DA NUVEM....171
FIGURA B.1 – CASO 1 VISTA SUPERIOR 173
FIGURA B.2 – CASO 2 VISTA SUPERIOR 173
FIGURA B.3 – CASO 3 VISTA SUPERIOR 174
FIGURA B.4 – CASO 4 VISTA SUPERIOR 174
FIGURA B.5 – CASO 5 VISTA SUPERIOR 175
FIGURA B.6 – CASO 8 VISTA SUPERIOR 175
FIGURA B.7 – CASO 9 VISTA SUPERIOR 176
FIGURA B.8 – CASO 10 VISTA SUPERIOR 176
FIGURA B.9 – CASO 11 VISTA SUPERIOR 177
FIGURA B.10 – CASO 12 VISTA SUPERIOR....177
FIGURA B.11 – CASO 14 VISTA SUPERIOR....178
FIGURA B.12 – CASO 15 VISTA SUPERIOR....178
FIGURA B.13 – CASO 16 VISTA SUPERIOR....179
FIGURA B.14 – CASO 17 VISTA SUPERIOR....179
FIGURA B.15 – CASO 18 VISTA SUPERIOR....180
FIGURA B.16 – CASO 19 VISTA SUPERIOR....180
FIGURA B.17 – CASO 20 VISTA SUPERIOR....181
FIGURA B.18 – CASO 21 VISTA SUPERIOR....181
FIGURA B.19 – CASO 22 VISTA SUPERIOR....182
FIGURA B.20 – CASO 23 VISTA SUPERIOR....182
FIGURA B.21 – CASO 25 VISTA LATERAL 183
FIGURA B.22 – CASO 26 VISTA LATERAL 183

FIGURA B.23 – CASO 27 VISTA LATERAL 184
FIGURA B.24 – CASO 29 VISTA LATERAL 184
FIGURA B.25 – CASO 30 VISTA LATERAL 185
FIGURA B.26 – CASO 31 VISTA LATERAL 185
FIGURA B.27 – CASO 33 VISTA LATERAL 186
FIGURA B.28 – CASO 34 VISTA LATERAL 186
FIGURA B.29 – CASO 35 VISTA LATERAL 187
FIGURA B.30 – CASO 36 VISTA LATERAL 187
FIGURA C.1 – CASO 1 VISTA SUPERIOR 189
FIGURA C.2 – CASO 2 VISTA SUPERIOR 189
FIGURA C.3 – CASO 3 VISTA SUPERIOR 189
FIGURA C.4 – CASO 4 VISTA SUPERIOR 190
FIGURA C.5 – CASO 5 VISTA SUPERIOR 190
FIGURA C.6 – CASO 8 VISTA SUPERIOR 190
FIGURA C.7 – CASO 9 VISTA SUPERIOR 191
FIGURA C.8 – CASO 10 VISTA SUPERIOR 191
FIGURA C.9 – CASO 11 VISTA SUPERIOR 191
FIGURA C.10 – CASO 12 VISTA SUPERIOR 192
FIGURA C.11 – CASO 14 VISTA SUPERIOR 192
FIGURA C.12 – CASO 15 VISTA SUPERIOR 192
FIGURA C.13 – CASO 16 VISTA SUPERIOR 193
FIGURA C.14 – CASO 17 VISTA SUPERIOR 193
FIGURA C.15 – CASO 18 VISTA SUPERIOR 193
FIGURA C.16 – CASO 19 VISTA SUPERIOR 194
FIGURA C.17 – CASO 20 VISTA SUPERIOR 194
FIGURA C.18 – CASO 21 VISTA SUPERIOR 194
FIGURA C.19 – CASO 22 VISTA SUPERIOR 195
FIGURA C.20 – CASO 23 VISTA SUPERIOR 195
FIGURA C.21 – CASO 25 VISTA SUPERIOR 195
FIGURA C.22 – CASO 26 VISTA SUPERIOR 196
FIGURA C.23 – CASO 27 VISTA SUPERIOR 196
FIGURA C.24 – CASO 29 VISTA SUPERIOR 196
FIGURA C.25 – CASO 30 VISTA SUPERIOR 197
FIGURA C.26 – CASO 31 VISTA SUPERIOR 197
FIGURA C.27 – CASO 33 VISTA SUPERIOR 197
FIGURA C.28 – CASO 34 VISTA SUPERIOR 198
FIGURA C.29 – CASO 35 VISTA SUPERIOR 198
FIGURA C.30 – CASO 36 VISTA SUPERIOR 198

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1.1 – ACIDENTES TECNOLÓGICOS NAS ATIVIDADES OFFSHORE 4
TABELA 1.2 – ACIDENTES NA ATIVIDADE *OFFSHORE* 4
TABELA 3.1 – DIREÇÕES DE VENTO E INTENSIDADES 59
TABELA 3.2 – SELEÇÃO DOS CENÁRIOS E ESPECIFICAÇÕES DAS SIMULAÇÕES 62
TABELA 3.3 – COMPOSIÇÃO DA MISTURA CONTIDA NA CORRENTE DE PROCESSO 63
TABELA 3.4 – FRAÇÃO MÁSSICA NORMALIZADA DE HIDROCARBONETOS 63
TABELA 3.5 – PROPRIEDADE E PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DO VAZAMENTO 64
TABELA 3.6 – CONDIÇÕES DE CONTORNO E PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 64
TABELA 3.7 – CONDIÇÕES DE CONTORNO E PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO 66
TABELA 4.1 – VOLUMES ESTACIONÁRIO (DENSIDADE LOCAL) X TRANSIENTE 104
TABELA 4.2 – VOLUMES (DENSIDADE LOCAL) X (MALHA ADAPTATIVA) 105
TABELA 4.3 – COORDENADAS DOS DETECTORES DA MATRIZ DE 0,5 X 0,5 M QUE GARANTE QUE TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 113
TABELA 4.4 – CENÁRIOS DETECTADOS POR CADA UM DOS DETECTORES QUE GARANTE QUE TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 113
TABELA 4.5 – NÚMERO DE CASOS E TEMPO MÍNIMO DE IDENTICAÇÃO 120
TABELA 4.6 – COORDENADAS DOS DETECTORES DA MATRIZ DE 0,5 X 0,5 M QUE GARANTE QUE, EM ATÉ 20S, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 121
TABELA 4.7 – CENÁRIOS DETECTADOS POR CADA UM DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 20 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 121
TABELA 4.8 – NÚMERO DE CASOS E TEMPO MÍNIMO DE IDENTICAÇÃO ATÉ 20S 125
TABELA 4.9 – COORDENADAS DOS DETECTORES DA MATRIZ DE 0,5 X 0,5 M QUE GARANTE QUE, EM ATÉ 5,0S, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 125
TABELA 4.10 – CENÁRIOS DETECTADOS POR CADA UM DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE, EM ATÉ 5,0 SEGUNDOS, TODOS OS CENÁRIOS SEJAM IDENTIFICADOS 126
TABELA 4.11 – NÚMERO DE CASOS E TEMPO MÍNIMO DE IDENTICAÇÃO ATÉ 5S 130
TABELA 4.12 – EFETIVIDADE DE DETECÇÃO DOS DETECTORES DETERMINADOS PELAS ANÁLISES NO ESTADOS ESTACIONÁRIO 131
TABELA 4.13 – EFETIVIDADE DE DETECÇÃO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE TODOS OS CENÁRIOS SERÃO IDENTIFICADOS EM ATÉ 20S. 131
TABELA 4.14 – EFETIVIDADE DE DETECÇÃO DOS DETECTORES QUE GARANTEM QUE TODOS OS CENÁRIOS SERÃO IDENTIFICADOS EM ATÉ 5S. 132
TABELA 4.15 – EFETIVIDADE DE DETECÇÃO DAS TRÊS MALHAS DE DETECTORES PROPOSTAS 132

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A crescente demanda por energia estimula a busca por novas formas e fontes de obtê-la, refletindo positivamente para o crescimento e desenvolvimento econômico em todo o planeta. A ação conjunta de empresas e instituições em busca de inovações promove a ocorrência ostensiva do desenvolvimento de novos produtos e processos tecnológicos. A partir dessa temática, os programas de P&D tecnológico, como elemento central de uma estratégia, facilitam o avanço das instituições até uma posição de liderança no mercado.

A indústria do petróleo, em conjunto com a indústria química, utiliza P&D como instrumento de crescimento econômico. A trajetória tecnológica acerca da exploração e produção do petróleo das reservas petrolíferas possibilita que sistemas de alta complexidade sejam capazes de produzir petróleo em alto mar, tecnologia conhecida como o*ffshore*. Em decorrência dos investimentos em inovação tecnológica, a produção energética deste segmento demonstra um grande potencial na criação de novas oportunidades de negócios.

No Brasil, a maior parte das reservas petrolíferas está localizada no mar, e não em terra, como acontece nos países que lideraram o processo de aprendizagem científica na indústria do petróleo. Em função desta realidade, a Petrobras, Petróleo Brasileiro S.A., estatal brasileira responsável pela exploração e produção em território nacional, iniciou uma trajetória tecnológica original, através da proposta do sistema de produção flutuante. A companhia teve de utilizar tecnologias importadas, que foram adaptadas às condições locais de produção, através de um processo de inovações incrementais (Neto e Costa, 2007).

Engenheiros e geólogos da Petrobras descobriram o petróleo localizado na região do pré-sal, conferindo à empresa o pioneirismo de exploração nessa camada em nível mundial. Esse acontecimento levou à descoberta de novos campos de petróleo *offshore*, demonstrando cada vez mais a necessidade da utilização de sistemas flutuantes.

Para atuar em áreas do pré-sal e do pós-sal, diversas plataformas entraram em operação nos últimos anos, como a P-58, a P-62, os FPSOs Cidade de Mangaratiba e Cidade de Ilhabela, entre outros. No campo de Papa-Terra (Bacia de Campos), foram instalados os FPSOs P-63 e P-61, plataformas que trabalham integradas, com capacidade de processamento conjunta de 140 mil bpd de óleo e um milhão de m³ de gás por dia. Em 2015, também entrou em operação o FPSO Cidade de Itaguaí, dando início à produção do projeto Iracema Norte, no campo de Lula, no pré-sal da Bacia de Santos, na costa do Rio de Janeiro. (Petrobras, 2017).

A extração do petróleo em alto mar, dependendo das circunstâncias, pode ser realizada por plataformas fixadas ao solo marinho, pode ser constituída de uma ilha artificial ou pode flutuar. Segundo Thomas *et al*. (2004), essas unidades se dividem basicamente nos seguintes tipos de sistemas: plataformas Fixas, Auto Eleváveis, Submersíveis, *Tension Legs*, Semissubmersíveis e os navios adaptados, como Navios-Sondas e plataformas do tipo FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*). Dentre estas, as mais completas são os FPSOs, Unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga.

Alguns dos projetos de engenharia mais ambiciosos envolvem etapas da produção de óleo e gás em sistemas o*ffshore*. O ambiente hostil e as dificuldades operacionais envolvem riscos em diversos níveis nos sistemas de processamento. Os acidentes graves representam, de maneira desastrosa, os caminhos nos quais os projetos de engenharia o*ffshore* podem dar errado. Acidentes podem causar mortes, sofrimento, poluição do meio ambiente e até mesmo a interrupção dos negócios. Sendo tão dramática, atraem a atenção da mídia permanecendo na memória pública, causando preocupação com relação à segurança dessas instalações (Spoug et. al., 1999).

Na atividade de exploração e produção de petróleo há sempre o risco associado ao vazamento de gás ou óleo. Para projetar essas unidades, a disciplina de arquitetura em conjunto com a disciplina de processo deve conter o *layout* mais seguro possível para a unidade. Por sua vez, a disciplina de automação e instrumentação é responsável por toda a parte de controle dos

intertravamentos que conduzirão a unidade a uma parada, total ou parcial, de forma segura.

Quando ocorrem vazamentos de líquidos inflamáveis ou combustíveis, esses podem, na maioria dos casos, ser conduzidos com segurança por meio de sistemas de drenagem, afastando-os de estruturas e equipamentos. Quando todas as barreiras são transpostas e o evento, como vazamento de gás, ou o acidente, como incêndio ou explosão, ocorrem, os sistemas de segurança industrial são ferramentas resposáveis a serem utilizadas na tentativa de se evitar, ou ao menos mitigar, danos à vida humana, ao meio ambiente, aos equipamentos e também a imagem da companhia.

O possível acidente que pode ser gerado é um evento probabilístico multicausal resultado de uma combinação de falhas latentes que vão se consolidando ao longo do tempo. A implantação de barreiras é, então, fundamental para minimizar as vulnerabilidades dos sistemas integrados existentes. Em termos operacionais, os meios de detecção podem incluir sistemas automatizados de controle de processos ou dispositivos de alarmes e detecção de gases ou vapores tóxicos e inflamáveis vazados (Moraes, 2013).

O trabalho nas plataformas oferece risco à vida e saúde dos trabalhadores, isto porque os trabalhos são confinados e com difícil acesso a resgate ou socorro. Assim sendo, um sistema que detecte tais eventos 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).

A partir dos relatos históricos, é possível identificar diversos exemplos de acidentes tecnológicos nas atividades o*ffshore*. No âmbito nacional, o acidente envolvendo a plataforma P-36 da Petrobras em março de 2001, localizada na Bacia de Campos, onde duas explosões levaram a mortes e ao afundamento da unidade e, o acidente na plataforma de Enchova da Petrobras em abril de 1988, na Bacia de Campos, onde um fluxo descontrolado de gás (*blow out*) levou a um incêndio de extensões inéditas para a empresa. No âmbito internacional, em 1988 no Mar do Norte, houve um grande desastre envolvendo a plataforma *Piper Alpha*. Em menos de três horas, a plataforma foi destruída devido a uma falha no sistema de compressão resultando na ruptura de um *riser*. O incêndio não

pôde ser controlado devido a um sistema precário e ineficiente de segurança. O resultado foi a morte de 167 pessoas e US$ 6 milhões em prejuízos. Após esse acidente, as análises de risco passaram a ser obrigatórias para todas as atividades. A Tabela 1.1 apresenta alguns dos mais relevantes acidentes registrados nesta atividade.

Tabela 1.1 – Acidentes tecnológicos nas atividades Offshore

Ano	Local	Descrição	Efeitos
1980	Mar do Norte	Plataforma Keillan naufraga	123 mortos
1981	Mar da China	Um navio de perfuração naufraga	81 mortos
1982	Atlântico Norte	Ocean Ranger aderna	84 mortos
1984	Campos Brasil	Explosão da plataforma de Enchova	37 mortos
1988	Campos Brasil	Incêndio da plataforma de Enchova	Apenas feridos
1988	Mar do Norte Escócia	Explosão da Plataforma Piper Alpha	167 mortos
1991	São Paulo Brasil	Explosão de um navio petroleiro	1 morto
1992	Mar do Norte	Queda de helicóptero	11 mortos
1995	Nigéria	Explosão de uma plataforma da Mobil	13 mortos
1996	Golfo de Suez	Explosão de plataforma (campo de Morgan)	3 mortos
1998	Mar do Norte	Explosão na plataforma Glomar Artic	2 mortos
2001	Campos Brasil	Incêndio na P-37	2 mortos
2001	Campos Brasil	Incêndio e Explosão na P-36	11 mortos
2006	India	Incêndio e explosão	10 mortos
2010	Golfo do México (EUA)	Incêndio, explosão e vazamento de petróleo na plataforma Deepwater Horizon	7 mortos
2015	ES Brasil	Explosão no FPSO Cidade de São Mateus	6 mortos

Na Tabela 1.2, de acordo com a BSEE (*Bureau of Safety and Environmental Enforcement*), agência federal responsável pelos relatórios da atividade o*ffshore* na Plataforma Continental Externa dos EUA, OCS (*U.S. Outer Continental Shelf*), que corresponde ao Alaska, Golfo do México e Região do Pacífico, são relatados diversos acidentes que ocorreram entre os anos de 2009 e 2016 de acordo com cada categoria avaliada.

Tabela 1.2 – Acidentes na atividade *Offshore*

Fonte: BSEE - Bureau of Safety and Environmental Enforcement. Washington D.C., EUA, 2016. Disponível em: https://www.bsee.gov/stats-facts/offshore-incident-statistics

OCS Acidentes/Derramamentos por Categoria								
Tipo	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**
Fatalidade	4	12	3	1	4	2	1	2
Ferimento	260	253	221	280	276	285	206	151
Perda de Controle do Poço	7	4	5	3	8	5	3	2
Fogo/Explosão	148	134	113	132	116	135	105	86
Colisão	26	14	11	13	21	16	9	9
Derramamento	7	9	4	5	10	5	7	3
Içamento	243	118	110	167	197	210	161	155
Vazamento de Gás	33	20	17	27	21	21	21	17
Evacuação	55	31	36	48	68	52	70	50
TOTAL	783	595	520	676	721	731	583	475

*Um mesmo acidente é contabilizado em mais de uma categoria, como por exemplo: fogo resultando em ferimento é contabilizado tanto em fogo quanto em ferimento.

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

Analisando o período entre 1992 a 2015 das estatísticas de vazamentos de hidrocarbonetos em ambiente o*ffshore* do HSE (*Health & Safety Executive*), percebe-se que de um total de 4.656 vazamentos gasosos, 1.761 (38%) foram detectados por um sistema de detecção de gases, sendo o restante identificado por outros tipos de sistemas de detecção (calor, fumaça ou fogo) ou identificado por pessoas, através da visão, audição, olfato, sensibilidade de mudança de temperatura, dentre outros. Nesse contexto, a determinação ótima da localização dos detectores de gases inflamáveis pode aumentar essa porcentagem e demonstra que é essencial entender como os gases se dispersam juntamente com o regime de vento e ventilação influenciados pela geometria da plataforma, para assim, se determinar a rede de detecção ideal inserida no modelo geométrico em questão.

O dimensionamento, ou seja, a quantificação e a localização, das botoeiras de emergência, dos detectores de fogo (chama, calor ou fumaça), e dos alarmes visuais e sonoros são regidos por normas técnicas nacionais e internacionais, sendo teoricamente simples o projeto desses sistemas. Já os sistemas de detecção de gases inflamáveis carecem de informações necessárias para a determinação do quantitativo e a localização ótima dos instrumentos de detecção. As normas recomendam, de maneira vaga e imprecisa, que os sensores estejam localizados próximos a possíveis pontos de vazamentos, entretanto, não determinam distâncias e metodologias que levem em consideração variáveis externas, número mínimo de detectores e a confiabilidade de um detector em especifico ou do sistema como um todo (Strøm et al., 1999). O projeto passa então a ter exclusiva dependência da sensibilidade

e bom senso do projetista, correndo o risco de apresentar sistemas superdimensionados ou subdimensionados, comprometendo, assim, a segurança da unidade em análise.

Um elevado número de detectores gera maiores custos para aquisição, instalação e manutenção destes dispositivos. Em contrapartida, um número subdimensionado leva a possíveis falhas e a não detecção de vazamentos locais. Assim sendo, tais estudos de dispersão de gases devem ser elaborados, preferencialmente, durante as fases de projeto da unidade e, devido às suas particularidades, cada unidade deve possuir seu próprio estudo. No caso do Sistema de Detecção de Fogo e Gás, espera-se que estes sistemas detectem e informem o mais rapidamente possível a ocorrência de um incêndio ou vazamento de gás, reduzindo-se, com isso, o tempo de resposta para evacuação das pessoas e o controle desta emergência.

Com os avanços da capacidade de processamento dos computadores e os avanços nos algoritmos e técnicas numéricas, as ferramentas utilizadas na fluidodinâmica computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) estão sendo cada vez mais empregadas na resolução de problemas envolvendo o complexo escoamento desses fluidos em unidades de processo (Gomes, 2012). Simulações em CFD têm dado importantes contribuições em análises de segurança em diversas áreas. Esta tendência é justificada pelo fato de que experimentos, especialmente os que envolvem grandes escalas, têm um alto custo e frequentemente não são plausíveis de serem realizados.

Os modelos matematicos de natureza numérica ou estatística utilizados para descrever o comportamento da liberação de gases inflamáveis e tóxicos vem sendo utilizados com maior frequência para determinação do posicionamento de detectores em unidades industriais. Neste contexto, a ferramenta CFD se destaca como uma alterantiva economicamente viável e flexível. Muitos autores defedem que a abordagem do regime estacionario é suficiente para garantir o estado final da dispersão gasosa, entretanto, existem divergências na literatura, uma vez que, outros autores consideram os efeitos transientes na investigação do desenvolvimento temporal da dispersão gasosa estabelecendo posições baseadas no tempo de identificação do vazamento.

1.2 Objetivo

O presente trabalho propõe inicialmente um estudo do comportamento de nuvens de gás inflamável geradas por vazamento em uma unidade o*ffshore* através de simulações numéricas com CFD. As simulações levam em consideração as condições meteorológicas da região e o *layout* típico de um FPSO com sistema de ancoragem via *Turret,* usado na extração de petróleo em alto mar. O objetivo principal deste trabalho é então comparar os resultados obtidos com as simulações numéricas quando o vazamento é considerado estacionário e quando é tratado como transiente. A metodologia proposta define um sistema de detecção dos gases inflamáveis para o cenário de vazamento com o intuito de minimizar o número total de instrumentos mantendo-se uma confiabilidade razoável. Dessa forma, pretende-se identificar a importância de informações que só se pode obter no regime transiente, como o tempo de detecção e o tempo no qual a dispersão gasosa entra em equilíbrio com a ventilação ambiente. Ao final, é verificado se apenas a abordagem estacionária é suficiente para descrever o comportamento da dispersão e estabelecer um sistema de detecção confiável.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Unidade Flutuante de Processamento de Petróleo *Offshore*

2.1.1 FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*)

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

Essas unidades podem ser convertidas a partir de antigos petroleiros devido à grande capacidade de estocagem ou terem seus cascos construídos especialmente para esta função. Devido a sua característica estacionária, essas unidades ficam ancoradas e posicionadas em locais de produção distantes da costa com inviabilidade de ligação por oleodutos ou gasodutos. Por se tratarem de estruturas complacentes, caracterizadas por grandes deslocamentos sob ação de cargas ambientais, a utilização de um sistema de ancoragem adequado, que limite tais deslocamentos, deve ser projetado em níveis aceitáveis atendendo normas e recomendações técnicas.

2.1.2 Etapas de Processamento

A área de processamento da plataforma, conhecida como *Topside*, é constituída de módulos de processo tipicamente limitados a 20 metros de comprimento. O arranjo típico de um FPSO é composto por Módulo de Processamento de Óleo, Módulo de Desidratação e Compressão do Gás, Módulo de Tratamento da Água Produzida, Módulo de Injeção (gás ou água), Módulo de Utilidades, Módulo de Produtos Químicos, Módulo de Geração de Energia e Módulo do *Flare* (sistemas de alívio). A Figura 2.1 apresenta alguns módulos de processo de um FPSO.

Figura 2.1 – Módulos de processamento do FPSO P-66
(https://www.portalmaritimo.com)

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

O petróleo é elevado do piso marinho até a superfície por tubulações chamadas de *Riser*. Essas tubulações são conectadas ao *Manifold*, conjunto de válvulas e instrumentos de controle que permitem flexibilidade na operação. No mesmo módulo do *Manifold*, encontram-se os lançadores e recebedores do sistema de inspeção dos dutos, responsáveis pela limpeza e manutenção das linhas de elevação e equipamentos submarinos. O petróleo segue para o aquecedor de produção com objetivo de prepara-lo para entrar no Separador de Produção. Controlando-se as variáveis de operação, garante-se que as fases óleo, água e gás sejam tratados individualmente nos sistemas subsequentes e enquadrados nos padrões de qualidade requeridos.

O óleo segue para o Tratador de Óleo, com objetivo de enquadrar o teor de BSW (*Basic Sediment and Water*), isto é, água, sedimentos e salinidade. O óleo que sai deste equipamento é resfriado e segue para o separador atmosférico, último estágio de estabilização do óleo, recuperando-se os gases separados e maximizando a produção do gás. O óleo então segue para os tanques de carga do navio mantendo a estabilidade da embarcação. Por fim, realiza-se o O*ffloading*, que consiste na transferência do óleo acumulado nos tanques de carga, por meio de bombas, para um navio aliviador.

Após sair do Separador de Produção, o gás passa pelo *Safety*, vaso de processo que minimizam o arrasto de líquido para os compressores de primeiro e segundo estágios. Cada compressor é composto de um resfriador de gás e um vaso para separação do condensado formado após a compressão e resfriamento do gás. O gás resfriado é direcionado para a Torre de Desidratação de Gás que utiliza um fluido de absorção (TEG) para que o gás seja suficientemente desidratado. Por fim, o gás desidratado é enviado para o terceiro e último estágio de compressão de gás onde poderá ser utilizado como gás combustível para os demais sistemas (geradores de energia e utilidades), além de ser exportado para terra ou injetado como métodos de recuperação dos poços produtores.

A água oleosa proveniente do Separador de Produção passa por uma bateria de hidrociclones onde parte do óleo carreado pela água é removida e reciclada para o sistema de tratamento de óleo. A água quase isenta de óleos e graxas passa então para o Flotador, equipamento responsável pelo polimento final do tratamento da água produzida podendo assim, ser armazenada ou descartada no mar.

A Figura 2.2 apresenta o fluxograma de processo simplificado típico de algumas unidades que operam em alto mar.

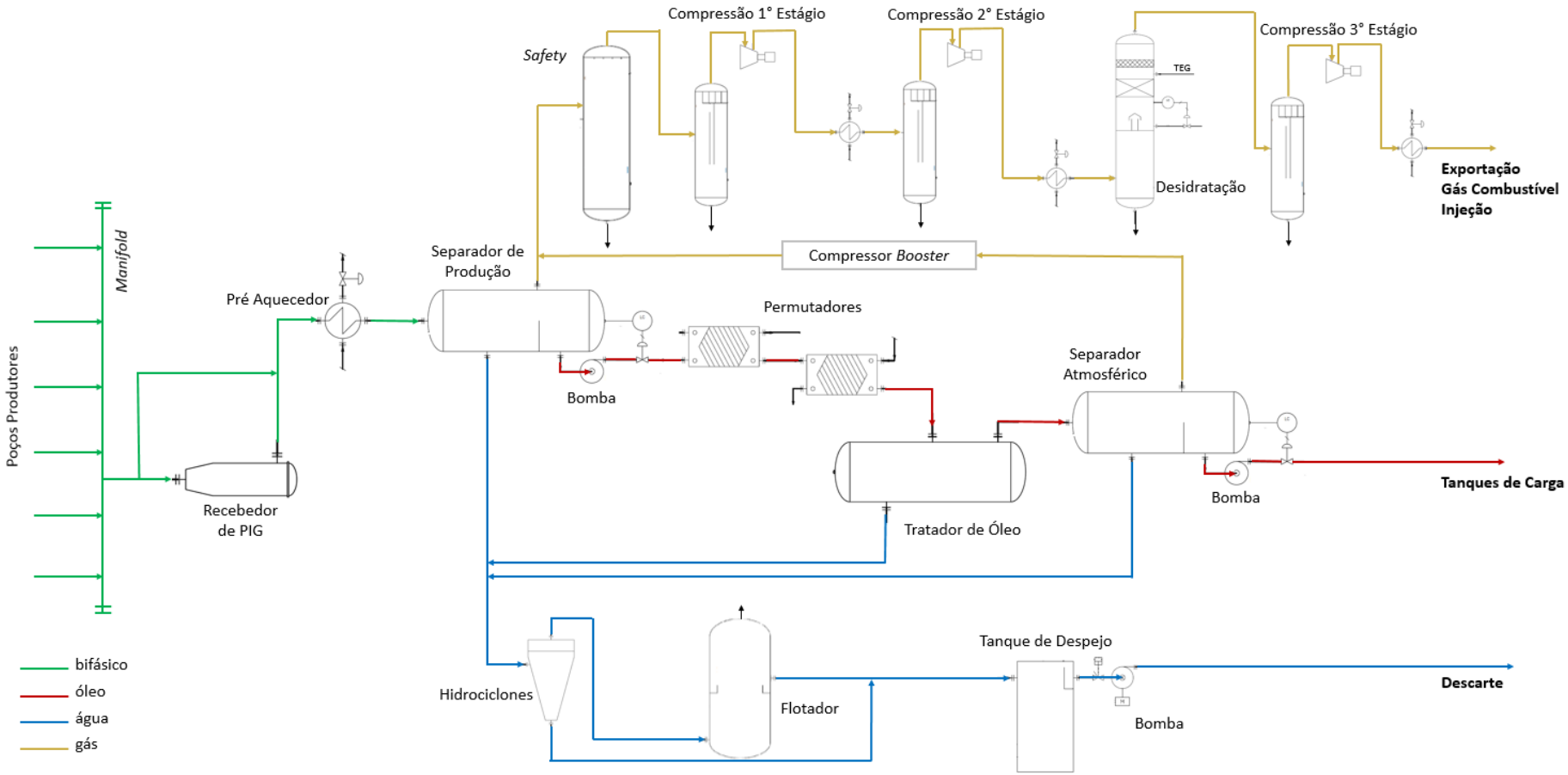

Figura 2.2 – Fluxograma típico de unidades de processamento de petróleo

2.1.3 Sistemas de Ancoragem

Sistema de Ancoragem é um conjunto de linhas de ancoragem compostas por diferentes materiais (amarras, cabos de aço, cabos de poliéster, cabos e nylon e etc.) e âncoras ou estacas, que transferem os esforços que agem sobre a plataforma para o solo. (Lacerda, 2005). O preceito fundamental de ancoragem usada em sistemas flutuantes origina-se no princípio complacente. Esse mecanismo funciona como molas, onde o deslocamento do meio flutuante induzido pelas cargas ambientais, desde uma posição neutra, em equilíbrio, é reestabelecida ao ponto de origem pelas forças de reação que se opõem ao carregamento aplicado, restaurando o equilíbrio. Diversos modelos de configuração de linhas de amarração são aceitáveis para a utilização na ancoragem de estruturas o*ffshore*. De acordo com a geometria da linha, podem ser encontradas ancoragens em catenária (convencional), ancoragem tipo *Taut-Leg* e ancoragem vertical (utilizando tendões), cada uma delas se aplica a diferentes sistemas de ancoragem.

Os tipos de Sistema de Ancoragem são apresentados como ancoragem com ponto único ou SPM (*Single Point Mooring*), caracterizado pela concentração das linhas de ancoragem em uma única posição da embarcação, ancoragem distribuída ou SP (*Spread Mooring*), caracterizado pela distribuição das linhas de ancoragem em torno da embarcação e a ancoragem de posicionamento dinâmico ou DP (*Dynamic Positioning*) caracterizado por utilizar propulsores e impulsionadores laterais (*thrusters*) para manter a unidade flutuante na posição através do acionamento dos mesmos de modo que se compensem os efeitos dos carregamentos ambientais atuantes, tais como vento, onda e corrente.

A ancoragem com ponto único é mais apropriado para navios do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading Unit*) e FSO (*Floating, Storage and Offloading Unit*), pois permite que a unidade flutuante gire livremente ao redor das linhas, alinhando-se com a direção das cargas ambientais predominantes e, consequentemente, reduzindo os esforços atuantes na mesma. Neste sistema, podem-se distinguir três tipos de configuração predominantes: ancoragem com *Turret* (interno e externo), CALM (*Catenary Anchor Leg Mooring*) e SALM (*Single*

Anchor Leg Mooring). Neste capítulo será apresentado apenas o Sistema de Ancoragem com ponto único ou SPM (*Single Point Mooring*) do tipo *Turret* que será utilizado neste trabalho.

O sistema de ancoragem com *Turret* é definido pela ligação de um conjunto de linhas de ancoragem a uma torre, podendo esta ser posicionada na proa, na popa (*Turret* externo) ou internamente ao navio (*Turret* interno), de modo que possibilite a livre rotação do mesmo em torno das linhas. Existem mancais de rolamento e rótulas que fazem a interface entre a estrutura do navio e a estrutura do *Turret*, a qual é fixa e é aonde as linhas de ancoragem e os *risers* flexíveis do sistema de produção chegam ao navio. Desta forma, é permitido ao navio a opção de mudança de seu aproamento de acordo com a combinação ambiental presente na locação, ou seja, há uma liberdade da estrutura girar em torno de si própria ficando orientada na direção resultante das cargas ambientais. O petróleo produzido, conduzido ao *Turret* através de linhas de escoamento flexíveis, é transferido para a planta de processo por meio de um *swivel* de produção localizado no topo do *Turret*, evitando o rompimento das tubulações durante a rotação do navio em relação ao *Turret* (Reyes, 2012). A Figura 2.3 apresenta o FPSO *Falcon* que utiliza o sistema de ancoragem por *Turret* externo e o FPSO P-53 que utilizam o sistema de ancoragem por *Turret* interno.

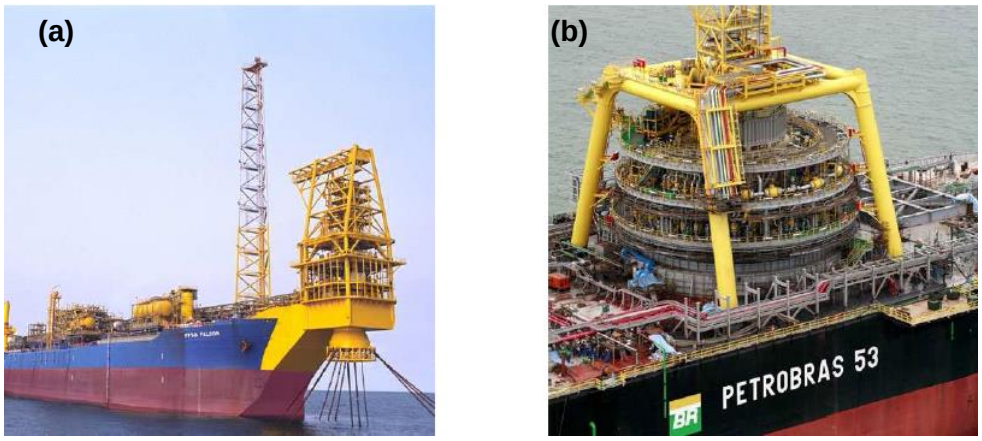

Figura 2.3 – Turret (a) externo - FPSO *Falcon*; e (b) interno - P-53 (adaptado de Reyes, 2012)

2.2 Vazamentos

Muitos materiais perigosos são armazenados e transportados em grandes quantidades em diferentes condições, podendo estar na forma de gases ou líquidos, estando refrigerados ou pressurizados. Vazamentos ocorrem por falhas

relacionadas às condições internas e externas ao processo. As condições internas estão relacionadas ao *design* do processo/equipamentos, erros operacionais (condição humana), corrosão e falta de manitenção. Já as condições externas estão relacionadas às falhas provocadas por impactos mecânicos, condições naturais e diversos eventos que são cascateados e que afetam a planta indiretamente (TNO Yellow Book, 2005).

O acidente ocorre a partir de um evento que geralmente resulta em uma perda de contenção de um material a partir de um processo determinado. Acidentes em unidades de processamento químico, frequentemente, ocorrem por liberações de materiais tóxicos, inflamáveis e explosivos (Crowl e Louvar, 2002). A liberação pode ocorrer em vasos, equipamentos como trocadores de calor e compressores, tubulações de processo, válvulas, flanges e outros. A quantidade máxima de escape depende do inventário contido no reservatório ou corrente e do isolamento proposto.

A liberação do fluido pode ocorrer na fase gasosa, vapor, líquida ou uma mistura bifásica como a líquido-vapor. A liberação de materiais depende de suas propriedades físicas, condições de processo ou de armazenamento, da forma como o material é liberado e as interações mecânicas e físicas com o ambiente. Durante a liberação, o material irá interagir com o ambiente ao seu redor de forma a afetar diretamente o seu estado termodinâmico. O material liberado poderá formar uma poça, ser disperso na atmosfera ou sofrer ignição imediatamente.

Uma vez que o evento é definido, modelos de fonte são selecionados para descrever como os materiais são liberados a partir do processo. O modelo de fonte fornece a descrição da taxa de descarga, da quantidade total descarregada (ou tempo total de descarga), e o estado físico da descarga, se é sólido, líquido, vapor ou uma combinação destes.

Um modelo de dispersão é subsequentemente usado para descrever como o material vazado é transportado a favor do vento e como se dispersa em alguns níveis de concentração. Para vazamentos inflamáveis, os modelos de incêndio e explosão convertem as informações do modelo de fonte relativas ao

vazamento em energia potencial de risco como radiação térmica e sobrepressões por explosão. Posteriormente, modelos de efeitos convertem esses resultados específicos dos eventos em efeitos sobre pessoas (lesão ou morte) e estruturas (CCPS, 2000).

De fato, existem muitos modelos clássicos disponíveis que vão de modelos empíricos e fenomenológicos até aqueles baseados na ferramenta computacional CFD. Seja qual for a classe de modelos, cada uma tem uma série de simplificações e suposições que, de certa forma, limitam as suas capacidades de serem utilizados como uma ferramenta com alto grau de confiabilidade fora das faixas de validação determinadas nos dados experimentais. Os modelos baseados em experimentos e fenômenos (os empíricos e fenomenológicos) apresentam facilidade quanto a sua implementação, mas, em contrapartida, disponibilizam menos detalhes. Exigem menores esforços computacionais quando comparados com os modelos baseados em CFD, pois exigem menor potência dos computadores. Todavia, tratando-se de geometrias congestionadas e parcialmente confinadas, os modelos empíricos e fenomenológicos apresentam menor precisão que os modelos mais complexos que têm como base a ferramenta computacional CFD (Fleck, 2008).

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

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

2.2.1 Modelos de Fonte

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

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

Existem diversos modelos de fonte que representam as liberações por orifício, de acordo com o estado físico do material e suas condições de armazenamento ou manuseio. No presente trabalho, abordam-se, portanto, aos vazamentos de gás ou vapores nesses orifícios.

2.2.1.1 Escoamentos Gasosos através de Orifício

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

ou o vapor passa pela ruptura, caracterizando-se como um escoamento compressível (Crowl e Louvar, 2002).

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

$$\int \frac{dP}{\rho} + \Delta\left(\frac{v^2}{2\alpha g_c}\right) + \frac{g}{g_c}\Delta z + F = -\frac{w_s}{q_s} \qquad (2.1)$$

onde:

P =	Pressão	[força/área];
ρ =	Densidade do fluido	[massa/volume];
v =	Velocidade instantânea média do fluido	[comprimento/tempo];
g_c=	Constante gravitacional	[comprimento*massa/força*tempo²];
α =	Fator de correção para velocidade	[adimensional];
g =	Aceleração da gravidade	[comprimento/tempo²];
z =	Altura	[comprimento];
F =	Termo de perda por fricção	[comprimento*força/massa];
w_s=	Trabalho de eixo	[força*comprimento];
q_s=	Vazão mássica	[massa/tempo].

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

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

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

onde:

q_s =	Vazão mássica de gás	[kg/s];
C_d =	Coeficiente de descarga	[-];
A_h =	Área transversal do orifício	[m²];
ψ =	Coeficiente de escoamento	[-];
ρ_0 =	Densidade do gás a montante do vazamento	[kg/m³];
P_0 =	Pressão do gás a montante do vazamento	[N/m²];
γ =	Relação entre os calores específicos à pressão e volume constantes (C_p/C_v)	[-].

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

No caso de escoamento subcrítico:

$$\frac{p_0}{p_a} < \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{2.3}$$

então:

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

No caso de escoamento crítico:

$$\frac{p_0}{p_a} \geq \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}} \tag{2.5}$$

Então:

$$\psi^2 = 1 \tag{2.6}$$

Para a maioria dos gases, a relação C_p/C_v, ou coeficiente isentrópico, varia de $1{,}1 < \gamma < 1{,}4$, pode ser considerado crítico quando $P_o >> P_a$. A pressão crítica, ou *choked*, P_c ou P_{choked}, é a máxima pressão que resulta na máxima vazão através do orifício. A velocidade do fluido no ponto do vazamento é a velocidade do som nas condições locais. Este tipo de escoamento é denominado crítico, sônico ou estagnado, sendo ilustrado pela Figura 2.4.

Nesta condição, a velocidade do gás é limitada pela velocidade do som neste gás no local de vazamento, entretanto, ondas de choque podem causar mudanças quase descontínuas das propriedades de um gás, tornando o escoamento supersônico, caracterizado pelo número de Mach > 1. As condições do escoamento subsônico, sônico e supersônico são apresentadas no item 2.2.2.1.

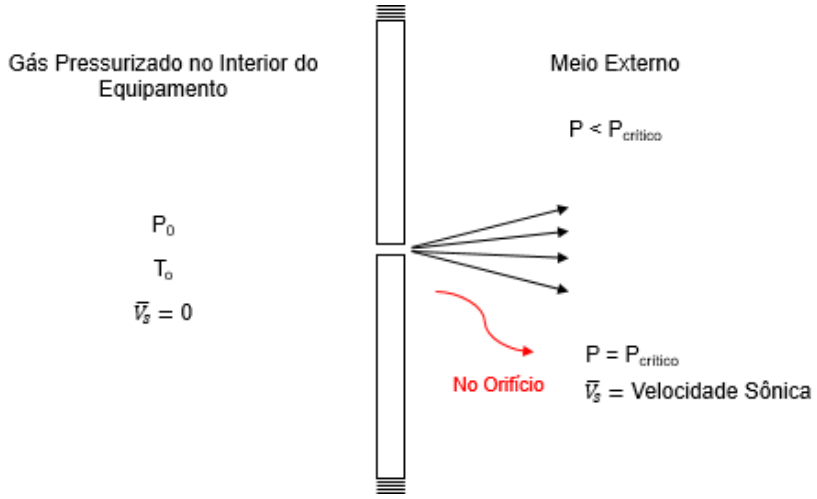

Figura 2.4 – Escoamento crítico de gás através de orifício

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

$$C_d = C_f \cdot C_c \tag{2.7}$$

Para as condições de operação específicas da plataforma em estudo, com pressões acima de 150 kgf/cm² na seção de compressão, 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 sônico. Para pequenos orifícios e número de *Reynolds* maiores que 30.000, o C_d pode ser aproximado para 0,62. Para essas condições a velocidade de saída do fluido é independente do tamanho do orifício (TNO, 2005). A Equação 2.2 pode ser reescrita abaixo.

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

Nota-se que nestas equações o tipo de escoamento é uma função da pressão no interior da fonte do vazamento, que é considerada constante. Porém, sabe-se que durante a liberação gasosa a pressão no interior do equipamento cai, havendo transição e mudança do regime de escoamento. Para vazamentos pequenos, o decaimento da pressão não é significativo para mudar o regime do escoamento tendo em vista o grande volume de inventário e as elevadas pressões de trabalho nessas unidades.

2.2.1.2 Diâmetro do Orifício de Vazamento

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

Neste tipo de abordagem, interessa detectar vazamentos com alto potencial de risco, possibilitando a formação de incêndios ou nuvens explosivas que poderão movimentar-se pela planta, com fluxo pequeno, porém, constante do gás. Este tipo de vazamento é limitado pela vazão mássica de gás que escoa pelo equipamento, pois não são esperados vazamentos superiores a esta vazão qualquer que fosse a área do orifício de vazamento.

Para vazamentos provocados por rupturas ou falhas nas linhas de processo, a liberação é considerada como instantânea, ocorrendo em um espaço curto de tempo. Nestes eventos, o inventário liberado, bem como as nuvens formadas, seriam de maiores dimensões e, desta forma, mais facilmente percebidas pelos operadores, considerando os sentidos humanos de visão, audição e olfato, por controladores de processo e pela rede de detectores disponível. Vazamentos com pequenas vazões são mais críticos sob o ponto de vista dos detectores, pois estes dependerão somente do sistema de detecção para serem percebidos. Vazões menores podem passar despercebidas, porém, apresentam perigos à planta de processo.

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

Os estudos do HSE (1997 e 1999) consideram o tamanho do furo através de uma distribuição em seis faixas de diâmetro: < 10 mm, 10 < 25 mm, 25 < 50

mm, 50 < 75 mm, 75 < 100 mm e ≥ 100 mm. De acordo com os dados obtidos pela HSE (1992 a 2015), associado ao número total de 4.656 vazamentos gasosos, percebe-se que 3.743 (80%) dos vazamentos identificados foram registrados com diâmetro equivalente de orifício de até 10 mm.

A Figura 2.5 apresenta uma curva de probabilidade pelo diâmetro de vazamento dos casos reportados até 2001 de acordo com a HSE. Pode-se perceber que a probabilidade aumenta para os vazamentos com diâmetros menores. A partir desses dados é possível afirmar que a grande maioria dos vazamentos ocorre para furos menores que 10 mm corroborando com as análises de Fleck (2008) e Gomes (2012).

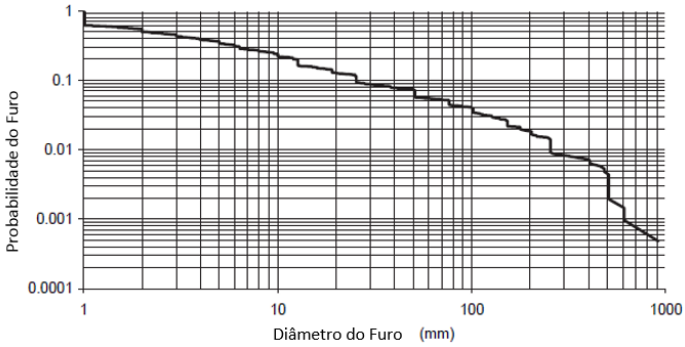

Figura 2.5 – Distribuição do diâmetro de furo em vazamentos
(Adaptado de Spouge, 2006)

Para não fugir da caracterização de furos e inclinar para os cenários de ruptura, a Fiscalização da Petrobras define vazões aceitas para esses estudos entre 0,1 e 4,0 kg/s ou diâmetros de furo entre 2,5 e 12,7 mm. Neste estudo será adotada a média entre os valores estabelecidos pela Petrobras, ou seja, será utilizado o furo com diâmetro de orifício de 7,6 mm, sendo mais conservativo que os estudos mencionados anteriormente.

2.2.2 Modelos de Dispersão Atmosférica

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

A seriedade dos acidentes apenas enfatiza a importância do planejamento de emergência e do *layout* da unidade para minimizar a ocorrência e as

consequências dos vazamentos. Os modelos de dispersão são amplamente utilizados na estimativa dos efeitos da liberação inflamável e tóxica no ambiente, levando assim, a possibilidade de prevenir ou reduzir os impactos gerados em caso de ocorrência.

A dispersão de um material sendo emitido de um vazamento em uma planta é determinada pelo seu momento e pela gravidade. Se as forças de momento predominam, o fluido forma um jato, enquanto que se as forças gravitacionais predominam, forma-se uma pluma. No entanto, se a dispersão diminui de intensidade, a turbulência atmosférica passa a ser o fator predominante (Lees, 1996). Depois do vazamento, o material liberado é carreado pela ação do vento caracterizando na forma de pluma ou nuvem. A máxima concentração do material ocorre no ponto de liberação, pois os efeitos turbulentos de mistura e dissipativos da substância com o ar tendem a minimizar a concentração do mesmo (Crowl e Louvar, 2002).

Um grande número de parâmetros afetam os efeitos de dispersão atmosférica de uma substância, podendo influenciar na detecção dos gases. À medida que a velocidade do vento cresce, a pluma se torna mais fina e 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, 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 a quantidade de movimento do material disperso alteram a “altura efetiva” do vazamento. Após a dissipação da quantidade de movimento inicial do jato, a mistura turbulenta torna-se o efeito dominante na pluma, sendo que em liberações de gases mais densos que o ar, a nuvem tende a escoar para baixo.

2.2.2.1 Modelos de Pluma, Nuvem e Jato

O modelo de pluma descreve a forma do perfil de concentração em estado estacionário do material disperso de um vazamento contínuo. Para este modelo, um exemplo seria a dispersão contínua de gases a partir de uma chaminé. Uma pluma em estado estacionário é formada a partir dos gases liberados na chaminé. A velocidade média temporal e o perfil de concentração temporal são similares e aproximadamente gaussianos. A Figura 2.6 apresenta o modelo de pluma em vazamento contínuo.

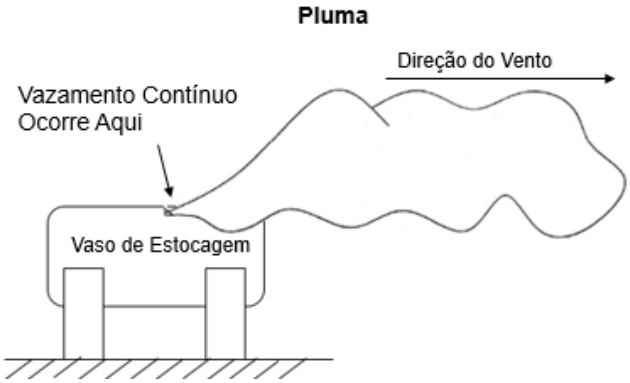

Figura 2.6 – Pluma formada por um vazamento contínuo
(Adaptado de Crowl e Louvar, 2002)

O modelo de nuvem (*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 nuvem 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.

O modelo de nuvem pode ser usado para descrever uma pluma, ou seja, a pluma pode ser descrita como vazamento de contínuas liberações em nuvem. Se a informação de uma pluma em estado estacionário é tudo de que se necessita, o modelo de pluma é recomendado uma vez que é mais facilmente aplicado. Para estudos envolvendo plumas dinâmicas (por exemplo, o efeito em uma pluma com a mudança da direção do vento), o modelo de nuvem deve ser usado. A Figura 2.7 apresenta o modelo de nuvem em vazamento instantâneo.

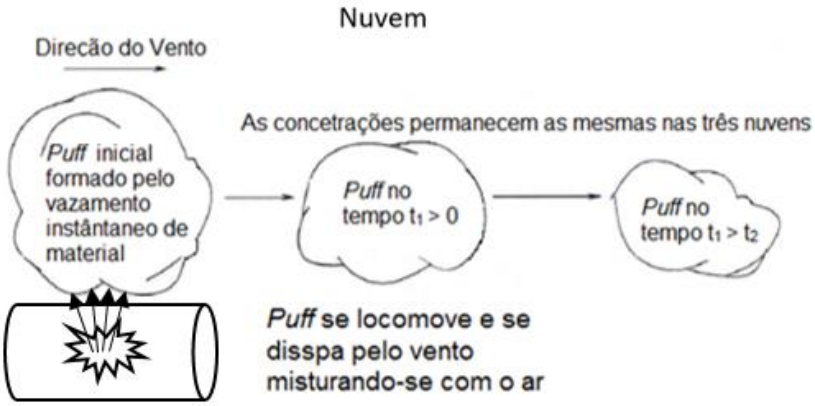

Figura 2.7 – Modelo de Nuvem formado por um vazamento instantâneo
(Adaptado de Crowl e Louvar, 2002)

O modelo de jato descreve o comportamento dos gases liberados em alta velocidade devido às condições internas do processo, caracterizadas por grandes diferenças de pressão com o ambiente. Empiricamente o jato é cônico e aparentemente diverge de um ponto numa fonte virtual a montante do orifício. A diluição ocorre por mistura turbulenta sendo a velocidade média temporal e os perfis de concentração similares após uma distância equivalente a 10 vezes o diâmetro do orifício e são aproximadamente gaussianos, sendo o perfil de concentração mais largo que o perfil de velocidade. O jato arrasta ar e conserva a sua quantidade de movimento, tal que o fluxo de quantidade de movimento em qualquer plano normal ao eixo é constante como apresentado na Figura 2.8 (Lees, 1996).

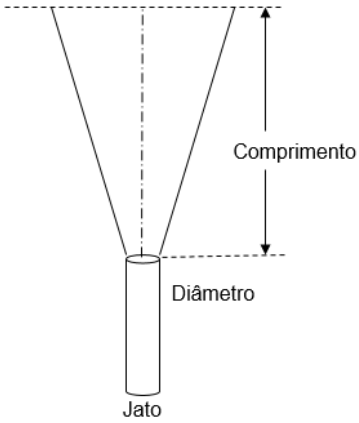

Figura 2.8 – Vazamento em jato
(Adaptado de Lees, 1996)

Se a quantidade de movimento de um material sendo emitido de um orifício é alta, a dispersão, na fase inicial, será devido à quantidade de movimento e a emissão é descrita como um jato (*momentum jet*). Se a quantidade de

movimento é baixa, seja pelo fato desta ser baixa inicialmente ou por ela ter reduzido sua intensidade, 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 (Lees, 1996).

O escoamento em jato pode ser tratado com comportamento subsônico, sônico e supersônico. A região sônica, número de Mach = 1, representa a condição crítica (*chocked*) do escoamento, no qual, o gás escoa com a velocidade do som. A partir da região sônica, se a pressão for pequena o suficiente, o gás atinge um regime supersônico, número de Mach > 1, onde ocorrem ondas de choque que provocam o aumento da entropia do sistema, aumentando a velocidade e gerando variações na densidade do fluido descrevendo assim a transição entre o regime sônico e subsônico ou região subexpandida. Um choque normal é uma descontinuidade irreversível e pode ocorrer em qualquer campo do escoamento supersônico. Grandes variações de pressão, temperatura e em outras propriedades ocorrem através dessa pequena distância que é responsável pelas desacelerações locais do fluido. Essas configurações, então, justificam tratar o choque normal como uma descontinuidade súbita. A região subsônica, número de Mach < 1, representa a condição onde o escoamento já está totalmente desenvolvido, podendo ser considerado como escoamento incompressível..

Para o estudo de dispersão de gases, o grande interesse está no desenvolvimento da dispersão gasosa no ambiente, sendo a região muito próxima ao vazamento pouco significativa para posicionar os sensores. Tendo em vista a grande variação das propriedades do gás e a sensibilidade dos sensores para identificação de vazamentos na região subexpandida, fica o questionamento se a representação do escoamento compressível para descrever o comportamento final da dispersão é necessária ou se apenas a descrição da região subsônica é suficiente para tal. No tópico seguinte serão identificadas as diferenças do escoamento compressível e incompressível para representar o gás disperso no ambiente.

2.2.2.2 Escoamento Compressível *versus* Incompressível

Em escoamentos compressíveis, a massa específica do fluido varia com a pressão e temperatura e faz-se necessário levar em consideração as transformações termodinâmicas que ocorrem ao longo do escoamento. Para escoamentos de líquidos, normalmente, a dependência da pressão é pequena e esses escoamentos podem ser tratados como incompressíveis. Entretanto, para gases, a influência da pressão e temperatura sobre a massa específica é significativa.

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

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

Uma vez que duas variáveis adicionais são necessárias para o tratamento de escoamentos compressíveis, precisa-se também de duas equações adicionais. Tanto a equação de energia quanto a equação de estado devem ser aplicadas para resolver os problemas de escoamentos compressíveis, o que torna o sistema a ser resolvido mais complexo e dificulta a solução de simulações numéricas com essas características.

Como já mencionado, nos locais onde existe uma redução significativa da pressão, o gás escoa com velocidade do som e o escoamento é dito como crítico (*choked*). A partir do escoamento sônico, o jato passa por uma região de transição que é caracterizada por uma série de ondas de choque, região subexpandida, atingindo uma região subsônica onde o escoamento já está totalmente desenvolvido. A Figura 2.9 apresenta a região do escoamento sônico

ou região crítica, região 1 com subscrito c, região subexpandida, região 2 e região de escoamento subsônico ou região de fonte efetiva, região 3 (condição atmosférica).

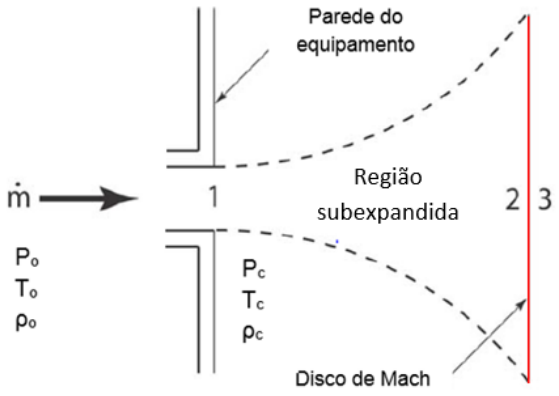

Figura 2.9 – Esquema do jato nas condições de escoamento
(Adaptado de Birch et al., 1987)

Uma alternativa para não se ter que resolver o escoamento sônico nos estágios iniciais do vazamento, ou seja, na região subexpandida, é usar a aproximação da 'fonte sônica resolvida' (*pseudo-source* ou tronco de cone). Isto consiste em modelar o vazamento somente após a região de ocorrência das ondas de choque e da região subexpandida, quando o escoamento sônico estiver totalmente desenvolvido, e o escoamento já é considerado como subsônico. Assume-se, ainda, que não ocorrerá entrada de ar entre a saída do jato até o término da região subexpandida (HSL, 2005). Esta mesma alternativa também é proposta por TNO (2005), quando afirma ser necessária a determinação de uma *pseudo-source*, a qual seja consistente com o modelo de jato, e que pode ser usada para substituir o complexo escoamento sônico quando o jato se expande para a atmosfera, após a sua liberação.

De acordo com Fleck (2008), esta simplificação não implicou em mudanças nos perfis (ângulos) de escoamento do jato sendo possível utilizar a simplificação do escoamento subsônico para as simulações no estudo de dispersão de gases. Desta forma, o escoamento seria simulado somente a partir da região destacada em vermelho na Figura 2.9, sendo a mesma denominada de pseudo-source, ou tronco de cone, em referência à forma geométrica formada entre o verdadeiro ponto de liberação e a pseudo-source.

Schefer et al. (2006) apresentam valores, em diferentes pressões, do fator de compressibilidade (Z) para o hidrogênio a 27 °C (300 K), e afirmam que as relações isentrópicas podem ser diretamente aplicadas para vazamentos em tanques a baixas pressões, e que em pressões de até 172 bar o gás pode ser tratado, com boa aproximação, como ideal, podendo ser adotado o valor de Z igual a 1,0 (Fleck 2008 apud Schefer et al. 2006). Portanto, considerando a pressão de operação do compressor em aproximadamente 150 bar, será adotada a consideração de gás ideal para o calculo do vazamento a partir da condição crítica, ou seja, da condição crítica de saída até a condição de fonte efetiva.

De acordo com Birch et al. (1987), a condição de saída do jato com taxa mássica ṁ, assumindo expansão isentrópica e sendo M o peso molecular do gás, pode ser determinada utilizando a Equação 2.9 até a Equação 2.11.

$$\frac{P_c}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \tag{2.9}$$

$$\frac{T_c}{T_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right) \tag{2.10}$$

$$\rho_c = \frac{P_c M}{R T_c} \tag{2.11}$$

Para escoamentos críticos, a velocidade do gás, Vc, na abertura da descarga é igual à velocidade do som no gás, a qual pode ser calculada pela Equação 2.12.

$$Vc = \sqrt{\gamma \frac{RT_0}{M}} \tag{2.12}$$

Para gás ideal, a Equação 2.13 também pode ser escrita da seguinte forma:

$$Vc = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}} \tag{2.13}$$

Para determinação das condições das regiões 2 e 3, Birch et al. (1987) utiliza a conservação de quantidade de movimento para o cálculo de V_2, conservação da massa, equação para gases ideais e a igualdade entre as áreas A_2 e A_3. As relações são apresentadas na Equação 2.14 até a Equação 2.18.

$$V_2 = V_c \left(1 + \frac{P_c - P_2}{\rho_c V_c^2}\right) \tag{2.14}$$

$$T_2 = T_c + \left(\frac{V_s^2 - V_2^2}{2C_p}\right) \tag{2.15}$$

$$M_a = \frac{V}{c} \tag{2.16}$$

$$M_{a_3}^{\ 2} = \frac{M_{a_2}^{\ 2} + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} M_{a_2}^{\ 2} - 1} = \frac{V_3^2}{c_3^2} = \frac{V_3^2}{\gamma R T_3} \tag{2.17}$$

$$T_3 = T_2 \frac{(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{a_2}^{\ 2})}{(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{a_3}^{\ 2})} \tag{2.18}$$

Sendo M_a o número de Mach (calculado para escoamento isentrópico e utilizando relação de gás ideal), c a velocidade do som no gás e C_p a capacidade térmica a pressão constante pode-se calcular as velocidade subsônica V_3 ou velocidade de saída V_s e a temperatura após expansão T_3 ou T. Para o cálculo da capacidade calorífica foi estimado o valor constante de 33 J/(mol.K) baseado na condição a 101,325 kPa e 25°C.

2.3 Detecção de Gases

O Sistema de Detecção de Gases é normalmente composto por dois subsistemas: o de detecção de Gás Combustível e o de Gás Tóxico, especialmente o sulfeto de hidrogênio (H_2S). Ambos têm por objetivo indicar a presença de gases acima de determinadas concentrações, de forma a permitir a adoção dos procedimentos de segurança adequados.

Os projetos de sistemas de detecção são normalmente baseados em normas técnicas, as quais, entretanto, não fornecem condições de prever o número ótimo de detectores. Estas normas, em sua grande maioria, indicam que estes sensores deverão localizar-se próximos a pontos de possíveis vazamentos, sem indicar a que distância devem ser posicionados, a quantidade apropriada de detectores, confiabilidade desejada para o detector ou para o sistema, e ainda, a influência de variáveis externas. O projeto fica, assim, dependente exclusivamente da sensibilidade do projetista, o que poderá conduzir a sistemas super ou subdimensionados.

Das limitações acima citadas pode, portanto, resultar em aumento de custo, quer seja pelo excesso de detectores ou pelos danos gerados pela falta destes. Torna-se assim necessária a substituição destes critérios genéricos por análise

quantitativa, mais precisa e baseada em critérios de engenharia. Essas análises acarretam alterações sensíveis nos procedimentos usuais até então recomendados e adotados.

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

Elementos essenciais na detecção de gases estão associados à mitigação do vazamento. Decidida a velocidade 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. Assim, a rápida detecção do vazamento é imprescindível para evitar danos à plataforma ou à vida (Fleck, 2008).

2.3.1 Detecção do Vazamento

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

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

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

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

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

2.3.2 Limites de Inflamabilidade e Níveis de Ação

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

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

Os níveis de detecção estão associados aos limites de inflamabilidade da mistura. O limite Inferior de Inflamabilidade (L.I.I.) e o Limite Superior de Inflamabilidade (L.S.I.) são expressos em porcentagens em relação ao volume de gás ou vapor no ar. O L.I.I. é a menor concentração do combustível no volume total da mistura com o ar, que permite a propagação da chama. Já o L.S.I. é a maior concentração do combustível no volume total da mistura com o ar que permite a propagação da chama. Um dos princípios que devem banalizar a escolha do nível de ação é a de que este não deve ser em 100% do L.I.I., pois, neste caso, a mistura inflamável já estaria formada, e qualquer fonte de ignição dentro desta nuvem ignitaria a mesma. Os dois níveis de detecção são descritos abaixo de acordo com a Norma Técnica Petrobras N-2914.

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

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

Para gases tóxicos também são aplicáveis os níveis de ação acima descritos, porém, os valores variam de acordo com a toxicidade de cada gás. Para o sulfeto de hidrogênio (H_2S), por exemplo, adotam-se 8 ppm e 20 ppm, para os níveis de alerta e de gás confirmado, respectivamente. Esses valores são baseados no tempo de exposição e consequências aos seres humanos.

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

Em unidades o*ffshore* da Petrobras, como o sistema de detecção é intertravado aos sistemas de parada de emergência da plataforma, ou seja, havendo gás confirmado na área são desencadeadas, automaticamente, diversas ações objetivando uma parada segura do processo e demais

equipamentos da unidade, existem sistemas de identificação que têm por objetivo evitar uma parada de emergência de maneira desnecessária.

2.3.3 Localização dos Detectores e Efetividade de Detecção

Os instrumentos devem ser posicionados para detectar qualquer acumulo de gás. O percurso do gás e suas características de dispersão estão intimamente relacionados à densidade do gás e ao padrão de ventilação presente na unidade analisada. Há casos em que a densidade é usada para determinar a altura em que os sensores devem ser posicionados em relação à fonte potencial, um exemplo é o metano (predominante no gás natural) que é menos denso que o ar, então seu movimento será ascendente em condições normais do ambiente.

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

2.3.3.1 Øvyind Strøm e Jan Roar Bakke *(1999)*

Strøm e Bakke (1999) constataram que muitos dos vazamentos de gás que aconteciam no ambiente de uma determinada plataformas o*ffshore* não eram identificados pelo sistema de detecção de gases da mesma. Utilizando a ferramenta CFD por meio do *software* FLACS, descrevem a metodologia para aprimorar o sistema de detecção e aumentar o número de vazamentos identificados. A metodologia baseia-se em alguns elementos principais como:

- Representação geométrica da unidade;
- Tipo, número e localização dos sensores de gás;
- Descrição dos cenários (pontos e taxas de vazamento, ventilação etc.);
- Classificação dos detectores baseado na eficiência dos sensores.

O estudo ficou restrito à área de chegada da cabeça dos poços de uma plataforma do tipo Jaqueta. A área de análise possui 20m x 40m e fica localizada

entre o convés inferior e o convés principal da unidade com altura de 14,5m. Os autores ressaltam a importância da representação geométrica para os efeitos de recirculação do vento e efeitos de mistura do gás liberado com o ar.

Com a geometria definida, o estudo de ventilação foi realizado para verificar o comportamento do vento em torno da superfície de equipamentos e estruturas. Foram selecionadas 3 categorias de vento: fraco, médio e forte para esta etapa. A partir disso, definiu-se um único ponto de vazamento, localizado no centro do módulo, e avaliou-se 6 direções de jato. Foram definidas 3 taxas de vazamento distintas: 3,4 kg/s, 10,3 kg/s e 31,3 kg/s. Resumindo, foram avaliados 3 condições vento, 1 ponto de vazamento, 6 direções de jato e 3 taxas de vazamento diferentes, totalizando 54 simulações transientes.

Foi definida uma matrix de 24 pontos de detecção espaçados de 4m x 4m em 3 alturas diferentes na área de análise, totalizando 72 detectores. Presume-se que os pontos de detecção de cada malha estejam na mesma altura (3 alturas com 24 detectores cada), pois, estas não foram mencionadas.

Os autores estimaram a frequência para as direções e intensidade do vento através de dados estatísticos da região, para a taxa de vazamento por meio da Análise Qualitativa de Riscos (AQR) e para as 6 direções de jato dividido-as igualmente. Foi efetuada uma classificação para os detectores, ou seja, geraram-se eficiências de detecção, baseadas na razão da frequência de vazamento pelo tempo de resposta na detecção, de cada cenário simulado.

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 porcentagem de cenários detectados foram plotados contra o número de detectores, com o intuito de aperfeiçoar a resposta à detecção, bem como a quantidade e localização dos instrumentos de detecção.

A detecção ficou baseada no limite de 20% do L.I.I. e a eficiência de detecção, E, foi calculada com a frequência do cenário atual, f, o tempo de deteccção do cenário específico, T, e o número de cenários analisados, n, de acordo com a equação abaixo:

$$E = \sum_{1}^{n} \frac{f}{T}$$

Os detectores foram posicionados de acordo com a classificação de cada um, ou seja, o melhor detector é posicionado, em seguida o segundo melhor detector é posicionado adicionalmente ao primeiro e assim por diante até que todos os cenários sejam detectados. Os autores mostraram que para o módulo estudado, com 15 detectores foi possível identificar 100% dos cenários simulados, num tempo de detecção médio em torno de 2,0 segundos. Além disso, os autores identificaram que com apenas 6 detectores é possível identificar 95% dos cenários avaliados. No entanto, os detectores classificados com maiores eficiências tenderam a estar mais próximo dos vazamentos. Assim sendo, os possíveis pontos de vazamento devem ser considerados a partir de estudos de análise de risco em ambientes reais, pois a eficiência dos detectores é influenciada diretamente por esses pontos.

2.3.3.2 Kelsey *et al*. (2002)

Kelsey et al. afirmam que a rede virtual de detecção de gás, baseada em guias e práticas industriais normalmente utilizadas e aceitas pelas operadoras, recomendam que os detectores de gás sejam instalados em uma rede de detecção com espaçamentos de 5 x 5 metros. Essa rede de detecção incorpora níveis de detecção e ação, bem como características do tempo de resposta dos instrumentos. Contudo, ao seguir tais recomendações, deve-se levar em consideração o processo e os pontos de vazamento de cada unidade individualmente.

Esta orientação de espaçamento é uma prática industrial derivada de estudos que mostram que para uma nuvem de gás inflamável (metano) de 6 metros de comprimento, em ambientes não confinados, a velocidade de chama não excede 100 m/s e a sobrepressão não é superior a 0,15 bar. Esses valores são considerados abaixo daqueles que poderiam causar danos quando esta nuvem sofre ignição. Porém, em locais com alto grau de confinamento, ambiente *offshore*, a velocidade de chama pode exceder 125 m/s para uma nuvem de 6 metros, requerendo uma redução no espaçamento dos detectores (HSE, 2002).

Kelsey utiliza dados experimentais de dispersão de gás natural em ambiente com ventilação natural sendo liberados à alta pressão em um módulo de processo *offshore* medindo 28m x 12m x 6m. Kelsey afirma que os dados experimentais possuem duração suficiente para que os vazamentos atinjam o estado estacionário, cerca de 50 a 300 segundos. A composição utilizada neste experimento possui 20% de gás natural e 80% de nitrogênio, sendo mais leve que o ar.

O autor ressalta que os guias e orientações para localização dos detectores não são detalhados. Assim, a proposta avalia dois níveis de detectores pontuais, um nível a 3,9 metros de altura e outro nível a 6,9 metros de altura, numa malha espaçada de 5 metros, originando, assim, 24 pontos de monitoramento, 12 para cada nível. Apesar de não ser informado pelos autores, supõe-se que a escolha das alturas dos níveis se deu pelo fato do gás natural ser menos denso que o ar e num eventual vazamento ele terá um movimento ascendente.

Como forma de avaliar a eficácia de diferentes tipos de detectores, foram usados 24 detectores pontuais catalíticos e 24 detectores pontuais de infravermelho (IR), além de 4 detectores de visada (*open-path*), estes últimos não respeitando o espaçamento de 5 metros.

Um total de 64 vazamentos no estado estacionário foram analisados em 3 pontos distintos do módulo, com o auxílio de programação computacional pelo *software* MATLAB v.5. Na avaliação foram utilizados os seguintes parâmetros: vazão mássica entre 0,5 e 10,0 kg/s; velocidade do vento variando de 0,9 a 8,6 m/s e duas direções de vento (Leste e Oeste). Para todos os vazamentos os autores estimaram as concentrações de gás lidas pelos detectores para diferentes tempos, baseados nos valores típicos dos tempos de resposta de cada tipo de sensor, podendo comparar assim a efetividade dos mesmos.

O estudo mostrou que os detectores pontuais de IR detectaram, no nível de alerta, todos os vazamentos antes da formação de uma nuvem explosiva de 6 m de comprimento. A mesma rede de detectores catalíticos, assim como a rede de detectores de visada, não obtiveram o mesmo sucesso, 93% e 88%, respectivamente. Já para o nível de alarme (gás confirmado), todas as 3 redes

não conseguiram detectar todos os casos, 83% para IR, 60% para catalítico e 68% para visada.

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

O tempo médio de detecção não teve grandes diferenças dos detectores pontuais para os de visada, além disso, os autores, no entanto, não otimizaram a quantidade de pontos de detecção da malha inicialmente proposta de detectores, equidistantes de 5 m, e também não discutiram a criticidade da direção da liberação dos cenários simulados, ou seja, a localização do vazamento no equipamento.

2.3.3.3 Fleck (2008)

Fleck avaliou a posição de detectores baseado nas afirmações de Kelsey et al. (2002) de que, em ambientes confinados, a velocidade de chama para nuvens inflamáveis de 6,0 m podem chegar a 125 m/s, alcançando valores danosos para a unidade caso as nuvens sofressem ignição. O estudo utilizou ferramenta CFD para geração das nuvens providas da dispersão dos gases inflamáveis e, a partir dessas, foram alocados detectores equidistantes de 5 x 5 metros para detecção de nuvens com tamanhos inferiores a 6,0 metros.

O modelo geométrico utilizado foi simplificado a partir de uma plataforma semissubmersível. O autor destaca o sistema de compressão de gases, justificando a maior possibilidade de vazamentos neste sistema. O domínio computacional possui 109,0 metros de comprimento por 60,5 metros de largura e 20 metros de altura, definindo-se 231 possíveis pontos de detecção (rede tridimensional de detectores espaçados em 5 metros). Com a alocação inicial dos detectores e descarte dos dispositivos que não capturassem nenhum

vazamento e que detectassem nuvens redundantes, foi proposta uma otimização avaliando-se um gráfico do número de pontos de detecção melhor classificados pela porcentagem de cenários detectados.

A classificação de cada detector proposto foi 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. A ponderação de cada cenário de vazamento foi efetuada de acordo com a frequência do vazamento, probabilidade do vento e intensidade (ou consequência) da explosão. A frequência de vazamento utilizada para o compressor foi de 6,52 x 10^{-2} falhas por ano, utilizando o mesmo valor para todas as direções de jato estudadas. A probabilidade do vento foi determinada para cada direção de vento avaliada de acordo com os dados meteorológicos da região de estudo. A intensidade da explosão foi considaderada diretamente proporcional ao volume da nuvem formada. De modo a ponderar este parâmetro, o volume inflamável gerado foi dividido por 113 m^3, representando o volume de uma nuvem esférica de 6,0 metros de diâmetro. A classificação é então calculada pelo produto da frequência de vazamento, probabilidade do vento e intensidade da explosão. Por fim, tem-se que cada ponto de detecção proposto terá sua classificação final determinada pelo somatório dos fatores dos cenários detectados por aquele ponto.

A partir dos pontos (x,y) otimizados, foi proposta a altura (z) dos dispositivos na malha de detectores. Linhas verticais foram traçadas a partir do piso nos pontos pré-determinados, avaliando-se a concentração ao longo destas. Escolheu-se como altura para cada detector em uma linha vertical a menor altura de detecção dos cenários que aquele detector era capaz de identificar (20% do L.I.I.). Os pontos mais próximos ao piso da plataforma são selecionados pelo fato da fração volumétrica de gás (gases leves) diminuir com o acréscimo da altura, garantindo-se assim que aquele detector seria capaz de identificar todos os cenários previstos pelas simulações.

Após aplicação da metodologia, Fleck constatou que 59 pontos de detecção foram suficientes para identificar 63% dos cenários (total de 60 cenários). Realizando a classificação dos 59 detectores que identificam pelo

menos 1 cenário, o autor conclui que apenas 4 pontos de detecção são suficientes para identificar o correspondente a 63% dos cenários. Dos demais cenários, 37% não foram identificados pela malha de detecção proposta. Dentre os não identificados, 17% são vazamento com direção de jato para cima (menor risco) e de volumes despreszíveis de detecção. Os 20% restantes são identificados com pequenos volumes inflamáveis e de difícil detecção. Após rearranjo de 2 detectores e adição de 1 detector, foi possível identificar 83% dos casos simulados (casos com volume inflamável considerável), sendo descartados 17% dos cenários (casos com volume inflamável desprezível).

Com a obtenção dos resultados, concluiu-se que as menores vazões mássicas tiveram um índice baixo de identificação das nuvens pela rede de detecção proposta e que foi possível determinar o sistema ótimo de detecção de gases da seção de compressão da plataforma, composto por 5 pontos de detecção, sendo capaz de identificar todos os cenários relevantes simulados. Fleck recomenda a utilização de um modelo geométrico mais representativo para plataformas o*ffshore*, tornando o estudo mais real. Além disso, a utilização de uma função objetivo tornaria o processo de alocação de detectores mais rápido e com menor dependência do operador.

2.3.3.4 Gomes (2012)

Gomes avaliou o posicionamento dos detectores de gases inflamáveis liberados acidentalmente por compressores, utilizando a ferramenta CFD, para uma unidade de hidrotratamento. O modelo geométrico possui 190 x 75 x 60 metros e a geração da malha computacional constituiu-se de uma malha não estruturada construída por elementos tetraédricos. A avaliação da dispersão de gases foi realizada para 2 compressores, 2 direções de vazamento (1 jato na direção do piso, em ambos os compressores, e 1 jato para região de maior congestionamento) além de 8 direções de vento, totalizando 32 simulações. Além disso, o vazamento foi realizado para uma vazão de 0,1637 kg/s com velocidade de 1460 m/s com diâmetro de vazamento de 10 mm. O autor realiza uma validação para utilização do *source point* como condição de contorno para o vazamento.

A metodologia de posicionamento dos detectores utilizada partiu de um programa computacional, disponibilizado pela Petrobras, capaz de criar uma matriz tridimensional de pontos e listar os pontos que conseguem identificar o maior número de cenários. De forma conservativa, o autor adota a premissa de que todos os vazamentos devem ser detectados, independente do tamanho da nuvem formada. Essa premissa reduz a incerteza sobre o risco associado ao volume da nuvem inflamável, como ocorre nos estudos de Fleck. Desta forma, as seguintes etapas são realizadas no *software* de “otimização” de detectores utilizado pelo autor:

- Gerar matriz 3D de possíveis pontos de detecção, no espaçamento desejado;

- Coletar a concentração da substância avaliada nos possíveis pontos de detecção, através de um programa de CFD, para cada caso individualmente;

- Organizar os dados em uma tabela que contém em cada linha um possível detector e nas colunas a concentração de todos os casos avaliados, chamada de Matriz de Busca Inicial (as linhas são ordenadas pela quantidade de casos que são capazes de detectar);

- O ponto que é capaz de anunciar a maior quantidade de casos é selecionado (deixa de ser considerado um possível ponto de detecção para ser chamado de ponto de detecção);

- Os pontos que detectam somente os casos já detectados são descartados;

- As colunas contendo os casos que já foram detectados também são excluídas. Evita-se selecionar uma nova posição que contenha casos já selecionados;

- Este processo é realizado até não restarem mais casos;

- Ao final da rotina são gerados uma matriz contendo a coordenada dos detectores e um arquivo em texto onde ficam armazenados a quantidade de detectores, coordenadas e os casos que cada detector é capaz de identificar.

Gomes estabelece 2 espaçamentos para sua análise, sendo de 5 x 5 metros e outro de 3 x 3 metros. Ao final da análise, conclui-se a necessidade de

utilizar 6 detectores para a matriz de espaçamento de 5 x 5 metros, identificando 100% dos casos, e mostrando que 53% dos cenários são identificados por apenas 2 detectores. Já para a matriz de espaçamento de 3 x 3 metros, percebeu-se que os detectores ficaram mais próximos dos pontos de vazamento, mais susceptível à direção de vazamento.

2.4 Mecânica dos Fluidos

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

2.4.1 Conservação da Massa

A equação da conservação de massa, conhecida como equação da continuidade, é desenvolvida a partir da análise do balanço de massa sobre um elemento fixo interno ao volume de controle diferencial por onde escoa o fluido. No presente estudo, não serão consideradas reações químicas ou nucleares, logo, não haverá geração ou consumo de massa, portanto, o balanço se resume por meio do termo de acúmulo temporal e os termos convectivos.

A massa dentro do volume de controle, em qualquer instante, é o produto da massa por unidade de volume, ρ, pelo volume, $dx \cdot dy \cdot dz$. Assim, a equação da conservação de massa em coordenadas cartesianas com as derivadas parciais é apresentada na Equação 2.15 e em notação vetorial com o operador $\boldsymbol{\nabla}$ na Equação 2.16.

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla}.(\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{2.16}$$

Para fluidos incompressíveis a massa específica não é função nem das coordenadas espaciais nem do tempo. A Equação 2.16 pode ser simplificada de acordo com a Equação 2.17.

$$\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{v} = 0 \tag{2.17}$$

2.4.2 Conservação da Quantidade de Movimento

Para um sistema movendo-se em relação a um referencial fixo, a segunda lei de Newton estabelece que a soma de todas as forças externas sobre o sistema é igual à taxa de variação da quantidade de movimento linear do sistema (Fox, 2006). A equação da conservação da quantidade de movimento, conhecida como equação do movimento, é desenvolvida a partir de um volume de controle inercial, fixo no espaço em relação a um sistema de coordenadas cartesianas que não esta acelerando em relação a um referencial estacionário. O procedimento é análogo àquele seguido na formulação matemática da conservação de massa para um volume de controle.

As forças que atuam sobre um elemento de fluido podem ser classificadas como forças de corpo e forças de superfície. Forças de superfície incluem tanto foças normais quanto forças tangenciais (cisalhamento). O somatório das forças que atuam em um elemento de volume do volume de controle é dado na Equação 2.18.

$$\mathbf{F_i} = \mathbf{F_p} + \mathbf{F_v} + \mathbf{F_g} \tag{2.18}$$

onde:

F_i= forças de inércia por unidade de volume;

F_p= forças de pressão por unidade de volume;

F_v= forças viscosas por unidade de volume;

F_g= forças de campo por unidade de volume.

Essas forças assumem as formas apresentadas nas Equações 2.19 a 2.22, obtidas para a aceleração de um elemento de fluido de massa infinitesimal em movimento em um campo de velocidade:

$$\mathbf{F_i} = \frac{\mathrm{D}(\rho \mathrm{v})}{\mathrm{Dt}} \tag{2.19}$$

$$\boldsymbol{F_p} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} \tag{2.20}$$

$$\boldsymbol{F_v} = \boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{\tau} \tag{2.21}$$

$$\boldsymbol{F_g} = \rho \boldsymbol{g} \tag{2.22}$$

onde:

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

$\boldsymbol{\tau}$= tensor tensão;

ρ= densidade do fluido;

$\boldsymbol{v}$= vetor velocidade;

P= pressão;

$\boldsymbol{g}$=aceleração da gravidade.

Substituindo as Equações 2.19, 2.20, 2.21, 2.22 na Equação 2.18, obtemos a Equação 2.23.

$$\frac{D\rho\boldsymbol{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} + \boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{\tau} + \rho\boldsymbol{g} \tag{2.23}$$

Para fluido newtoniano, incompressível, e com viscosidade constante, a Equação 2.23 reduz-se à equação de Navier-Stokes:

$$\rho\frac{D\boldsymbol{v}}{Dt} = -\boldsymbol{\nabla}\mathrm{P} + \mu\boldsymbol{\nabla}^{\boldsymbol{2}}\boldsymbol{v} + \rho\boldsymbol{g} \tag{2.24}$$

2.4.3 Escoamentos Turbulentos

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

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). Além disso, o escoamento é altamente dissipativo, onde parte da energia cinética é transformada em energia interna (aquecimento) devido às tensões de cisalhamento, que têm a sua intensidade aumentada devido ao regime turbulento. Vale ressaltar que um fluido estático ou em movimento uniforme possui forças cisalhantes nulas.

2.4.3.1 Turbulência

O escoamento turbulento é caracterizado pelo comportamento aleatório, irregular, caótico e tridimensional o que torna difícil sua descrição e predição. As estruturas rotacionais do escoamento, chamadas de turbilhões ou vórtices, frequentemente são observadas. Assim, a turbulência pode ser identificada pelo movimento dos turbilhões com um largo espectro de tamanhos, o que implica uma gama de escalas de comprimento. Os maiores tamanhos de turbilhões tem

a mesma ordem de grandeza do domínio, enquanto que, os de menor tamanho estão limitados pelas forças viscosas e pela energia cinética do movimento atuante (Klein, 2012).

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

As três abordagens mais comuns para resolver numericamente um escoamento são: *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES) e *Reynolds-Average Navier-Stokes* (RANS). Dentre essas abordagens, a mais utilizada na indústria é a RANS, pois, esta necessita de menor esforço computacional na modelagem das maiores escalas de turbulência.

Ao se medir a velocidade de um fluido que escoa no regime turbulento em um dado ponto e em função do tempo, obtém-se comportamento oscilatório e caótico nas medições. Uma variável instantânea, num tempo t qualquer, pode ser decomposta em duas componentes. A primeira representa a média temporal e a segunda representa a flutuação turbulenta.

$$v = \bar{v} + v^t \tag{2.25}$$

onde v é o valor da velocidade em um instante t, $\bar{v}$ é a sua média temporal, ou seja, o valor médio das velocidades calculado sobre um grande número de flutuações e v^t é a flutuação turbulenta naquele instante t.

Apesar de o escoamento turbulento ser intrinsecamente transiente, pode-se identificar um regime permanente, onde as propriedades médias não variam com o tempo. A velocidade média é comumente obtida aplicando-se a média

temporal, utilizada como um filtro que remove as flutuações, sobre um grande número de flutuações para escoamentos estacionários, como pode ser observado na Equação 2.26.

$$v = \frac{1}{t_0}\int_{t-\frac{t_0}{2}}^{t+\frac{t_0}{2}} \hat{v}(t)dt \tag{2.26}$$

onde t_0 é um intervalo de tempo grande o suficiente para zerar o valor médio das componentes flutuantes, mas pequeno o suficiente para captar, em regimes transientes, a variação de v com o tempo. De acordo com a definição apresentada acima, obtemos que:

$$\overline{v^t} = 0\ ;\ \overline{\overline{v^t}} = 0\ ;\ \overline{vv^t} = 0\ ;\ \overline{v^t}.\overline{v^t} \neq 0 \tag{2.27}$$

Inserindo essa nova definição de velocidade na Equação da Continuidade, quando considerada para fluidos incompressíveis, é possível mostrar que se chega a uma equação similar à equação original para velocidade instantânea, porém para a velocidade média.

$$\Delta.\boldsymbol{v} = 0 \ \Rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{2.28}$$

Inserindo o novo conceito de velocidade, temos:

$$\frac{\partial(\overline{v_x} + v_x^t)}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_y} + v_y^t)}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{v_z} + v_z^t)}{\partial z} = 0 \tag{2.30}$$

Aplicando a média temporal nos dois membros da Equação 2.30, resulta:

$$\frac{\partial(\overline{v_x})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{v_y})}{\partial y} + \frac{\partial(\overline{v_z})}{\partial z} = 0 \Rightarrow \Delta.\overline{\boldsymbol{v}} = 0 \tag{2.31}$$

Com esse resultado pode-se observar que é possível tratar a velocidade com suas decomposições em componentes média e turbulenta, porém sem a introdução de um novo termo, mantendo a Equação da Continuidade com a mudança da velocidade instantânea para a velocidade média apenas (Klein, 2007). Quando substituímos as variáveis instantâneas pela soma de suas componentes média e flutuante na Equação de Navier-Stokes, obtemos a conhecida equação RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*):

$$\rho \frac{D\overline{\boldsymbol{v}}}{Dt} = -\Delta\bar{p} + \mu \boldsymbol{\nabla}^2 \overline{\boldsymbol{v}} + \rho \boldsymbol{g} - \rho\left(\overline{\boldsymbol{v}^{\boldsymbol{t}}.\Delta \boldsymbol{v}^{\boldsymbol{t}}}\right) \tag{2.32}$$

Ao analisar a Equação 2.32, é possível perceber que ela é igual à equação de Navier Stokes, para variáveis instantâneas, com as variáveis médias, porém surge um novo termo $-\rho\left(\overline{\boldsymbol{v}^{\boldsymbol{t}}.\Delta \boldsymbol{v}^{\boldsymbol{t}}}\right)$. Este termo é conhecido como tensor de *Reynolds*, e pode ser interpretado como uma força turbulenta, por unidade de volume, que representa uma força extra de inércia. Esse termo representa toda a contribuição turbulenta do escoamento no que tange à transferência de momento, sendo responsável pelos escoamentos secundários, como zonas de recirculação. Com componentes denotados por τ_{ij}, o tensor de *Reynolds* pode ser expresso como apresentado a seguir:

$$\underline{\underline{\boldsymbol{\tau}}}^{\boldsymbol{t}} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho\overline{(v_x^t)^2} & \rho\overline{(v_x^t v_y^t)} & \rho\overline{(v_x^t v_z^t)} \\ \rho\overline{(v_y^t v_x^t)} & \rho\overline{(v_y^t)^2} & \rho\overline{(v_y^t v_z^t)} \\ \rho\overline{(v_z^t v_x^t)} & \rho\overline{(v_z^t v_y^t)} & \rho\overline{(v_z^t)^2} \end{bmatrix} \tag{2.33}$$

Os componentes do tensor de *Reynolds* são simétricos, então, $\tau_{ij} = \tau_{ji}$.

Em escoamentos com o comportamento turbulento, os componentes considerados normais, τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}, são não nulos, pois são compostos pelo quadrado de um mesmo componente da velocidade turbulenta, sendo por definição, diferente de zero (desde que a própria velocidade flutuante não seja zero), como observado na Equação 2.27. Quando considerado os componentes cisalhantes, τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}, estes estão associados a componentes distintos da velocidade turbulenta e se estes forem estatisticamente independentes, a média temporal de seu produto será nula (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Analisando as Equações da Continuidade e a RANS expressas pelas Equações 2.31 e 2.32 respectivamente, juntamente com a relação $\tau_{ij} = \tau_{ji}$, observa-se que o sistema formado entre elas é composto por 4 equações (Continuidade mais RANS, uma para cada direção x, y, z do escoamento) e 10 incógnitas: P, $\bar{v}_x$, $\bar{v}_y$, $\bar{v}_z$, τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}, τ_{xy}, τ_{xz} e τ_{yz}.

Com isso, o surgimento do termo referente ao tensor de *Reynolds* faz com que o sistema passe a ter mais incógnitas do que equações requerendo relações adicionais para modelar os componentes do tensor de *Reynolds*.

2.4.3.2 Modelos de Viscosidade Turbulenta

Com o intuito de modelar os componentes do tensor de Reynolds e fechar o sistema formado por 4 equações e 10 incógnitas, foram desenvolvidos os modelos de turbulência. Dentre os diversos tipos e conceitos de modelos de turbulência disponíveis, os mais utilizados, devido a sua simplicidade e robustez são os modelos baseados na viscosidade turbulenta linear. Nesses modelos, calculam-se os componentes do tensor de Reynolds, com base na hipótese de *Boussinesq* (1877), que estabelece que as tensões de *Reynolds* são proporcionais à taxa de deformação do fluido e seus gradientes, em analogia à lei da viscosidade de Newton:

$$\overline{\rho v_i^t v_j^t} = \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} - \mu^t \left(\frac{\partial \overline{v_i}}{\partial \overline{v_j}} + \frac{\partial \overline{v_j}}{\partial \overline{v_i}} \right) \tag{2.34}$$

A constante de proporcionalidade é então chamada de viscosidade turbulenta μ^t. A viscosidade turbulenta não é uma propriedade do fluido, mas sim do escoamento. Na equação 2.34, *k* é a energia cinética turbulenta por unidade de massa, inserida para respeitar o conceito de energia cinética relativa às componentes flutuantes da velocidade. δ_{ij} é o delta de *Kroenecker* (1, se i = j e 0, se i ≠ j), que é a própria matriz identidade e $\left(\frac{\partial v_i}{\partial v_j} + \frac{\partial v_j}{\partial v_i}\right)$ é a parte simétrica do gradiente de velocidade, chamada de tensor deformação.

Dentre os modelos de viscosidade turbulenta existem os lineares e os não lineares. Este capítulo ficará restrito apenas aos modelos de viscosidade turbulenta lineares. As classes mais comuns são:

<u>Modelos de Zero Equações - *Zero Equation*</u>;

Por não apresentar nenhuma equação de transporte adicional, apenas conter expressões algébricas, este modelo pode ser chamado de modelo de Zero Equações. Estes modelos necessitam de uma equação algébrica para a viscosidade turbulenta μ^t. O modelo algébrico mais conhecido baseia-se na teoria do comprimento de mistura de *Prandtl*, l_0 (escala de comprimento turbulenta), onde é proposta a Equação 2.33 para expressar a viscosidade turbulenta. Para camadas limite com gradiente de pressão nulo, l_0 é dado pela

Equação 2.34, onde κ é a constante de *Von Kármán* que dá origem a Lei Logarítimica da Parede.

$$\mu^t = \rho l_0^2 \left|\frac{dv}{dy}\right| \tag{2.33}$$

$$l_0 = \kappa y \tag{2.34}$$

Assim, no modelo de zero equações de Prandtl, a viscosidade turbulenta é função do gradiente da velocidade média do escoamento e de uma escala de comprimento geométrica. Assim, é um modelo de predição limitado, pois a escala de comprimento deve ser especificada empiricamente (Speziale, 1996).

<u>Modelos a duas equações (exemplo: κ-ε e κ-ω)</u>

Os modelos a duas equações, baseados também no conceito de viscosidade turbulenta, apresentam duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas, sendo caracterizados como modelos consistentes e completos. Estas propriedades turbulentas são quantidades independentes que estão diretamente relacionadas com as escalas de velocidade e comprimento turbulentas. Geralmente, são utilizadas a energia cinética turbulenta, k, e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, ε, ambas por unidade de massa.

O modelo k-ε e as suas variantes são os modelos mais utilizados na solução de problemas de interesse industrial. Este modelo, na sua forma padrão, possui duas equações, uma para a energia cinética turbulenta, k, e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta, ε. A equação diferencial de transporte para a energia cinética turbulenta, *k*, está expressa na Equação 2.35 e para a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, ε, na Equação 2.36:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu^t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{2.35}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu^t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right] + \frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \tag{2.36}$$

onde a viscosidade turbulenta μ^t é definida pela Equação 2.37 com a constante C_μ assumindo o valor de 0,09.

$$\mu^t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{2.37}$$

O termo P_k , que aparece nas Equações 2.35 e 2.36, representa a "produção de energia cinética turbulênta" transferida do fluido médio, resultado dos efeitos das forças viscosas (cisalhamento) e do empuxo. Os valores de ε são encontrados a partir da Equação diferencial de transporte 2.36. Os termos $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε e σ_k são parâmetros do modelo.

2.5 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta que utiliza o estudo dos fenômenos de transporte, que envolve escoamento de fluidos, transferência de calor, transferência de massa e reações químicas, acoplados a métodos matemáticos, numéricos e computacionais.

Simulações em CFD oferecem compreensão do comportamento do escoamento em situações onde é impraticável ou mesmo impossível realizar experimentos. Para uma boa predição dos resultados é necessário que os modelos utilizados representem o fenômeno desejado. Essa representatividade é confiável quando tais modelos são validados com experimentos bem controlados, bem definidos e que possam ser repetidos. A percepção do operador é essencial para que essa ferramenta seja aplicada corretamente e os resultados possam ser utilizados com prudência. Essa ferramenta contém uma grande quantidade de informações sobre campos de velocidade, pressão, densidade, temperatura, concentração, etc.

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

2.5.1 Etapas da Simulação CFD

O conhecimento físico do problema é essencial para a realização de análises utilizando CFD. As variáveis mais importantes devem ser relacionadas e investigadas para que simplificações possam ser feitas, além da determinação

dos limites de estudo do problema. O problema físico é modelado matematicamente através das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia.

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

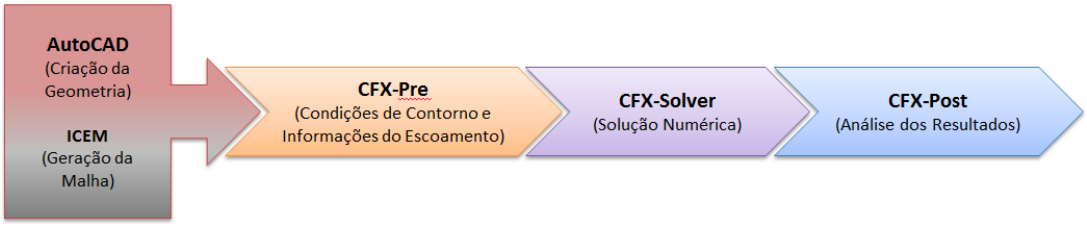

Figura 2.10 – Etapas da simulação em CFD

Para a análise com CFD, o domínio de interesse é a região onde ocorre o escoamento do fluido. Para definir esta região, o modelo geométrico deve ser proposto contendo as principais dimensões do problema físico. Nesta etapa, deve-se ter atenção para facilitar a aplicação das condições de contorno e diminuir a necessidade de malha propondo simplificações no modelo como simetrias e periodicidades. Posteriormente, o volume deve ser discretizado por meio de volumes infinitesimais, onde as equações são calculadas e as soluções são obtidas, sendo essa etapa denominada, geração de malha. Num projeto industrial com uso de CFD, mais de 50% do tempo é dedicado a estas duas etapas. No pré-processamento, o usuário tem a tarefa de definir propriedades dos fluidos, selecionar os modelos fenomenológicos relevantes e especificar as condições de contorno apropriadas que descrevem as fronteiras do domínio.

No CFX, a técnica para discretização do problema, no solver, é a utilização a CV-FEM (*Control Volume Finite Element Method*). Assim como o domínio precisa ser discretizado, as equações também precisam de uma transformação equivalente. Sendo assim, as equações deixam de ser resolvidas através de

equações diferenciais, substituindo-se as derivadas por expressões algébricas, já que o domínio passou a ser discreto. As técnicas utilizadas neste tipo de solver se diferenciam pela aproximação das variáveis de fluxo e pela discretização das equações. O modelo matemático deve descrever os fenômenos físicos de maneira fiel ou, pelo menos, o mais próximo da realidade.

2.5.2 Malha Computacional

A discretização do espaço físico se refere à aproximação de um problema em um domínio contínuo por elementos discretos, construindo-se a chamada malha computacional. A grande maioria dos métodos numéricos de solução de equações de transporte envolve cálculo no nível de subdomínios, portanto, é necessário que o domínio seja subdividido em pequenos elementos. Esta subdivisão é chamada de geração de malha, *mesh*.

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

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

As malhas computacionais podem ser estruturadas, não estruturadas ou híbridas. Essas podem ser uniformes ou não uniformes, igualmente espaçados ou espaçados de acordo com a necessidade do domínio, porém, uma alta deformação dos elementos pode levar a problemas numéricos. As malhas

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

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

2.5.3 Malha Adaptativa

A adaptação de malha, no *software* CFX, é um processo de refinamento seletivo em áreas especificadas pelo critério adaptativo. Isso significa que a malha passará automaticamente por refinamentos locais com o intuito de torná-la mais fina onde as variáveis selecionadas apresentam variações rápidas para apresentar resultados mais acurados nestas regiões.

A estratégia de adaptação automática é realizada através da combinação dos métodos de refinamento e realocação nodal, onde os elementos da malha, que possuem baixa qualidade, são adequadamente subdivididos, com o objetivo de melhorar a qualidade dos mesmos. Em seguida, a malha é submetida a um processo de realocação nodal, com o propósito de melhorar as propriedades geométricas dos elementos, bem como suavizar a transição entre as regiões de baixa e alta densidade de elementos (Popioleket al., 2001). A estratégia adaptativa garante uma boa transição entre regiões refinadas e grosseiras, mantendo a compatibilidade entre regiões adjacentes. A qualidade global da malha gerada é assegurada pela contribuição das medidas dos erros locais

calculados para cada nó da malha. A malha adaptativa converge para uma malha de boa qualidade mesmo que a malha inicial seja extremamente grosseira (Siqueira, 2009).

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

3 METODOLOGIA

3.1 Recursos Computacionais

No presente estudo foi utilizado o *software* de Fluidodinâmica Computacional CFX, versão 16.1, distribuído pela ANSYS Inc. A geração da geometria 3D e da malha computacional foram feitas utilizando o *software* AutoCad 2013 e ICEM CFD 16.1, respectivamente. O CFX permite trabalhar com misturas multicomponentes, em análises transientes e regimes turbulentos. Possui algoritmos de solução adequados ao problema de dispersão de gases, além de ter elevada capacidade gráfica proporcionando resultados de fácil visualização e largo emprego. Permite determinar diretamente a distribuição de concentrações de gás em qualquer ponto da unidade.

As simulações foram realizadas utilizando 21 processadores Intel Xeon (2.40GHz, 2400Mhz) com 24 GB de memória RAM. O tempo de simulação foi avaliado levando em média cerca de 4 horas e 30 minutos para o regime estacionário e 7 horas para o regime transiente. Além disso, para a abordagem da malha adaptativa, o tempo médio de simulação foi de 3 horas e 30 minutos.

3.2 Estudo de Dispersão de Gases

Em linhas gerais, o objetivo de um estudo de dispersão de gases é fornecer dados consistentes para a implantação de sistemas de detecção de vazamentos. O estudo consiste na análise do escoamento do gás liberado para a atmosfera através do orifício de vazamento, considerando sua interação com a ventilação ambiente, obstáculos e a geometria da unidade.

A Análise Preliminar de Riscos (APR) é o método para identificação de perigo nos primeiros estágios de desenvolvimento da planta de processo. Essa técnica qualitativa visa identificar as possíveis hipóteses acidentais, assim como, pontos de vazamento/liberação de material inflamável ou tóxico em unidades de processamento de petróleo (Lees, 1996). Nesta etapa, leva-se em consideração um critério de localização do *layout* da unidade, características dos inventários dos possíveis vazamentos e especificações de processo. Como uma planta de processos apresenta dezenas de cenários de liberações gasosas, ficaria inviável, para a finalidade do presente trabalho, realizar simulações de dispersão

em todos esses cenários. Assim sendo, optou-se por considerar apenas um cenário de vazamento (um ponto), este localizado no compressor de gás.

Neste estudo foi selecionado o cenário que oferece a maior frequência de vazamento em unidades industriais. De acordo com Fleck (2008) e Gomes (2012), os equipamentos que oferecem maior probabilidade de vazamento são os que constituem o sistema de compressão dos gases. Spouge (2006) demonstra que os compressores possuem maior frequência de vazamento e, para tal, utiliza dados estatísticos da HSE (*Health and Safety Executive*) para diâmetro de orifício de vazamento e dados de diferentes tipos e tamanhos de equipamentos para padronização da frequência de vazamento criando uma função analítica que representa a variação da frequência de vazamento com o tipo de equipamento/sistema para diferentes diâmetros de orifício de vazamento. Portanto o equipamento selecionado foi um compressor típico que compõe o sistema de compressão de gases da unidade em condições de operação da pressão em 150 kgf/cm² e temperatura de 128°C.

A qualidade da representação geométrica tem efeito significativo nos resultados das simulações. De acordo com a geometria, podem ser formadas zonas de estagnação, zonas de maior circulação de ar, zonas geradoras de vórtices, zonas turbulentas, etc. Essa caracterização do ambiente onde o fluido será liberado irá influenciar no tamanho da nuvem de gás gerada, bem como na sua concentração. Logo, é fácil perceber que a etapa da criação do modelo geométrico da plataforma tem importância nos resultados.

3.2.1 Geometria e Malha Computacional

No presente trabalho foi escolhida uma unidade com grau de complexidade elevado. Trata-se de um FPSO genérico com ancoragem do tipo Turret interno que possui as características principais para o tratamento do óleo, gás e água extraído em alto mar. A geometria utilizada foi adaptada a partir das plataformas de petróleo em funcionamento na Petrobras. As Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3 apresentam, respectivamente, uma vista tridimensional, uma vista de topo (identificando o módulo que será estudado na unidade) e a vista do farfield cilíndrico (domínio das simulações; região na qual há escoamento de fluido).

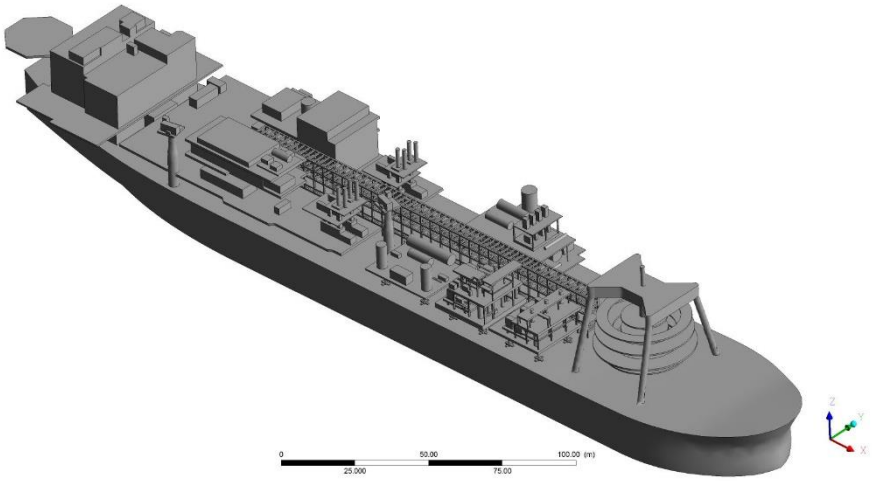

Figura 3.1 – Vista tridimensional do modelo 3D

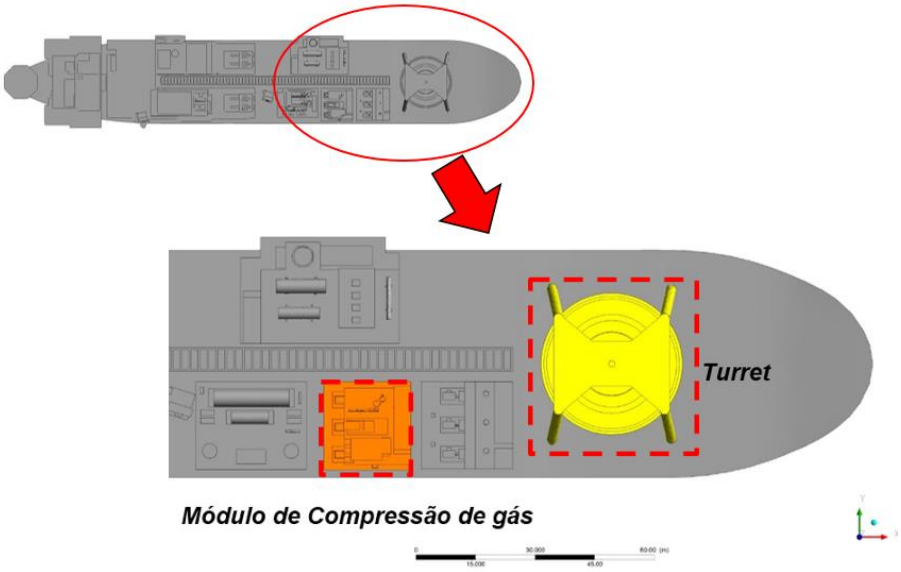

Figura 3.2 – Vista de topo do modelo 3D

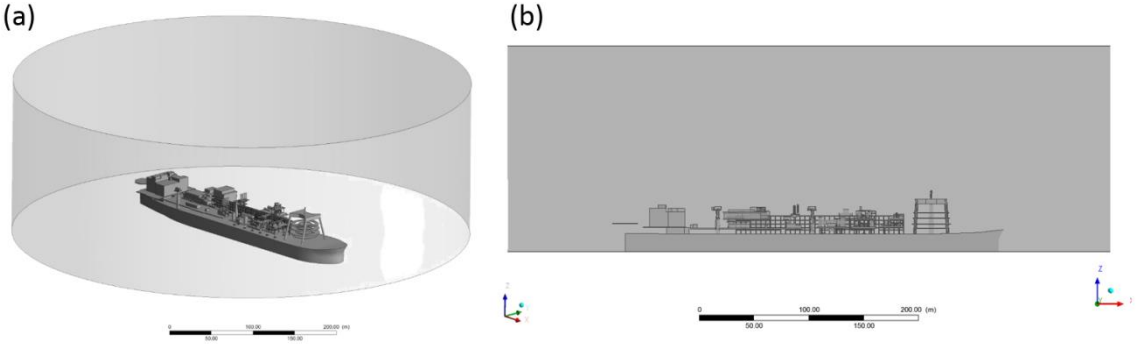

Figura 3.3 – Vista do domínio (*Farfield*) (a) vista 3D; (b) vista lateral

No modelo desenvolvido não foi considerada a presença de tubulações devido à insuficiência de recursos computacionais na geração da malha. Em contra partida, o modelo possui detalhes mais representativos das estruturas, equipamentos, módulos, *pipe-rack* e etc. O *farfield* utilizado possui 550 metros

de diâmetro e 188 metros de altura e a unidade possui 356 metros de comprimeto, 57 metros de largura e 56 metros de altura (superfície do mar até o topo do *Turret*). O grande espaço ao redor da plataforma é incluído para assegurar que a condição de contorno relativa à entrada de ar não seja perturbada pela presença da unidade. Devido à inviabilidade da construção de malhas estruturadas face à complexidade da geometria, foram usadas, na discretização do domínio, malhas não estruturadas constituídas por elementos tetraédricos.

Optou-se pela não adoção de elementos prismáticos na resolução da camada limite, pois, em um estudo de dispersão de gases leves, o efeito da camada limite não são tão significativos para estimar a região de influência da nuvem de gás. Além disso, os maiores gradientes encontram-se localizados próximos à liberação do gás, dedicando-se, portanto, o esforço computacional para um refinamento nesta região.

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

Uma malha inicial foi contruída com intuito de representar de forma detalhada as superfícies de cada estrutura e equipamento que possa influenciar no resultado da dispersão dos gases. Por se tratar de um vazamento com diferentes direções de jato, um caso foi selecionado para o teste de sensibilidade de malha que será apresentado no Capítulo 4. Além disso, para confrontar os resultados deste trabalho, utilizou-se um método bastante empregado na indústria para esse tipo de problema, a adaptação de malha. A adaptação de malha permite tornar mais dinâmica as simulações em termos de malha e acompanhamento aos parâmetros de interesse, evitando-se a contrução de

diversas malhas computacionais diferentes. A Figura 3.4 e Figura 3.5 apresentam a malha superficial no modelo 3D.

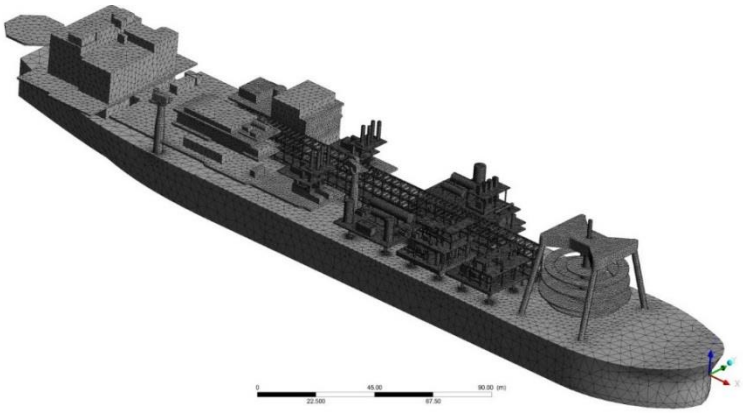

Figura 3.4 – Malha superficial do modelo 3D

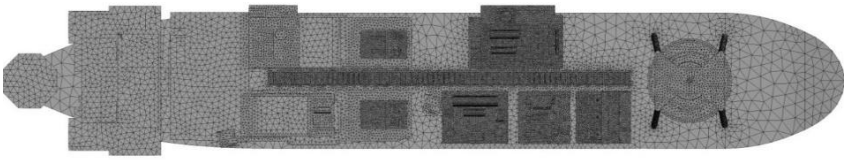

Figura 3.5 – Malha superficial vista de topo

3.2.2 Definição das Condições Meteorológicas

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

As condições meteorológicas estabelecem a velocidade média mais frequente dos ventos e a porcentagem de ocorrência para cada direção. O valor de porcentagem para cada direção faz-se necessário quando se deseja calcular a probabilidade de ocorrência de determinado cenário dentro dos listados na APR.

No presente estudo, essas condições estão relacionadas com uma determinada região similar à da Bacia de Campos. Para efeitos de estudo, foi introduzido também um vento de baixa intensidade (0,5 m/s) representando o cenário de calmaria, considerado o mais crítico pela baixa diluição dos gases

com a ventilação ambiente, formando nuvens inflamáveis de grandes proporções. As condições meteorológicas estabelecem a intensidade e a porcentagem de ocorrência para cada direção e são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Direções de vento e intensidades
(Metocean Data – Petrobras S.A.)

Veloc. (m/s)		N	NE	L	SE	S	SO	O	NO	TOTAL	% Veloc.
0	**1**	264	291	268	249	290	204	223	185	1974	1.66
1	**2**	484	630	640	504	475	336	335	299	3703	3.11
2	**3**	927	1440	1440	906	853	626	478	445	7115	5.98
3	**4**	1223	2336	2100	1312	1195	782	516	422	9886	8.31
4	**5**	1924	3582	2860	1765	1437	967	456	469	13460	11.32
5	**6**	2065	4035	2525	1748	1407	868	342	326	13316	11.20
6	**7**	2740	5105	2477	1775	1466	893	300	249	15005	12.62
7	**8**	2956	4859	1732	1271	1133	715	193	167	13026	10.95
8	**9**	3351	4861	1237	975	958	704	203	123	12412	10.44
9	**10**	2735	3711	676	482	597	446	124	84	8855	7.45
10	**11**	2320	2999	393	322	395	397	108	56	6990	5.88
11	**12**	1633	1773	196	192	265	247	70	30	4406	3.71
12	**13**	1139	1133	105	94	166	180	41	10	2868	2.41
13	**14**	1012	1482	109	68	173	241	72	3	3160	2.66
14	**15**	400	446	32	20	43	88	30	2	1061	0.89
15	**16**	265	508	16	10	23	96	51	1	970	0.82
16	**17**	97	126	5	6	9	37	12	1	293	0.25
17	**18**	73	130	1	3	5	30	8	0	250	0.21
18	**19**	31	48	0	2	6	5	17	0	109	0.09
19	**20**	11	21	0	1	2	1	4	0	40	0.03
20	**21**	3	3	0	1	0	0	2	0	9	0.01
21	**22**	0	3	0	0	1	0	0	0	4	0.00
22	**23**	0	1	0	0	1	0	0	0	2	0.00
23	**24**	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
Total		25653	39523	16812	11706	10900	7863	3585	2872	118914	
% Direção		21.57	33.24	14.14	9.84	9.17	6.61	3.01	2.42		

Analisando a Tabela 3.1, a velocidade que apresenta maior frequência está compreendida entre os valores 6 e 7 m/s na direção Nordeste. Dessa forma, no estudo, foram usados dois valores distintos para a velocidade do vento, um de 6,5 m/s, representando a média da faixa com maior porcentagem de ocorrência e um de 0,5 m/s, representando a calmaria.

Como apresentado no item 2.1.3, há uma liberdade da unidade girar em torno do eixo do *Turret* ficando orientada na direção resultante das cargas ambientais. Essa é uma característica oriunda da ancoragem do tipo *Turret* para

embarcações com operações estacionárias, item 2.1.3. Assim, a carga ambiental considerada no estudo refere-se ao vento que atinge a plataforma.

Desta forma, será considerada a direção de incidência de 0° representando o vento incidindo pela proa em direção à popa. Caso haja uma variação da direção do vento, o navio tende a rotacionar em torno da estrutura do *Turret* para fazer com que a resultante das cargas ambientais sobre a embarcação seja nula. Porém, como esta rotação não ocorre de forma instantânea, considera-se uma variação nas direções de incidência do vento para + 30° e -30°, onde os ângulos positivos representam o vento incidindo por bombordo e os ângulos negativos incidindo por boreste. Será considerado que o navio terá seu aproamento em direção ao vento de maior frequência, ou seja, o vento soprando da direção Nordeste.

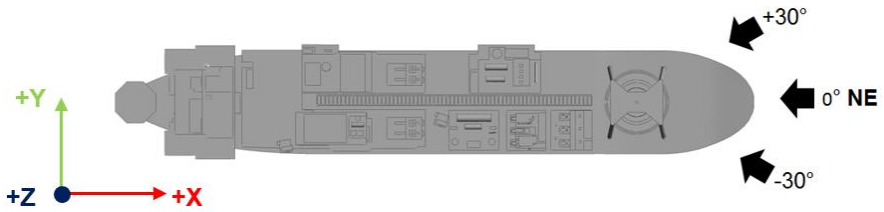

Figura 3.6 – Esquema representativo das direções de vento.

3.2.3 Seleção dos Cenários, Parâmetros e Condições de Contorno

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

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

8 direções de vento x 6 direções de vazamento x número de pontos de vazamento, tendo assim, um número excessivo de cenários a serem simulados. Segundo Fleck (2008), em estudos de dispersão de gases com auxílio de CFD, deve-se dar preferência para vazamentos direcionados para o piso da unidade ou situações onde há obstáculos na saída do jato, confinando parcialmente o gás e aumentando a mistura hidrocarboneto/ar, ou seja, o volume inflamável.

Neste contexto, foi selecionado apenas um ponto de vazamento para análise estacionária e transiente realizando-se as 6 direções de jato sugeridas por Strϕm et. al. (1999) e analisando-se os vazamentos que estariam confinados como observado por Fleck (2008). Para tal, 6 direções de jato x 3 direções de vento x 2 intensidades de vento resultam em um total de 36 simulações para cada regime, ou seja, 36 simulações estacionárias, 36 simulações transientes, além de 36 simulações utilizando malha adaptativa (estacionário) conferindo um total de 108 simulações. O compressor escolhido é apresentado na Figura 3.7.

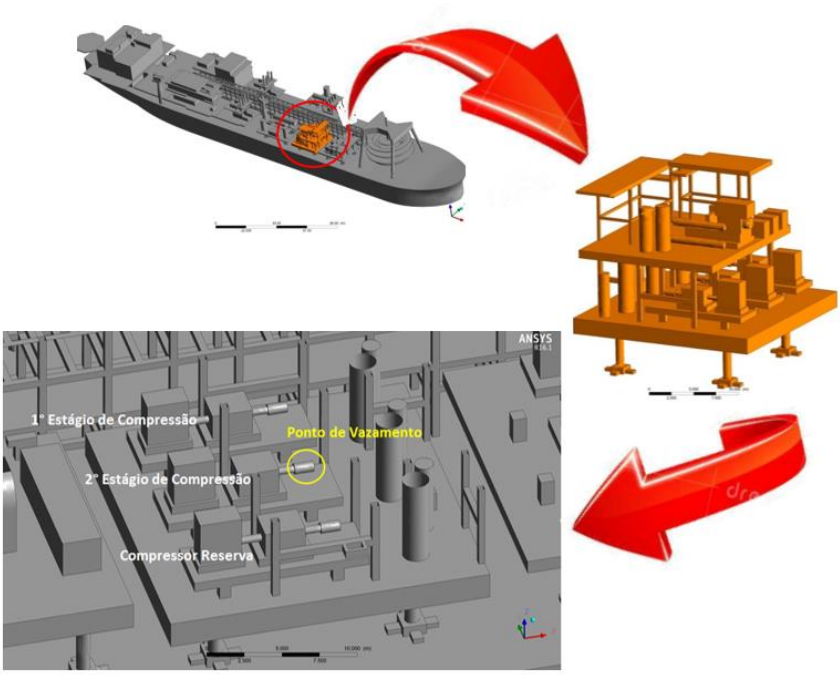

Figura 3.7 – Compressor selecionado no estudo

A partir do ponto de vazamento selecionado, a Tabela 3.2 apresenta os 36 casos que serão simulados tanto no regime estacionário quanto no transiente, além da estratégia de malha adaptativa. A partir dessas simulações é possível utilizar a metodologia de alocação de detectores e estimar o tempo para detecção das nuvens simuladas, além de verificar se a abordagem estacionária é suficiente para realização de um estudo de dispersão de gases confiável.

Tabela 3.2 – Seleção dos Cenários e Especificações das Simulações

Caso	Equipamento	Direção do Vazamento	Direção do Vento	Intensidade do Vento (m/s)
1	C-02	+X	0º	0,5
2	C-02		+30°	
3	C-02		-30°	
4	C-02		0º	6.5
5	C-02		+30°	
6	C-02		-30°	
7	C-02	-X	0º	0,5
8	C-02		+30°	
9	C-02		-30°	
10	C-02		0º	6.5
11	C-02		+30°	
12	C-02		-30°	
13	C-02	+Y	0º	0,5
14	C-02		+30°	
15	C-02		-30°	
16	C-02		0º	6.5
17	C-02		+30°	
18	C-02		-30°	
19	C-02	-Y	0º	0,5
20	C-02		+30°	
21	C-02		-30°	
22	C-02		0º	6.5
23	C-02		+30°	
24	C-02		-30°	
25	C-02	+Z	0º	0,5
26	C-02		+30°	
27	C-02		-30°	
28	C-02		0º	6.5
29	C-02		+30°	
30	C-02		-30°	
31	C-02	-Z	0º	0,5
32	C-02		+30°	
33	C-02		-30°	
34	C-02		0º	6.5
35	C-02		+30°	
36	C-02		-30°	

As condições atmosféricas e as condições de operação do compressor são inseridas por meio das condições de contorno. Na aplicação das condições de contorno, algumas propriedades devem ser inseridas. No CFX-Pré, foi criado um fluido denominado “Mistura” que representa o gás contido nas linhas de processo do sistema de compressão da unidade. A composição do gás deve ser típica à do gás natural processado nesses sistemas, sendo assim, a Tabela 3.3

apresenta os componentes presentes na mistura e suas respectivas frações molares e mássicas de acordo com o peso molecular de cada espécie.

Tabela 3.3 – Composição da Mistura Contida na Corrente de Processo

Componentes	**PM**	**Fr. Molar**	**Fr. Mássica**
CH_4	16,04	0,750	0,5508
C_2H_6	30,07	0,125	0,1721
C_3H_8	44,10	0,070	0,1413
C_4H_{10}	58,10	0,030	0,0798
C_5+	72,15	0,010	0,0330
CO_2	44,01	0,005	0,0101
N_2	28,01	0,010	0,0128

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

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

Tabela 3.4 – Fração Mássica Normalizada de Hidrocarbonetos

Componentes	**Fr. Mássica Normalizada**
CH_4	0,5637
C_2H_6	0,1761
C_3H_8	0,1447
C_4H_{10}	0,0817
C_5+	0,0338

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

Tendo em vista a afirmação acima, o *Source point* foi utilizado neste trabalho como condição de entrada. Os parâmetros importantes para calcular a vazão mássica e a velocidade do vazamento para as simulações estão inseridos na Tabela 3.5. Nesta são encontrados os valores para pressão interna, P_o, temperatura após expansão T, diâmetro do orifício de vazamento, D, área do vazamento, A, densidade da mistura na linha de processo, ρ_o, coeficiente isentrópico, γ, vazão mássica, q_s, e a velocidade do vazamento após expansão,

V_s. As equaçõs para o cálculo desses parâmetros são encontradas no item 2.2.1.1 e item 2.2.2.2.

Tabela 3.5 – Propriedade e Parâmetros de simulação para análise do vazamento

Parâmetro	**Valor**
P_o [kgf/cm²]	150
T [ºC]	110
D [mm]	7,6
A [m²]	4,54 x 10e-5
ρ_o [kg/m³]	107,8
γ	1,29
q_s [kg/s]	0,70
V_s [m/s]	122.5

No CFX-Pré são especificados como a simulação será tratada em relação ao regime do escoamento. Segundo HSE (2003), em geral, é suficiente realizar cálculos estacionários para analisar o tamanho das nuvens geradas, sendo que o escoamento transiente pode ser utilizado para determinação do tempo de detecção. Neste caso, serão simulados os casos com regime estacionário e transiente para comparar os resultados finais.

O *Source Point* atua em um único elemento da malha e cria fontes de quantidade em um ponto específico dentro do domínio de interesse. A localização do ponto é definida em coordenadas cartesianas e a fonte é criada no elemento de malha que está mais próximo do ponto especificado. As fontes devem ser especificadas como quantidades volumétricas. A Tabela 3.6 apresenta um resumo das condições do escoamento e de contorno e os parâmetros utilizados nas simulações.

Tabela 3.6 – Condições de Contorno e Parâmetros da Simulação

Condição de Contorno/ Parâmetro	**Especificação/ Valor**
Regime do Escoamento	Estacionário / Transiente
Pressão de Referência: Domínio [atm]	1
Densidade de Referência: Domínio [kg/m³]	1,183
Gravidade Direção ẑ [m/s²]	-9,81
Tipo de Escoamento	Incompressível
Modelo de Transferência de Calor	Thermal Energy
Modelo de Turbulência	k-ε
Modelo de Função de Parede	*Scalable*
Condição Ambiente	*Air Ideal gas*
Superfícies de Entrada do Ar	*Opening* (velocidade do vento)
Superfícies da Unidade e Limite Inferior (Mar)	*Wall* (*No Slip*)
Entrada do Gás (*Source Point*) [m/s]	V_s = 122,5
Entrada do Gás (*Source Point*) [kg/s]	q_s = 0,70

*Densidade de Referência: Densidade do Ar

3.2.4 Teste de Sensibilidade de Malha

O teste de sensibilidade de malha objetiva eliminar a influência da malha ou ao menos limitá-la nos resultados de dispersão de gases de forma que os desvios estejam dentro de uma faixa tolerável levando em consideração o objetivo do estudo. O teste de sensibilidade de malha é realizado utilizando os mesmos modelos matemáticos, as mesmas condições de contorno para o ambiente e para o vazamento e o mesmo *layout* da unidade, mantendo-se os equipamentos inalterados, variando o refinamento da malha, até que a concentração do componente de interesse não se altere significativamente.

A partir da geometria proposta, foi elaborada uma malha inicial com o tamanho dos elementos suficientes para representar as superfícies dos equipamentos e estruturas da unidade, chamada de *Mesh 0*. A partir desta, selecionou-se o caso 13 da Tabela 3.2, vazamento na direção +Y com condição de vento de calmaria, para realizar os testes de independência da malha. A seleção de um único caso é representativa para os demais, pois, o refinamento ficará baseado no tamanho dos elementos em uma dada região de interesse e, a partir da definição dos parâmetros adequados para independêcia do resultado, acredita-se que os mesmos possam ser aplicados para as demais simulações. Para esse teste, foram selecionados os seguintes tamanhos de elemento: 0,75m, 0,58m, 0,50m e 0,25m para elementos tetraédricos.

Malhas com refinamentos distintos são elaboradas para realizar o teste de independêcia de malha, entretanto, por se tratar de um caso de vazamento com diversas direções de jato e vento, o refinamento de uma região que englobasse todos os casos geraria uma malha com alto grau de refinamento, impossibilitanto as simulações. Assim sendo, o refinamento destinou-se a uma região específica por meio da densidade de malha local (refinamento na região de interesse). Para essa densidade de malha é possível indicar o temanho máximo do elemento dentro da região selecionada, a taxa de crescimento a partir dessa região (fora da densidade de malha) e o número de camadas a partir dessa região com a taxa de crescimento específica. A região foi selecionada a partir da simulação teste com a *Mesh 0*. A Figura 3.8 apresenta o resultado na cor azul da região

contendo gás na concentração de detecção (especificada no item 4) e a Figura 3.9 apresenta a região de densidade de malha criada para esse teste.

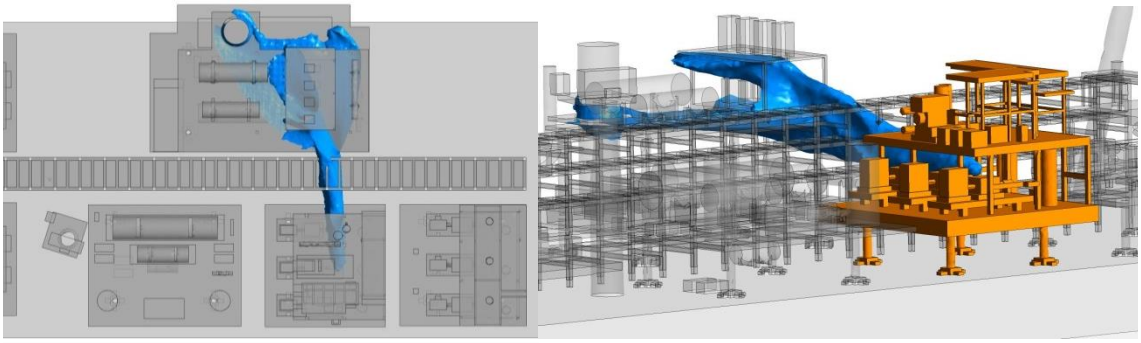

Figura 3.8 – Dispersão de gases com a Mesh 0 (grosseira)

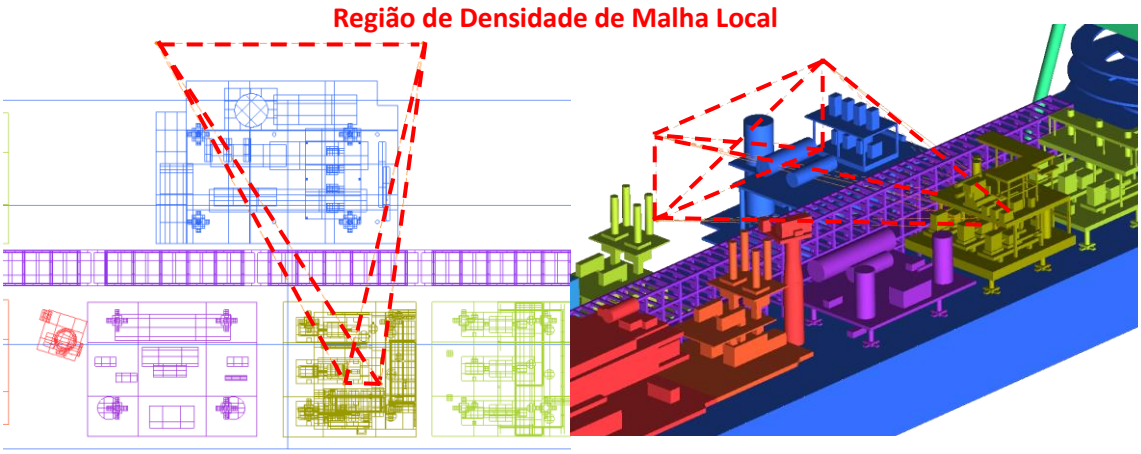

Figura 3.9 – Região de densidade de malha local (região de interesse)

A partir da simulação teste da *Mesh 0* e da definição da região de densidade de malha, foram elaboradas 4 malhas com refinamentos distintos. A Tabela 3.6 apresenta os principais parâmetros das malhas elaboradas. A qualidade da malha é indicada no *software* em uma escala de 0 a 1, onde 0 é considerado ruim e 1 é considerado ótima. Para todas as malhas foi assegurada a qualidade recomendada pelo *software* ICEM, o critério de qualidade de malha é atendido se não existir elementos entre 0 e 0,1 para o parâmetro *Quality.*

Tabela 3.7 – Condições de Contorno e Parâmetros da Simulação

Malha	Parâmetro				
	Nº de nós Total	Nº de elementos Total	Tamanho elemento (Dentro da região densidade local)	Razão de crescimento (Fora da região densidade local)	Quality
Mesh 0	565.780	3.346.177	Livre	Livre	> 0,1
Mesh 1	923.985	5.494.465	0,75 m	1.20	> 0,1
Mesh 2	1.775.500	10.224.514	0,58 m	1.08	> 0,1
Mesh 3	2.551.214	15.196.119	0,50 m	1.20	> 0,1
Mesh 4	4.198.111	25.043.943	0,25 m	1.20	> 0,1

Nota: Todas as malhas possuem 1 camada de transição de refinamento

3.2.4.1 Teste de Resíduos

Com o intuito de avaliar o número mínimo de iterações necessárias para estabilização da nuvem inflamável e convergência residual do resultado para o regime estacionário, o teste de resíduos foi realizado nas 5 malhas apresentadas no item 3.2.4. Esse teste consiste na avaliação comparativa das simulações com diferente número de iterações por meio do gráfico de concentração x comprimento em 3 linhas passando no interior da dispersão gasosa como apresentado na Figura 3.10.

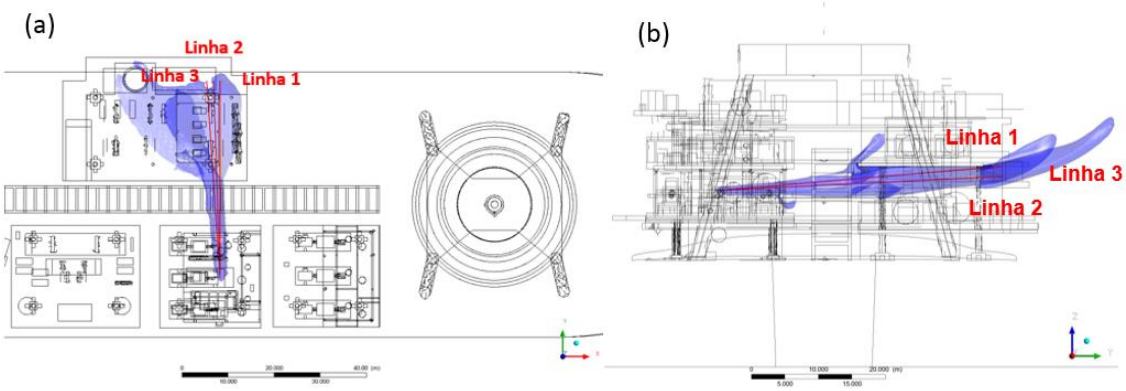

Figura 3.10 – Linha de concentração x comprimento em
(a) vista superior e (b) vista lateral

O perfil de concentração nas linhas foi comparado para 100, 200, 300 e 400 iterações. Além disso, foram avaliados os valores residuais ao final das simulações e os resultados visuais das nuvens de gás. Cada malha será avaliada individualmente e, após seleção do número de iterações necessárias para convergência e estabilização dos valores residuais médios, será realizada a comparação entre as malhas.

O teste de resíduos também auxilia as simulações a fim de avaliar um critério de convergência para os passos de tempo transientes. Cada passo de tempo irá convergir para um resíduo especificado e, assim que atingir esse critério, um novo passo será calculado. As simulações foram realizadas para a malha selecionada a partir do teste de resíduos tendo como critério de parada o número total de iterações e convergência residual. Na avaliação deste teste, foram realizadas simulações com o valor alvo para os resíduos de 1,0E-2, 1,0E-3, 1,0E-4, 1,0E-5 e 1,0E-6. A avaliação foi por comparação dos resultados por meio do gráfico de concentração x comprimento.

Cabe salientar que a condição de ventilação foi simulada com 50 iterações (vento sem liberação dos gases) sendo utilizada de valor inicial para cada uma das malhas. A utilização de valores iniciais facilitam a convergência, pois é utilizado o mesmo campo de velocidade no domínio, partindo assim, de valores mais próximos do resultado final.

3.2.4.2 Teste de Passo de Tempo

Para as simulações transientes é necessário estipular um passo de tempo adequado para o desenvolvimento temporal da nuvem de gás dispersada. O teste de passo de tempo visa assegurar que os resultados independem do passo de tempo, de modo que possibilite analisar possíveis desvios, acúmulos ou regiões que possam ser atingidas por gases inflamáveis antes que o regime estacionário seja atingido. Além disso, é de extrema importância avaliar o tempo no qual a nuvem dispersada irá ser identificada pelo sensor, pois a tomada de decisão dos operadores será baseada na confirmação de gás na plataforma e irá ocorrer após essa indicação. Neste teste foram simulados os passos de tempo de 5,0; 1,0 e 0,1 segundos com critério de convergência nos resultados do teste de resíduos do item 3.2.4.1.

Um dos critérios de estabilização da nuvem inflamável a partir de vazamentos nas linhas de processo é que esta consegue estabilizar a região inflamável em aproximadamente 60 segundos após o vazamento, critério usualmente aceito na indústria. Tendo em vista tal premissa, adotou-se o tempo total de simulação de 120 segundos para analisar a resposta transiente. Neste teste, os resultados são avaliados em intervalos de 20 segundos.

3.2.5 Malhas Adaptativas

Com o objetivo de facilitar as simulações mantendo-se a independência da malha, usualmente são realizadas simulações utilizando o método de adaptação de malha. A utilização deste método facilita a obtenção do resultado a partir de uma malha grosseira, definindo-se apenas, a quantidade de adaptações, o número máximo de nós no refinamento automático da malha e sobre quais parâmetros esse refinamento deve ser feito, como exemplo, concentração de hidrocarbonetos no domínio.

O CFX recomenda não ultrapassar 5 processos adaptativos da malha, pois o alto grau de refinamento pode provocar deformações nos elementos da malha. Segundo Barcelos (2013), para a utilização do método adaptativo são necessários 3 níveis adaptativos da malha alcançando um total de refinamento de aproximadamente o dobro do número de nós da malha inicial, ou seja, para este caso, *Mesh 0*, seria necessário atingir aproximadamente um total de 1.100.000 nós.

Por ser muito utilizado na indústria, todos os cenários foram simulados utilizando este método para um total de 1.100.000 nós e adaptando na variável de interesse, concentraçaõ de HC. A partir destes resultados é possível comparar o método adaptativo com o refinamento local por densidade de malha e, caso os resultados não se alterem significativamente, utilizar a malha adaptativa para muitos cenários, evitando-se a construção de dezenas de malhas diferentes.

3.2.6 Metodologia do Posicionamento de Detectores

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

Levando em consideração o critério de classificação de detectores utilizado pelos autores citados no item 2.3.3 e as matrizes de detectores avaliadas por Kesley (2002), Fleck (2008) e Gomes (2012), fica fácil perceber a evolução no tratamento dos pontos de monitoramento em estudos de dispersão de gases. O processo automatizado no qual são criadas matrizes de pontos tridimensionais parece ser bastante satisfatório para refinar as possibilidades no posicionamento dos detectores, entretanto, como a amostra de cenários é limitada, o processo de alocação de detectores de gás não pode e não deve ser 100% automatizado, pois os estudos são baseados em análises determinísticas (pontos selecionados pelo usuário) e não são contemplados todos os possíveis cenários de vazamento da unidade nesses estudos. O melhor posicionamento destes detectores para

esta amostra pode não ser o mais efetivo para o universo de possíveis vazamentos na área. Além disso, um processo 100% automatizado pode resultar em detectores agrupados, em locais de difícil acesso ou em locais sem suportação aparente (ex. em rotas de fuga ou vias de acesso).

Desta forma, uma alocação de detectores efetiva não deve depender somente dos resultados das simulações (alocação baseada em CFD), mas sim deve usar os resultados das simulações para orientar o posicionamento por analistas (alocação assistida por CFD).

Assim, neste estudo será utilizado o *software* POND4, desenvolvido pela BV-MTL (Bureau Veritas e MTL-Engenharia) para cálculo de ponderações de concentrações de gases, resultando na combinação de diferentes cenários de vazamento. Permite uma combinação direta das concentrações, ordenando os pontos (nós) onde é possível detectar o maior número de vazamentos, considerando a ponderação por frequência de ocorrência ou número de casos. Este processo de alocação de detectores assistida por CFD envolve, de forma resumida, as seguintes etapas:

- Uma amostra de cenários de vazamento é pré-selecionada como representativa do universo de cenários – para que esta amostra seja efetiva, deve considerar os pontos de vazamento mais prováveis e diferentes direções de jato e vento;

- Com os resultados das simulações desta amostra, é realizada uma pré-alocação de detectores, de forma a determinar o número mínimo de detectores que detecte 100% dos cenários simulados – deve ser observado que, quando as nuvens de gás são muito pequenas e/ou estão significativamente afastadas, este posicionamento “ótimo”, que minimiza o número de detectores, tende a ser próximo aos pontos de vazamento, o que pode não ser efetivo para a detecção do universo;

- Para esta pré-alocação, os resultados de todas as simulações são interpolados para uma malha estruturada regular e ajustados (seleciona-se o espaçamento desejado entre os pontos de monitoramento nas 3

direções cartesianas), em cada ponto desta malha, para 1 (quando acima do limite de detecção) ou 0 (quando abaixo do limite de detecção);

- Estas nuvens de concentração unitária são então sobrepostas, como representado abaixo (os pontos numerados representam cada nó ou ponto desta malha estruturada):

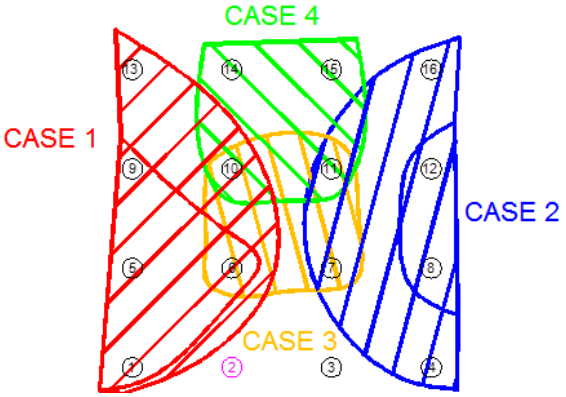

Figura 3.11 - Exemplo de nuvens sobrepostas

- Estes pontos são então ordenados, em ordem decrescente, conforme o número de casos que são detectáveis em cada um deles, como no exemplo a seguir:

*** Casos Detectaveis

Pto	Cel	N.Casos	Casos ->		
1	10	3	1	3	4
2	11	3	2	3	4
3	6	2	1	3	
4	7	2	2	3	
5	13	1	1		
6	16	1	2		
7	4	1	2		
8	5	1	1		
9	8	1	2		
10	9	1	1		
11	15	1	4		
12	12	1	2		
13	1	1	1		
14	14	1	4		

- É realizada uma otimização do tipo “força bruta” para a verificação das combinações possíveis de pontos de detecção que resultem na menor quantidade possível de detectores para os casos simulados;
- Com base nesta pré-alocação de detectores, é realizada uma primeira triagem dos resultados das simulações, de forma a se evitar agrupamentos excessivos de detectores (dentro da área de influência de 1 metro no entorno de outros detectores) ou em pontos com restrição de instalação (sem apoio ou difícil acesso);
- Nesta fase, pode também ser definido algum critério para descarte de simulações cujas nuvens sejam muito pequenas para uma detecção

efetiva ou cujos efeitos sejam toleráveis (ex. volume inflamável menor do que um valor pré-definido);

- O processo é repetido, iterativamente com as novas restrições até que um posicionamento final consolidado seja definido;

- Uma análise crítica mais refinada dos resultados é feita de forma a estabelecer tendências das nuvens de dispersão de gás – essas tendências podem ser extrapoladas por simetria ou similaridade para outros pontos de vazamento;

- A alocação dos detectores é ajustada, considerando-se o comportamento esperado das nuvens de forma a identificar os pontos mais prováveis que favoreçam a detecção de cenários não simulados – verifica-se continuamente se, para as posições ajustadas, a detecção dos cenários simulados ainda é garantida (através de uma matriz de cruzamentos) e, caso necessário, realizam-se novos ajustes subsequentes até a obtenção da alocação final.

Terminado o processo, os detectores são identificados e representados nos arranjos da área, sendo o processo repetido para as demais áreas. Cabe ressaltar que essa descrição geral se aplica a muitos cenários de vazamento em diferentes áreas da unidade, entretanto, no presente estudo será avaliado somente um equipamento localizado em apenas um módulo de processo, não cabendo a repetição do procedimento em diferentes áreas nem mesmo a extrapolação por similaridade, tendo em vista que todos os casos serão simulados.

Desta forma, o *software* POND4 será utilizado para espaçamentos tridimensionais de 0,5 x 0,5 metros a fim de avaliar a matriz de pontos em torno do ponto de vazamento. Serão avaliados os posicionamentos dos detectores que identificam o nível de alerta para o gás presente em maior concentração, ou seja, o metano (20% do L.I.I.), para cada cenário de vazamento. A Figura 3.12 apresenta um exemplo da malha estruturada regular de 0,5 x 0,5 metros criada pelo *software* para interpolação das nuvens simuladas e classificação dos detectores quanto ao número de casos identificados.

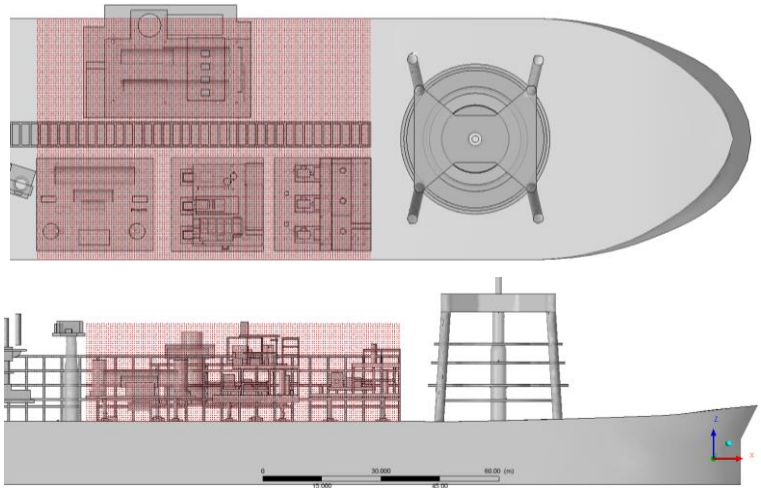

Figura 3.12 – Malha regular de pontos espaçados em 0,5 *vs* 0,5 metros

O *software* POND4 utiliza uma tolerância de 0,5 metro de raio, ou seja, ao selecionar um ponto de detecção, qualquer nuvem que tocar a superfície de uma esfera com 0,5 metros de raio, será identificada. Assim, o ponto de detecção pode não estar necessariamente no interior da nuvem inflamável, porém estará sendo tocado por esta nuvem em sua superfície. A Figura 3.13 apresenta um exemplo da abrangência do detector. O detector na cor verde estaria identificando um cenário, porém, este ponto não estaria inserido dentro da nuvem inflamável. Essa aproximação é aceitável quando avaliada juntamente com todas as incertezas presentes em um estudo de dispersão de gases, desde a seleção dos pontos de vazamento em uma análise qualitativa, na determinação das faixas de velocidades e direções dos ventos e na caracterização geométrica do modelo 3D. Julga-se razoável ter uma tolerância de 0,5 metro para uma domínio amplamente maior como em unidades o*ffshore*.

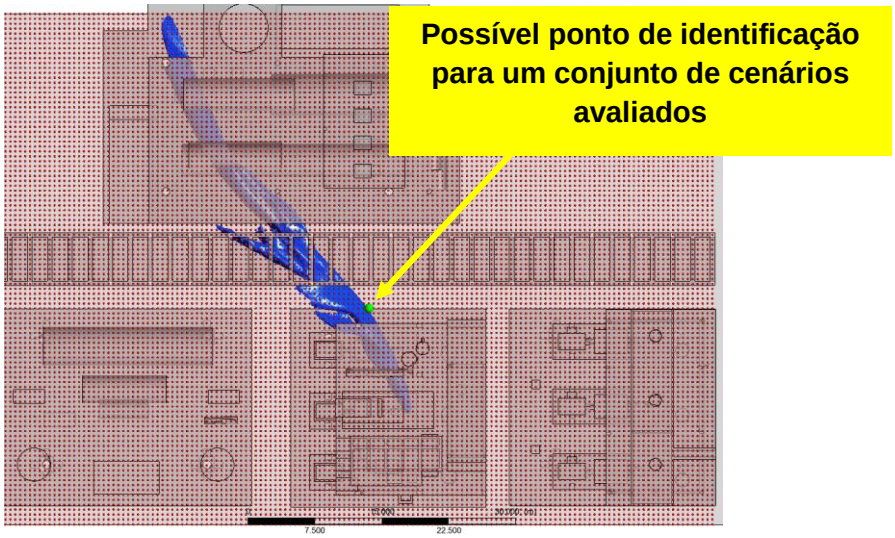

Figura 3.13 – Tolerância de 0,5 metro na identificação do cenário

Desta forma, utilizar uma matriz de pontos refinada garante que uma maior amostra de pontos seja analisada permitindo maior sobreposição das nuvens avaliadas. Outro ponto importante é a desconsideração dos cenários já identificados a partir de um ponto selecionado, ou seja, além do espaçamento de 1,0 metro entre os detectores, evitando-se agrupamentos dos dispositivos, as nuvens já detectadas serão descartadas, reduzindo assim a busca por pontos que identifiquem cenários já analisados.

O critério de alocação dos detectores será baseado no número de casos que cada detector é capaz de identificar e no tempo de detecção dos cenários avaliados de acordo com os resultados das simulações transientes. Desta forma, primeiramente será avaliado o posicionamento para os cenários do regime estacionário e, após seleção dos melhores pontos que identificam todos os cenários, será feita uma classificação do tempo de detecção.

Cabe ressaltar que pontos muito próximos do ponto de vazamento resultam em detecção mais rápida, entretanto, devido ao alto gradiente de concentração em regiões muito próximas ao vazamento e as limitações na leitura das concentrações dos sensores, além da possibilidade de agrupamento dos sensores, será estabelecida uma distancia mínima de 2,0 metros de raio do ponto de liberação onde nenhum detector será alocado, região em vermelho da Figura 3.14.

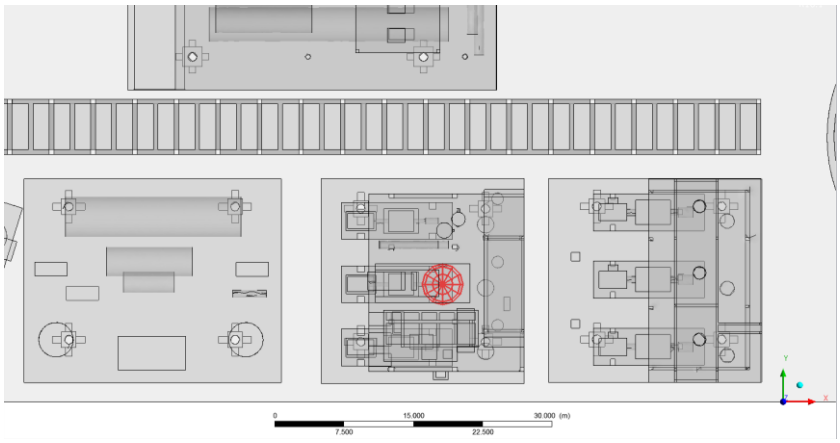

Figura 3.14 – Esfera de 2,0 metros de raio não influente

3.2.7 Efetividade de Detecção - Simulações Transientes

A Efetividade de detecção mede a efetividade de cada sensor da malha de detecção proposta de acordo com a relevância de cada caso transiente simulado. Alguns parâmetros relevantes para tomada de decisão, como o tempo, e para o dimensionamento de danos e consequências, como o volume das nuvens, são utilizados para classificação do risco dos cenários. A ponderação para cada detector é dado pela quantidade de casos que cada detector é capaz de identificar.

Neste trabalho, propõe-se a Equação 3.1 para determinar a efetividade de detecção de cada ponto dentro do domínio de simulação transiente:

$$E_i = \frac{1}{N_T} \sum_{j=1}^{N_i} f_j \frac{V_{EE,j}}{V_{EE,max}} \frac{t_{EE,j} - t_{ij}}{t_{EE,j}} \tag{3.1}$$

onde,

E_i	Efetividade de detecção do detector “i”
N_i	Número de casos identicados pelo detector “i”
N_T	Número total de casos simulados
f_j	Frequência de ocorrência do cenário “j”
$V_{EE,j}$	Volume detectado no estado estacionário do cenário “j”
$V_{EE,max}$	Volume detectado máximo dentre todos os cenários no regime estacionário
$t_{EE,j}$	Tempo de simulação para atingir o estado estacionário do cenário “j”
t_{ij}	Tempo para o detector “i” identificar o cenário “j”

A efetividade de detecção possui valor máximo igual a 1,0. O melhor ponto seria aquele que identifica o cenário com maior frequência, com volume no estado estacionário igual ao volume máximo encontrado e tempo de detecção tendendo a zero, além disso, teria capacidade de identificar todos os cenários avaliados no estudo. Os termos da Equação 3.1 são explicados abaixo.

- Frequência do cenário (f_j): Determinada pela multiplicação da frequência de vazamento do sistema/equipamento pela probabilidade do vento associada, pela direção do jato e pela taxa de vazamento selecionada. Neste estudo a frequência é a mesma para todos os casos pois a análise ocorre apenas para um ponto de vazamento no compressor, sendo cada direção de jato com a mesma frequência, mesmo vento predominante (NE

com variações em +30° e -30°) e mesma taxa de vazamento. Portanto a frequência utilizada para qualquer cenário é igual a 1,0 neste estudo;

- Fator de Dano ou Consequência ($\frac{V_{EE,j}}{V_{EE,max}}$): Determinada pela razão entre o volume da nuvem no estado estacionário para o cenário *j* e o volume máximo possível no estado estacionário, dentre todos os casos simulados, do equipamento analisado;
- Tempo de resposta ($\frac{t_{EE,j}-t_{ij}}{t_{EE,j}}$): Determinado pela razão entre a diferença entre o tempo para atingir o estado estacionário no cenário *j* e o tempo que o detector *i* leva para identificar o cenário *j* e o tempo para atingir o estado estacionário no cenário *j*, mostrando que, para este termo, o pior detector é aquele que leva mais tempo para identificar o vazamento;
- Ponderação dos casos analisados ($\frac{1}{N_T}\sum_{j=1}^{N_i} F(f,V,t)$): Determina a ponderação dos cenários identificados em função do total de cenários avaliados, sendo incorporado no somatório, o número de casos que cada sensor é capaz de identificar.

Assim sendo, os pontos que não identificam nenhum caso são naturalmente excluídos, os melhores pontos são identificados pelo *software* POND4 e a capacidade dos detectores é estimada a fim de classificar a relevância de cada dispositivo dentro da malha de detecção proposta. Na medida que se conhece a capacidade de cada detector, é possível adicionar outros dispositivos para aumentar a segurança do sistema até que, caso especificada, seja atingida uma tolerância para a capacidade de detecção do sistema. Outro ponto relevante é a verificação da capacidade de detecção do sistema como um todo e comparar com outros sistemas avaliados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Teste de Sensibilidade de Malha

Para as 5 malhas propostas no item 3.2.4 foram simulados os valores de 100, 200, 300 e 400 iterações a fim de avaliar diferenças nos resultados com o aumento das iterações. Avaliou-se a concentração de hidrocarbonetos em 3 linhas passando pelo interior da nuvem como apresentado no item 3.2.4.1 verificando-se a diferença da concentração entre as malhas. Definiu-se que a influência da malha não seria significativa quando a diferença dos valores de concentração de HC entre as malhas mais refinadas e menos refinadas fosse menor a 1,0E-02. Adotou-se essa tolerância, pois, a concentração de detecção corresponde à fração molar igual a 0,01 (20% do LII para o metano). Pode-se expressar 1% do volume como 1% da fração molar no domínio, pois, adota-se o comportamento de gases ideais durante a dispersão.

$$PVa = NaRT \tag{4.1}$$

$$PV = NRT \tag{4.2}$$

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

$$\frac{Va}{V} = \frac{Na}{N} \tag{4.3}$$

onde:

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

4.1.1 Teste de Resíduos

A Figura 4.1 até a Figura 4.5 apresenta as curvas de concentração *versus* comprimento para as malhas *Mesh 0, Mesh 1, Mesh 2, Mesh 3* e *Mesh 4* para as simulações de 100, 200, 300 e 400 iterações. A partir desses gráficos é possível perceber que a variação do número de iterações não influencia significativamente a concentração de hidrocarbonetos no interior da nuvem no regime estacionario em uma mesma malha. Pode-se perceber também que a menor variação é encontrada entre os casos de 300 e 400 iterações.

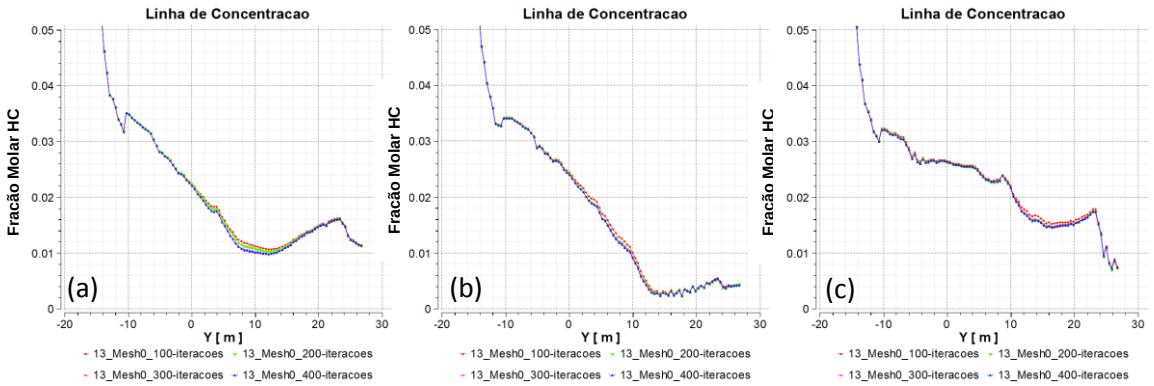

Figura 4.1 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para *Mesh 0*
(a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

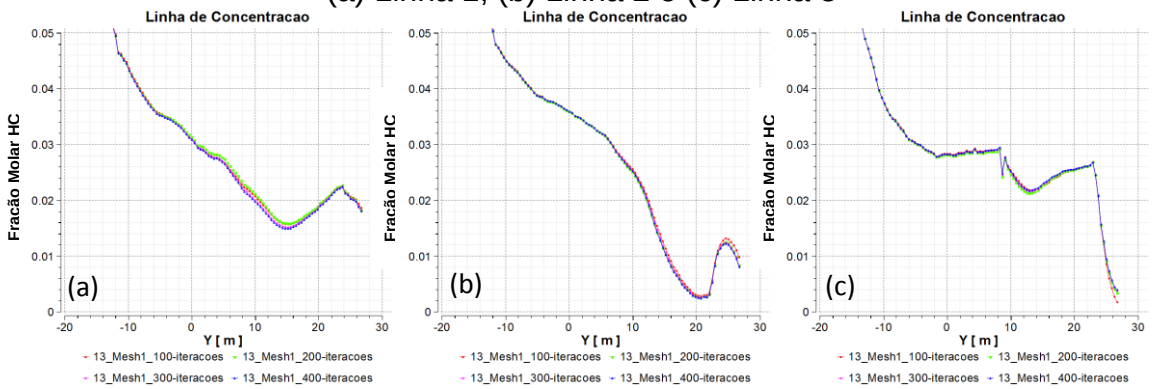

Figura 4.2 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para *Mesh 1*
(a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

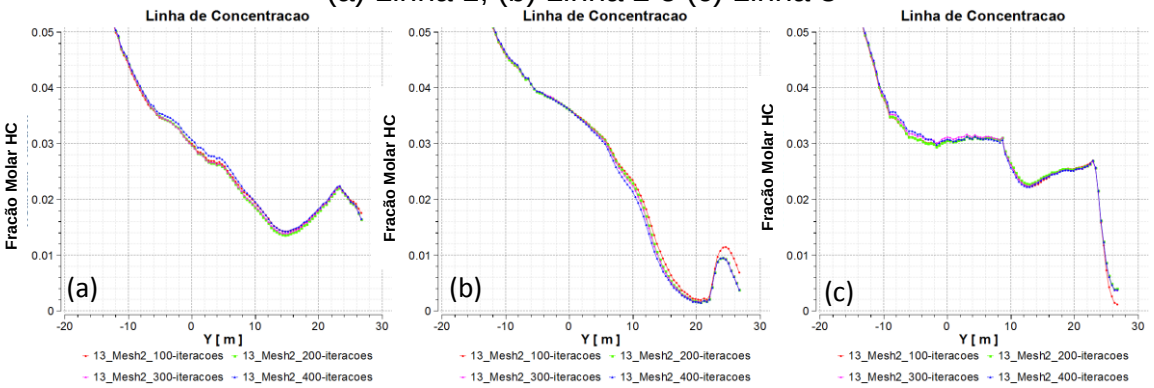

Figura 4.3 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para *Mesh 2*
(a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

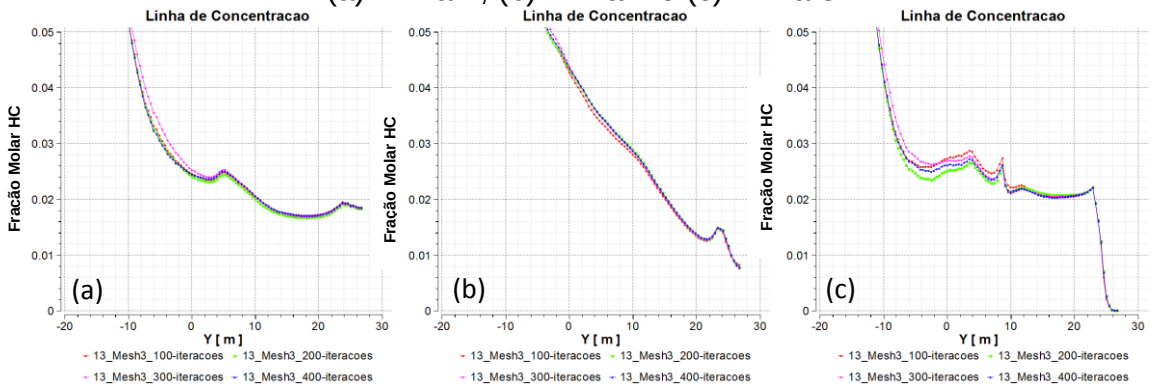

Figura 4.4 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para *Mesh 3*
(a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

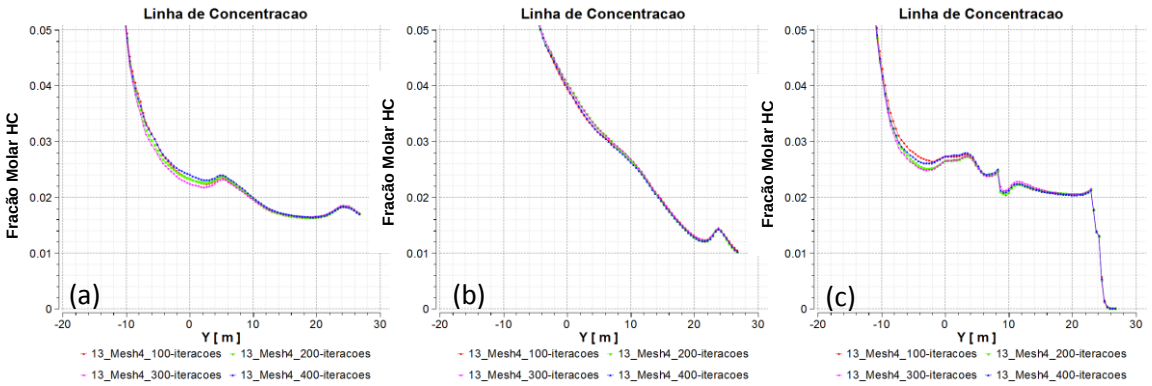

Figura 4.5 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para *Mesh 4* (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

Os valores residuais médios finais, de cada malha, foram comparados em 100, 200, 300 e 400 iterações. Todos as simulações ficaram com o resíduos médios com valor abaixo de 1,0E-04. A Figura 4.6 demonstra que os valores residuais médios não se alteram significativamente de 300 para 400 iterações, conferindo estabilidade do resultado. Além disso, na avaliação do volume de nuvem detectável constata-se que a variação entre 300 e 400 iterações é menor que 10% para todas as malhas, não alterando significativamente a região inflamável, a qual é foco para o posicionamento dos detectores.

A partir dessa análise optou-se por utilizar 300 iterações como valor total para garantir um número mínimo de iterações e um valor residual médio sem alteração significativa do resultado.

Mesh 0		Número de Iterações	
		300	400
Volume [m³]		537.42	533.61
Resíduos	U-Mom	1.20E-04	1.10E-04
	V-Mom	1.10E-04	9.90E-05
	W-Mom	5.80E-05	5.00E-05
	P-Mass	3.30E-07	2.70E-07
	K-TurbKE	4.60E-05	3.80E-05
	E-DissK	6.60E-06	5.40E-06
	HC-Mass Fraction	2.90E-05	3.00E-05

Mesh 1		Número de Iterações	
		300	400
Volume [m³]		473.61	477.31
Resíduos	U-Mom	7.1E-05	7.4E-05
	V-Mom	6.0E-05	6.1E-05
	W-Mom	4.2E-05	3.8E-05
	P-Mass	1.7E-07	1.9E-07
	K-TurbKE	4.3E-05	6.1E-04
	E-DissK	7.4E-06	6.4E-06
	HC-Mass Fraction	2.9E-05	3.0E-05

Mesh 2		Número de Iterações	
		300	400
Volume [m³]		474.58	465.50
Resíduos	U-Mom	5.5E-05	5.7E-05
	V-Mom	4.4E-05	4.5E-05
	W-Mom	3.6E-05	4.0E-05
	P-Mass	1.3E-07	1.8E-07
	K-TurbKE	2.5E-05	4.2E-03
	E-DissK	5.4E-06	5.8E-06
	HC-Mass Fraction	1.5E-05	3.1E-05

Mesh 3		Número de Iterações	
		300	400
Volume [m³]		514.92	513.08
Resíduos	U-Mom	3.6E-05	4.1E-05
	V-Mom	3.1E-05	3.3E-05
	W-Mom	2.7E-05	3.1E-05
	P-Mass	9.5E-08	2.7E-07
	K-TurbKE	2.3E-05	3.5E-05
	E-DissK	1.6E-05	2.8E-05
	HC-Mass Fraction	2.9E-05	4.0E-05

Mesh 4		Número de Iterações	
		300	400
Volume [m³]		537.92	539.72
Resíduos	U-Mom	3.0E-05	3.1E-05
	V-Mom	2.3E-05	2.7E-05
	W-Mom	2.0E-05	2.4E-05
	P-Mass	1.3E-07	2.0E-07
	K-TurbKE	5.8E-05	2.2E-04
	E-DissK	3.6E-05	1.9E-04
	HC-Mass Fraction	3.5E-05	4.4E-05

Figura 4.6 – Valores Residuais e Volume de nuvem

A partir da definição do número total de iterações é possível comparar o resultado das simulações para 300 iterações das malhas propostas. A Figura 4.7 apresenta a diferença entre as malhas. Pode-se perceber que próximo ao ponto

de vazamento existem as maiores diferenças nos valores de concentração devido ao alto gradiente de concentração e velocidade nessa região. Contudo, posicionar detectores em regiões com alto gradiente pode não ser aconselhável devido às limitações de identificação do próprio dispositivo. Nota-se também que nas regiões mais afastadas do ponto de vazamento, as malhas *Mesh 3* (cor azul) e *Mesh 4* (cor preta) possuem valores muito próximos uma da outra dentro da tolerância estabelecida de 1,0E-2. Portanto, adotou-se a *Mesh 3* (tamanho de elemento de 0,5m) como tamanho de malha para representar a dispersão gasosa para a finalidade deste estudo.

Cabe ressaltar que ao confeccionar a malha volumétrica, a partir de um determinado tamanho de elemento, ocorreu um súbito crescimento da *Mesh 1* (923.985 nós) para a *Mesh 3* (2.551.214 nós). Uma investigação sobre esse crescimento foi realizada, entretando, não foi possível correlacionar os parâmetros de ajuste da malha e evidenciar o motivo desse "salto". Acredita-se que a partir de 0,60 m, para a geometria deste estudo, os menores elementos conseguem se alinhar em regiões que, para elementos maiores, não era possível detalhar, aumentando quantidade de elementos volumétricos para representar tal região. Como solução para gerar uma malha intermediária, alguns ajustes nas taxas de crescimento foram relaizadas, confeccionando assim a *Mesh 2*. A partir dessa investigação, fica perceptível a aproximação entre os perfis de concentração da *Mesh 1* e *Mesh 2* e entre os perfis da *Mesh 3* e *Mesh 4*.

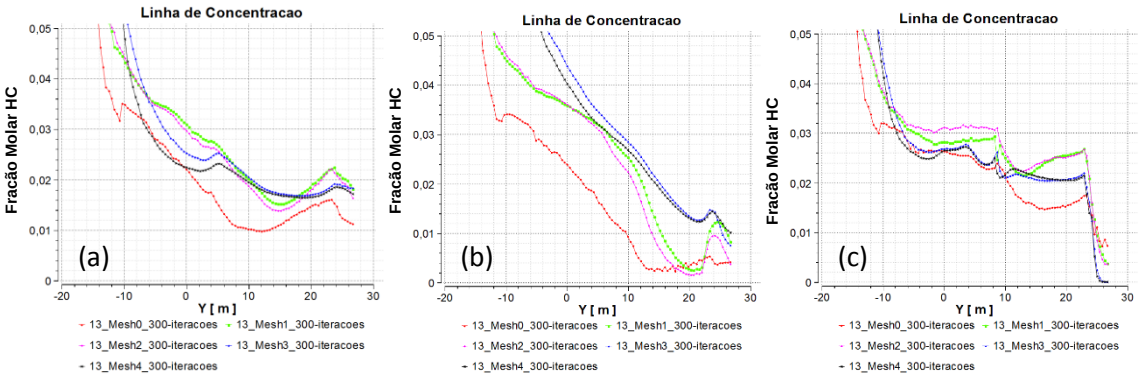

Figura 4.7 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) ao final de 300 iterações em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3.

Comparou-se o resultado da simulação com 300 iterações e 1000 iterações da *mesh 3*, mostrando assim, que o resultado não se altera com o aumento do

número de iterações e não foram observadas diferenças significativas nos resíduos médios finais nem no volume final da nuvem detectável.

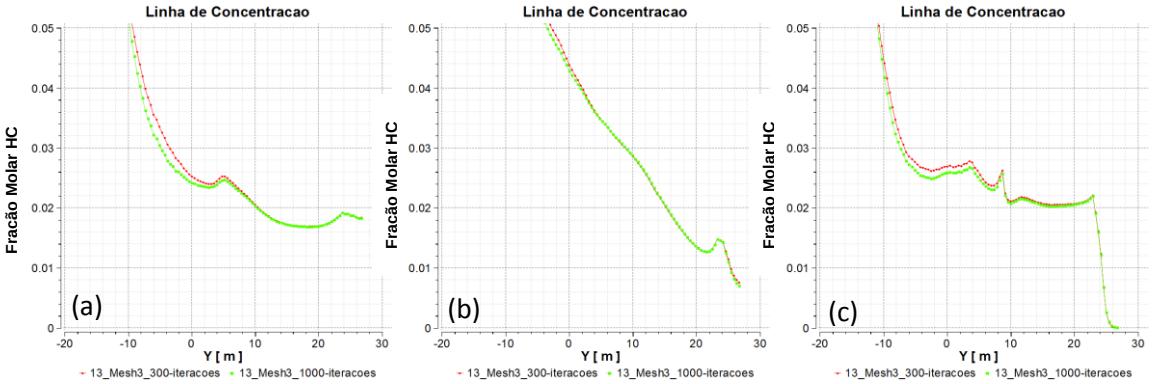

Figura 4.8 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 300 e 1000 iterações para a *Mesh* 3 em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3.

Com a malha, *Mesh 3*, selecionada no teste de sensibilidade de malha, foi realizado o teste para verificar o resíduo alvo para as simulações transientes. O teste avaliou os valores de 1,0E-2, 1,0E-3, 1,0E-4, 1,0E-5 e 1,0E-6 e são apresentados na Figura 4.9. A curva para o resíduo alvo de 1,0E-6 não é apresentada, pois o resultado não converge para valores menores que 1,0E-5 para este tipo de simulação. Cabe ressaltar que foram realizadas 1.000 iterações e o critério de 10E-5 não foi alcançado. Pode-se perceber que as curvas de concentração *versus* comprimento tanto para 1,0E-4 quanto para 1,0E-5 são semelhantes enquanto que as simulações para 1,0E-2 e 1,0E-3 não apresentam a dispersão completa da nuvem inflamável. Assim, com base nos valores residuais apresentados na Figura 4.6 e Figura 4.9 adota-se 1,0E-4 como critério de convergência para a simulação transiente.

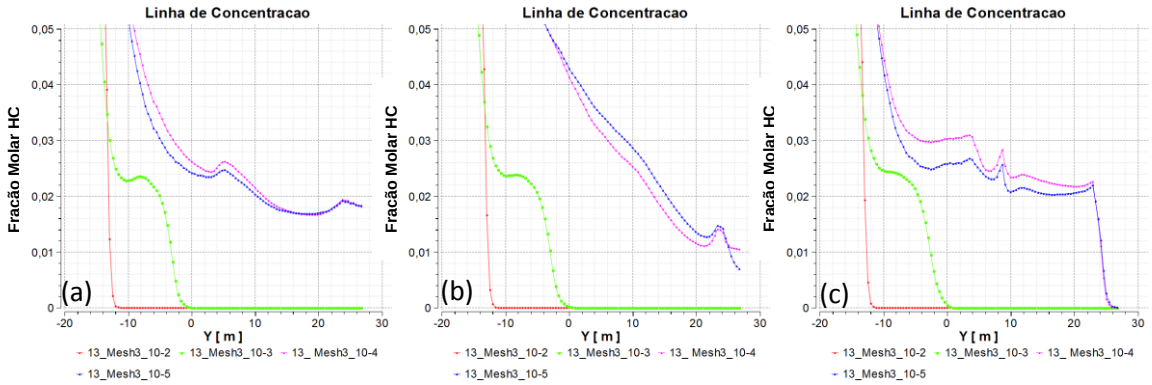

Figura 4.9 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para Resíduos (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

4.1.2 Teste de Passo de Tempo

Para este teste foram realizadas simulações em regime transiente com passo de tempo de 5,0; 1,0 e 0,1 segundos registrando os resultados em intervalos de 20 segundos com um tempo total de simulação de 120 segundos. A Figura 4.10 até a Figura 4.15 apresenta as curvas de concentração versus comprimento para os intervalos de 20, 40, 60, 80, 100 e 120 segundos. Pode-se perceber que as curvas de concentração *versus* comprimentos são semelhantes a partir de 60 segundos. Entretanto, para o passo de tempo de 5,0 fica perceptível a distância, ainda que pequena, dos passos de 1,0 e 0,1 segundos. Sendo assim, selecionou-se o passo de tempo de 1,0 segundo para realizar as simulações transientes.

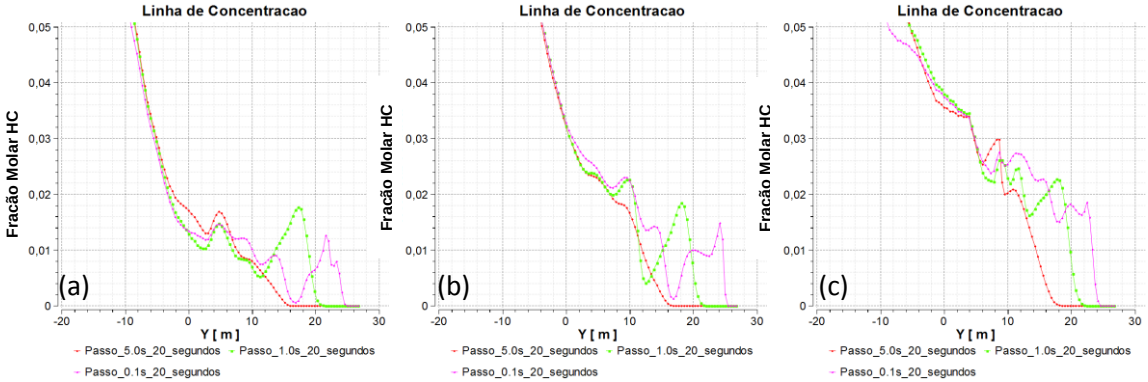

Figura 4.10 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 20 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

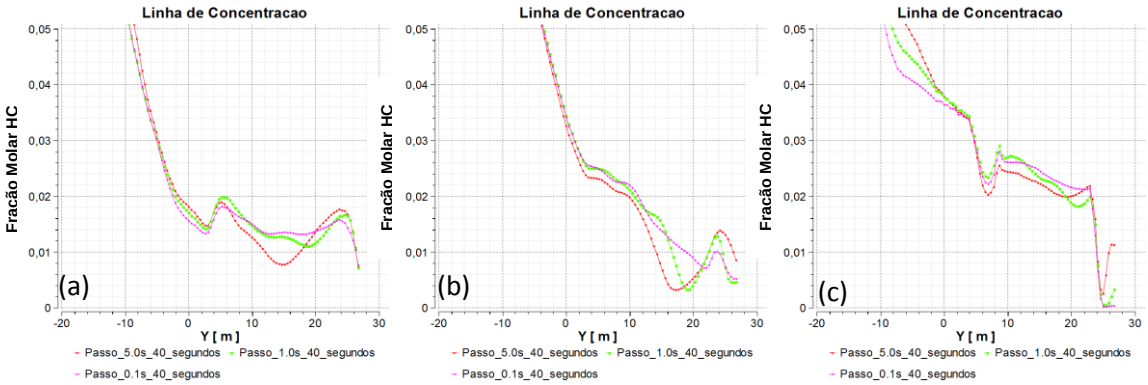

Figura 4.11 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 40 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

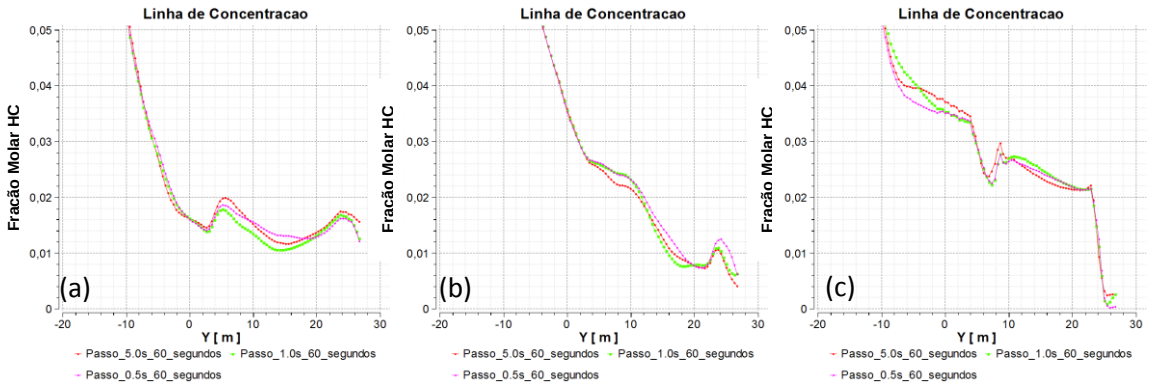

Figura 4.12 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 60 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

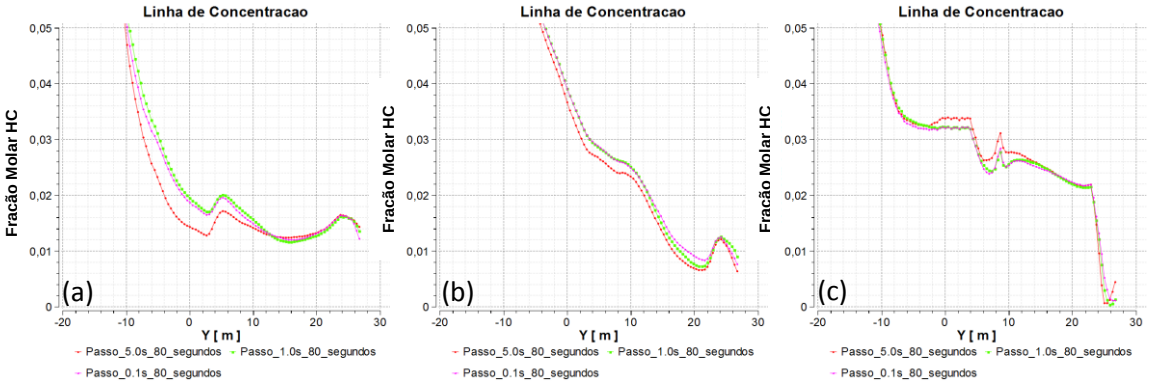

Figura 4.13 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 80 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

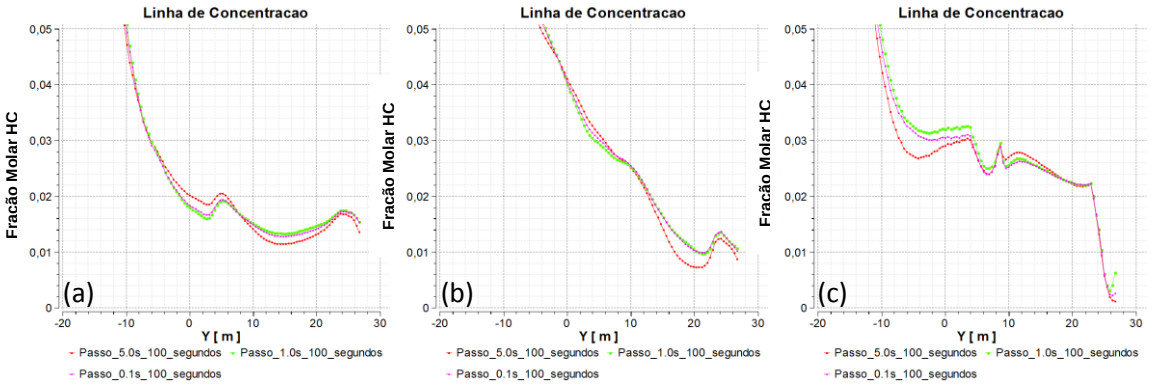

Figura 4.14 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 100 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

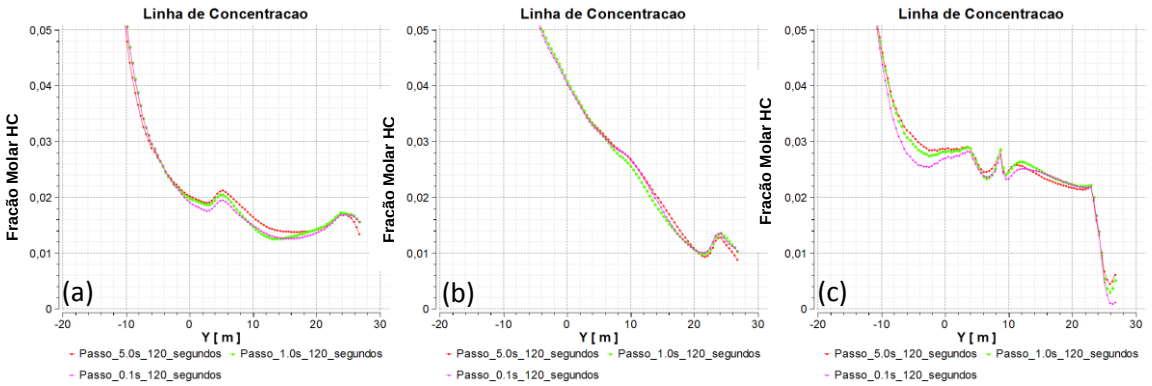

Figura 4.15 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) após 120 segundos para passos de tempo de 5, 1 e 0,1s em (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

Outro ponto importante é definir o tempo total de simulação para garantir que o estado estacionário está sendo atingido. Foram comparados os perfis de concentração de hidrocarbonetos, nos intervalos de 20 em 20 segundos, para o passo de tempo selecionado de 1,0 segundo até o tempo total de simulação de 150 segundos. Tendo em vista a semelhança dos perfis a partir de 60 segundos de simulação, a Figura 4.16 apresenta os perfis de concentração *versus* comprimento para 80, 100, 120 e 150 segundos de simulação.

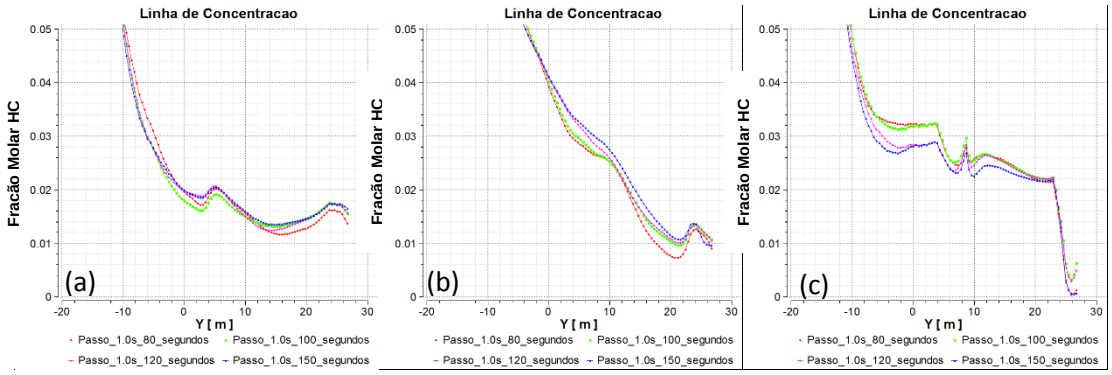

Figura 4.16 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) para passo de tempo de 1,0 s de 80 a 150 s (a) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3

Pode-se perceber que os perfis são semelhantes nos instantes de 80, 100, 120 e 150 segundos, entretanto, observa-se que na região entre -4,0 < Y < +4,0 m existe uma diferença maior dos valores de concentração. Acredita-se que essa região seja fortemente influenciada pelos gradientes de concentração e velocidade da liberação dos gases e que existam regiões com forte influência geométrica, que causam perturbações no desenvolvimento temporal.

Definido que a estabilização da nuvem detectável ocorre quando a diferença entre os perfis estiver dentro da tolerância de concentração de 1,0E-2, definiu-se o tempo de estabilização da nuvem inflamável com preenchimento total da região de influência a partir de 100 segundos, sendo este o tempo total utilizado para as demais simulações transientes.

4.2 Malha Adaptativa

O recurso da malha adaptativa, muito empregado na indústria, foi utilizado para comparar os resultados estacionários (densidade local) deste estudo. Neste tópico será abordado apenas a simulação utilizada no caso teste, ou seja, o caso 13. Este caso foi utilizado para os demais testes até então discutidos no item 4 e será confrontado com a simulação da malha selecionada, *Mesh 3*. A Figura 4.17 apresenta as curvas de concentração *versus* comprimento para as simulações.

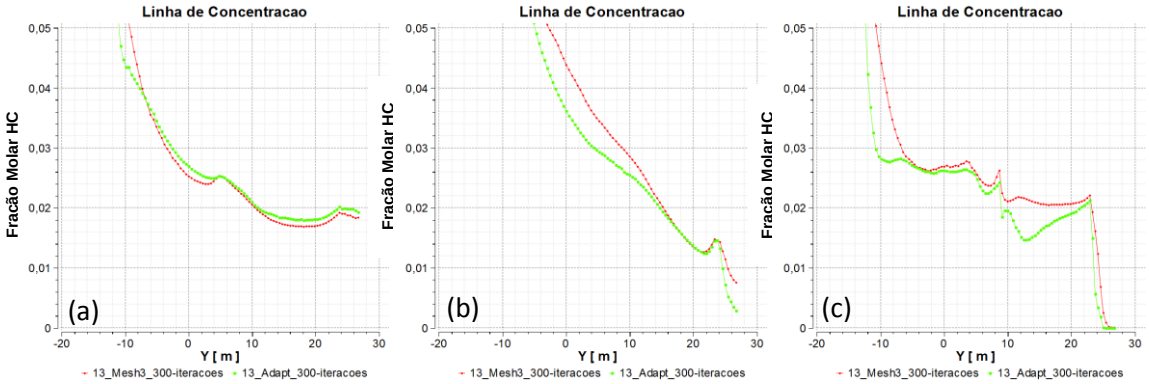

Figura 4.17 – Perfil de concentração de hidrocarbonetos (HC) com a *Mesh 3* e Malha Adaptativa, para o estado estacionário, em (1) Linha 1, (b) Linha 2 e (c) Linha 3.

Observa-se que as curvas possuem algumas variações, porém, o comportamento delas é semelhante. Acredita-se que tais variações ocorram em regiões de alto gradiente de concentração onde o método adaptativo refina a malha mais agressivamente, enquanto que, no teste de malha, a região de interesse apresenta o mesmo tamanho dos elementos. Avalia-se que o método de malha adaptativa apresenta curvas de concentração consistentes com os testes realizados nesse trabalho, além disso, o volume da nuvem inflamável encontrado nas duas abordagens é semelhante sendo a diferença entre os valores em torno de 0,99%. A partir desses resultados, acredita-se que seja possível utilizar a malha adaptativa para resolver problemas de dispersão de gases em ambientes com alto grau de confinamento retirando a necessidade da

elaboração de diversas malhas para representar a gama de cenários. Os demais resultados serão comparados e discutidos no item 4.3.3.

Foi observado a existência de picos de concentração nos gráficos apresentados até o momento. Como parte do estudo, foi verificado que esses picos ocorrem devido a influência da geometria em regiões com proximidade de superfícies, como pisos, estruturas, equipamentos e outros. Os picos apresentados correspondem a regiões com forte influência da geometria proposta o que corrobora para maior atenção no detalhamento geométrico do modelo quanto à apresentação dos resultados. A Figura 4.18 apresenta um dos picos observados na linha 1. A investigação aponta uma variação repentina em aproximadamente +5,0 metros e +23,0 metros. A Figura 4.19 apresenta esses pontos (pontos verdes) no comprimento de linha analisado, sendo possível observar que esses estão localizados logo após grandes estruturas presentes no modelo. Além disso, foi verificado que os elementos da malha possuem o mesmo tamanho não havendo variações visuais que poderiam ocasionar desvios no perfil de concentração dos gases (Figura 4.20). Portanto, os picos presentes nos gráficos apresentados surgem a partir da influência geométrica no desenvolvimento das nuvens gasosas.

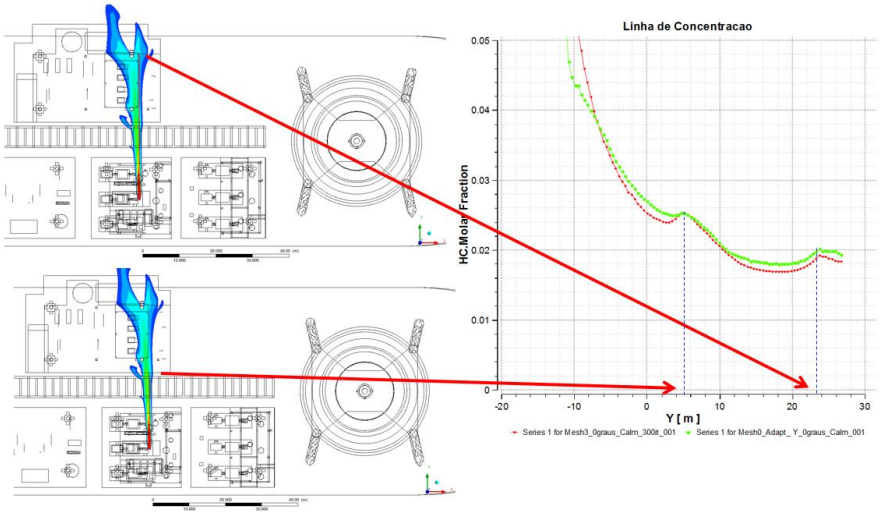

Figura 4.18 – Localização dos desvios no perfil de contração na nuvem detectável

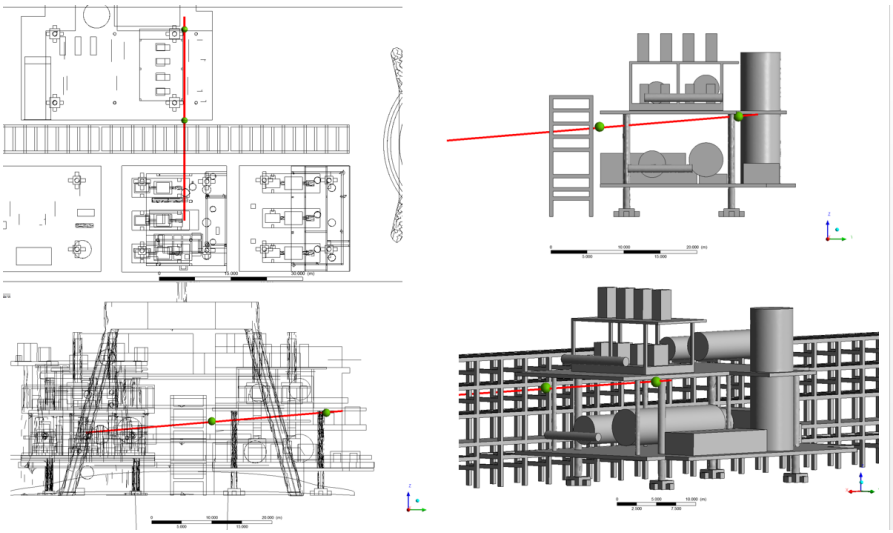

Figura 4.19 – Localização geométrica dos desvios no perfil de contração na nuvem detectável

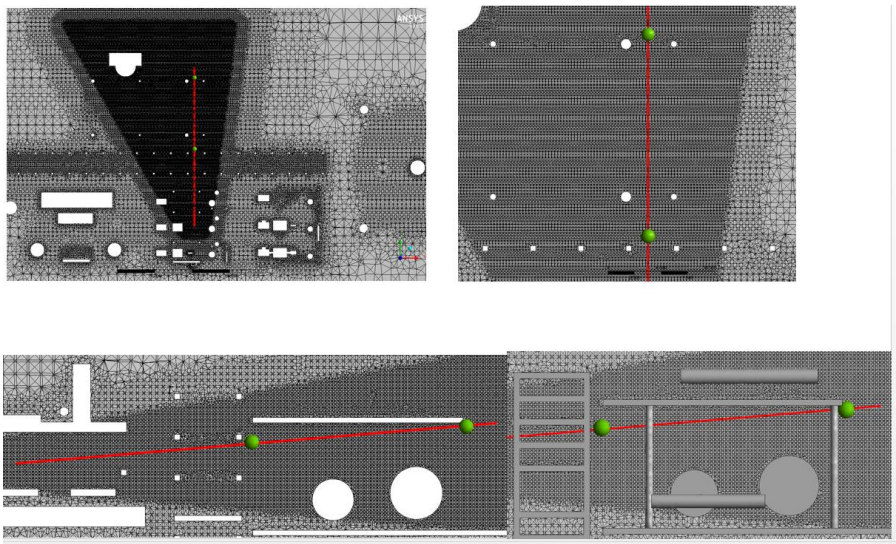

Figura 4.20 – Cortes na malha de elementos na região de desvio do perfil de concentração

4.3 Resultados dos Vazamentos

Este item apresenta algumas observações importantes dos resultados obtidos até o momento. Como resumo geral, foi possível estabelecer alguns critérios para as simulações estacionárias e transientes:

1) Para a abordagem estacionária serão utilizadas malhas regulares (densidade local) com tamanho máximo de elemento de 0,5 metros. Será utilizado um número total de iterações igual a 300 para a estabilização da nuvem inflamável, resíduos e volume inflamável. Ainda no regime estacionário, os casos serão simulados também com a estratégia de malha adaptativa, refinando

automaticamente a região da nuvem inflamável, dobrando-se o total de nós da malha inicial.

2) Para a abordagem transiente, serão utilizadas malhas regulares (densidade local) com tamanho máximo de elemento de 0,5 metros. Será utilizado o valor residual alvo para os passos de tempo de 1,0E-4. Será utilizado o passo de tempo de 1,0 segundo e com tempo máximo de simulação de 100 segundos.

Realizando as simulações listadas na Tabela 3.2, espera-se obter dados suficientes para aplicação da metodologia proposta para alocação dos detectores de gás e comparar os resultados estacionários e transientes, além da estimativa do tempo de detecção de cada caso.

Os resultados serão apresentados em função dos pontos de vazamento, separados pelas direções de vazamento e pelas direções de vento. São apresentados sob duas formas de visualização, de modo a facilitar a análise dos riscos inerentes ao vazamento. Na primeira, são apresentadas as vistas superior e lateral das plumas formadas após o vazamento, para observar o espalhamento e a altura atingida pelas mesmas. Duas plumas são apresentadas na forma de isossuperfícies, nas concentrações (frações volumétricas) de gás referentes ao limite de detectabilidade dos sensores, gerando o chamado volume detectável. A segunda 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% (L.I.I.) e 15% (L.S.I). Na legenda das figuras, os valores de 0,01, 0,05 e 0,15 correspondem a 20% do L.I.I., 100% do L.I.I. e ao L.S.I. respectivamente.

4.3.1 Resultados dos Vazamentos Estacionários

Devido ao número elevado de simulações, alguns resultados foram selecionados para serem apresentados e discutidos aqui (Figura 4.21 até a Figura 4.26). Os demais encontram-se no item A do Apêndice.

Caso 6 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em -30°

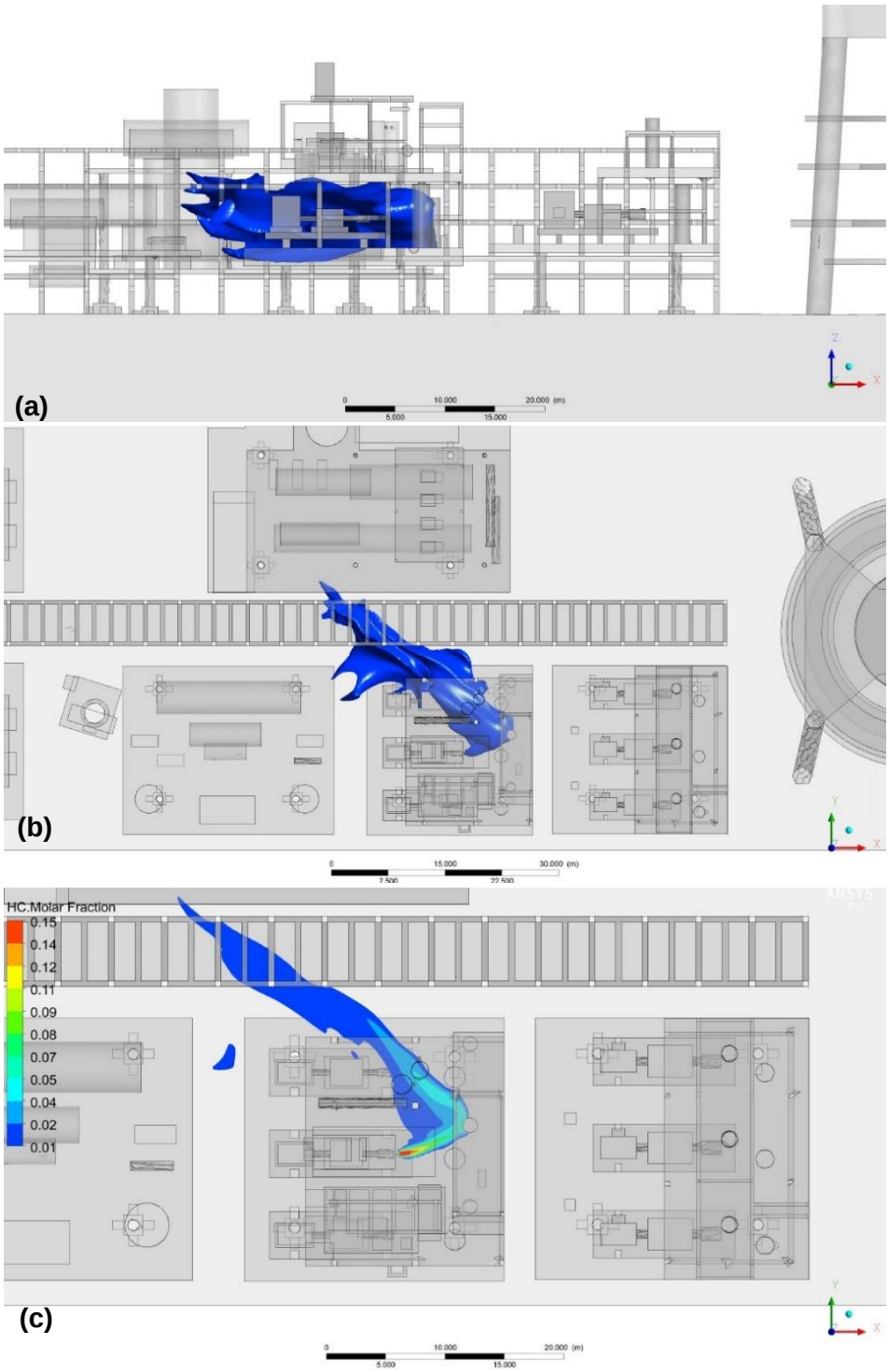

Figura 4.21 – Caso 6 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 7 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em 0°

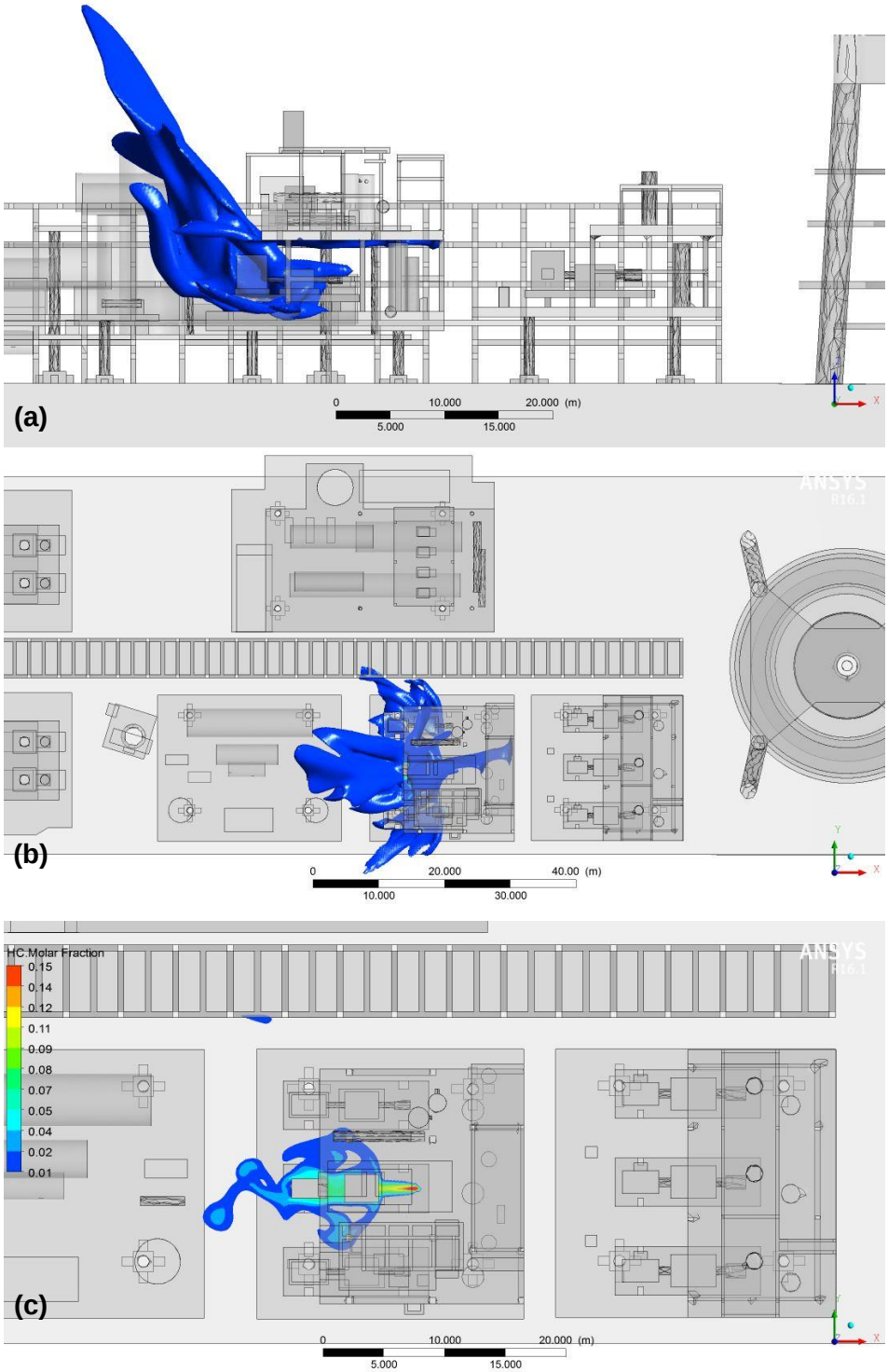

Figura 4.22 – Caso 7 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 13 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em 0°

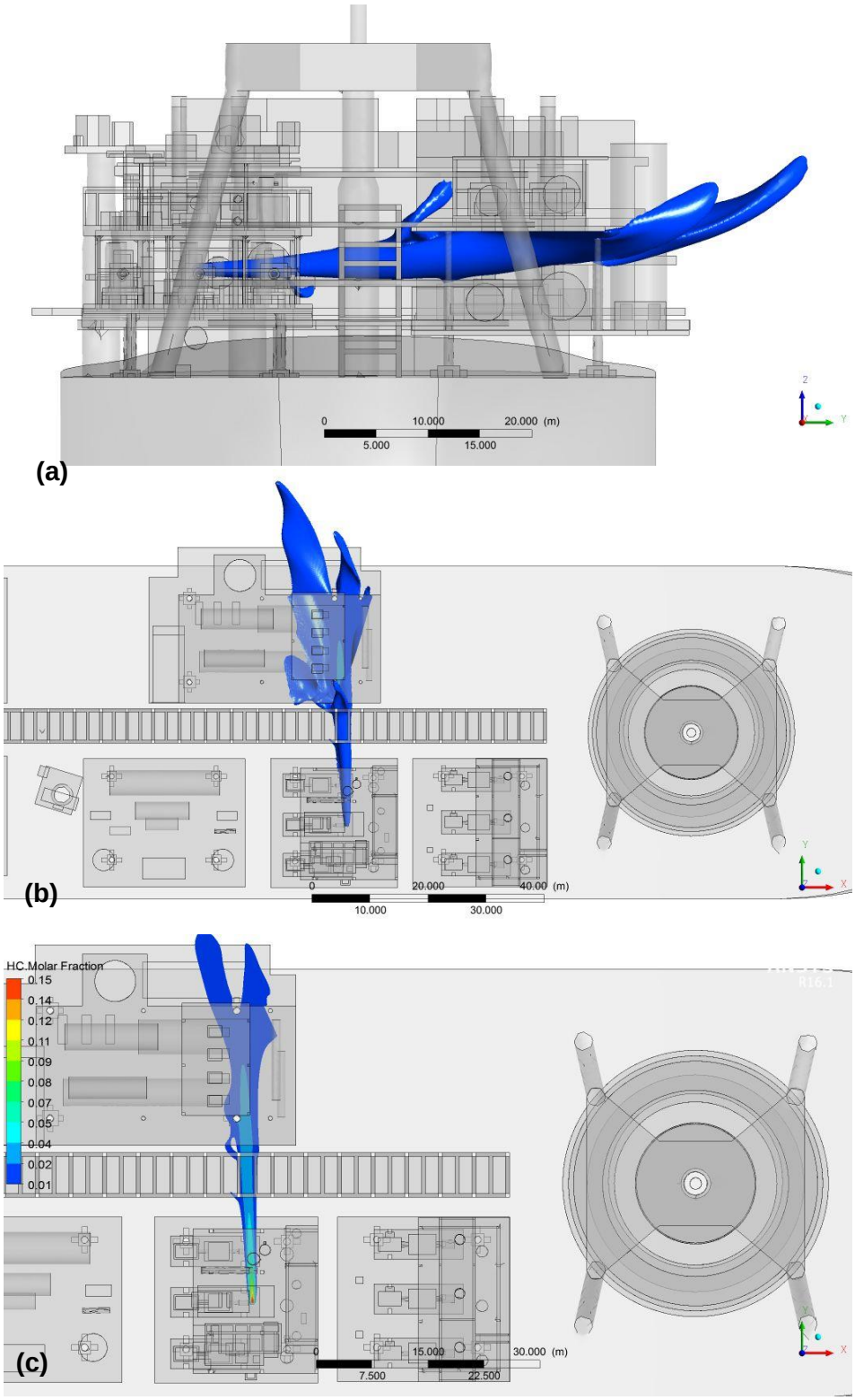

Figura 4.23 – Caso 13 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 24 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em -30°

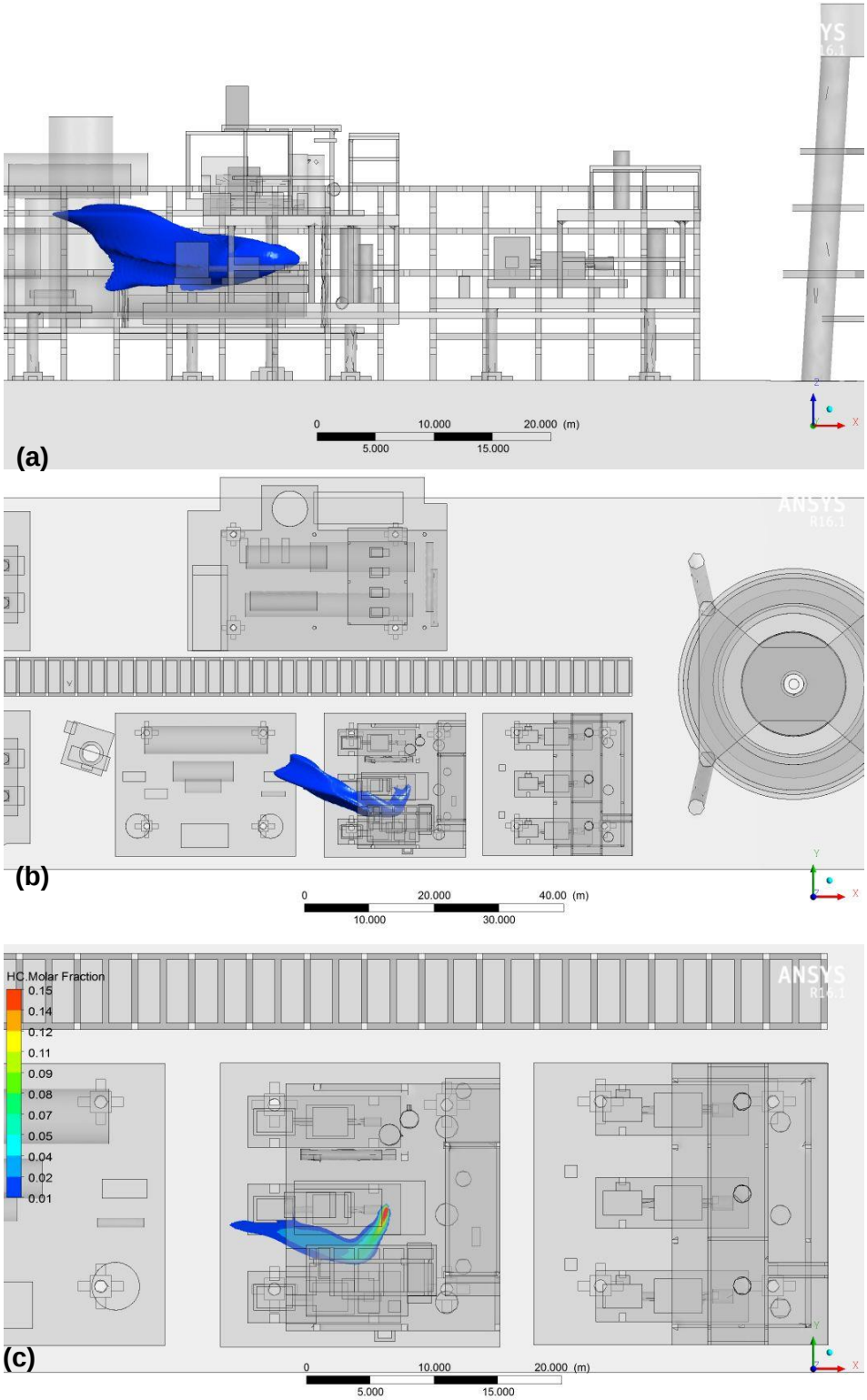

Figura 4.24 – Caso 24 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 28 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em 0°

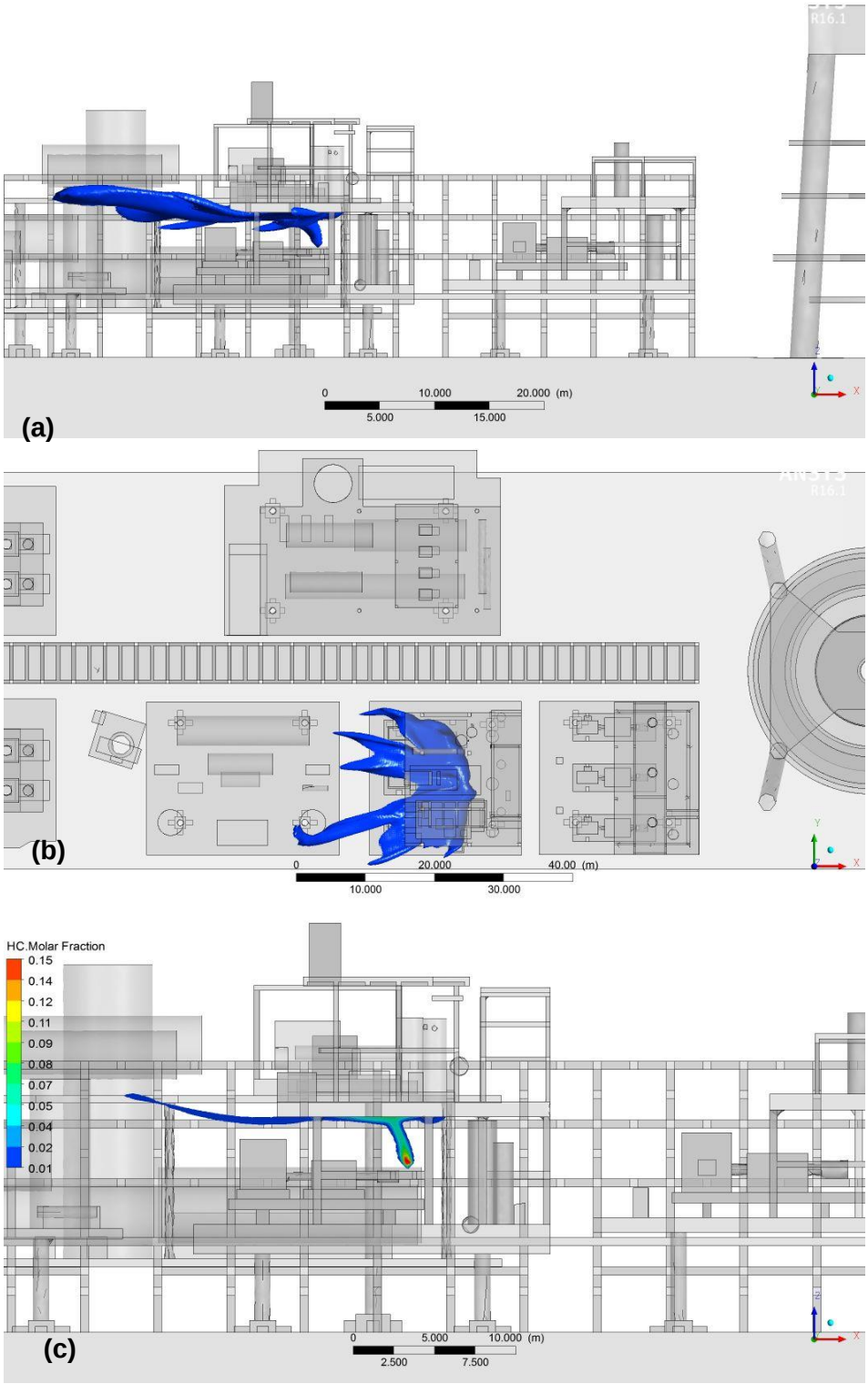

Figura 4.25 – Caso 28 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 32 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

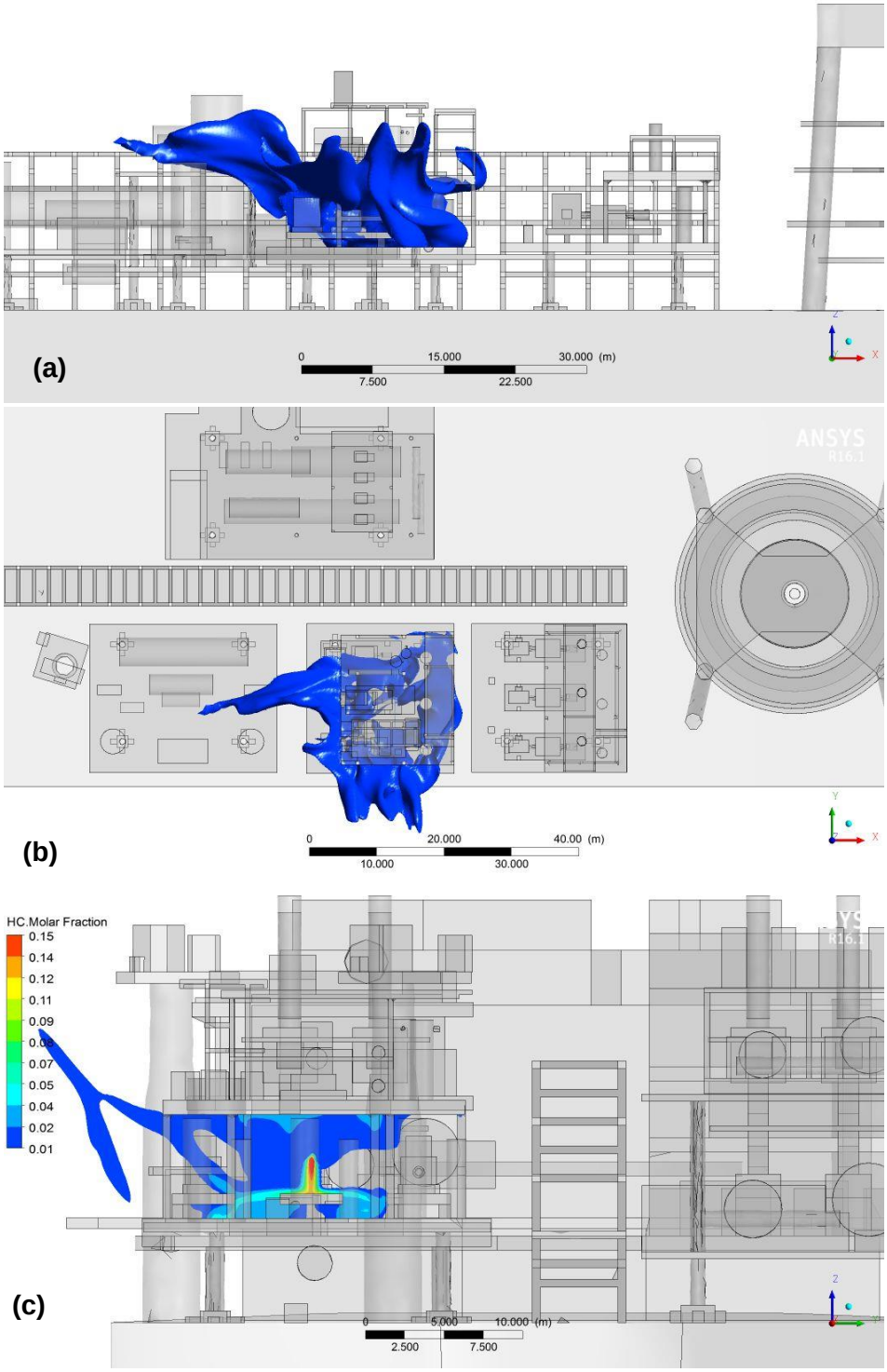

Figura 4.26 – Caso 32 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

A partir das 36 simulações estacionárias foi possível verificar a região de influência da liberação do gás vazado para o ambiente. A Figura 4.27 apresenta uma vista de topo da sobreposição das nuvens simuladas. Avaliando-se os resultados é possível verificar que existe a possíbilidade da nuvem detectável atingir módulos vizinhos ao módulo de origem do vazamento, tendo um comprimento máximo de aproximadamente 60 metros, demonstrando que, a nuvem detectável consegue atingir grandes regiões da plataforma. Além disso, os maiores volumes de gases inflamáveis na região da plataforma foram encontrados nos vazamentos direcionados para baixo, devido à dificuldade de dispersão da pluma, conforme identificado por Fleck (2008). O cenário 31, também de vazamento para baixo, apresentou o maior volume, de aproximadamente 1376,85 m³. Este foi o valor utilizado como $V_{EE,\max}$ na Equação 3.1.

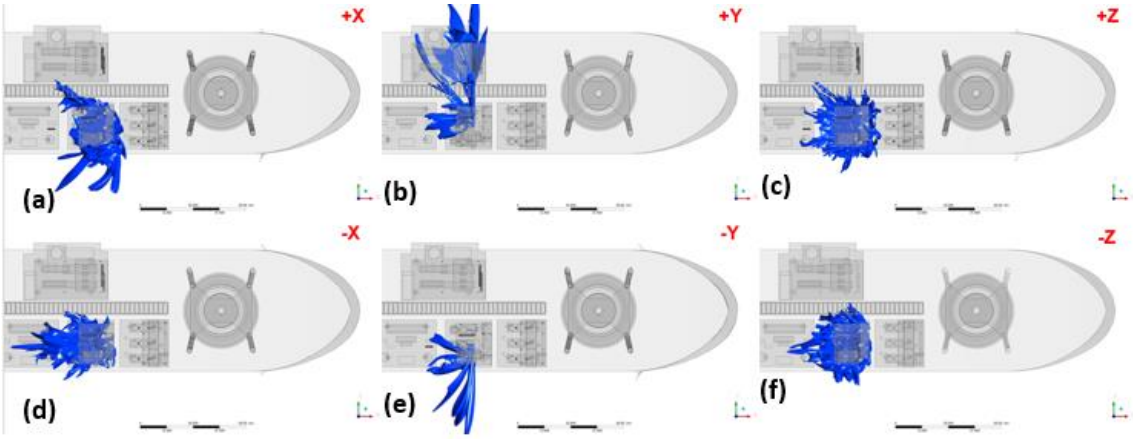

Figura 4.27 – Sobreposição das nuvens simuladas para os ventos de 0°, +30°, -30° e 0° em (a) jato +X, (b) jato +Y, (c) jato +Z, (d) jato –X, (e) jato –Y e (f) jato -Z

Percebe-se que o desenvolvimento das nuvens inflamáveis é altamente depedente do vento incidente e das pertubações provocadas pelos obstáculos presentes no modelo. Devido à grande dimensão que algumas nuvens podem alcançar, o acionamento do sistema de detecção pode acusar vazamentos em um dos módulos sendo a origem de liberação proveniente de módulos vizinhos. Sendo assim, é de extrema importancia saber quais os vazamentos cada dispositivo é capaz de identificar dos diversos sistemas e módulos presentes na unidade para tomada de decisão após o vazamento.

4.3.2 Resultados dos Vazamentos Transientes

Os resultados desta seção são apresentados na forma de isossuperfícies de concentração da nuvem detectável em diferentes instantes de tempo. Os mesmos casos apresentados para as simulações estacionárias são apresentados para as simulações transientes com intuito de comparar a forma física da nuvem após a estabilização.

Devido ao número elevado de simulações, os resultados de desenvolvimento temporal de alguns cenários foram selecionados para serem apresentados e discutidos aqui (Figura 4.28 até a Figura 4.33). Os demais encontram-se no item B do Apêndice.

Caso 6 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em -30°

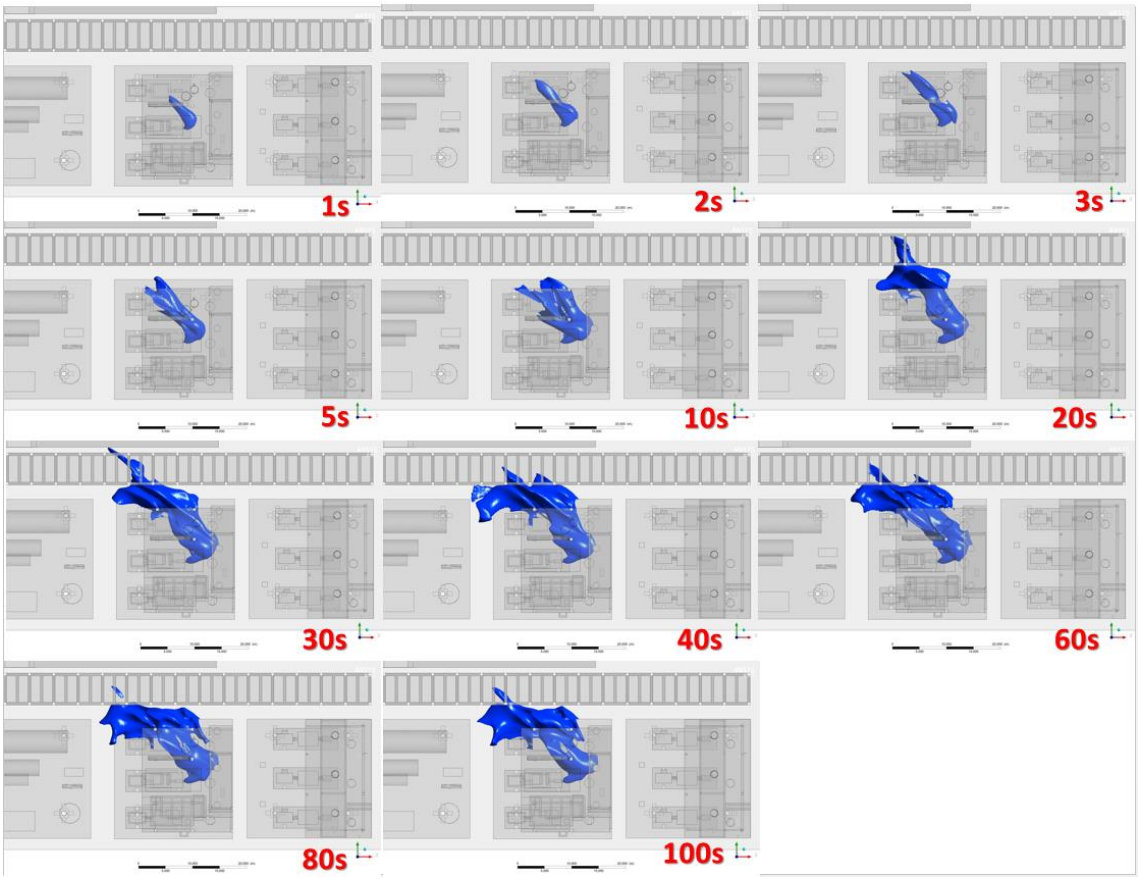

Figura 4.28 – Caso 6 avanço temporal da nuvem inflamável

Caso 7 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em 0°

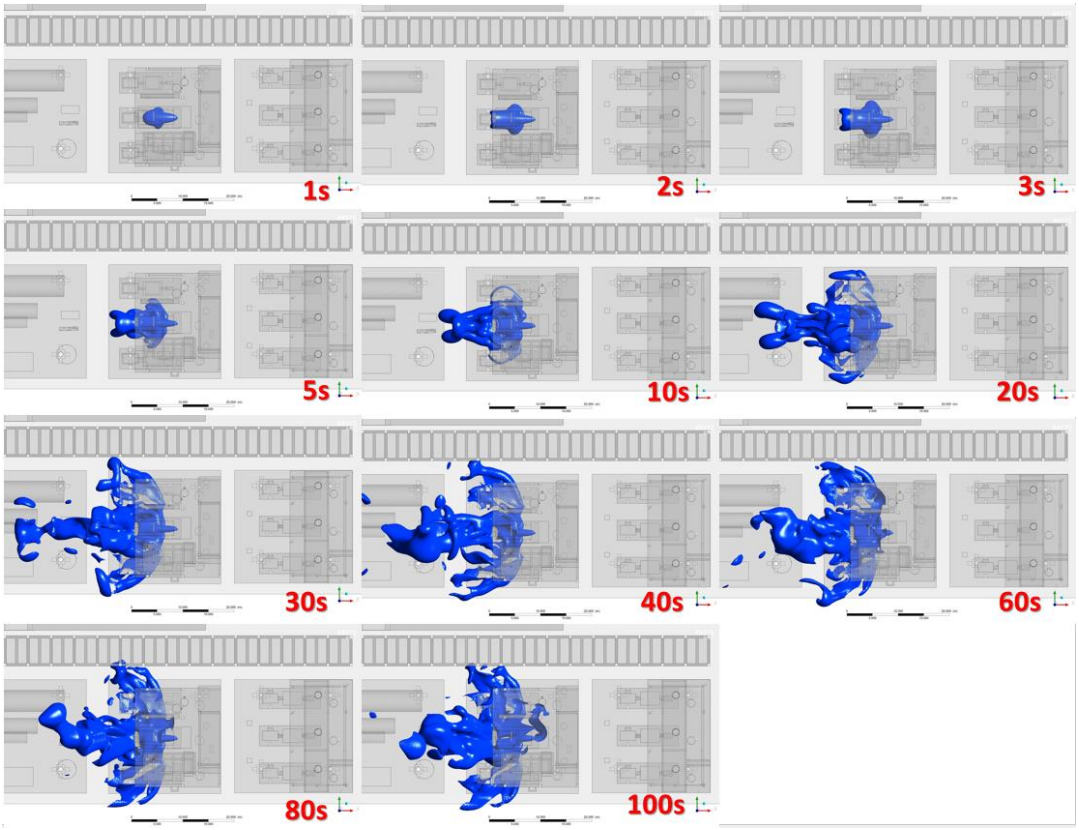

Figura 4.29 – Caso 7 avanço temporal da nuvem inflamável

Caso 13 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em 0°

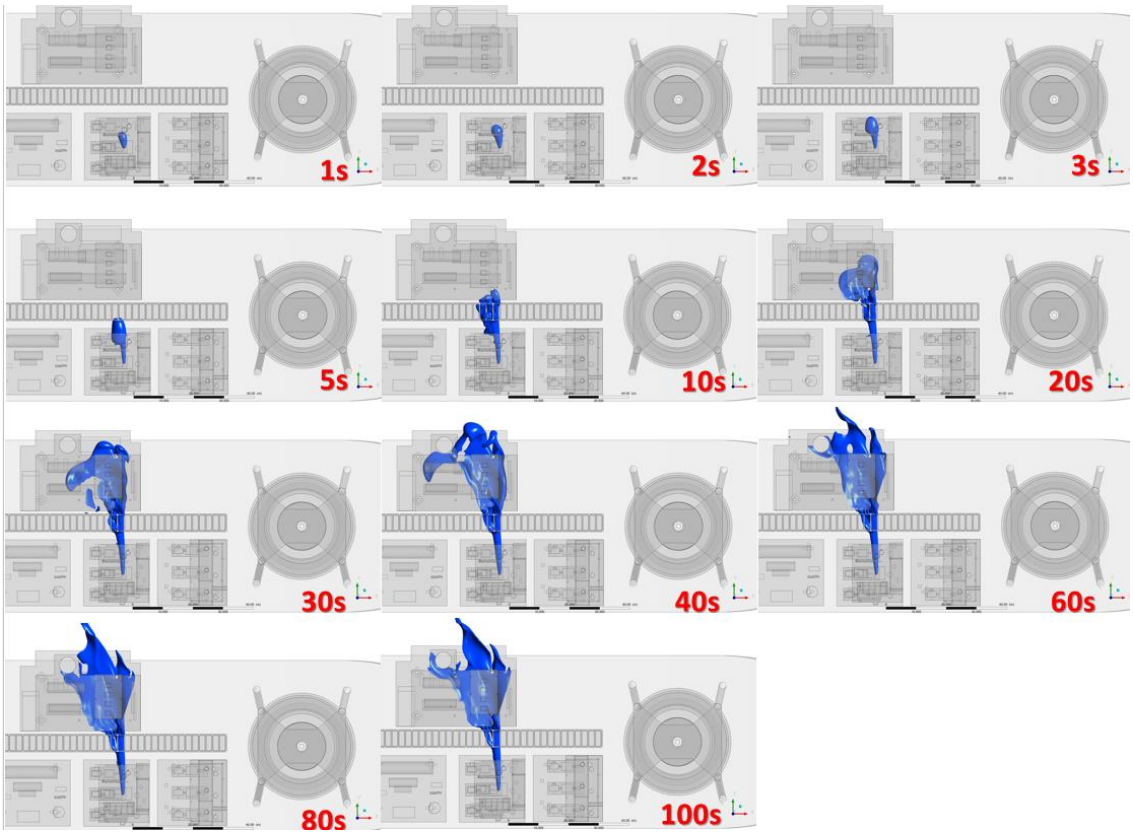

Figura 4.30 – Caso 13 avanço temporal da nuvem inflamável

Caso 24 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em -30°

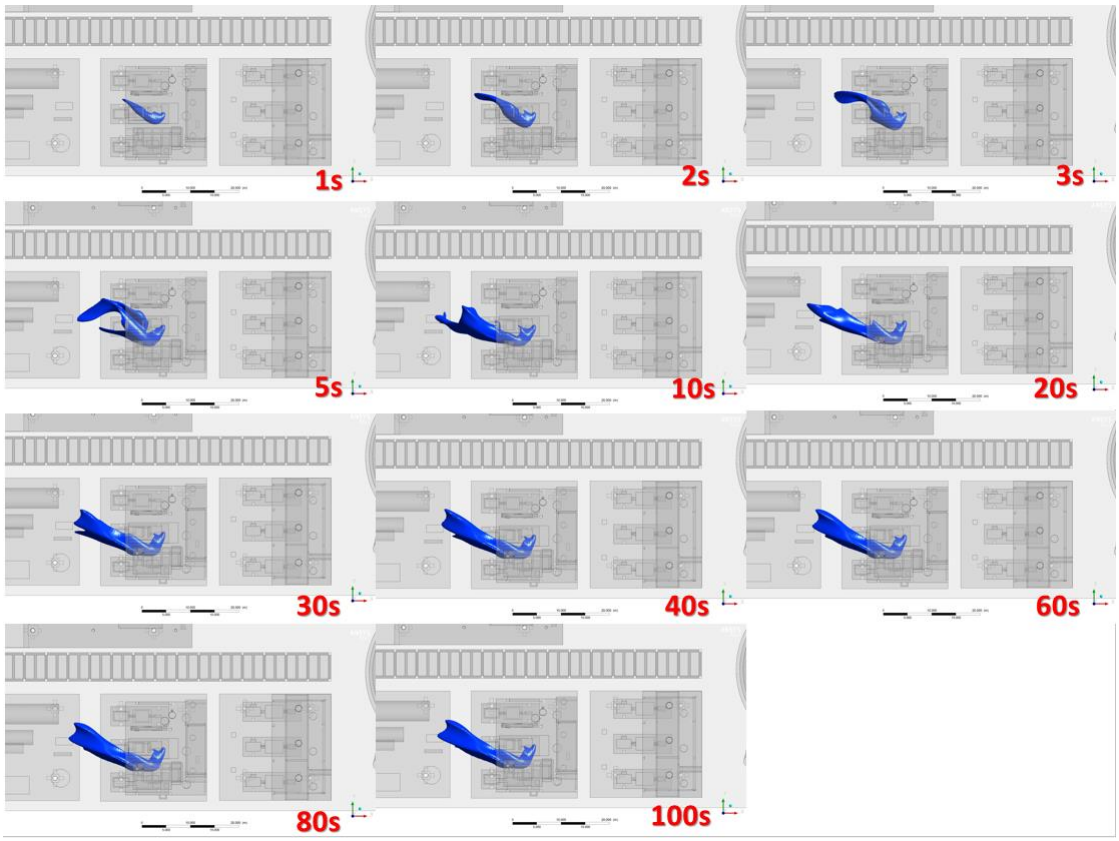

Figura 4.31 – Caso 24 avanço temporal da nuvem inflamável

Caso 28 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em 0°

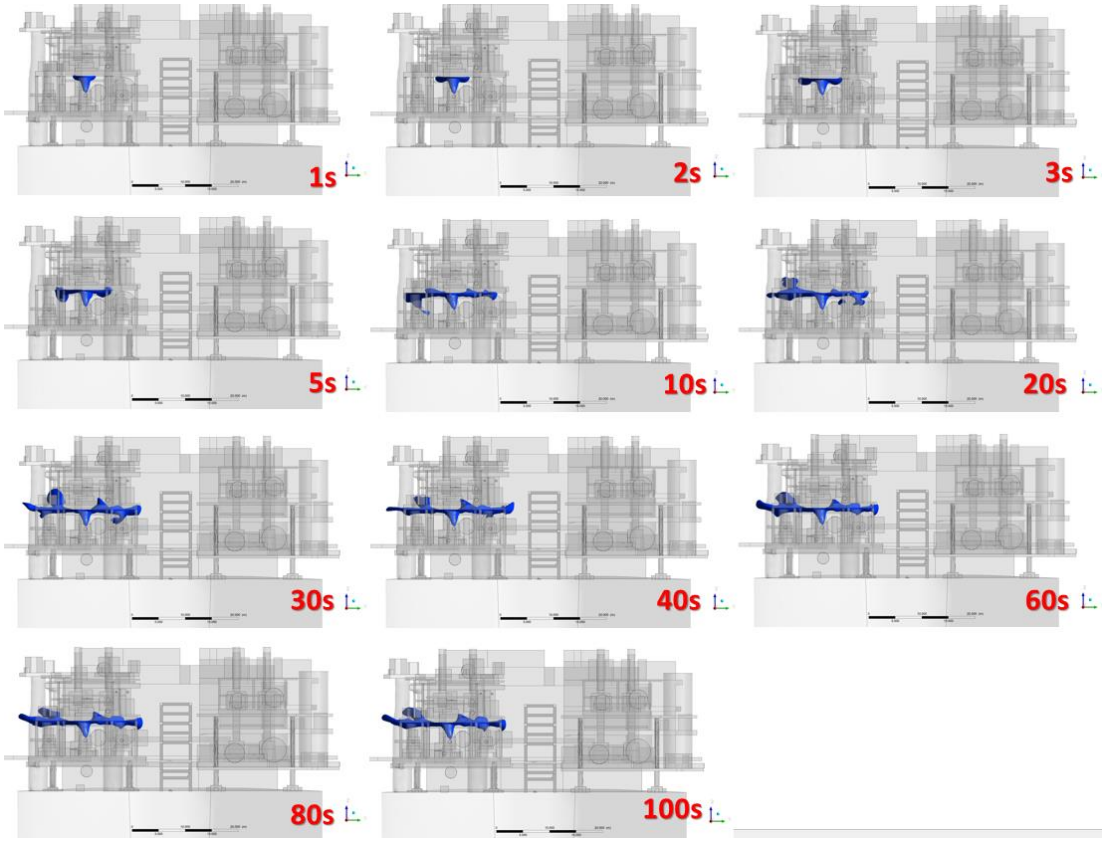

Figura 4.32 – Caso 28 avanço temporal da nuvem inflamável

Caso 32 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

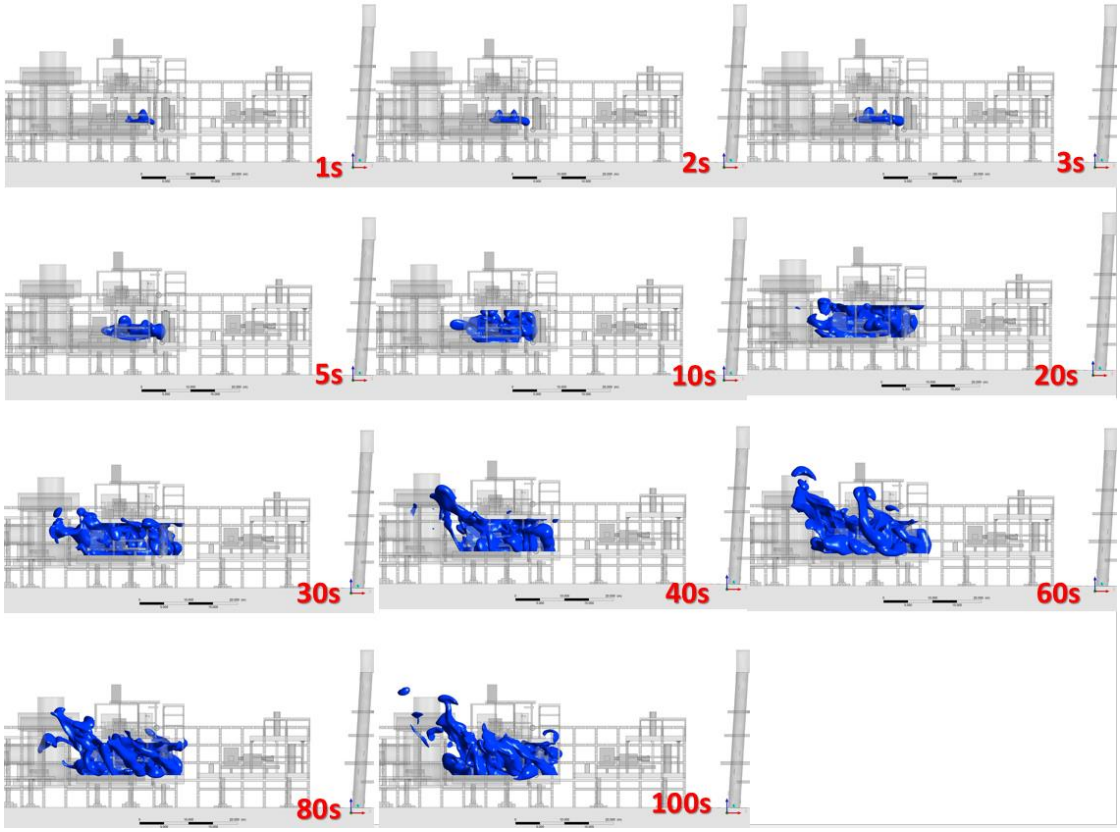

Figura 4.33 – Caso 32 avanço temporal da nuvem inflamável

A partir das simulações transientes pode-se perceber que a região de influência da nuvem inflamável é atingida a partir dos 30 a 40 segundos de simulação, porém, a estabilização da nuvem só acontece posteriormente, em torno de 60 e 80 segundos, como abservado no teste de passo de tempo. Nota-se também que ao final dos 100 segundos a nuvem inflamável torna-se semelhante à nuvem da simulação estacionária mostrando que o resultado estacionário atinge as características da simulação transiente sem desvios significativos na região de interesse. Com os resultados das simulações transientes é possível estimar o tempo no qual cada cenário será detectado.

4.3.3 Resultados da Malha Adaptativa

As plumas resultantes das simulações com malha adaptativa serão apresentadas juntamente com os respectivos resultados estacionários na malha refinada localmente. Para isso, ambas as plumas serão mostradas de forma sobreposta, com cores diferentes. Os resultados em azul representam os da malha localmente refinada e os resultados em vermelho representam os da malha adaptativa.

Devido ao número elevado de simulações, alguns resultados foram selecionados para serem apresentados e discutidos aqui (Figura 4.34 até a Figura 4.39). Os demais encontram-se no item C do Apêndice.

Caso 6 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em -30°

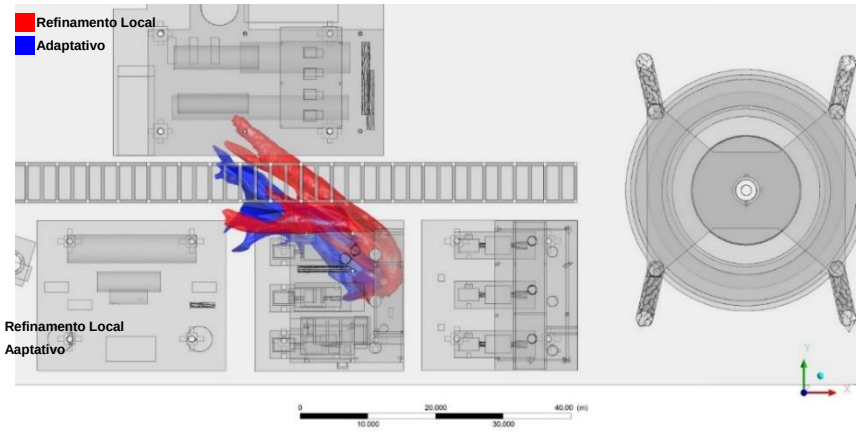

Figura 4.34 – Caso 6 sobreposição (densidade local x adaptativo)

Caso 7 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em 0°

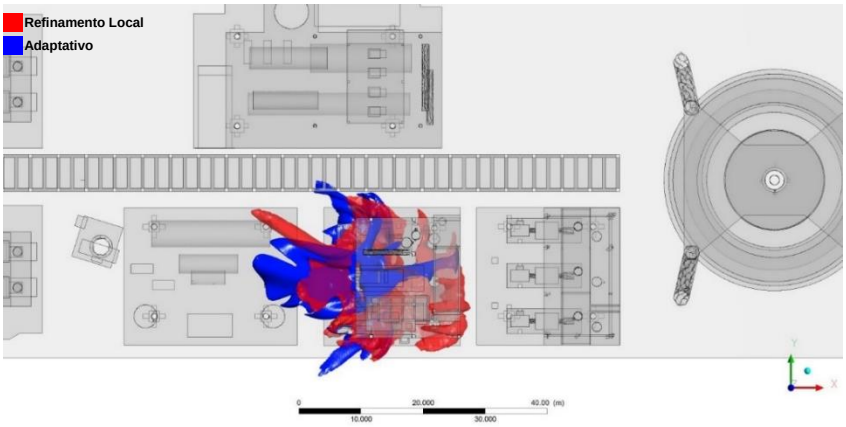

Figura 4.35 – Caso 7 sobreposição (densidade local x adaptativo)

Caso 13 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em 0°

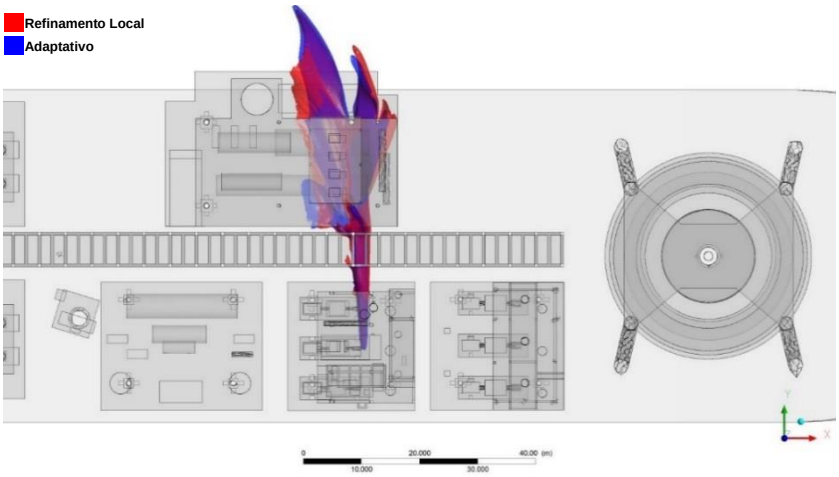

Figura 4.36 – Caso 13 sobreposição (densidade local x adaptativo)

Caso 24 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em -30°

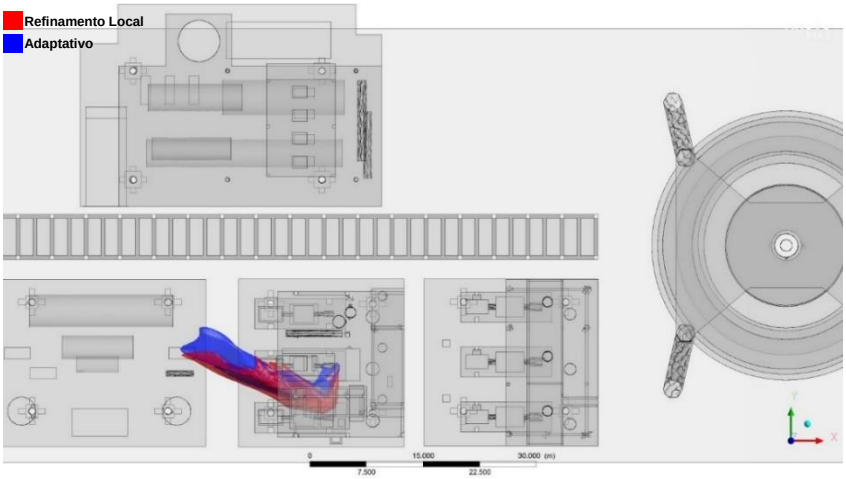

Figura 4.37 – Caso 24 sobreposição (densidade local x adaptativo)

Caso 28 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em 0°

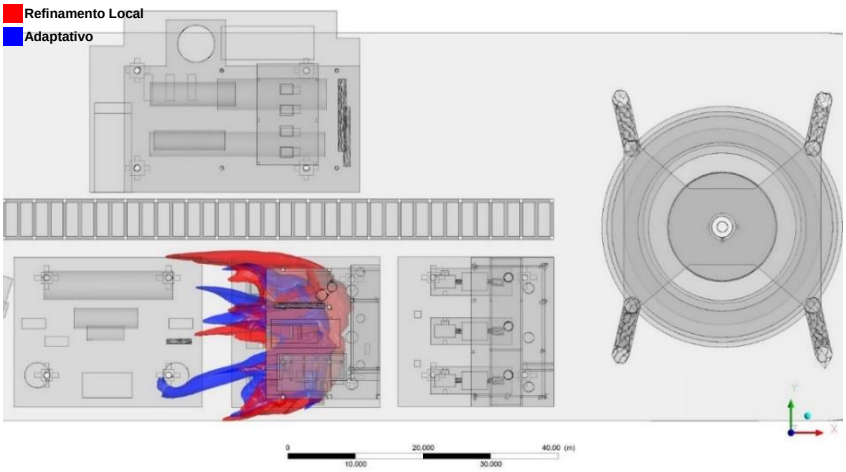

Figura 4.38 – Caso 28 sobreposição (densidade local x adaptativo)

Caso 32 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

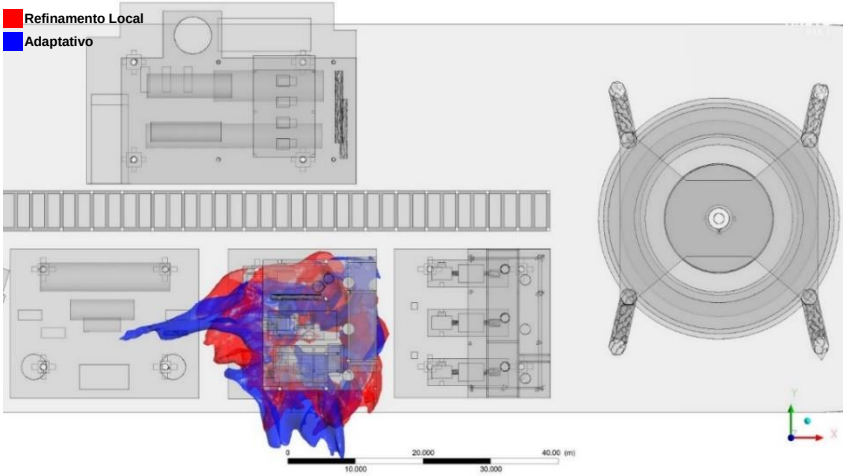

Figura 4.39 – Caso 32 sobreposição (densidade local x adaptativo)

A partir das 36 simulações estacionárias utilizando a estratégia de malha adaptativa foi possível verificar que os resultados são semelhantes (levando em consideração as dimensões geométricas do sistema) aos resultados do item 4.3.1, porém, algumas variações são perceptíveis no alcance e resposta final das nuvens inflamáveis. Nota-se que, para a finalidade de posicionamento de detectores, esta estratégia é razoavel na medida que as nuvens da região detectável sobrepõe uma a outra em sua maioria, tendo variações mais acentuadas em suas extremidades. Um estudo mais detalhado sobre o refinamento automático em função de uma variavél específica deve ser realizado posteriormente para garantir que a estratégia de malha adaptativa seja realmente aceitável para tal finalidade. Portanto, o posicionamento dos detectores será avaliado apenas para os resultados utilizando a malha do teste de sensibilidade por meio da densidade local.

4.3.4 Observações Gerais

Analisando-se o total de 108 simulações realizadas neste trabalho, isto é, tanto as apresentadas até o momento quanto as apresentadas no Apêndice, observa-se que as nuvens dos vazamentos com direção de jato +Y e -Y tendem a ser mais finas e compridas na concentração de detecção (20% do L.I.I.), como na Figura 4.23. Na maioria dos casos a pluma toma como preferência a direção do vento, sendo arrastada na condição de velocidade mais frequente, ou seja, 6,5 m/s, como na Figura 4.24. Para os jatos direcionados opostamente ao vento, as nuvens formadas são impulsionadas pelo vento podendo acumular próximo ao ponto de vazamento e serem arrastadas em sentido contrário ao jato, como na Figura 4.21. Os piores cenários são encontrados para vazamentos direcionados para baixo, pois estes acumulam o gás vazado, Figura 4.26, e com 100% do L.I.I. qualquer fonte de ignição como faíscas provocadas por equipamentos elétricos levariam a ignição imediata.

Um bom projeto de classificação de áreas é de fundamental importância, pois nessas regiões não pode haver qualquer equipamento elétrico que não seja apropriado para atmosferas explosivas. Além disso, fica claro também a importância dos detectores estarem alocados de forma que atuem o mais

rapidamente possível, tentando, inclusive, alertar o operador antes que a mistura explosiva seja formada.

A partir dos resultados, recomenda-se fortemente, sempre que for possível e coerente, nos estudos de dispersão de gases em unidades o*ffshore* 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.

Além da discussão apresentada em cada item especificado, pode-se avaliar o resultado de todas as abordagens a partir do volume da nuvem inflamável de cada simulação. A Tabela 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam um resumo dos valores encontrados ao final das simulações para a comparação Estacionário (densidade local) *versus* Transiente e Estacionário (densidade local) *versus* Estacionário (malha adaptativa). Observa-se que o desvio médio dos casos com a abordagem transiente e estacionário (malha adaptativa) em relação aos casos estacionários (densidade local) é de 8.4% e 23.6% respectivamente e o desvio máximo econtrado é de 43.6% e 116.6% respectivamente.

Os volumes realçados em negrito apresentam os casos onde o desvio encontrado ultrapassa 10% do valor do volume final da simulação estacionária (densidade local). Para tal, foi realizada uma investigação mais profunda para entender o motivo de serem encontrados desvios tão acentuados tendo em vista que a região física da nuvem detectável é semelhante entre os resultados obtidos.

Tabela 4.1 – Volumes estacionário (densidade local) x transiente

Caso	**Estacionário (Densidade Local)**	**Transiente**	**Módulo do desvio relativo**
	Volume (m³)	**Volume (m³)**	
1	587.3	568.1	3.3
2	563.4	580.8	3.1
3	557.7	576.8	3.4
4	399.8	282.5	**29.3**
5	595.4	420.9	**29.3**
6	405.1	336.6	**16.9**
7	576.9	592.6	2.7
8	649.0	667.8	2.9
9	640.8	656.1	2.4
10	337.8	327.7	3.0
11	179.4	166.7	7.1
12	138.1	136.1	1.4
13	514.9	610.0	**18.5**
14	559.2	628.5	**12.4**
15	491.6	516.5	5.1
16	208.6	211.1	1.2
17	320.8	237.7	**25.9**
18	175.8	172.5	1.9
19	267.0	258.5	3.2
20	320.5	295.7	7.7
21	263.8	272.4	3.3
22	208.2	236.4	**13.6**
23	121.3	120.1	1.0
24	126.4	127.8	1.1
25	243.3	228.1	6.3
26	217.4	208.3	4.2
27	218.7	230.1	5.2
28	102.5	101.5	0.9
29	118.8	116.1	2.2
30	73.6	74.3	0.9
31	1376.9	1012.1	**26.5**
32	1238.5	1222.7	1.3
33	898.3	1290.4	**43.6**
34	264.1	265.2	0.4
35	170.3	155.0	9.0
36	141.7	139.8	1.3
Média	396.5	390.1	8.4

Tabela 4.2 – Volumes (densidade local) x (malha adaptativa)

Caso	**Estacionário (Densidade Local)**	**Estacionário (Malha Adaptativa)**	**Módulo do desvio relativo**
	Volume (m³)	**Volume (m³)**	
1	587.3	421.19	**28.3**
2	563.4	480.27	**14.8**
3	557.7	373.76	**33.0**
4	399.8	302.39	**24.4**
5	595.4	607.37	2.0
6	405.1	289.76	**28.5**
7	576.9	794.01	**37.6**
8	649.0	839.53	**29.4**
9	640.8	746.5	**16.5**
10	337.8	395.37	**17.1**
11	179.4	255.47	**42.4**
12	138.1	162.68	**17.8**
13	514.9	521.97	1.4
14	559.2	527.77	5.6
15	491.6	505.59	2.9
16	208.6	260.58	**24.9**
17	320.8	307.87	4.0
18	175.8	269.59	**53.3**
19	267.0	226.37	**15.2**
20	320.5	258.18	**19.5**
21	263.8	230.04	**12.8**
22	208.2	203.88	2.1
23	121.3	53.91	**55.5**
24	126.4	144.73	**14.5**
25	243.3	247.67	1.8
26	217.4	223.13	2.6
27	218.7	208.56	4.7
28	102.5	221.95	**116.6**
29	118.8	128.51	8.2
30	73.6	56.56	**23.2**
31	1376.9	1255.49	8.8
32	1238.5	1371.83	**10.8**
33	898.3	1479.36	**64.7**
34	264.1	178.05	**32.6**
35	170.3	234.45	**37.7**
36	141.7	188.43	**33.0**
Média	396.5	415.9	23.6

Para a investigação foram selecionados os casos 4, 5, 6, 13, 14, 17, 22, 31 e 33 (casos com desvio superior a 10% da Tabela 4.1). Estes casos foram simulados até 300 segundos com intuito de verificar a variação do valor do volume detectável em função do tempo de simulação.

Após as simulação transientes desses casos, verificou-se que o formato físico, no domínio de simulação, das nuvens detectáveis, ficou semelhante ao

formato físico das simulações estacionárias (densidade local) como apresentado na Figura 4.40 para o caso 22. Entretanto, para os casos 4, 5, 31 e 33, foi verificado que o volume calculado pelo *software* CFX se manteve em um comportamento instável durante o tempo de simulação, não convergindo para um valor final. Em contrapartida, os casos 6, 13, 14, 17 e 22 atingiram uma convergência de seus valores. Verificou-se também que os valores obtidos para os casos 6 e 17 apresentavam volumes com diferença maior que 10% comparados aos volumes obtidos pela simulação estacionária (densidade local) e, para os casos 13, 14 e 22, os volumes se aproximaram dos volumes obtidos nas simulações estacionárias (densidade local) com valores contendo diferenças inferiores à 10%. As Figura 4.41 até a Figura 4.49 apresentam as curvas de volume por tempo para as simulações até 300 segundos.

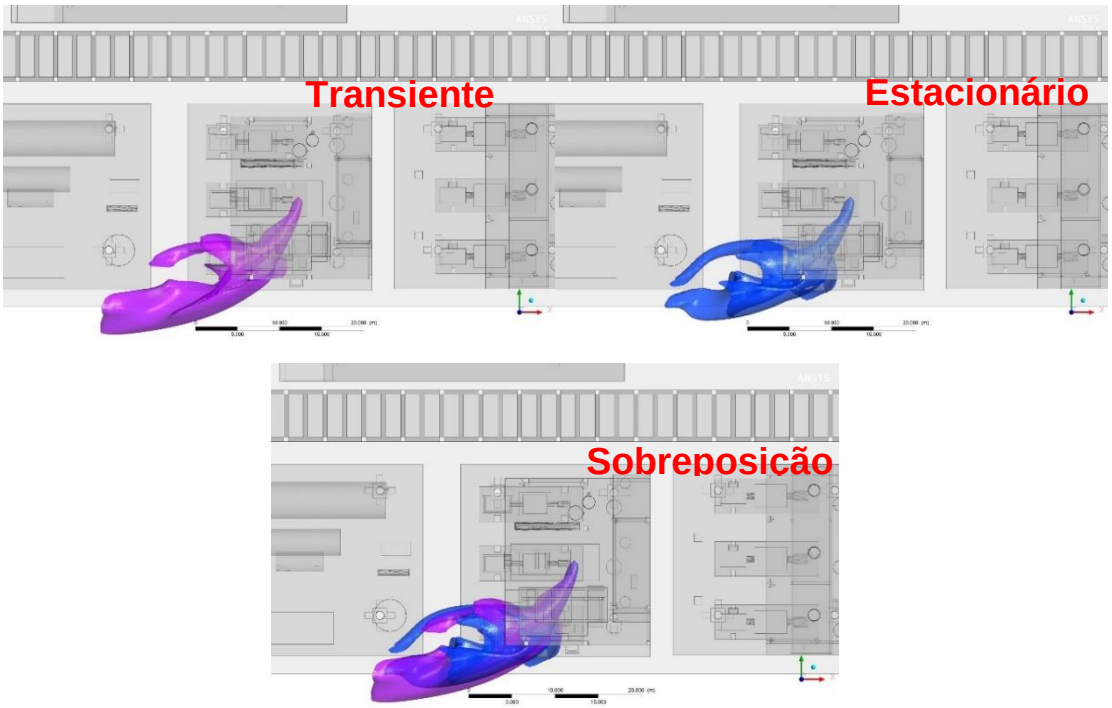

Figura 4.40 – Semelhança entre os resultados do caso 22

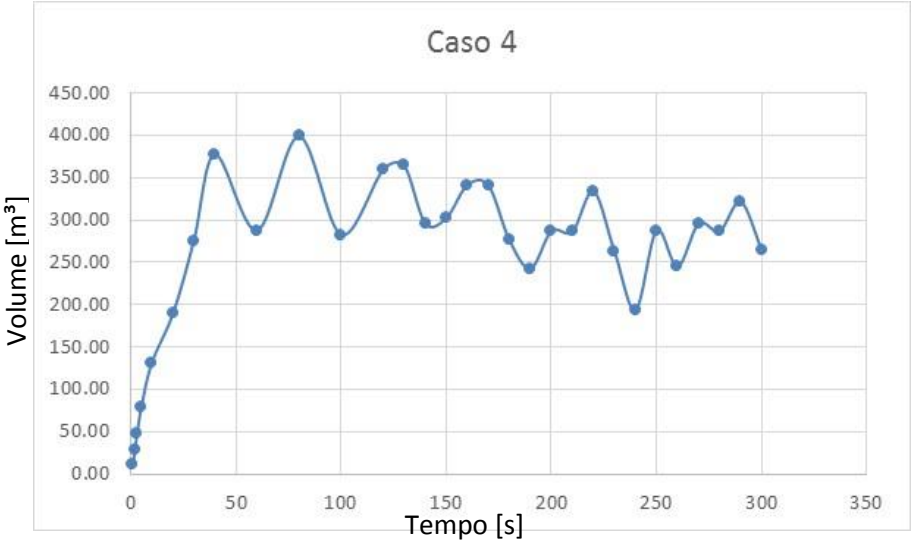

Figura 4.41 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 4

Figura 4.42 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 5

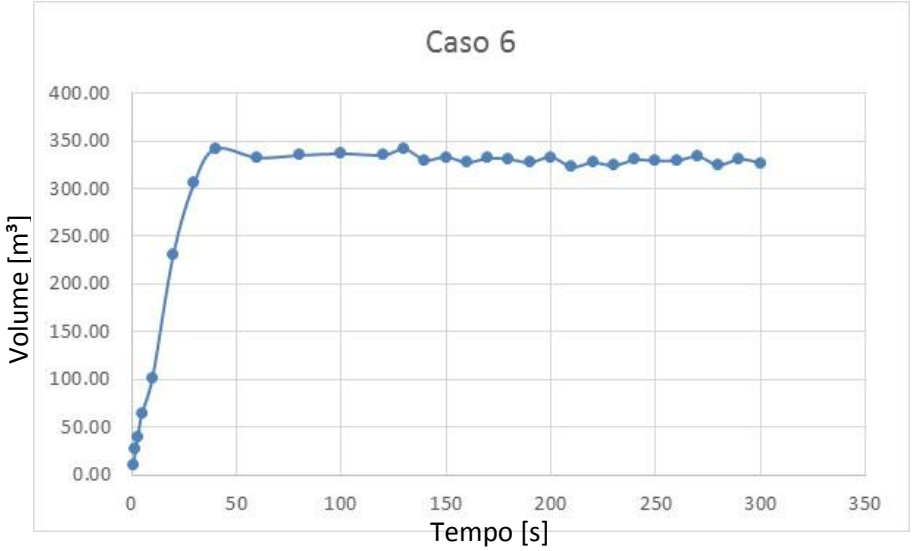

Figura 4.43 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 6

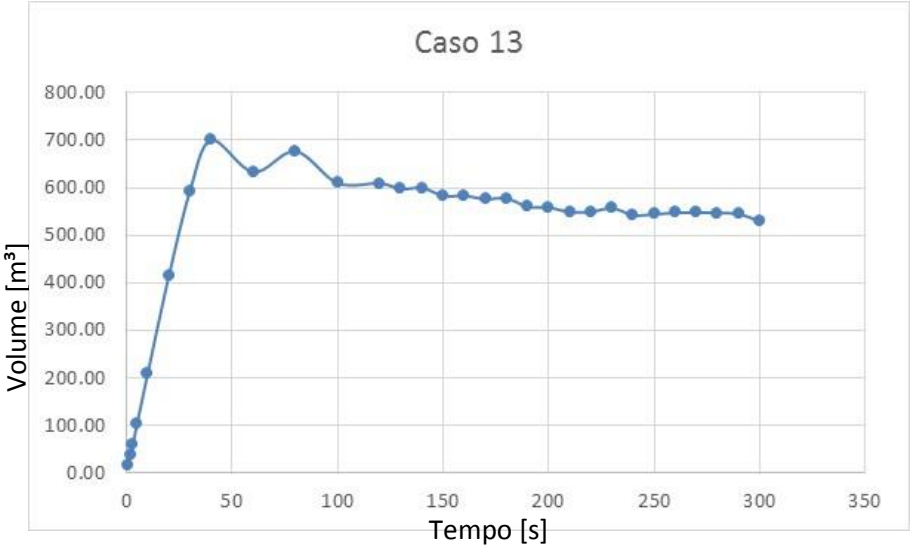

Figura 4.44 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 13

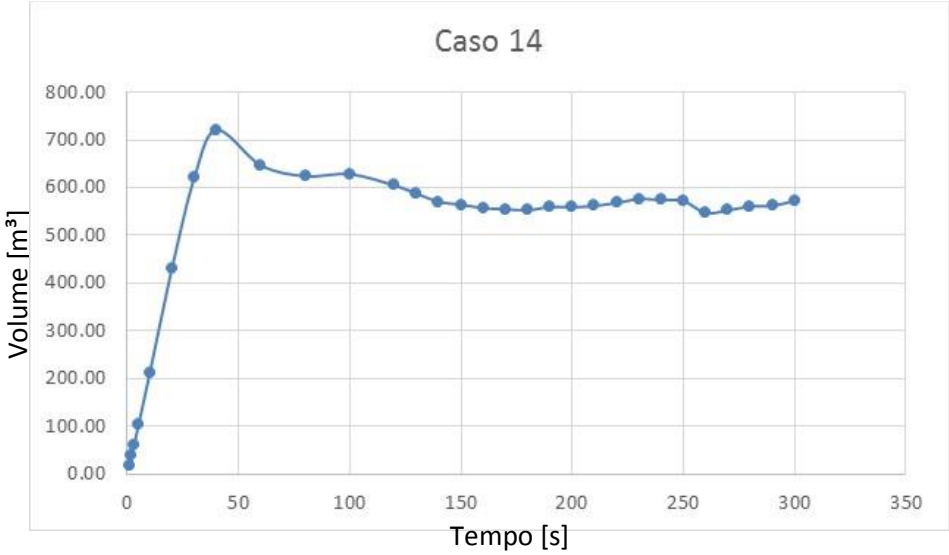

Figura 4.45 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 14

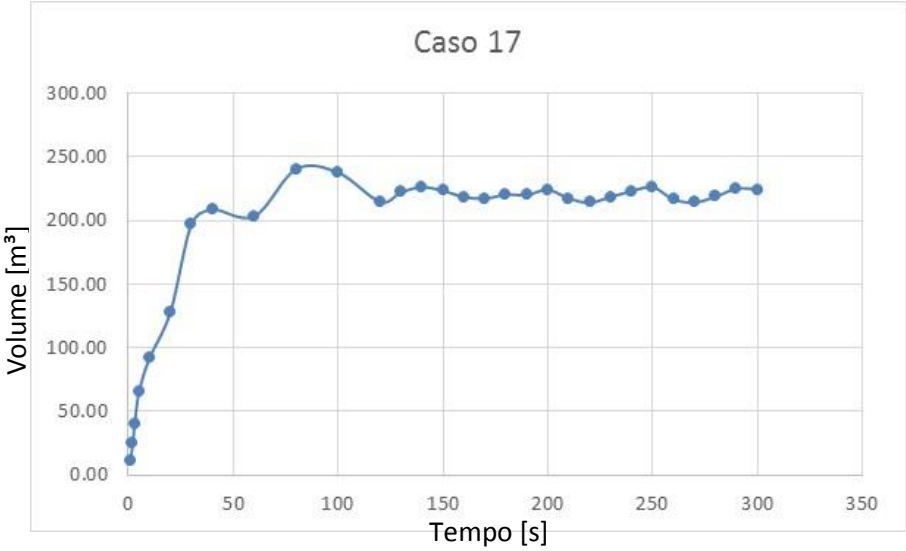

Figura 4.46 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 17

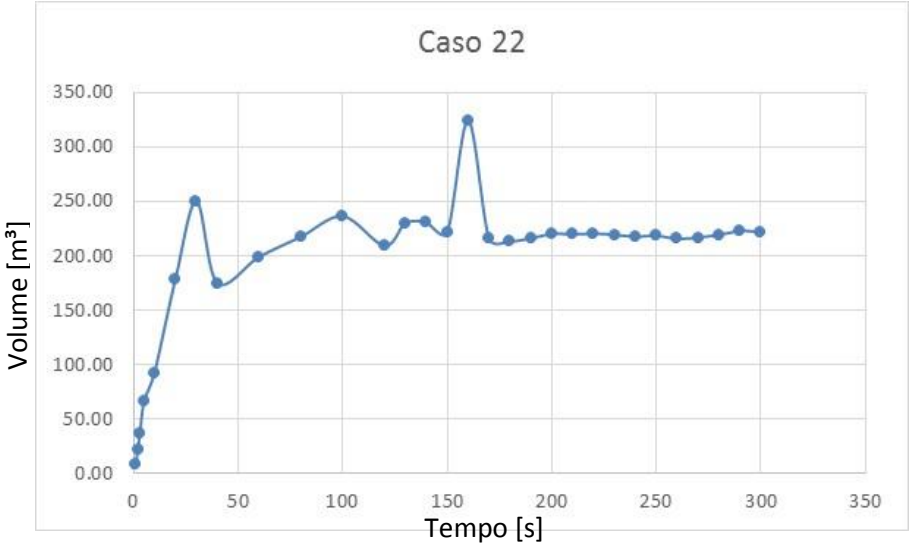

Figura 4.47 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 22

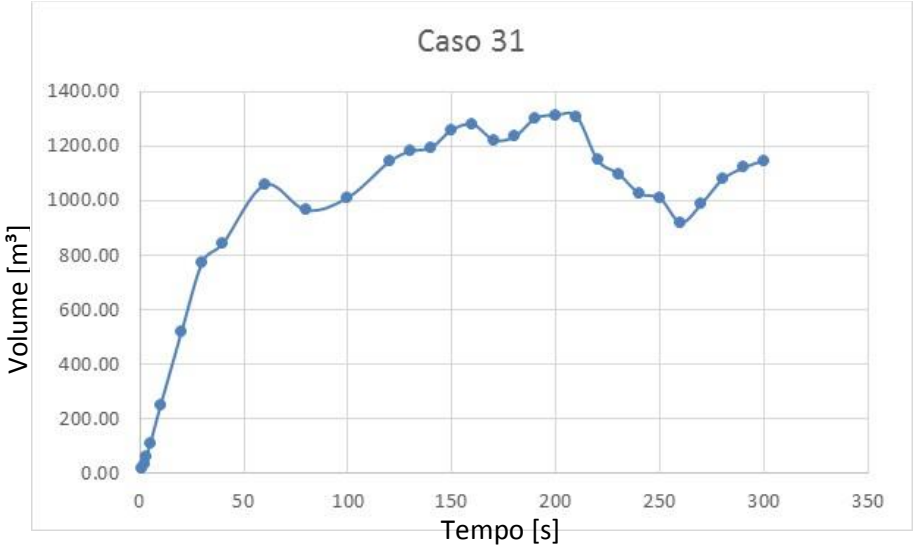

Figura 4.48 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 31

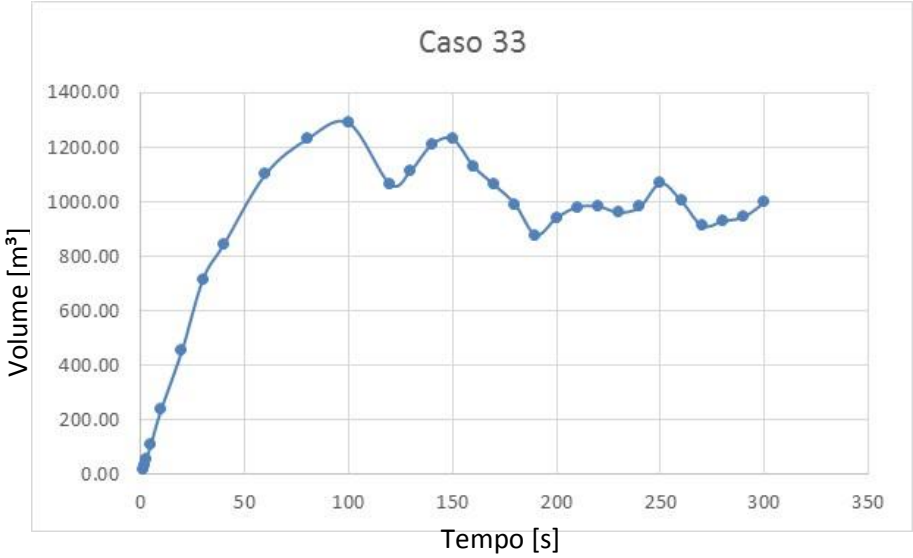

Figura 4.49 – Volume obtido ao longo de 300s para o caso 33

Com os resultados do valor encontrado para o volume detectável com o tempo, constata-se que o desenvolvimento transiente das nuvens simuladas ocorre aproximadamente nos primeiros 50 segundos de simulação. A partir da análise dos resultados, selecionou-se o caso 4 para verificar o tempo no qual a simulação transiente iria atingir a convergência do volume detectável. Para tal, foi realizada uma simulação com tempo total de 1000 segundos.

Além disso, verificou-se, para o caso 4, a diferença entre os volumes obtidos considerando passos de tempo de 1,0 e 0,1 segundos.

A Figura 4. **50** apresenta os volumes obtidos para uma simulação considerando 1000 segundos. A Figura 4.51 apresenta as diferenças entre os volumes obtidos para os passos de tempo de 1,0 e 0,1 segundos.

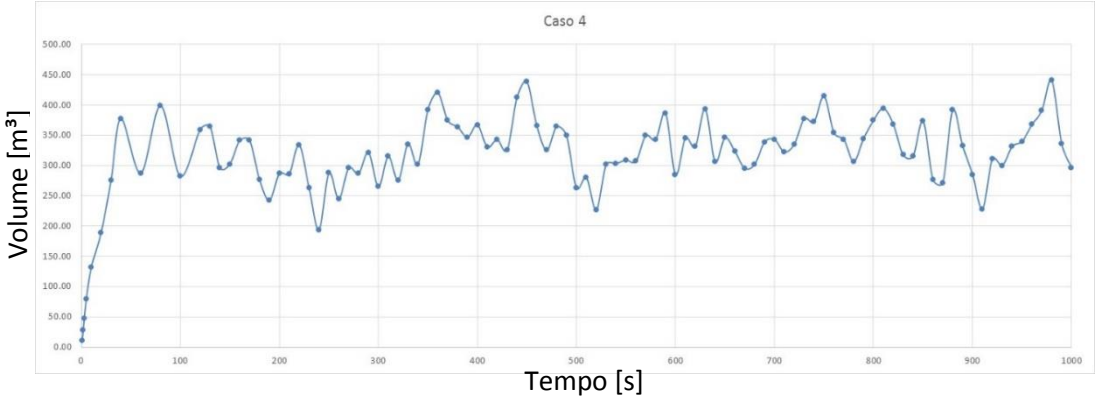

Figura 4. 50 – Volume obtido ao longo de 1000s para o caso 4

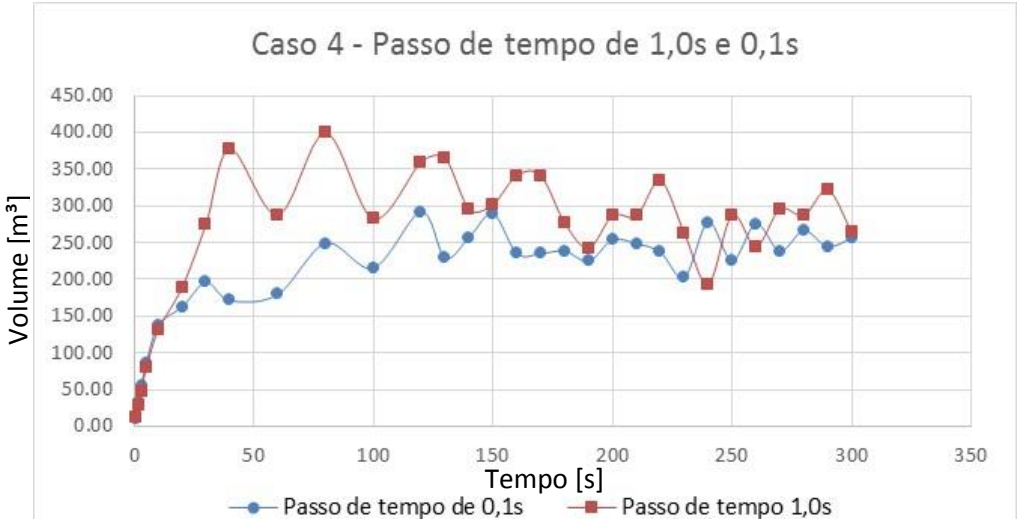

Figura 4.51 – Volume obtido ao longo de 300s (caso 4) passos de 1,0s e 0,1s

Não foi observada convergência do volume detectável para um valor absoluto, indicando que, para o caso 4, os parâmetros de independência do resultado são diferentes do encontrados no teste do caso 13. Com esses

resultados fica evidenciado que cada simulação possui características e restrições próprias confirmando que os testes de sensibilidade de malha, resíduos e passo de tempo deveriam ser realizados para cada caso individualmente para obtenção de resultados mais precisos. Além disso, apesar de todos os testes indicarem os critérios necessários para convergência e independência dos resultados do caso 13, para os demais casos foi observado que 25% obtiveram resultados divergentes ao estacionáio (densidade local) para o volume detectável nas simulações transientes e 70% para o volume detectável nas simulações estacionárias (malha adaptativa). Dentre os casos reavaliados (9 casos), 5 casos convergiram para um valor final do volume, sendo 2 casos diferentes e 3 casos próximos dos valores de volume detectável obtidos nas simulações estacionárias (densidade local).

Fica claro perceber que realizar tais testes para cada cenário em um estudo de dispersão de gases inviabilizaria a execução em tempo viável para um projeto de engenharia. Cabe destacar que, mesmo para volumes distintos das nuvens obtidas nas simulações, para o posicionamento dos detectores, a região física de concentração detectável é semelhante para os resultados das simulações estacionárias (densidade local e adaptativa) e transiente tornando viável o posicionamento baseado em simulação CFD.

Outro ponto importante para descatacar são valores do volume encontrado para a concentração (fração molar) de 0,01 que resulta em variações mais acentuadas para espécies em simulações CFD. Esses valores são fortemente influenciados tendo em vista as dimensões do domínio de simulação e as diferentes escalas de comprimento atribuidas ao modelo geométrico, elevando a incerteza do cálculo numérico para tolerâncias na ordem de 1,0E-2. Contudo, as diferenças físicas das nuvens simuladas são observadas nas extremidades das mesmas, diminuindo a precisão dos resultados, porém, não inviabilizando a utilização da abordagem CFD para estimativa da posição dos sensores de gás.

Os resultados finais obtidos mostram variações significativas do volume detectável para as abordagens sugeridas neste estudo, porém, as dimensões físicas das nuvens de interesse foram semelhantes para tais abordagens. Sendo assim, tal incerteza deve ser investigada a fim de se avaliar os parâmetros mais importantes que consigam tornar o resultado final mais preciso.

4.4 Alocação de Detectores

Como apresentado no item 3.2.6, o *software* POND4 será utilizado para posicionar os detectores pela avaliação do espaçamentos tridimensionais de 0,5 x 0,5 metro a fim de avaliar essa matriz de pontos em torno do vazamento. Foi estabelecida uma distância mínima de 2,0 metros de raio do ponto de liberação avitando-se regiões de alto gradiente de concentração e agrupamento dos detectores no ponto de vazamento selecionado. A tolerância para identificação dos cenários é de 0,5 metro de raio no ponto de detecção, além disso, não são alocados detectores próximos uns dos outros mantendo-se a distância de 1,0 metro entre os pontos selecionados.

4.4.1 Alocação dos Detectores (Simulações Estacionárias)

Após a simulação dos 36 cenários de vazamento no compressor de 2° estágio, observou-se que para a malha de 0,5 metro foram necessários 05 detectores para identificar 100% dos casos, ou seja, os 36 casos simulados. O primeiro ponto de detecção selecionado foi capaz de identificar 44,5% dos casos, já o segundo ponto foi capaz de identificar 30,6% dos cenários, sendo 13,9% iguais ao do primeiro ponto. Os demais sensores foram alocados de acordo com as coordenadas apresentadas na Tabela 4.3 até que todos os cenários fossem identificados gerando a matriz de cruzamento de casos *versus* detectores apresentadas na Tabela 4.4.

A origem do sistema de coordenadas, ou seja, o ponto (0,0,0), é mostrado na forma de cruz na cor azul apresentado na Figura 4.52.

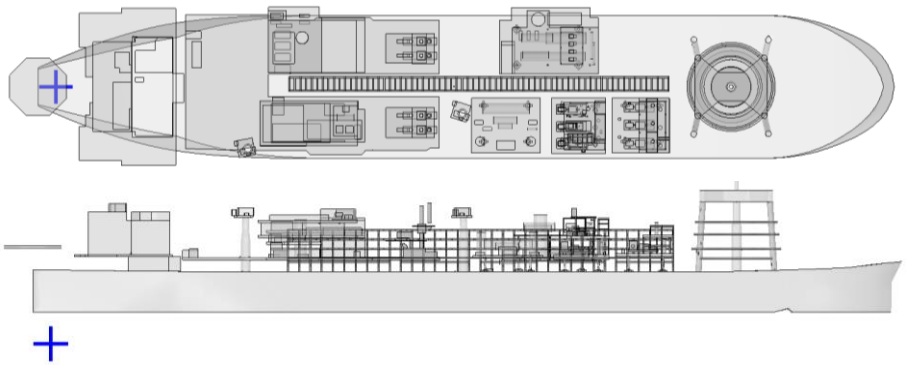

Figura 4.52 – Origem do Sistema de Coordenadas dos Detectores

Tabela 4.3 – Coordenadas dos detectores da matriz de 0,5 x 0,5 m que garante que todos os cenários sejam identificados

DETECTOR	X	Y	Z	PRECISÃO
D-HC-01	210.0 m	-16.0 m	42.0 m	0.5 m
D-HC-02	212.0 m	-10.5 m	38.0 m	0.5 m
D-HC-03	200.0 m	-17.5 m	38.0 m	0.5 m
D-HC-04	211.0 m	-25.0 m	37.5 m	0.5 m
D-HC-05	201.0 m	-11.0 m	38.0 m	0.5 m

Tabela 4.4 – Cenários detectados por cada um dos detectores que garante que todos os cenários sejam identificados

CENÁRIOS vs. DETECTORES MATRIZ			D-HC-01	D-HC-02	D-HC-03	D-HC-04	D-HC-05
			16	11	8	8	8
1	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_0	1	1				
2	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_30	1	1				
3	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_-30	1	1				
4	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_0	1	1				
5	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_30	1				1	
6	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_-30	1		1			
7	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_0	2	1		1		
8	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_30	3	1		1		1
9	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_-30	3	1		1		1
10	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_0	1			1		
11	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_30	1			1		
12	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_-30	1					1
13	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_0	1		1			
14	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_30	1		1			
15	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_-30	1		1			
16	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_0	2		1			1
17	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_30	3		1	1		1
18	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_-30	1		1			
19	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_0	1				1	
20	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_30	1				1	
21	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_-30	1				1	
22	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_0	1				1	
23	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_30	1				1	
24	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_-30	1			1		
25	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_0	1	1				
26	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_30	1	1				
27	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_-30	1	1				
28	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_0	1	1				
29	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_30	1	1				
30	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_-30	1	1				
31	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_0	4	1	1		1	1
32	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_30	4	1	1		1	1
33	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_-30	2	1	1			
34	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_0	1					1
35	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_30	1			1		
36	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_-30	1		1			

A localização geométrica dos sensores é apresentada na vista de topo na Figura 4.53 e na vista lateral na Figura 4.54.

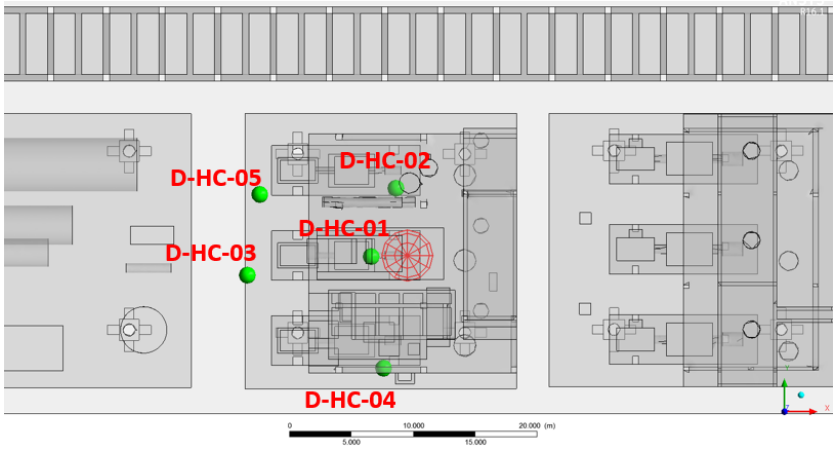

Figura 4.53 – Vista de topo do posicionamento dos detectores que garante que todos os cenários sejam identificados

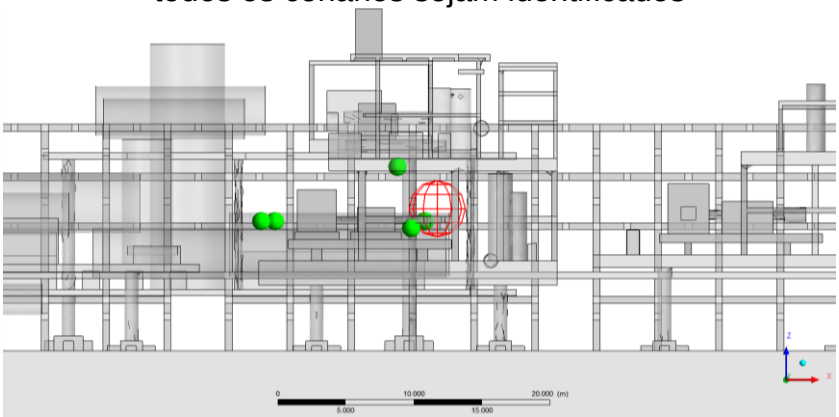

Figura 4.54 – Vista lateral do posicionamento dos detectores que garante que todos os cenários sejam identificados

Em um projeto real, nesta etapa, verifica-se a possibilidade de instalação dos detectores nos pontos selecionados, ou seja, se estes pontos não estão em áreas de manutenção, rotas de fuga, ou outros locais que inviabilizem a sua fixação. Isto seria feito de maneira simples com o auxílio da maquete 3D da unidade. Esta tarefa não foi realizada no presente trabalho, pois os detectores não serão fisicamente instalados na planta.

Pode ser verificado que nenhum dos detectores poderia ser excluído da malha de detecção sem prejuízo à “otimização” da mesma, ou seja, não existe nenhuma situação em que os cenários cobertos por um determinado detector fossem todos eles cobertos pelos outros 04 detectores. O caso 1, por exemplo, só é coberto pelo detector D-HC-01; assim como, o caso 34 pelo detector D-HC-05; o caso 24 pelo detector D-HC-03 e etc.

Em alguns projetos industriais, existe a exigência ou critério de votação de 02 detectores identificando cada cenário aumentando a confiabilidade do sistema de detecção, pois, se um detector falhar, ao menos um outro detector estará apto a fazer a detecção. Para o sistema proposto neste trabalho, cerca de 22,2% dos cenários foram cobertos por 02 detectores, e tal exigencia aumentaria o número de dispositivos a serem inseridos.

No processo de alocação de detectores observou-se que o primeiro ponto selecionado pelo *software* é o que identifica o maior número de cenários. Entretando, analisando-se a resposta, percebeu-se que o primeiro ponto, não é necessariamente o melhor ponto a ser escolhido. O exemplo da Figura 4.55 mostra que, para um conjunto de nuvens inflamáveis hipotético, onde existam diversos cenários de vazamento representado por cada cor, o ponto A seria o ponto selecionado pelo *softaware* POND4 por considerar o maior número de casos identificados. Após identificação do ponto A, o *software* iria selecionar os pontos B, C e D e encerraria sua rotina identificando 100% dos cenários, totalizando 04 detectores. Entretanto, pode-se perceber que a identificação dos pontos B, C e D seria suficiente para alcançar os mesmos 100% dos casos hipotéticos com apenas 03 detectores. Tendo em vista essa análise, fica claro que um posicionamento 100% automatizado não garante a otimização do número final de dispositivos, apenas considera os melhores pontos para identificação de um conjunto de cenários, ficando a análise desses pontos ao usuário.

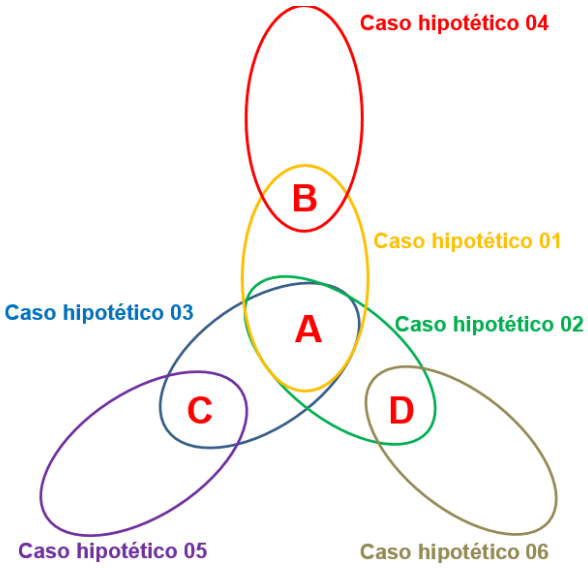

Figura 4.55 – Exemplo hipotético verificado após análise dos resultados

A Figura 4.56 apresenta a resposta do software para o caso hipotético:

```
LISTA DE PONTOS DE DETECÇÃO:
      X            Y            Z             Casos
  Coordenada AX Coordenada AY  Coordenada AZ    3  ->   01   02   03
  Coordenada BX Coordenada BY  Coordenada BZ    2  ->   01   04
  Coordenada CX Coordenada CY  Coordenada CZ    2  ->   02   06
  Coordenada DX Coordenada DY  Coordenada DZ    2  ->   03   05
```

Figura 4.56 – Exemplo da saída dos dados do *software* POND4

Assim, é de extrema impotância levar em consideração o fato de que o melhor ponto, o qual identifica o maior número de cenários, não necessariamente é o ponto ideal para alocação de sensores em unidade o*ffshore*. Um método consistente deve levar em consideração diversos arranjos dos pontos identificados e até mesmo selecionar diferentes “primeiros pontos” para garantir que todas as possibilidades sejam verificadas, garantindo um número otimizado de detectores. Este processo seria muito complexo e demandaria muito tempo dependendo do número de casos analisados.

Cabe salientar ainda que mais pontos de vazamento gerariam, obviamente, mais simulações e mais nuvens gasosas, e o processo de alocação poderia ser mais completo. Na consideração de mais cenários, a probabilidade de um detector detectar diversas nuvens é maior, ou seja, dificilmente existiriam detectores na planta que fossem responsáveis pela detecção de somente uma nuvem ou de um número pequeno de nuvens. Em outras palavras, isso significa dizer que se fossem levados em consideração, por exemplo, 72 cenários, ao invés das 36 do presente trabalho, o aumento do número de detectores não seria proporcional.

4.4.2 Tempo de Detecção (Simulação Transiente)

Após a determinação dos pontos de detecção para os cenários analisados através das simulações em estado estacionário, estimou-se o tempo no qual cada cenário seria identificado. A Figura 4.57 apresenta o número acumulado de casos detectados por tempo decorrido do início do vazamento.

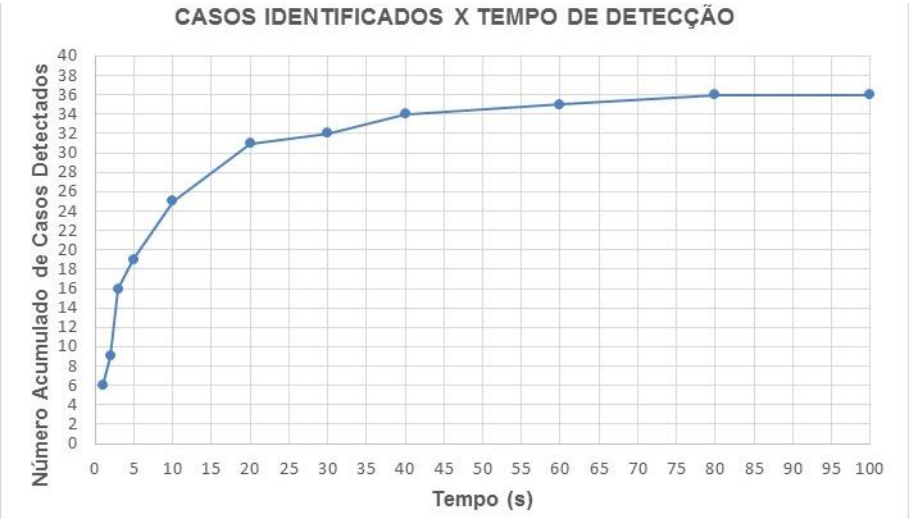

Figura 4.57 – Número acumulado de casos detectados por tempo pelos detectores alocados através dos resultados das simulações em regime estacionário.

Percebe-se que os 36 casos são idenficados pela malha de detecção entre 60 e 80 segundos. A porcentagem de casos identificados com o tempo de vazamento é apresentado abaixo:

% detecção

- 16.7% dos casos são identificados em 1,0 segundo
- 25.0% dos casos são identificados em 2,0 segundos
- 44.4% dos casos são identificados em 3,0 segundos
- 52.8% dos casos são identificados em 5,0 segundos
- 69.4% dos casos são identificados em 10,0 segundos
- 86.1% dos casos são identificados em 20,0 segundos
- 88.9% dos casos são identificados em 30,0 segundos
- 94.4% dos casos são identificados em 40,0 segundos
- 97.2% dos casos são identificados em 60,0 segundos
- 100.0% dos casos são identificados em 80,0 segundos

A apresentação da porcentagem de detecção consta apenas como informação adicional para o presente trabalho, pois, não é esperado que todos os vazamentos ocorram simultaneamente.

Outro ponto relevante é identificar o tempo em que cada detector é capaz de identificar cada caso simulado. A Figura 4.58 até a Figura 4.72 apresenta o tempo máximo necessário para que cada detector seja capaz de identificar cada caso, ou seja, em quanto tempo (no máximo) pode-se garantir que a concentração de HC atinja 20% do L.I.I. em cada ponto de detecção. Como a avaliação dos resultados é feita em instantes de tempo discretos, o que podemos afirmar é o tempo máximo para que cada caso seja identificado.

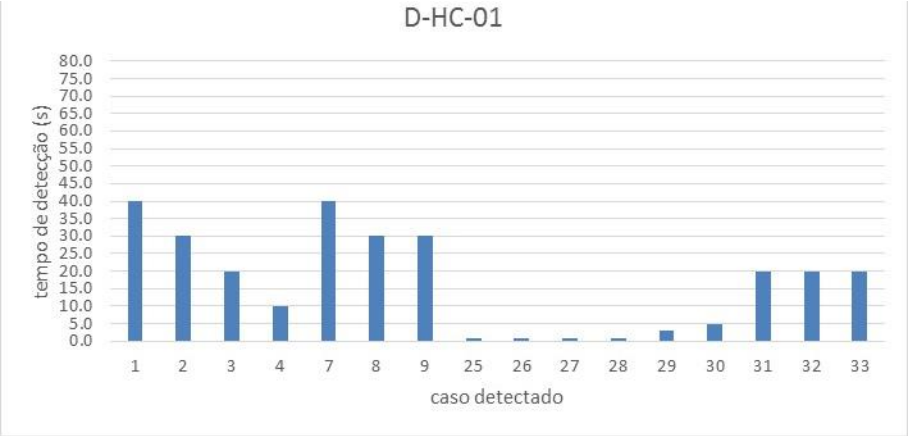

Figura 4.58 – Tempo máximo necessário para o detector D-HC-01 identificar cada cenário de vazamento. O D-HC-01 foi determinado por análise estacionária dos vazamentos.

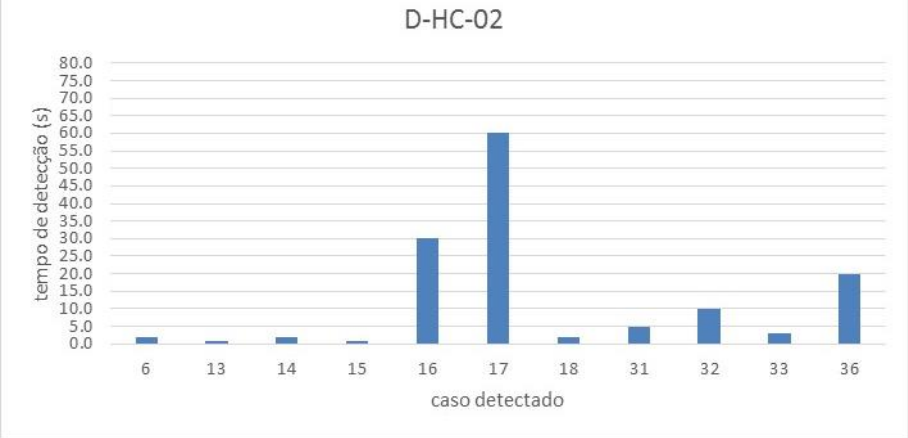

Figura 4.59 – Tempo máximo necessário para o detector D-HC-02 identificar cada cenário de vazamento. O D-HC-02 foi determinado por análise estacionária dos vazamentos.

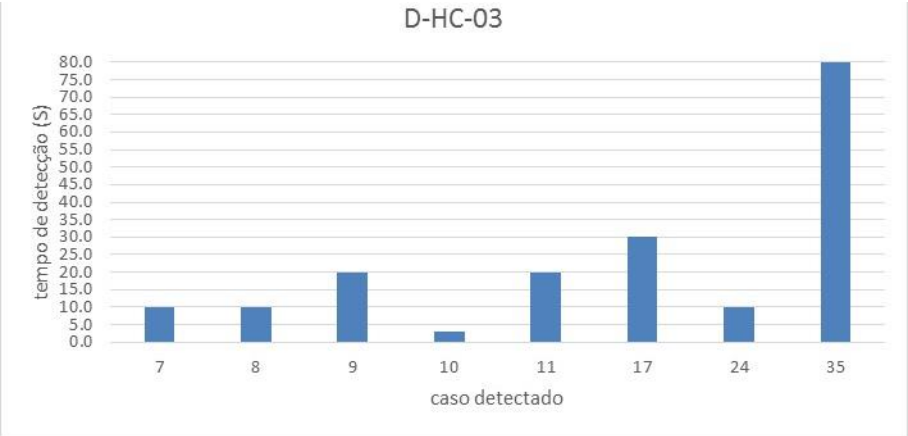

Figura 4.60 – Tempo máximo necessário para o detector D-HC-03 identificar cada cenário de vazamento. O D-HC-03 foi determinado por análise estacionária dos vazamentos.

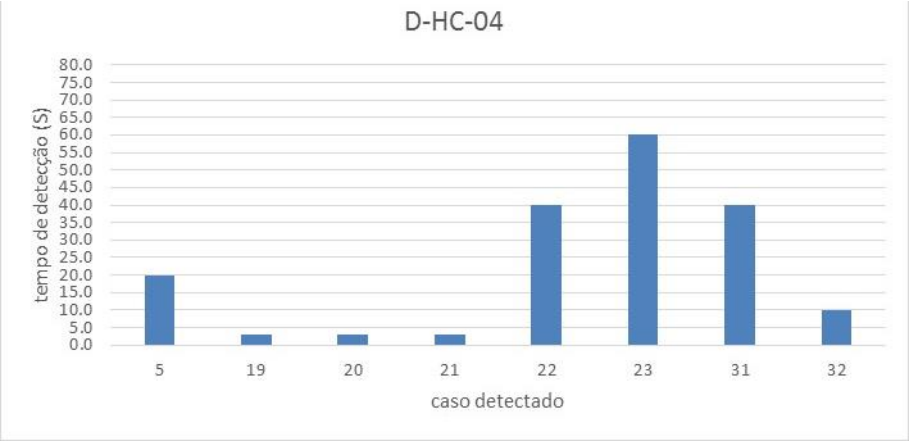

Figura 4.61 – Tempo máximo necessário para o detector D-HC-04 identificar cada cenário de vazamento. O D-HC-04 foi determinado por análise estacionária dos vazamentos.

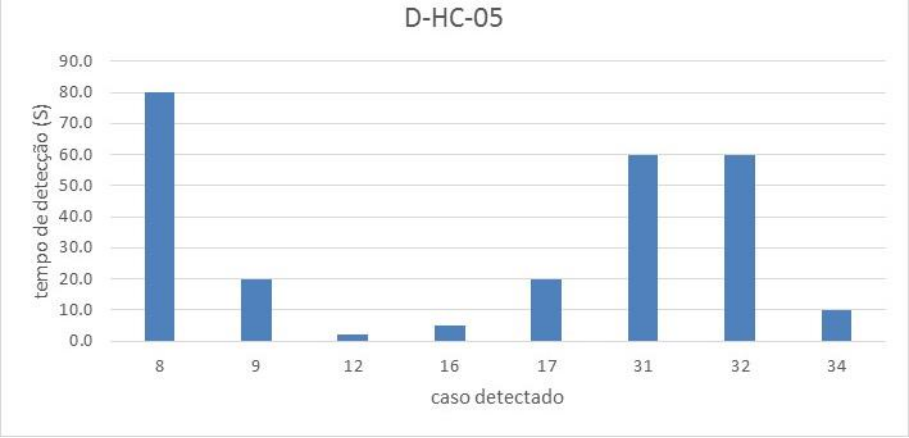

Figura 4.62 – Tempo máximo necessário para o detector D-HC-05 identificar cada cenário de vazamento. O D-HC-05 foi determinado por análise estacionária dos vazamentos.

Alguns dos casos apresentados possuem tempos de detecção muito elevados, como no caso 23, com tempo de 60 segundos, e como no caso 35, com tempo de 80 segundos. Em um projeto de detecção de gases, o tempo de detecção entre o início da liberação gasosa e a identificação do evento pode ser determinante entre a mitigação do evento acidental e a consequência catastrófica.

A Tabela 4.5 apresenta o número de casos que cada detector identifica antes dos demais, ou seja, mais rapidamente, dentro do intervalo de 100 segundos, e em até quanto tempo, no mínimo, pode-se garantir que sejam identificados todos esses casos.

Tabela 4.5 – Número de casos e tempo mínimo de identicação

Detector	Número de casos identificados primeiramente	Em até quanto tempo, no mínimo, esses casos são identificados (s)
D-HC-01	10	40.0
D-HC-02	9	20.0
D-HC-03	7	80.0
D-HC-04	6	60.0
D-HC-05	4	20.0

Tendo em vista o elevado tempo para identificação dos casos avaliados, novas malhas de detecção são propostas avaliando a quantidade de dispositivos necessários para identificação de todos os casos em menor tempo. Esse tipo de análise só é possível de ser feita com as simulações no estado transiente. São então identificados os detectores necessários para indentificação de todos os casos em até 20,0 e em até 5,0 segundos.

Para gerar uma rede de detectores capaz de identificar os casos simulados em até 20 segundos, o *software* POND4 utiliza as as dimensões da nuvem simulada no instante 20 segundos. O posicionamento ocorre de forma similar ao realizado para o estado estacionário, de maneira que as nuvens simuladas são sobrepostas no instante 20 segundos, considerando este instante como final. Neste caso, sabe-se que as nuvens simuladas não atingiram seu formato final, porém, serão identificadas antes que atinjam seu volume máximo. O mesmo tratamento é feito para o posicionamento em até 5,0 segundos, de forma que a alocação seja proposta considerando o retrato da nuvem em um determinado tempo.

A Tabela 4.6 apresenta a posição (coordenadas) dos sensores que garante que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados. Estes foram nomeados D20-HC-0i, i variando de 1 a 5. A Tabela 4.7 apresenta quais casos que cada um desses detectores é capaz de identificar, caracterizando o cruzamento de casos *versus* detectores.

Tabela 4.6 – Coordenadas dos detectores da matriz de 0,5 x 0,5 m que garante que, em até 20s, todos os cenários sejam identificados

DETECTOR	X	Y	Z	PRECISISÃO
D20-HC-01	213.0 m	-13.0 m	38.5 m	0.5 m
D20-HC -02	207.0 m	-15.5 m	41.5 m	0.5 m
D20-HC -03	210.0 m	-14.0 m	37.5 m	0.5 m
D20-HC -04	212.0 m	-20.0 m	39.0 m	0.5 m
D20-HC -05	216.0 m	-16.0 m	39.0 m	0.5 m

Tabela 4.7 – Cenários detectados por cada um dos detectores que garantem que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados

CENÁRIOS vs. DETECTORES MATRIZ			D20-HC-01	D20-HC-02	D20-HC-03	D20-HC-04	D20-HC-05
			14	13	13	13	9
1	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_0	1					1
2	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_30	2				1	1
3	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_-30	2				1	1
4	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_0	3	1	1			1
5	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_30	2				1	1
6	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_-30	2	1				1
7	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_0	2		1	1		
8	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_30	2		1	1		
9	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_-30	2		1	1		
10	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_0	1			1		
11	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_30	1			1		
12	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_-30	1			1		
13	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_0	1	1				
14	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_30	1	1				
15	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_-30	1	1				
16	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_0	1	1				
17	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_30	2	1		1		
18	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_-30	1	1				
19	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_0	1				1	
20	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_30	1				1	
21	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_-30	1				1	
22	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_0	1				1	
23	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_30	1				1	
24	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_-30	1				1	
25	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_0	1		1			
26	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_30	1		1			
27	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_-30	1		1			
28	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_0	1		1			
29	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_30	1		1			
30	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_-30	1		1			
31	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_0	5	1	1	1	1	1
32	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_30	5	1	1	1	1	1
33	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_-30	5	1	1	1	1	1
34	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_0	2	1		1		
35	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_30	3	1		1	1	
36	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_-30	2	1		1		

A localização geométrica dos sensores para a detecção em até 20 segundos é apresentada por vista de topo na Figura 4.63 e por vista lateral na Figura 4.64.

Figura 4.63 – Vista de topo do posicionamento dos detectores que garantem que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados

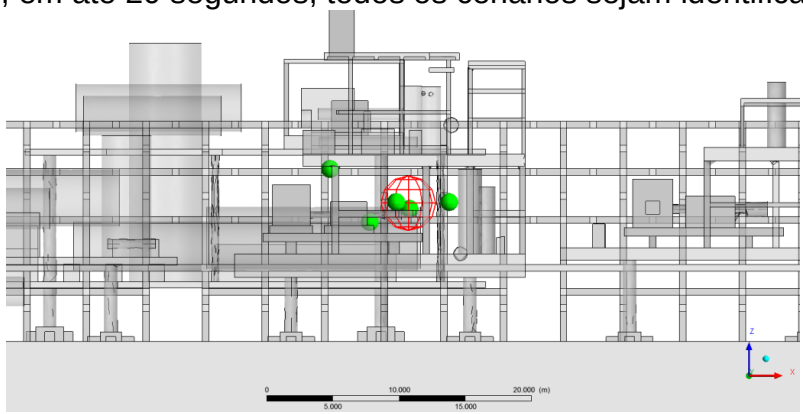

Figura 4.64 – Vista lateral do posicionamento dos detectores que garantem que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados

A Figura 4.65 apresenta uma relação do número acumulado de casos detectados por tempo de simulação.

Figura 4.65 – Número acumulado de casos detectados por tempo que garantem que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados.

A porcentagem de casos identificados, em até 20s, com o tempo de vazamento é apresentado abaixo:

% de detecção

- 61.1% dos casos são identificados em 1,0 segundo
- 75.0% dos casos são identificados em 2,0 segundos
- 80.6% dos casos são identificados em 3,0 segundos
- 88.9% dos casos são identificados em 5,0 segundos
- 97.2% dos casos são identificados em 10,0 segundos
- 100.0% dos casos são identificados em 20,0 segundos

A Figura 4.66 até a Figura 4.72 apresenta em até quanto tempo cada caso é identificado por cada detector dos que garantem que, em até 20 segundos, todos os cenários sejam identificados.

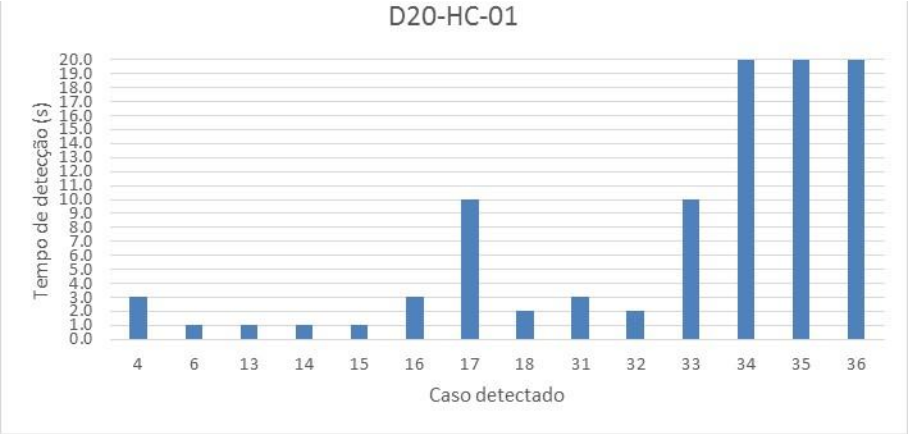

Figura 4.66 – Tempo máximo necessário para o detector D20-HC-01 identificar cada cenário de vazamento. O D20-HC-01 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 20 segundos

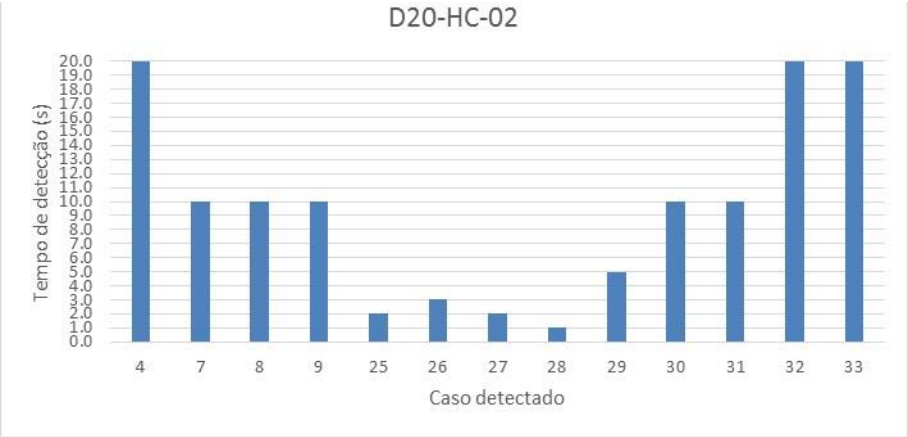

Figura 4.67 – Tempo máximo necessário para o detector D20-HC-02 identificar cada cenário de vazamento. O D20-HC-02 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 20 segundos

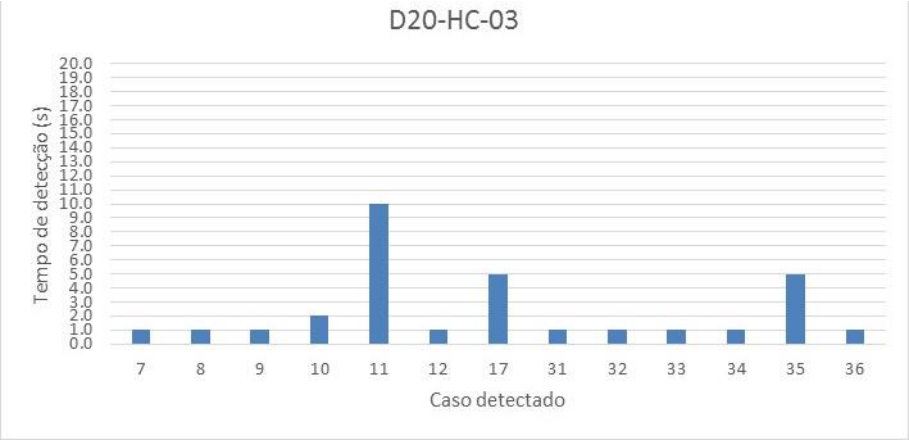

Figura 4.68 – Tempo máximo necessário para o detector D20-HC-03 identificar cada cenário de vazamento. O D20-HC-03 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 20 segundos

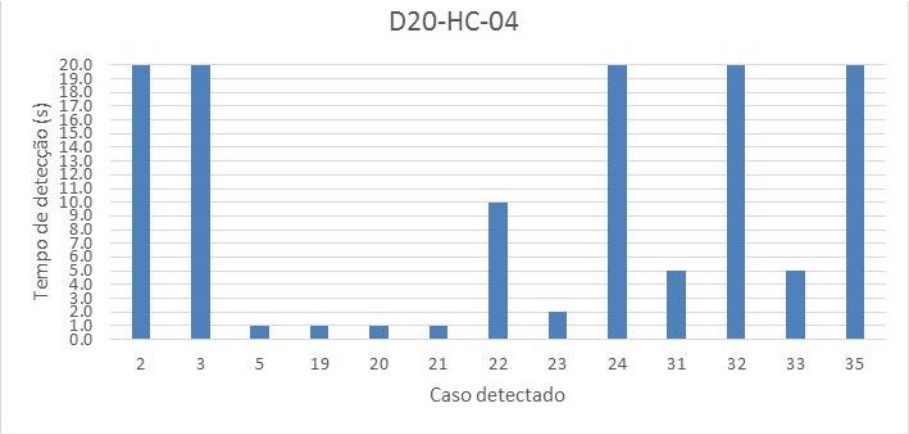

Figura 4.69 – Tempo máximo necessário para o detector D20-HC-04 identificar cada cenário de vazamento. O D20-HC-04 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 20 segundos

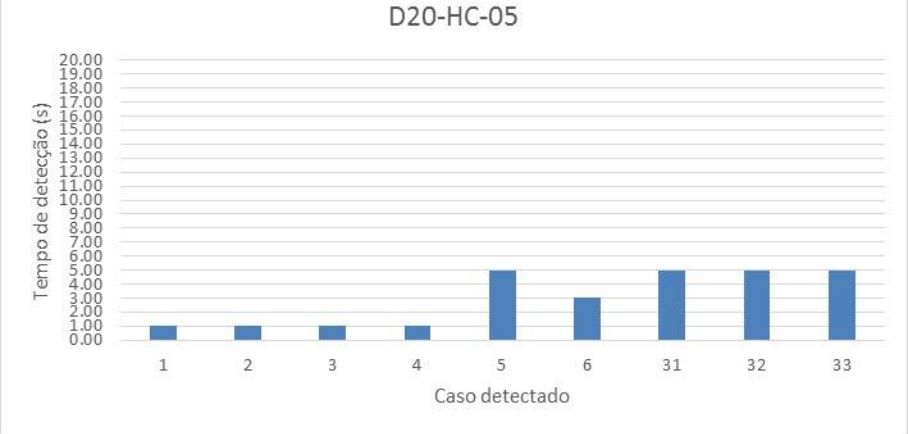

Figura 4.70 – Tempo máximo necessário para o detector D20-HC-05 identificar cada cenário de vazamento. O D20-HC-05 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 20 segundos

A Tabela 4.8 apresenta o número de casos que cada detector identifica antes dos demais, ou seja, mais rapidamente, dentro do intervalo de 20

segundos, e em até quanto tempo, no mínimo, pode-se garantir que sejam identificados todos esses casos.

Tabela 4.8 – Número de casos e tempo mínimo de identicação até 20s

Detector	Número de casos identificados primeiramente	Em até quanto tempo, no mínimo, esses casos são identificados (s)
D20-HC-01	6	20.0
D20-HC-02	6	20.0
D20-HC-03	13	10.0
D20-HC-04	7	20.0
D20-HC-05	4	5.0

A Tabela 4.9 apresenta a posição (coordenadas) dos sensores que garante que, em até 5 segundos, todos os cenários sejam identificados. Estes foram nomeados D5-HC-0i, i variando de 1 a 5. A Tabela 4.10 apresenta quais casos que cada um desses detectores é capaz de identificar, caracterizando o cruzamento de casos *versus* detectores .

Tabela 4.9 – Coordenadas dos detectores da matriz de 0,5 x 0,5 m que garante que, em até 5,0s, todos os cenários sejam identificados

DETECTOR	X	Y	Z	PRECISÃO
D5-HC-01	210.0 m	-16.0 m	38.5 m	0.5 m
D5-HC-02	213.0 m	-18.5 m	39.0 m	0.5 m
D5-HC-03	217.0 m	-16.0 m	39.5 m	0.5 m
D5-HC-04	211.0 m	-15.5 m	41.5 m	0.5 m
D5-HC-05	212.0 m	-12.0 m	39.0 m	0.5 m

Tabela 4.10 – Cenários Detectados por cada um dos detectores que garantem que, em até 5,0 segundos, todos os cenários sejam identificados

CENÁRIOS vs. DETECTORES MATRIZ			D5-HC-01	D5-HC-02	D5-HC-03	D5-HC-04	D5-HC-05
			15	9	9	8	8
1	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_0	1			1		
2	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_30	1			1		
3	Compressor_2_Estagio_+X_NE_Calm_-30	1			1		
4	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_0	3	1		1	1	
5	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_30	2		1	1		
6	Compressor_2_Estagio_+X_NE_6.5_-30	1					1
7	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_0	1	1				
8	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_30	1	1				
9	Compressor_2_Estagio_-X_NE_Calm_-30	1	1				
10	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_0	1	1				
11	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_30	1	1				
12	Compressor_2_Estagio_-X_NE_6.5_-30	1	1				
13	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_0	1					1
14	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_30	1					1
15	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_Calm_-30	1					1
16	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_0	1					1
17	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_30	2	1			1	
18	Compressor_2_Estagio_+Y_NE_6.5_-30	1					1
19	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_0	1		1			
20	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_30	1		1			
21	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_Calm_-30	1		1			
22	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_0	1		1			
23	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_30	1		1			
24	Compressor_2_Estagio_-Y_NE_6.5_-30	2	1	1			
25	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_0	2			1	1	
26	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_30	2			1	1	
27	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_Calm_-30	2			1	1	
28	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_0	1				1	
29	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_30	1				1	
30	Compressor_2_Estagio_+Z_NE_6.5_-30	1				1	
31	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_0	4	1	1	1		1
32	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_30	2	1				1
33	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_Calm_-30	2	1	1			
34	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_0	1	1				
35	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_30	1	1				
36	Compressor_2_Estagio_-Z_NE_6.5_-30	1	1				

A localização geométrica dos sensores para a detecção em até 5 segundos é apresentada na vista de topo na Figura 4.71 e na vista lateral na Figura 4.72.

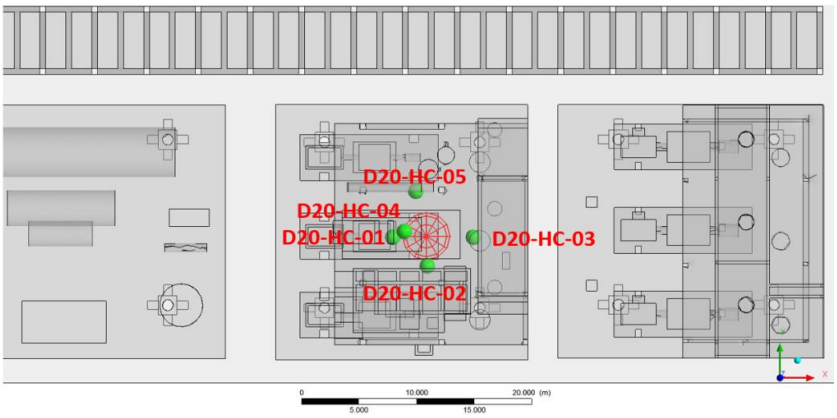

Figura 4.71 – Vista de topo do posicionamento dos detectores que garantem que, em até 5 segundos, todos os cenários sejam identificados.

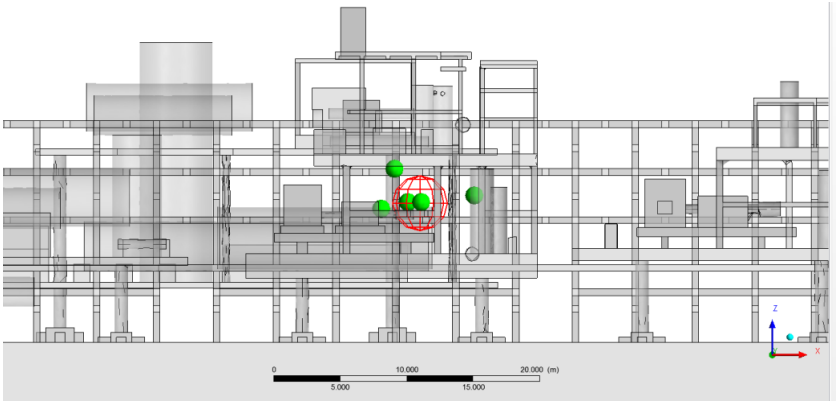

Figura 4.72 – Vista lateral do posicionamento dos detectores que garantem que, em até 5 segundos, todos os cenários sejam identificados

A Figura 4.73 apresenta um gráfiico do número acumulado de casos detectados por tempo decorrido do início do vazamento.

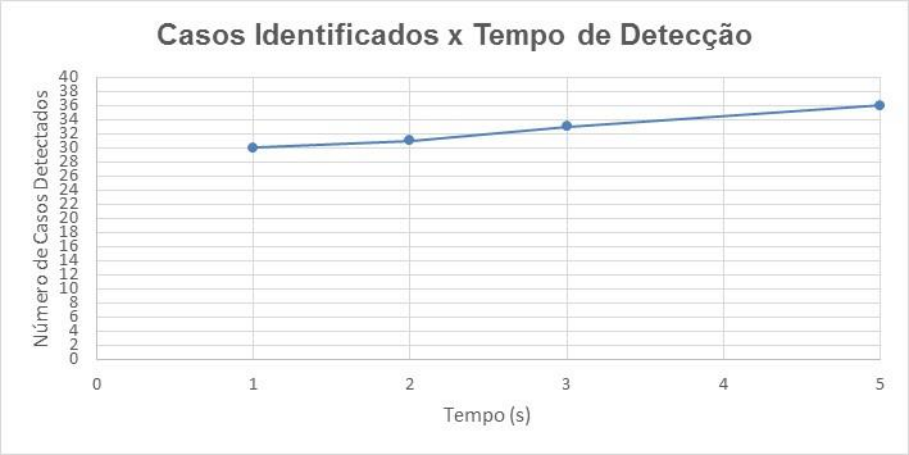

Figura 4.73 – Número acumulado de casos detectados por tempo que garantem que, em até 5 segundos, todos os cenários sejam identificados.

A porcentagem de casos identificados com o tempo de vazamento é apresentado abaixo:

% de detecção

- 83.3% dos casos são identificados em 1,0 segundo
- 86.1% dos casos são identificados em 2,0 segundos
- 91.7% dos casos são identificados em 3,0 segundos
- 100.0% dos casos são identificados em 5,0 segundos

A Figura 4.74 até a Figura 4.78 apresenta em até quanto tempo cada caso é identificado por cada detector dos que garantem que, em até 5 segundos, todos os cenários sejam identificados.

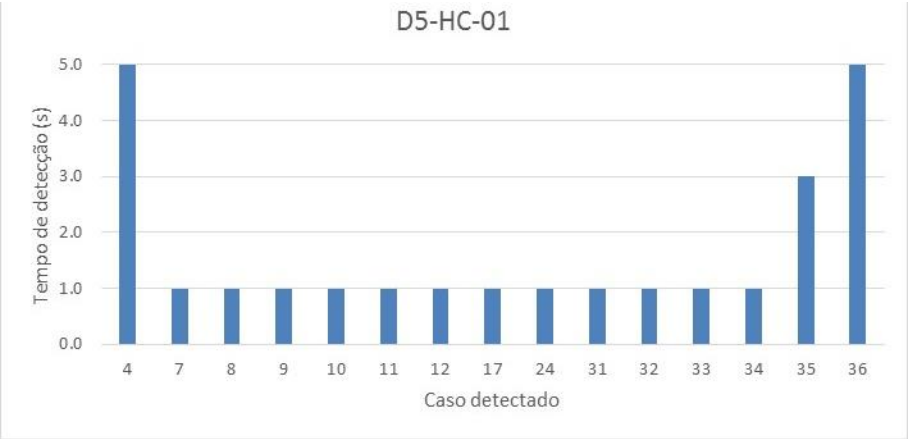

Figura 4.74 – Tempo máximo necessário para o detector D5-HC-01 identificar cada cenário de vazamento. O D5-HC-01 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 5 segundos.

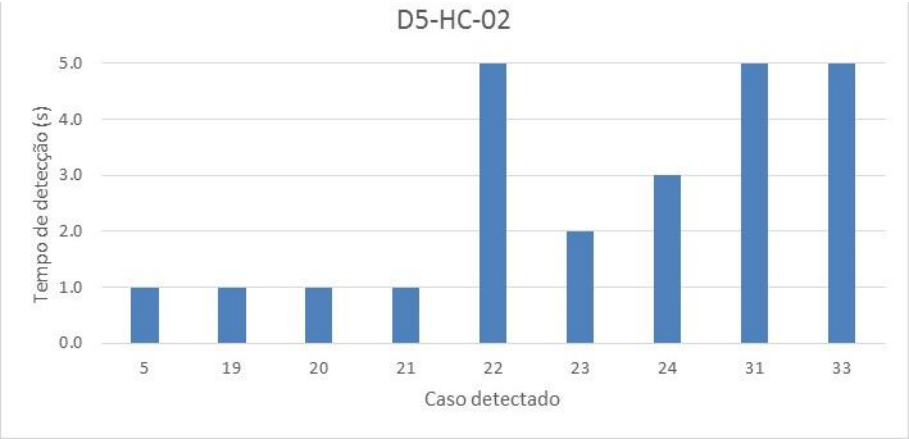

Figura 4.75 – Tempo máximo necessário para o detector D5-HC-02 identificar cada cenário de vazamento. O D5-HC-02 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 5 segundos.

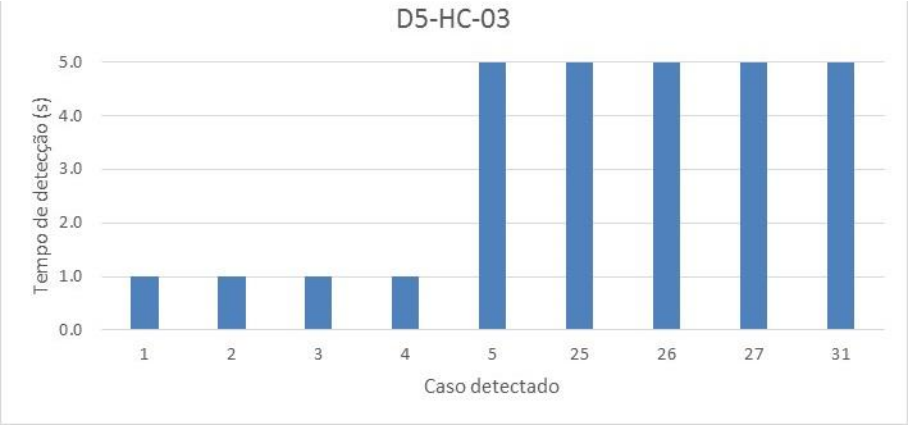

Figura 4.76 – Tempo máximo necessário para o detector D5-HC-03 identificar cada cenário de vazamento. O D5-HC-03 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 5 segundos.

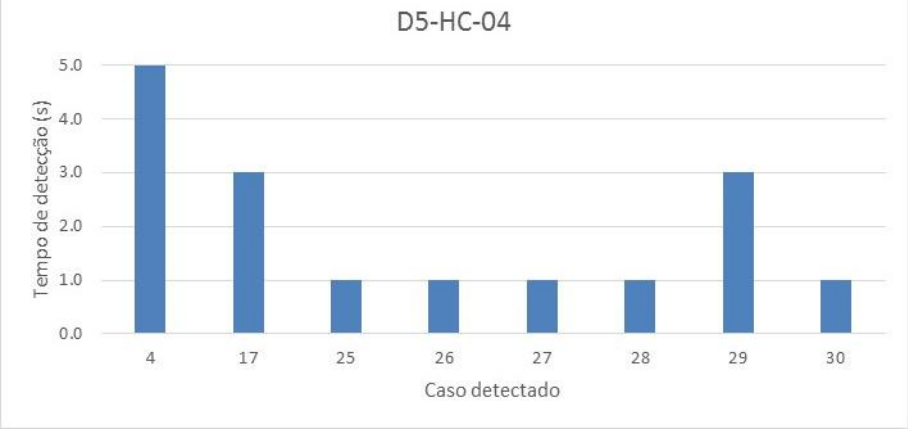

Figura 4.77 – Tempo máximo necessário para o detector D5-HC-04 identificar cada cenário de vazamento. O D5-HC-04 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 5 segundos.

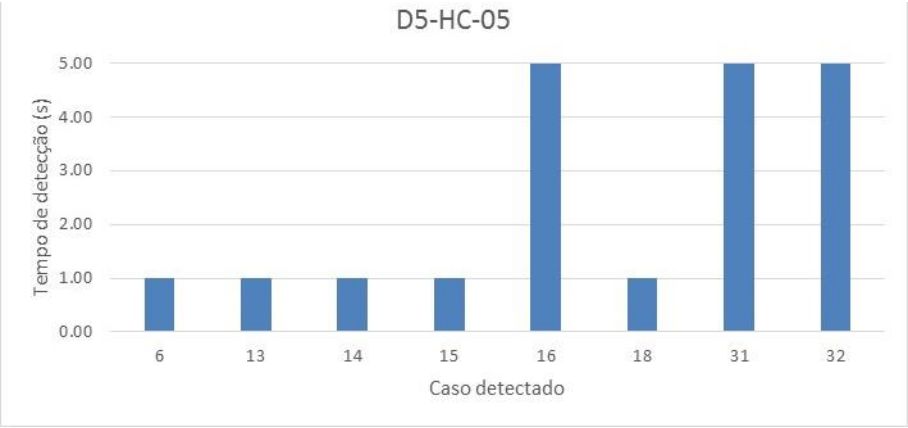

Figura 4.78 – Tempo máximo necessário para o detector D5-HC-05 identificar cada cenário de vazamento. O D5-HC-05 foi determinado por análise transiente dos vazamentos no tempo de 5 segundos.

A Tabela 4.11 apresenta o número de casos que cada detector identifica antes dos demais, ou seja, mais rapidamente, dentro do intervalo de 5 segundos, e em até quanto tempo, no mínimo, pode-se garantir que sejam identificados todos esses casos.

Tabela 4.11 – Número de casos e tempo mínimo de identicação até 5s

Detector	Número de casos identificados primeiramente	Em até quanto tempo, no mínimo, esses casos são identificados (s)
D5-HC-01	14	5.0
D5-HC-02	6	5.0
D5-HC-03	4	1.0
D5-HC-04	6	3.0
D5-HC-05	6	5.0

Após análise das malhas de detecção propostas fica perceptível que ao diminuir o tempo de detecção dos casos simulados, o posicionamento dos sensores fica mais próximo do ponto de vazamento. Estabelecendo um tempo mínimo de detecção, a rede de detectores torna a tomada de decisão mais eficiente no caso de vazamentos acidentais.

Os detectores alocados por meio das simulações estacionárias foram capazes de identicar todos os casos simulados em regime transiente, entretanto, a localização dos melhores pontos não foi efetiva quanto ao tempo de detecção final, sendo um tempo muito elevado para tomada de decisão. Já as redes propostas para detecção em até 20 segundos e em até 5,0 segundos se aproximaram do ponto de vazamento ficando possivelmente restritas ao ponto selecionado na análise. Além disso, o mesmo número final de dispositivos foi observado para identificação dos casos em diferentes tempos. A efetividade de detecção de cada malha será discutida no item 4.4.3 de acordo com alguns parâmetros importantes apresentados no item 3.2.7.

Foi observado que a rede de detectores alocados para identificação dos casos em até 20 segundos e em até 5,0 segundos são capazes de identicar todos os casos simulados no regime estacionário (densidade local). Apesar da detecção mais rápida, verificou-se que a carga explosiva da mistura em 5 segundos e 20 segundos corresponde a 0,8kg e 1,4kg em equivalente TNT. A

partir de 60 segundos fica em torno de 2,2kg em equivalente TNT, ou seja, a carga explosiva não altera significativamente para uma detecção mais rápida.

Acredita-se que ao analisar diversos pontos de vazamento nessa unidade *offshore*, o número de dispositivos a serem utilizados iria aumentar ao diminuir o tempo de detecção dos casos, tendo em vista que a metodologia de localização sugerida (*software* POND4) tende a se aproximar do ponto de vazamento selecionado.

4.4.3 Efetividade de Detecção

Em tese, o melhor posicionamento dos detectores para dado tempo máximo de detecção de todos os cenários foi determinado acima. Nesta seção, deseja-se identificar se a equação porposta para avaliar a eficiência de cada detector, Equação 3.1, é adequada.

As Tabela 4.12 até a Tabela 4.14 apresentam a efetividade de detecção de cada detector para as malhas de detecção geradas para identificação de 100% dos cenários pelo resultado estacionário e para detecção em até 20 segundos e em até 5,0 segundos. A Tabela 4.15 apresenta a efetividade de detecção das redes de detecção propostas, ou seja, a soma da efetividade de detecção dos sensores individualmente.

Tabela 4.12 – Efetividade de detecção dos detectores determinados pelas análises no Estados Estacionário

Detector	Efetividade de Detecção (%)
D-HC-01	13,13
D-HC-02	11,90
D-HC-03	4,89
D-HC-04	6,13
D-HC-05	5,08

Tabela 4.13 – Efetividade de detecção dos detectores que garantem que todos os cenários serão identificados em até 20s.

Detector	Efetividade de Detecção (%)
D20-HC-01	13,56
D20-HC-02	11,70
D20-HC-03	11,79
D20-HC-04	10,81
D20-HC-05	10,20

Tabela 4.14 – Efetividade de detecção dos detectores que garantem que todos os cenários serão identificados em até 5s.

Detector	Efetividade de Detecção (%)
D5-HC-01	14,50
D5-HC-02	7,85
D5-HC-03	8,04
D5-HC-04	2,92
D5-HC-05	9,21

Tabela 4.15 – Efetividade de detecção das três malhas de detectores propostas

Sistema de detecção proposto	Efetividade do Sistema (%)
Sistema de Detecção pelo Estado Estacionário	41,12
Sistema de Detecção em até 20 segundos	58,06
Sistema de Detecção em até 5.0 segundos	42,51

Dentre os detectores avaliados, o que apresentou maior efetividade foi o D5-HC-01, em segundo lugar, o D20-HC-01 e em terceiro lugar, o D-HC-01, que identificam, no total, 15, 14 e 16 cenários, conforme pode-se ver na Tabela 4.10, Tabela 4.7 e Tabela 4.4. O quarto detector mais efetivo, foi o D-HC-02, com 11 cenários detectáveis, enquanto os detectores D20-HC-02, D20-HC-03 e D20-HC-04 são os próximos mais efetivos com 13 cenários detectáveis. Mas claramente, podem ser classificados, como um todo, como os detectores que detectam mais casos e são mais efetivos. Isso mostra que há uma relação entre os detectores que detectam o maior número de casos serem os mais efetivos, mas não garante que o que detecta mais casos é o mais efetivo. Por outro lado, os detectores mais rápidos (D5-HC-0i), que detectam todos os cenários em até 5s, não apresentaram necessariamente as melhores efetividades.

Pode-se notar que os detectores da malha D20-HC-0i, que detectam todos os cenários em até 20s, apresentaram os maiores valores de efetividade e consequentemente esta foi a malha mais efetiva. Isso provavelmente está associado ao fato de que após 20s o volume da pluma deve ser significativamente maior que em 5s, como podemos ver na Figura 4.28 a Figura 4.33. Isso é consequência de as razões na Equação 3.1 terem o mesmo expoente, apesar de magnitudes bastante distinhas. É possível, então, ajustar parâmetros na Equação 3.1 de modo que se pondere, de acordo com a relevância física desejada, cada um dos parâmetros que estão sendo avaliados: número de casos detectáveis, volume da pluma no tempo de detecção e tempo de detecção.

5 CONCLUSÕES

O modelo geométrico detalhado de uma unidade de processamento de petróleo *offshore* mostrou-se bastante realístico para o objetivo do estudo. Tanto os módulos de processo quanto os equipamentos e estruturas de suportação (*pipe rack*) influenciaram no desenvolvimento final da dispersão dos gases inflamáveis na área de processo. As dimensões da unidade, baseadas em sistemas reais, demonstram que as dimensões das nuvens inflamáveis podem atingir diversas áreas do processo, sendo de extrema importância saber as proporções e possibilidade do risco envolvendo vazamentos acidentais. As dimensões do domínio de simulação não influenciam os resultados de dispersão tendo em vista que a concentração de interesse fica distante das extremidades. Contudo, a análise pode ser avaliada com a redução da geometria considerando que o vento incide apenas de proa para popa da embarcação.

Devido a inviabilidade de realizar uma Análise Preliminar de Risco para os sistemas existentes da platafoma, recorreu-se a dados estatísticos de vazamentos, em unidades onshore e *offshore*, para caracterizar e definir os possíveis cenários acidentais e selecionar o mais crítico para este estudo. Selecionou-se um ponto de vazamento localizado no sistema de compressão de gases e os dados operacionais do processo foram estimados a partir de sistemas já existentes. As condições ambientais utilizadas foram estimadas a partir de dados reais de campos de extração de petróleo localizados na costa brasileira. Os dados obtidos se mostraram bastante coerentes e influenciam significativamente a dispersão final dos gases, sendo assim, devem ser o mais fiéis possível com a realidade dessas unidades.

A metodologia utilizada para definição do cenário, seleção do ponto e caracterização do vazamento, além da definição das condições de contorno, mostrou-se satisfatória produzindo resultados coerentes para o objetivo final do estudo. Na caracterização do vazamento levou-se em consideração um sistema contendo pressão interna de 150 kgf/cm², temperatura de 110°C e densidade do gás de 129,4 kg/m³, na condição de operação. O vazamento foi modelado considerando um ponto fonte para uma taxa de vazamento de 0,70 kg/s, correspondente a um diâmetro de vazamento de 7,6 mm, e com velocidade

subsônica (após região subexpandida) de 122,5 m/s. Para as condições ambientais, levou-se em consideração um sistema que possibilite a rotação da unidade fazendo com que esta fique sempre direcionada para a carga ambiental resultante, ou seja, o vento incidente sobre a plataforma. Com isso definiu-se duas intensidades de vento, 0,5 m/s para calmaria e 6,5 m/s para velocidade mais frequente, além de três direções possíveis, a mais frequente sendo a Nordeste (NE) e os desvios em - 30° e +30°. Ao final definiu-se 36 casos de simulação a serem analisados em três abordagens diferentes, estacionário com malha regular, estacionária com malha adaptativa e transiente. O comportamento das dispersões mostra que as diversas possibilidades do vazamento geram resultados que abrangem diferentes áreas da plataforma de processo, além de serem bastante influenciadas pela escolha do ponto de vazamento, direção do jato e da direção e intensidade do vento.

Os parâmetros de simulação foram definidos a partir de testes específicos para um caso particular da lista de casos final. A partir dos testes definiu-se que uma malha regular com tamanho de elemento de 0,5 metros seria suficiente para representar a dispersão gasosa mantendo a resposta de interesse dentro da faixa de tolerância de 1,0E-02. Definiu-se que 300 iterações seriam suficientes para garantir a convergência dos resultados, estabilização residual e variação aceitável dos parâmetros de interesse. Além disso, para as simulações transientes, utilizou-se o passo de tempo de 1,0 segundo e resíduo alvo de 1,0E-04 por iteração com tempo total de simulação de 100 segundos.

Os testes envolvendo a malha computacional e os diversos parâmetros de simulação demonstram que cada simulação possui suas características e restrições próprias e que utilizar um caso representativo para definição de todas as simulações não é recomendavel. Ao utilizar apenas um caso e definir as condições de simulação que levam a resultados independentes, não é garantido que os demais casos terão a mesma independência em seus resultados finais. Foram observadas variações no volume detectável de alguns casos e que a estabilização dos resultados não fora atingida utilizando os parâmetros de independência de um caso particular. Entretando, os desvios significativos foram observados apenas para o valor do volume detectável no domínio de simulação dos resultados transientes, sendo a forma física e área de influência dos gases

inflamáveis semelhante entre os resultados obtidos. Contudo, constatou-se que, para o objetivo do estudo, os resultados obtidos nos regimes estacionário e transiente foram semelhantes em relação ao formato físico, área de influência e concentração no interior da nuvem da dispersão gasosa, o que permitiu elaborar um sistema de detecção capaz de identificar tanto os resultados do regime estacionário quanto do regime transiente. Essa semelhança ocorre a partir dos 60 segundos de simulação no caso do regime transiente. Logo, verificou-se que a abordagem estacionária realmente permite a definição de um sistema de detecção capaz de identificar todos os vazamentos.

Assim como a abordagem transiente, as simulações utilizando a estratégia de malha adaptativa se motraram suficientes para formar nuvens detectáveis semelhantes às simuladas pelo estado estacionário com a malha regular. Os valores de volume detectável apresentam maiores divergências e podem ser explicadas pela técnica adaptativa que tende a refinar regiões de alto gradiente deixando as demais mais grosseiras. A análise mais profunda dos parâmetros de maior influência do volume inflamável deve ser realizada a fim de encontrar respostas mais precisas.

Observou-se que os cenários mais críticos são aqueles com jato direcionado para o piso da unidade, gerando grande acúmulo dos gases inflamáveis e aumentando a possibilidade de ocorrer explosões e incêndios. Os jatos direcionados contra a direção do vento tendem a acumular os gases nas proximidades do equipamento onde ocorre o vazamento acidental.

A metodolgia de detecção utilizada mostrou-se eficiente quanto a detecção de 100% dos casos analisados e a disposição geométrica dos detectores na planta de processo. Foram necessários 05 detectores pontuais para identificação de 100% do casos simulados. Mesmo para um posicionamento automatizado, varredura dos melhores pontos sobre uma malha de pontos regular gerada pelo *software* POND4, observou-se que a dependência do resultado continua influenciada pelo usuário. A seleção do melhor ponto de monitoramento continua sendo arbitrária, levando em consideração que o *software* de posicionamento apresenta diversos pontos capazes de identificar o mesmo número de casos. Conforme se seleciona um ponto de detecção e descarta-se os casos

identificados por este ponto, as alternativas para identificação dos demais casos continuam passando pela seleção do próximo “melhor” ponto de detecção, onde diversos outros pontos apresentados são capazes de identificar o mesmo número de casos. Sendo assim, um aperfeiçoamento da estratégia de definição dos pontos de detecção do *sofware* deve ser elaborada de maneira que este seja capaz de realizar diferentes combinações considerando diversas sequências de pontos selecionados em toda a malha de detecção. Com isso, o usuário ficaria com o dever de avaliar a rede de detecção proposta pelo *software* e reavaliar as diversas combinações a fim de selecionar aquela que se ajusta melhor ao sistema e área disponível.

A rede de detectores foi elaborada inicialmente para o regime estacionário, entretanto, verificou-se um elevado tempo de detecção dos cenários, o que levou à elaboração de redes de detecção capazes de identificar todos os casos em menor tempo. Estimou-se dois valores para o tempo máximo de detecção de 100% dos casos, sendo o tempo máximo de 20 e de 5 segundos. Com a dimunuição do tempo de detecção, o *software* determinou a localização dos pontos de detecção cada vez mais próximos ao ponto de vazamento, limitando assim, a abrangência do sistema como um todo. Para detecção de todos os casos em 20 e em 5 segundos também foram necessários 05 detectores, mostrando que o número mínimo de dispositivos para identificação em tempos diferentes não se altera necessariamente.

Uma nova maneira de classificação de pontos de detecção foi proposta a partir da equação da efetividade de detecção. De maneira geral, a utilização desta equação demonstra que os detectores que identificam o maior número de casos são os mais efetivos, porém, essa relação não garante que o que detecta mais casos seja o mais efetivo. Por outro lado, os detectores que identificam mais rapidamente os casos não apresentaram necessariamente as melhores efetividades o que, provavelmente, está associado ao volume da nuvem detectável gerada a partir de cada cenário. Sendo assim, a equação da efetividade de detecção mostrou-se coerente em relação aos parâmetros selecionados e demonstra que pode ser utilizada para classificação de todos os pontos observáveis do domínio de simulação. Além disso, outras configurações podem ser levadas em consideração de acordo com a relevância física desejada.

6 SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Na complementação deste estudo é importante obter mais detalhes geométricos da unidade objetivando alcançar resultados ainda mais próximos da realidade aumentando a confiabilidade do estudo. Detalhes como tubulações com grande diâmetro e congestionamentos provocados por um grande volume de linhas podem influenciar no resultado final. Com os avanços dos programas de geração de malha computacional e solução do problema numérico, será possível representar mais detalhes, utilizar malhas híbridas na resolução da camada limite próximo às superfícies e obter resultados em menor tempo.

Recomenda-se realizar uma análise preliminar de risco considerando unidades reais objetivando obter todas as possíveis fontes de vazamento e estimar todas as plumas gasosas geradas por um grande número de cenários. Assim, é possível analisar a rotina computacional na obtenção da localização dos “melhores” pontos de detecção e aprimorar a resposta final, retirando do usuário a escolha referente aos pontos que identificam a mesma quantidade de casos.

Avaliar mais profundamente os parâmetros que influenciam no resultado utilizando a estratégia de malha adaptativas. Além disso, realizar uma análise de sensibilidade dos parâmetros para diversos casos e investigar se existe algum parâmetro em comum que limite os testes de sensibilidade e passo de tempo para tornar a análise viável em projetos de engenharia.

Considerar o cálculo da efetividade, ajustando os parâmetros de interesse, e utilizar a classificação de todos os pontos de observação gerados pelo *software* POND4 para selecionar os pontos mais efetivos. A partir de cálculos mais precisos do volume da nuvem inflamável e o refinamento do tempo de indentificação de cada cenário, é possível classificar os pontos e gerar uma rede de detectores mais eficaz.

É conveniente também, quando disponíveis os dados, efetuar uma análise custo benefício levando em consideração balanço dos benefícios e custos associados à adição de cada detector.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barcelos, J, M. (2013), Dispersão de Gases Inflamáveis em Unidade de Processamento de Petróleo Offshore: Posicionamento de Detectores, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Departamente de Engenharia Química.

Birch, A. D., Hughes, D. J. and Swaffield, F. (1987), Velocity Decay of High Pressure Jets, Combust. Sci. and Tech., 52, pp. 161-171.

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

Boussinesq, J. (1877), Theorie de l'ecoulement tourbillant, Mem. Pré. Par Div. Sav., Acad. Sci. Inst. Fr., vol. 23, pp. 31-64.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Health & Safety Laboratory (2003), Outstanding Safety Questions Concerning tha Analysis of Ventilation and Gas Dispersion in Gas Turbine Enclosures, Best Practice Guidelines for CFD, Fire and Explosion Group.

Kawasaki, P. Y. (2010), Análise de Linhas de Ancoragem de Plataformas Oeânicas Considerando Diversos Tramos e o Trecho Enterrado da Linha, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, UFRJ.

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

Klein, T.S. (2012), The Development and Application of Two-Time-Scale Turbulence Models for Non-Equilibrium Flows, Scholl of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester.

Lacerda, T. A. G. (2005), Análise de Sistemas de Ancoragem de Plataformas Flutuantes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politénica, Departamento de Mecânica Aplicada e Estruturas, UFRJ.

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

Moraes, G. (2013), Sistema de Gestão de Risco (Vol. Volume 2), Rio de Janeiro, Gerenciamento Verde Editora.

Neto, A.S. (2002), Fundamentos da Turbulência nos Fluidos, Em: Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), Turbulência, Ediouro Gráfica e Editora S.A, Volume 1, Rio de Janeiro.

Neto, J. B. O., Costa, A. J. D. (2007), A Petrobras e a Exploração de Petróleo O*ffshore* no Brasil: Um A*pproach* Evolucionário, Revista Brasileira de Economia, Volume 61, número 1, Rio de Janeiro.

Popiolek, T.L., Vaz dos Santos, M.A. (2001), Um Novo Critério de Adaptação de Malha, Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

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

Reyes, M. C. (2012), Apostila de Tecnologia de Sistemas Oceânicos III, Rio de Janeiro, Construa.

Schefer, R. W., Houf, W. G., Williams, T. C., Bourne, B., et al. (2006), Characterization of High-Pressure, Underexpanded Hydrogen-Jet Flames, International Journal of Hydrogen Energy 32, 2081-2093.

Siqueira, D. M. B. (2009), Geração Adaptativa de Malhas de Superfícies Paramétricas com Controle de Curvatura, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

Speziale, C.G. (1996), 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.

Speziale,C.G. (1995), A Review of Reynolds Stress Models for Turbulent Shear Flows, Research supported by the National Aeronautics and Space Administration under NASA Contract. NASA Langley Research Center, Hampton.

Spouge, J. R. (1999), A Guide to Quantitaive Risk Assessment for *Offshore* Installations, DNV Technica, Det Norske Veritas, CMPT 1999.

Strφm, Φ., Bakke, J.R. (1999), Gas Detector Location, Safety on Offshore Installations Conference.

Thomas, J.E. (2004), Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2a Ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro.

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

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

SITES VISITADOS:

http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/, acessado em 10/07/2017.

https://www.bsee.gov/stats-facts/offshore-incident-statistics, acessado em 18/07/2017.

https://www.portalmaritimo.com, acessado em 19/07/2017.

http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Mask=1, acessado em 25/07/2017.

APÊNDICE

Nesta seção são apresentados os demais resultados que não foram mostrados no corpo do estudo. Os resultados aqui apresentados estão dividos em resultados das simulações estacionáias (densidade local), com o tamanho de malha definido após teste de independencia de malha, os resultados transientes, com a mesma malha do teste de independecia de malha e os resulados estacionários (malha adaptativa), obtidos pelas simulação considerando adaptação automática da malha de acordo com os parâmetrso de interesse, ou seja, concentração de hidrocarbonetos.

A. Resultados Estacionários (densidade local)

A Figura A.1 até a Figura A.30 apresentam uma pluma na forma de isossuperfície, na concentração (frações volumétricas) de gás referentes ao limite de detectabilidade dos sensores comerciais, iguail a 0,01, e um plano de corte que possue superfícies de contorno com variação de coloração em função da fração volumétrica do gás, ou seja, corte vertical e/ou horizontal da nuvem, no ponto de origem do vazamento, para visualizar as áreas cuja concentração de gás encontra-se entre 5 e 15%.

Caso 01 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em 0°

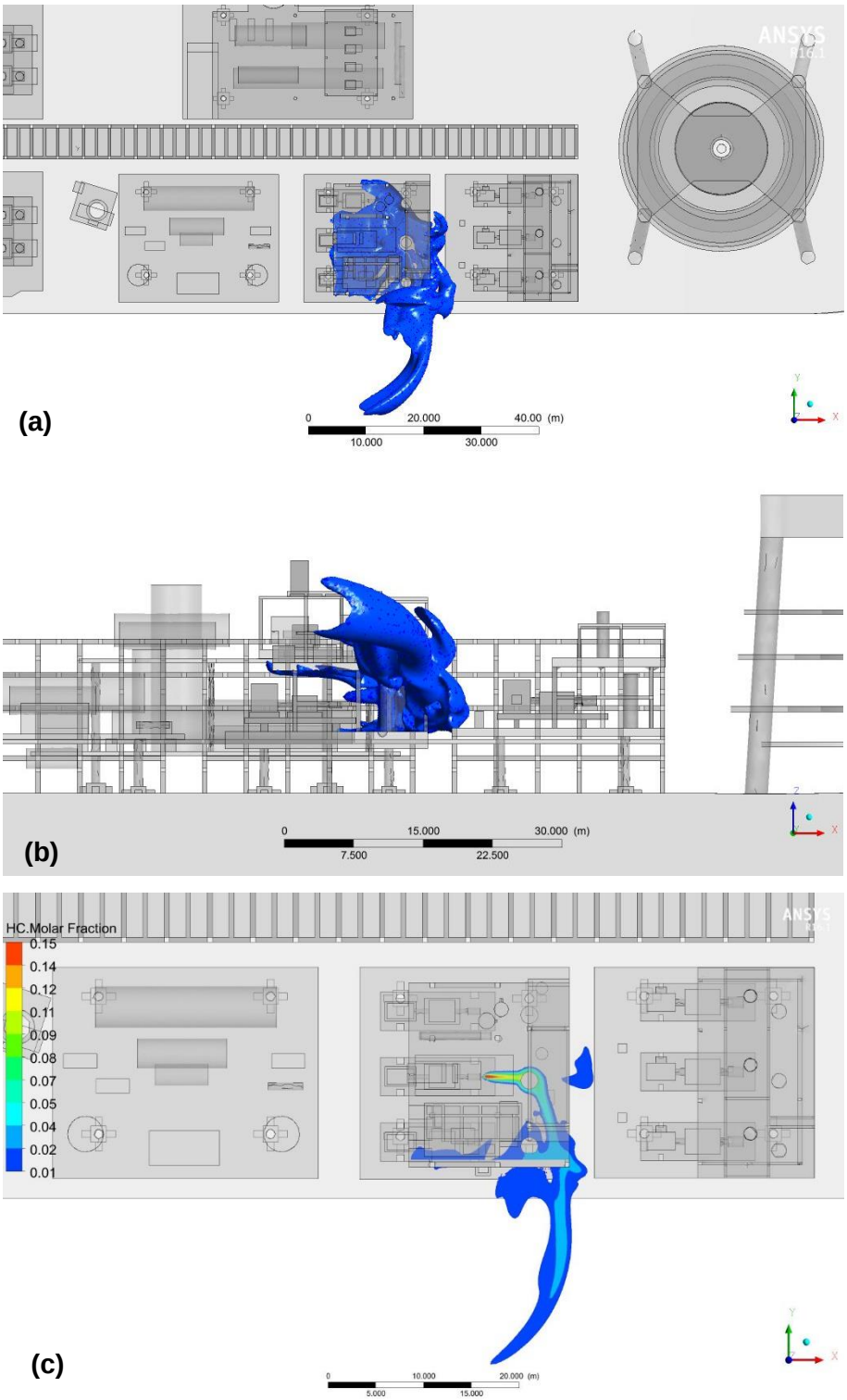

Figura A.1 – Caso 1 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 02 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em +30°

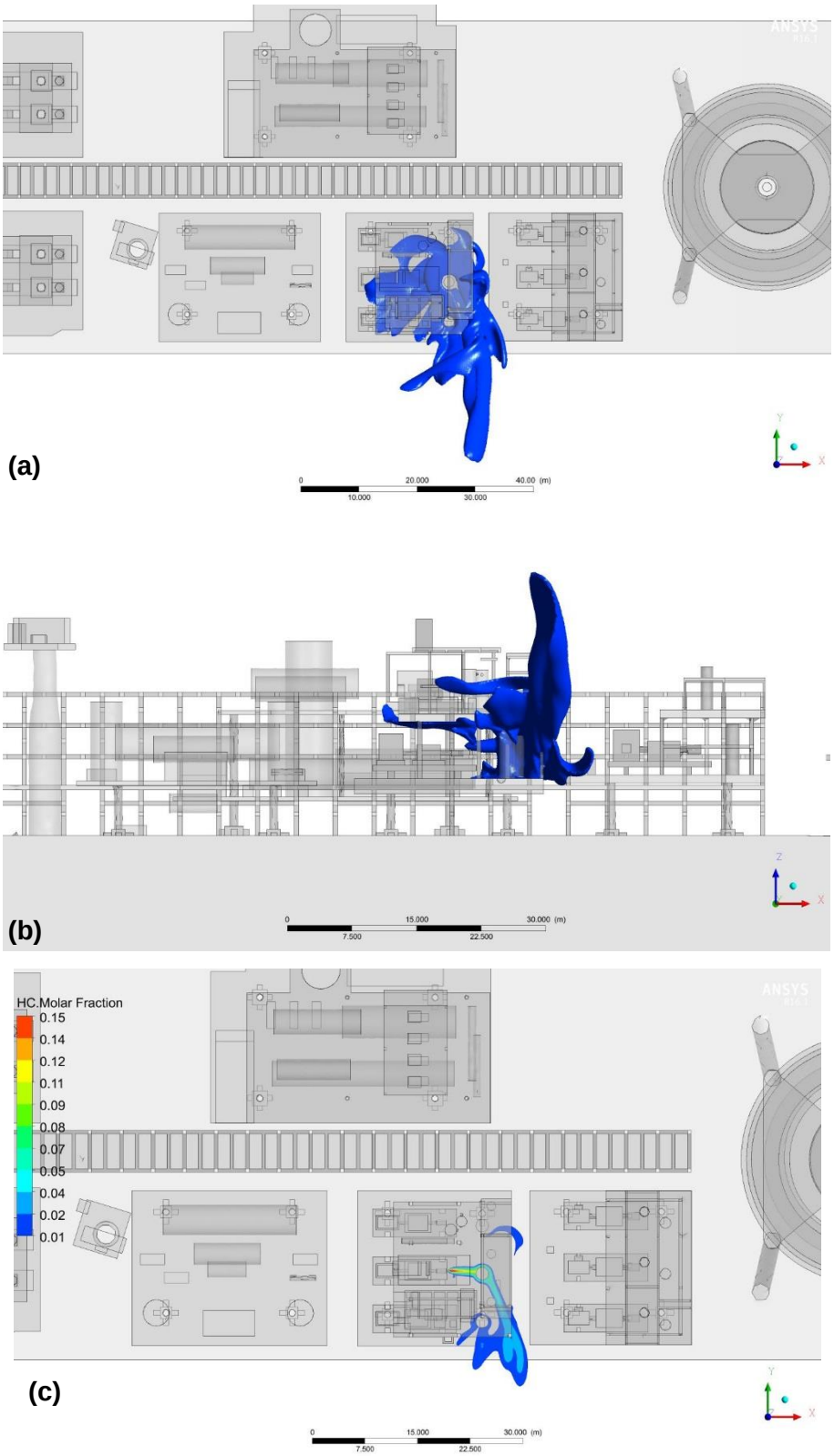

Figura A.2 – Caso 2 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 03 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em -30°

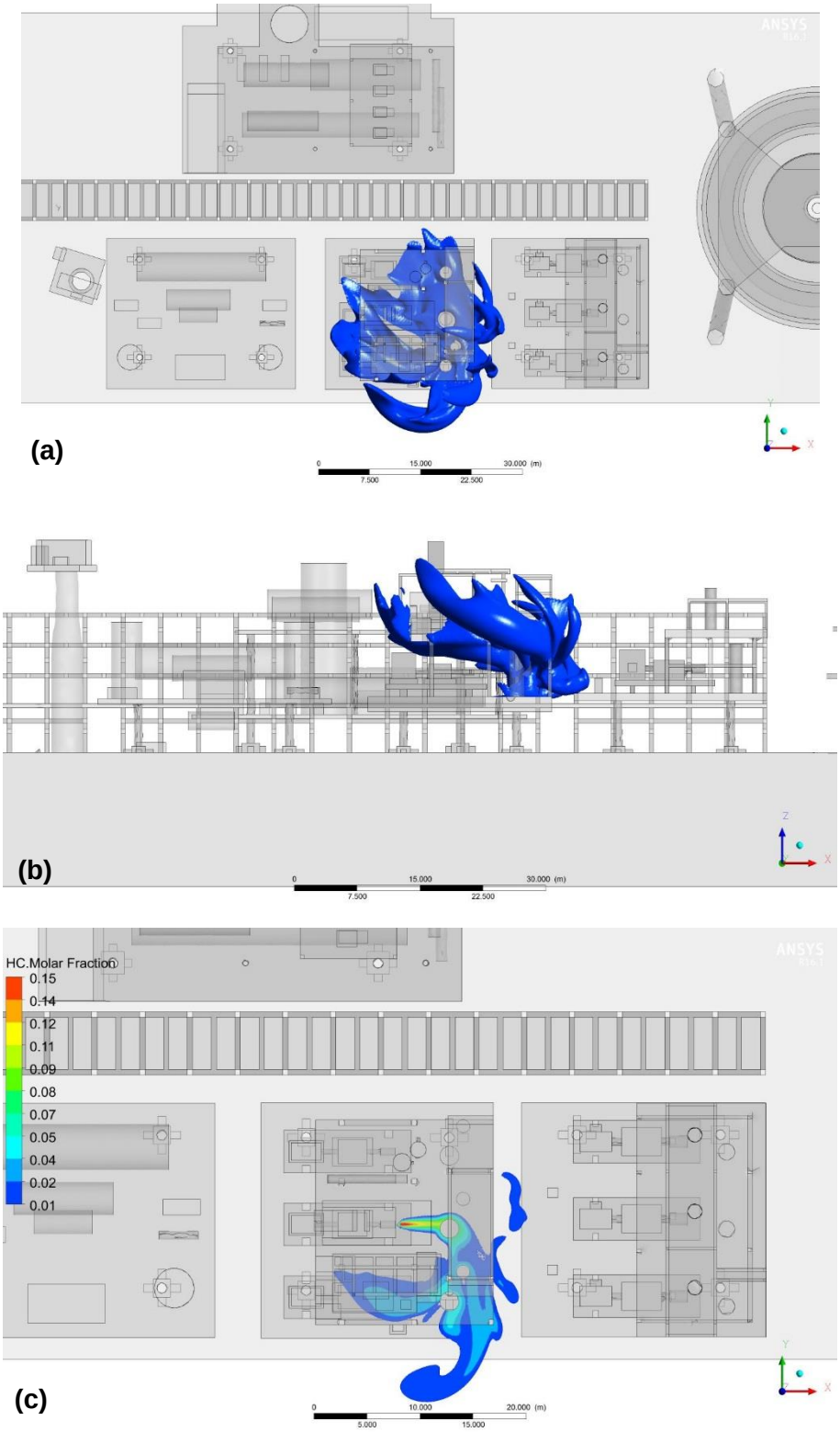

Figura A.3 – Caso 3 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 04 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em 0°

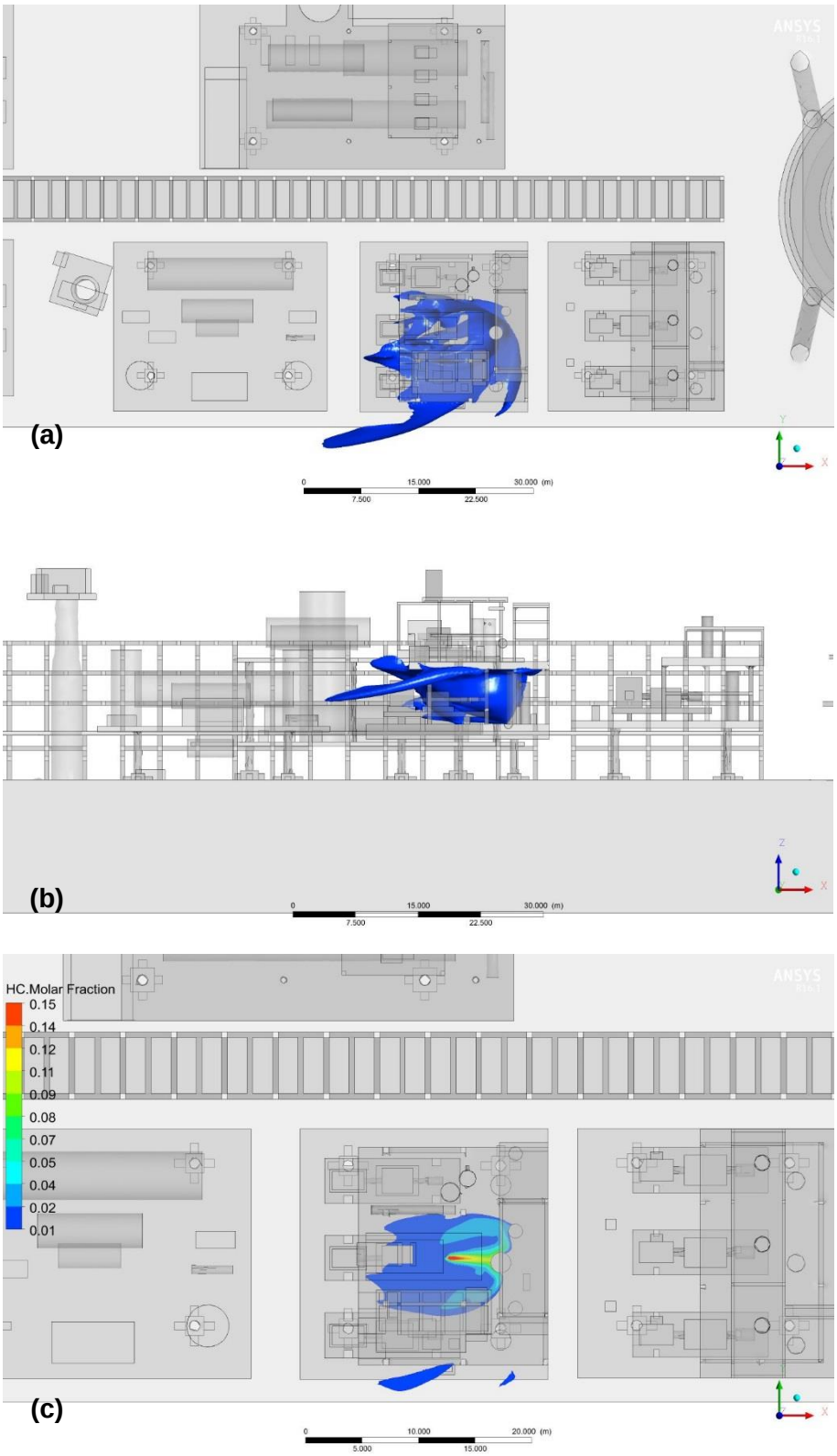

Figura A.4 – Caso 4 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 05 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em +30°

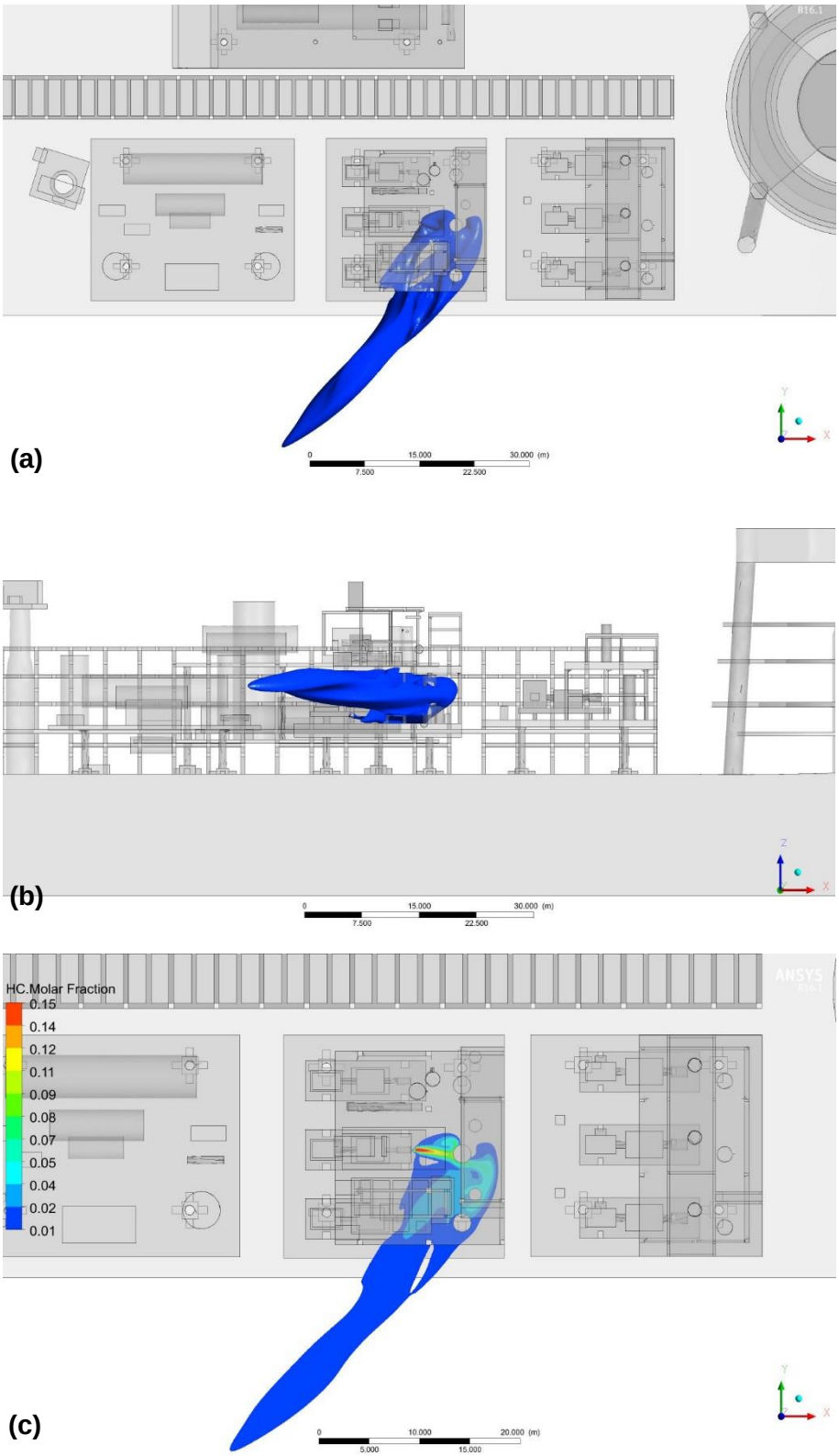

Figura A.5 – Caso 5 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 08 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em +30°

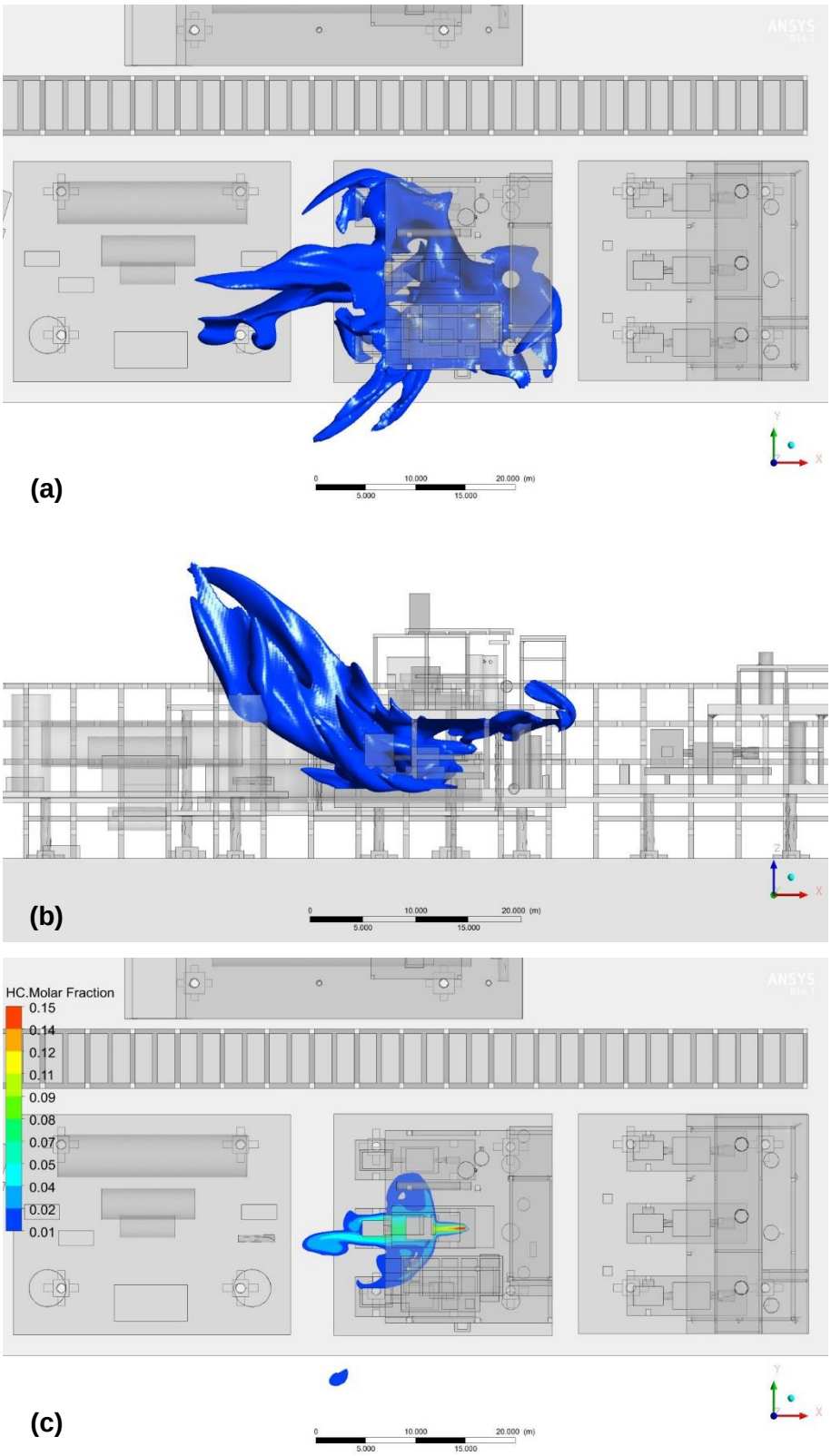

Figura A.6 – Caso 8 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 09 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em -30°

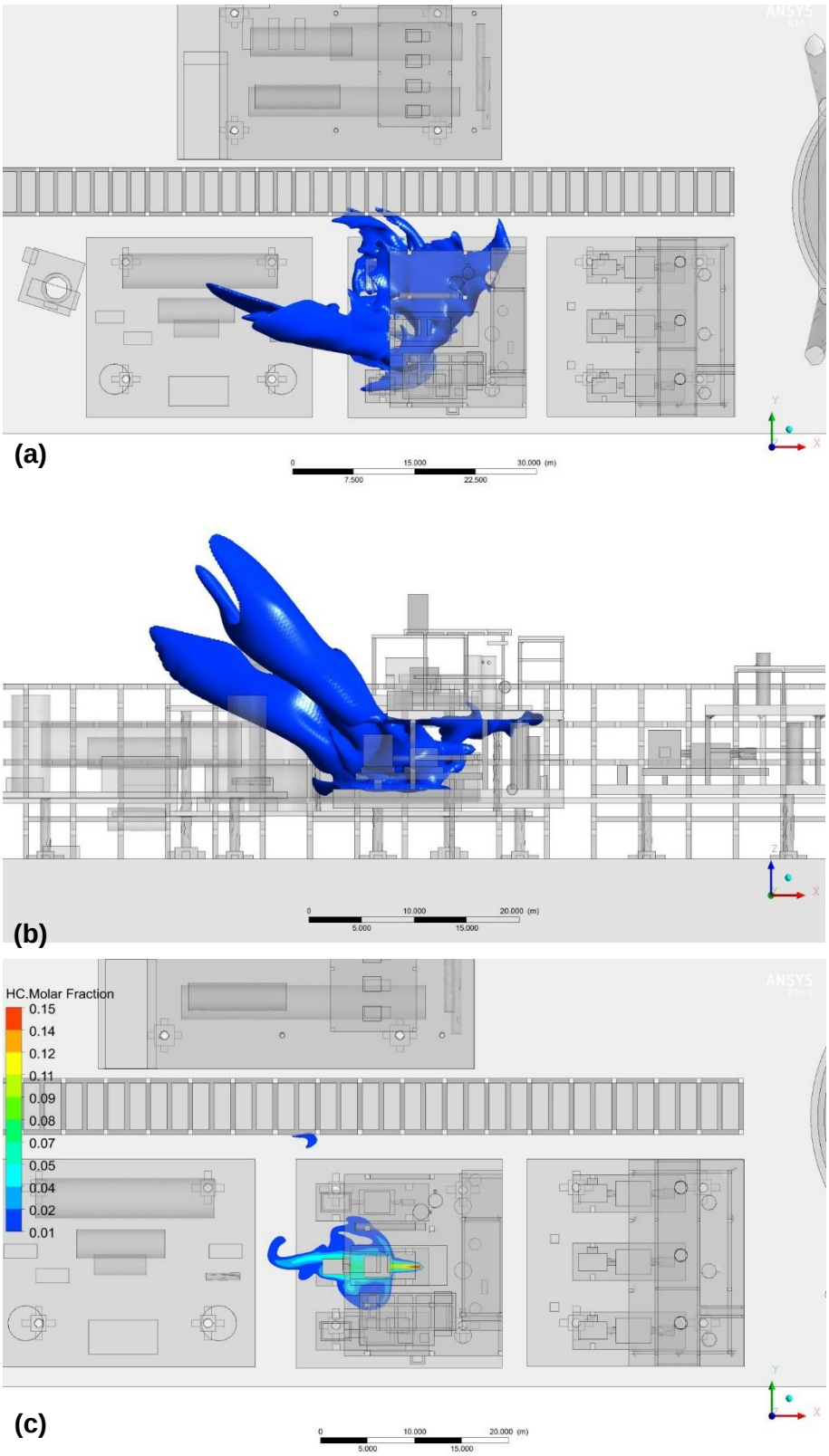

Figura A.7 – Caso 9 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 10 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em 0°

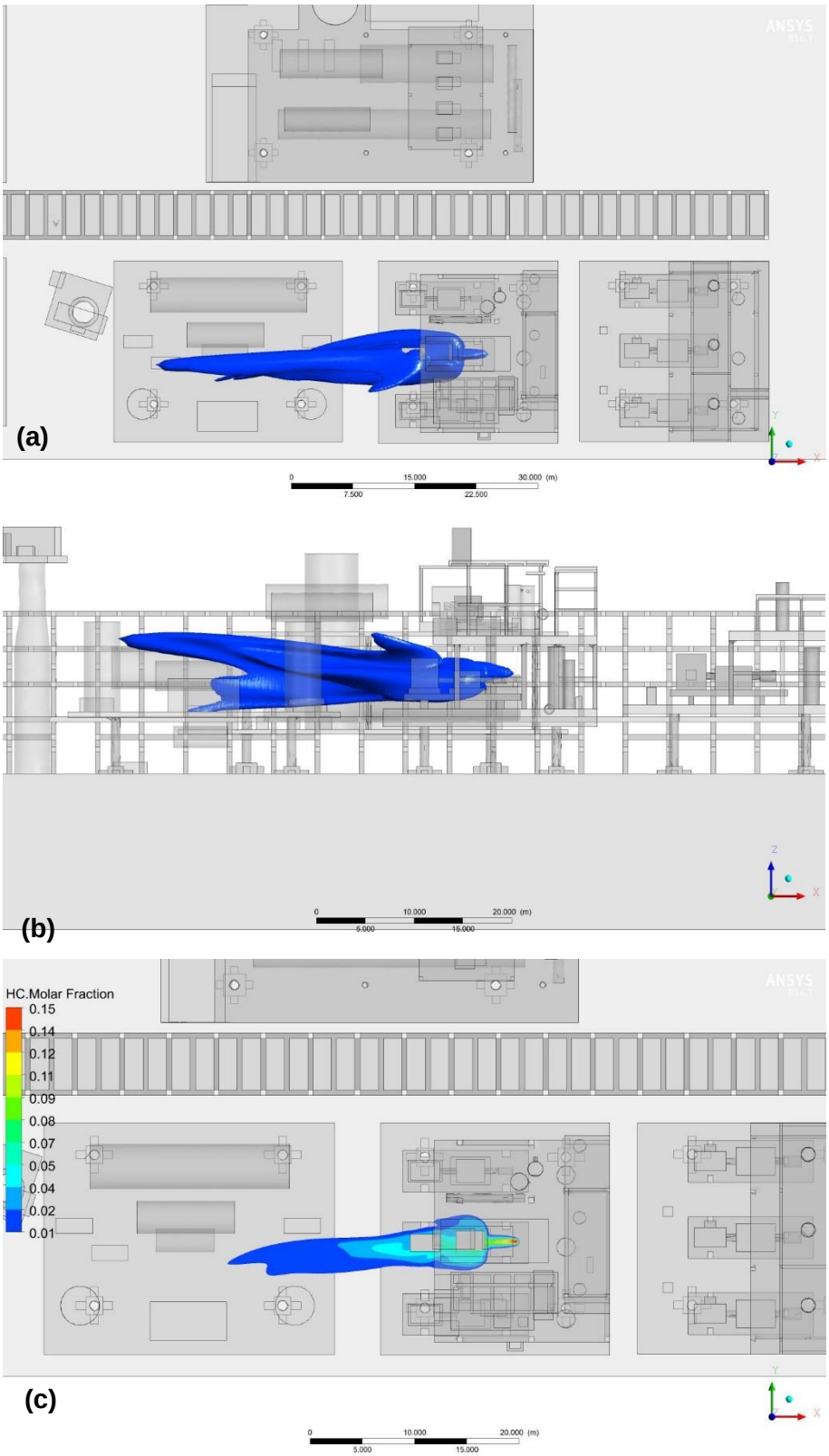

Figura A.8 – Caso 10 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 11 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em +30°

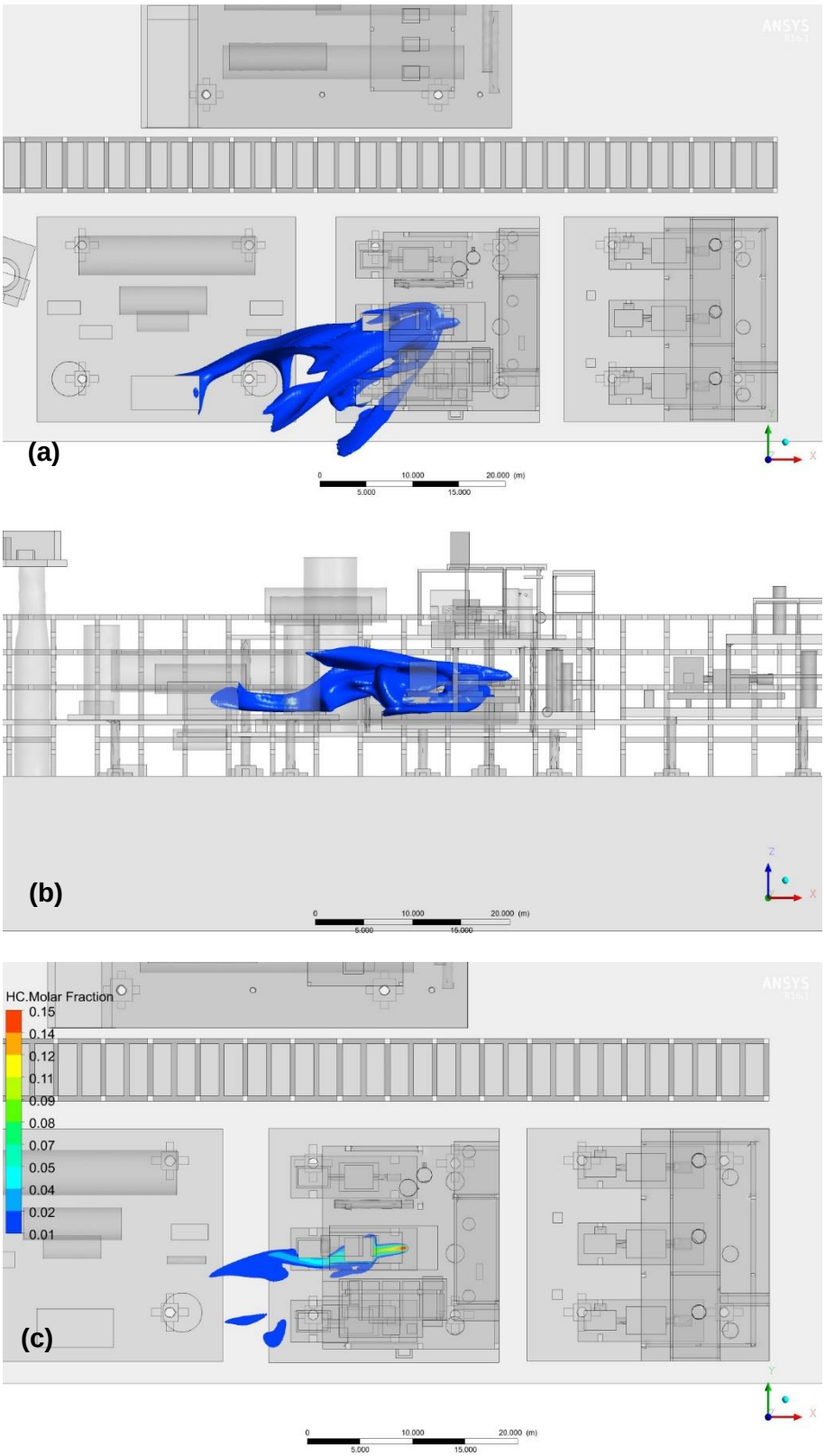

Figura A.9 – Caso 11 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 12 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em -30°

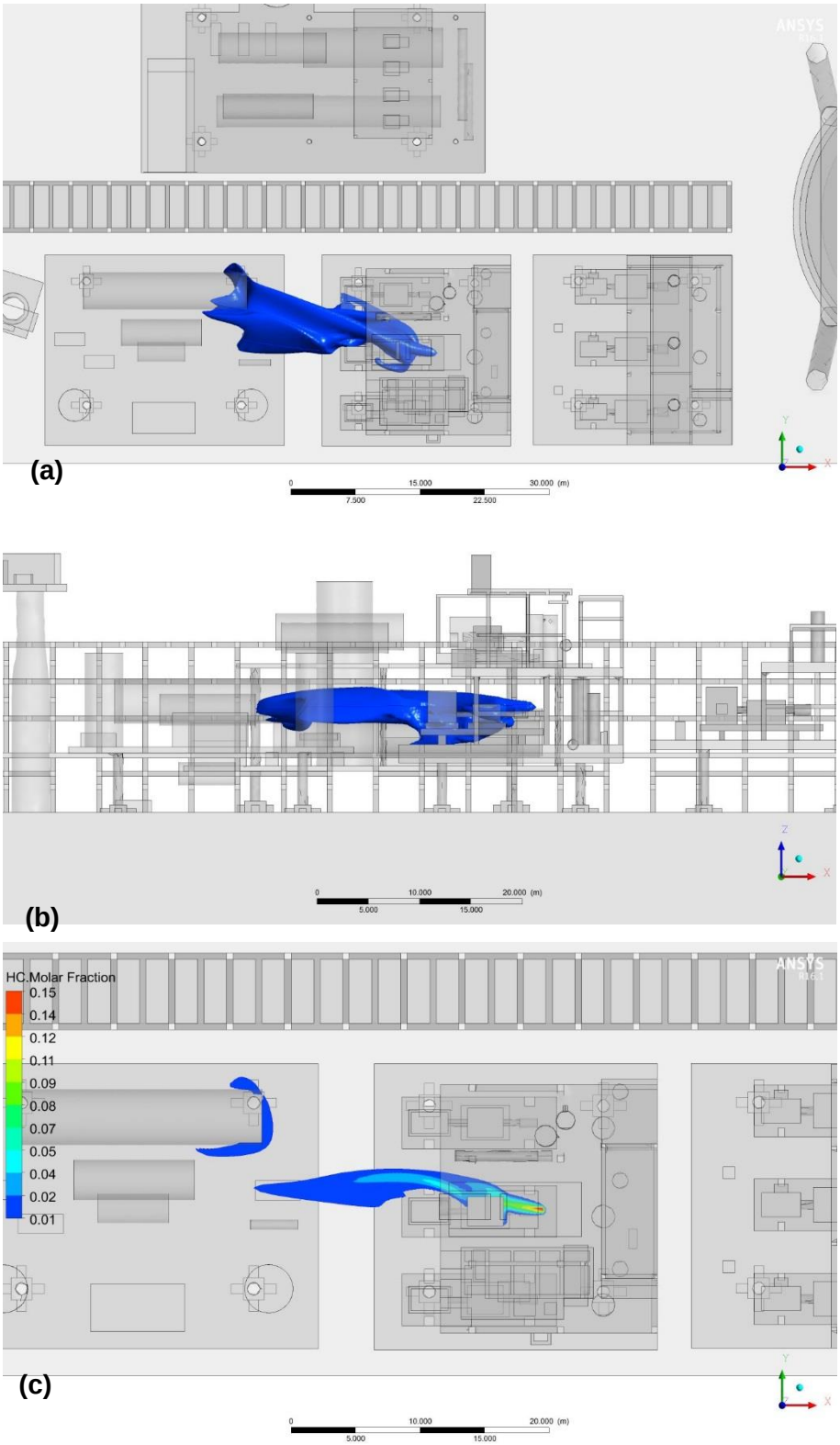

Figura A.10 – Caso 12 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 14 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em +30°

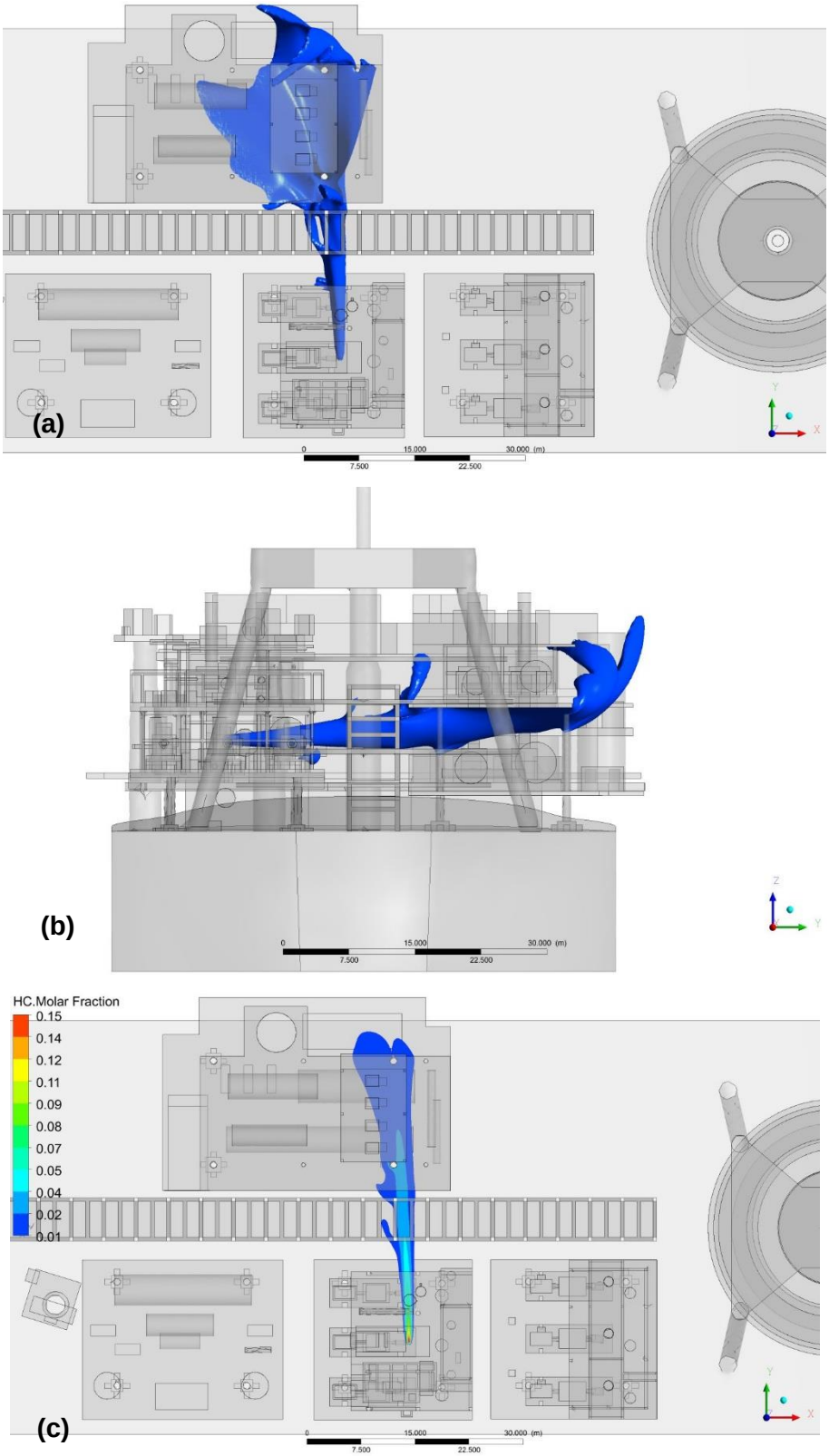

Figura A.11 – Caso 14 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 15 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em -30°

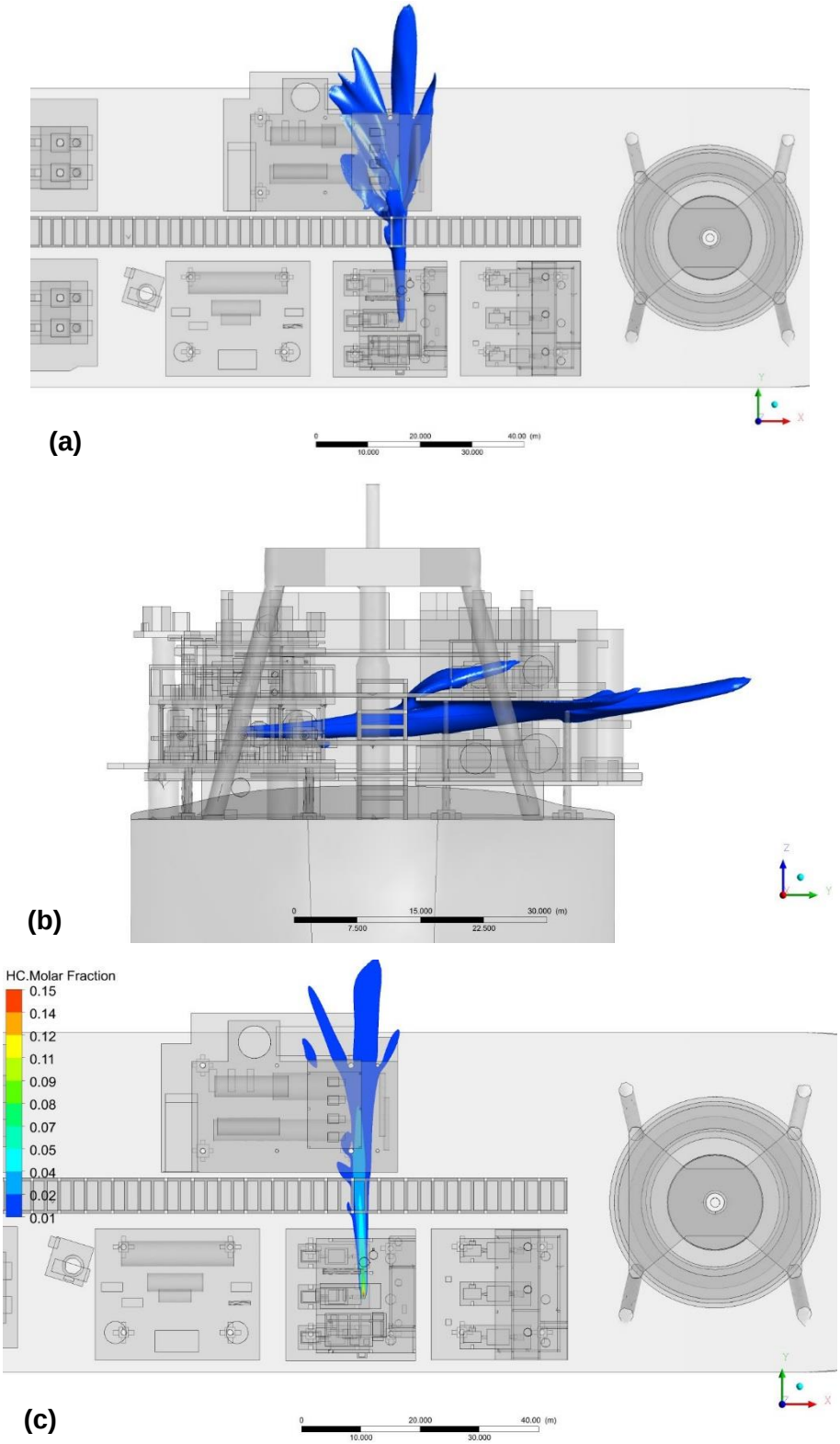

Figura A.12 – Caso 15 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 16 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em 0°

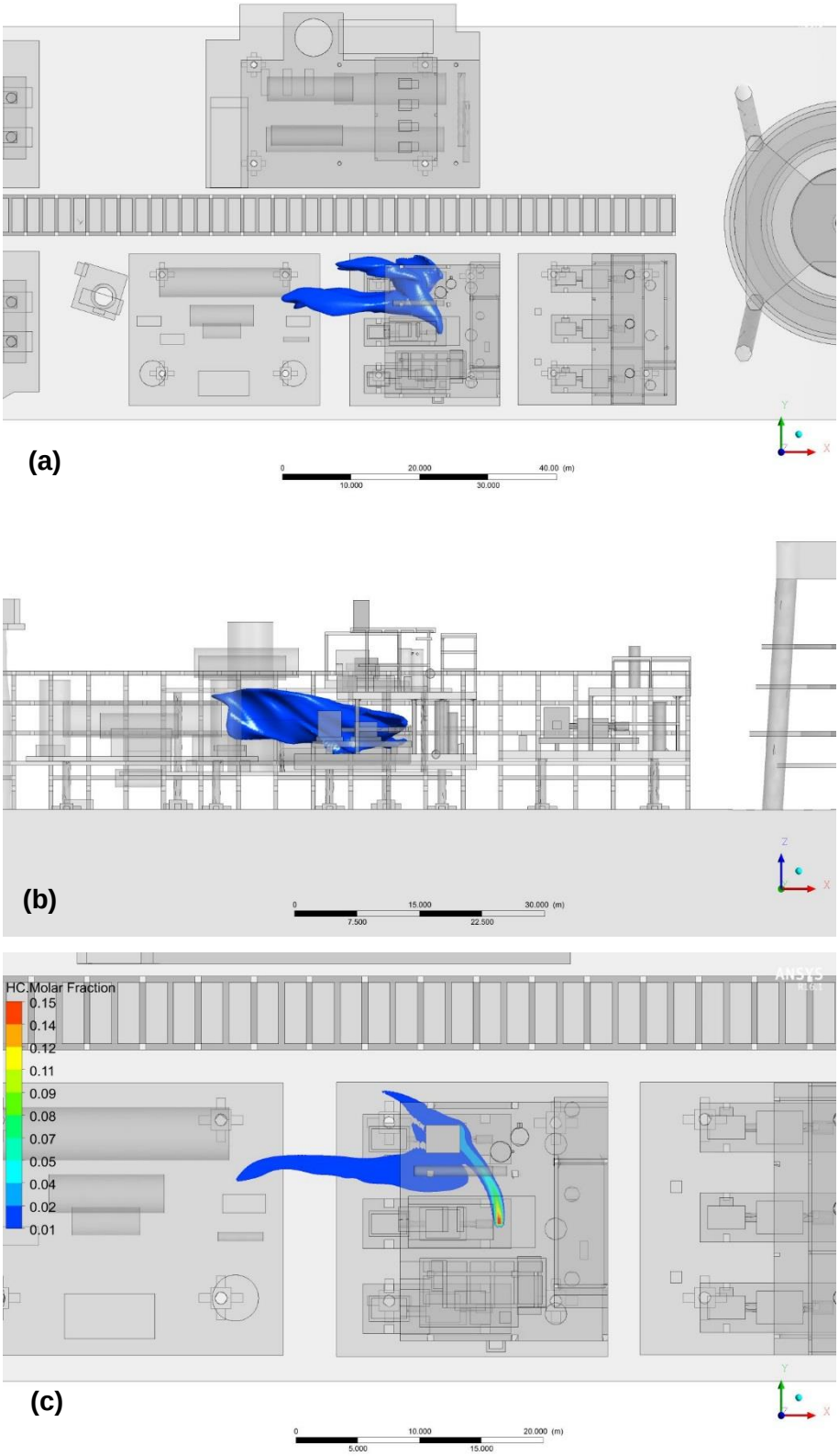

Figura A.13 – Caso 16 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 17 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em +30°

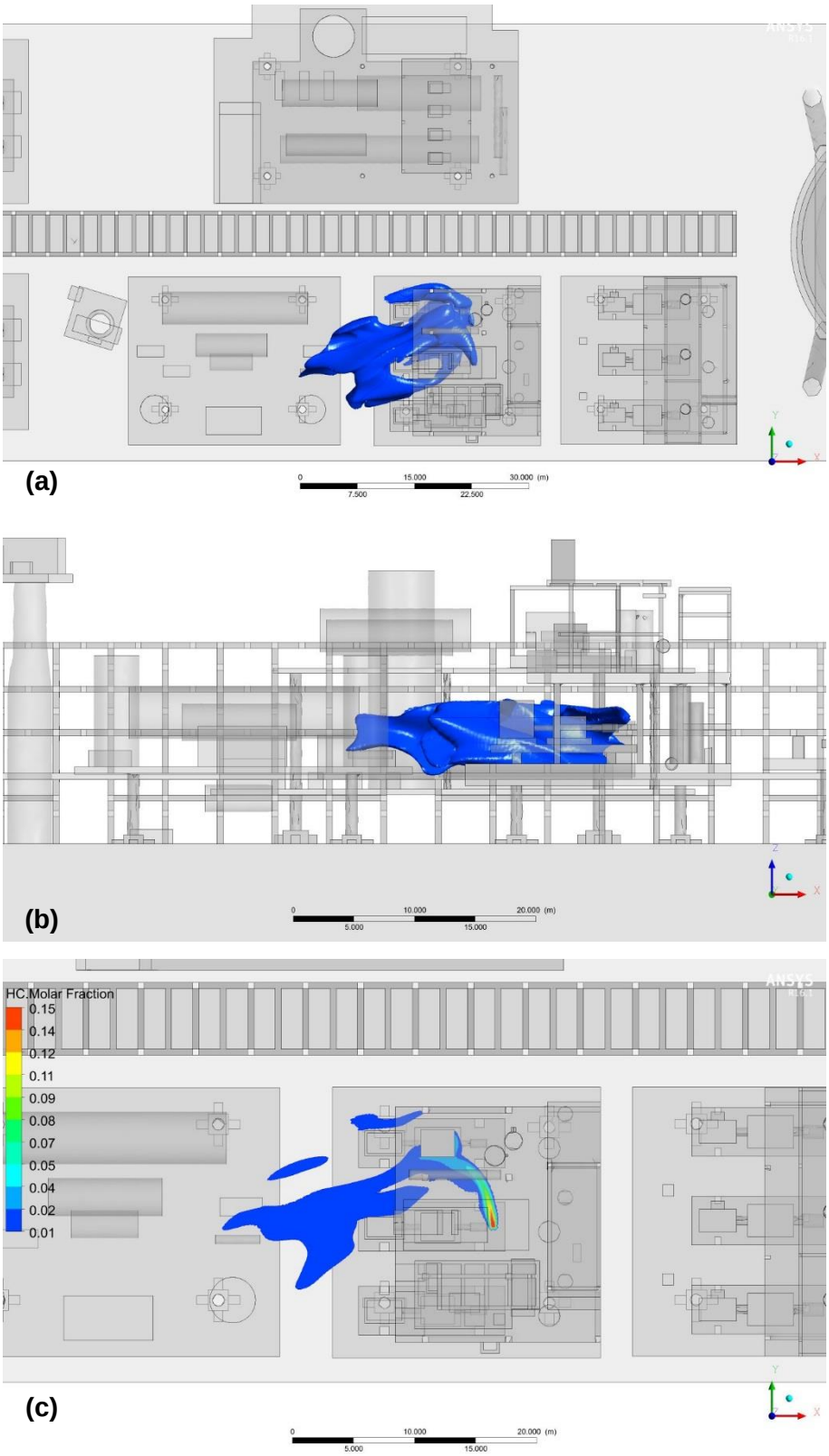

Figura A.14 – Caso 17 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 18 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em -30°

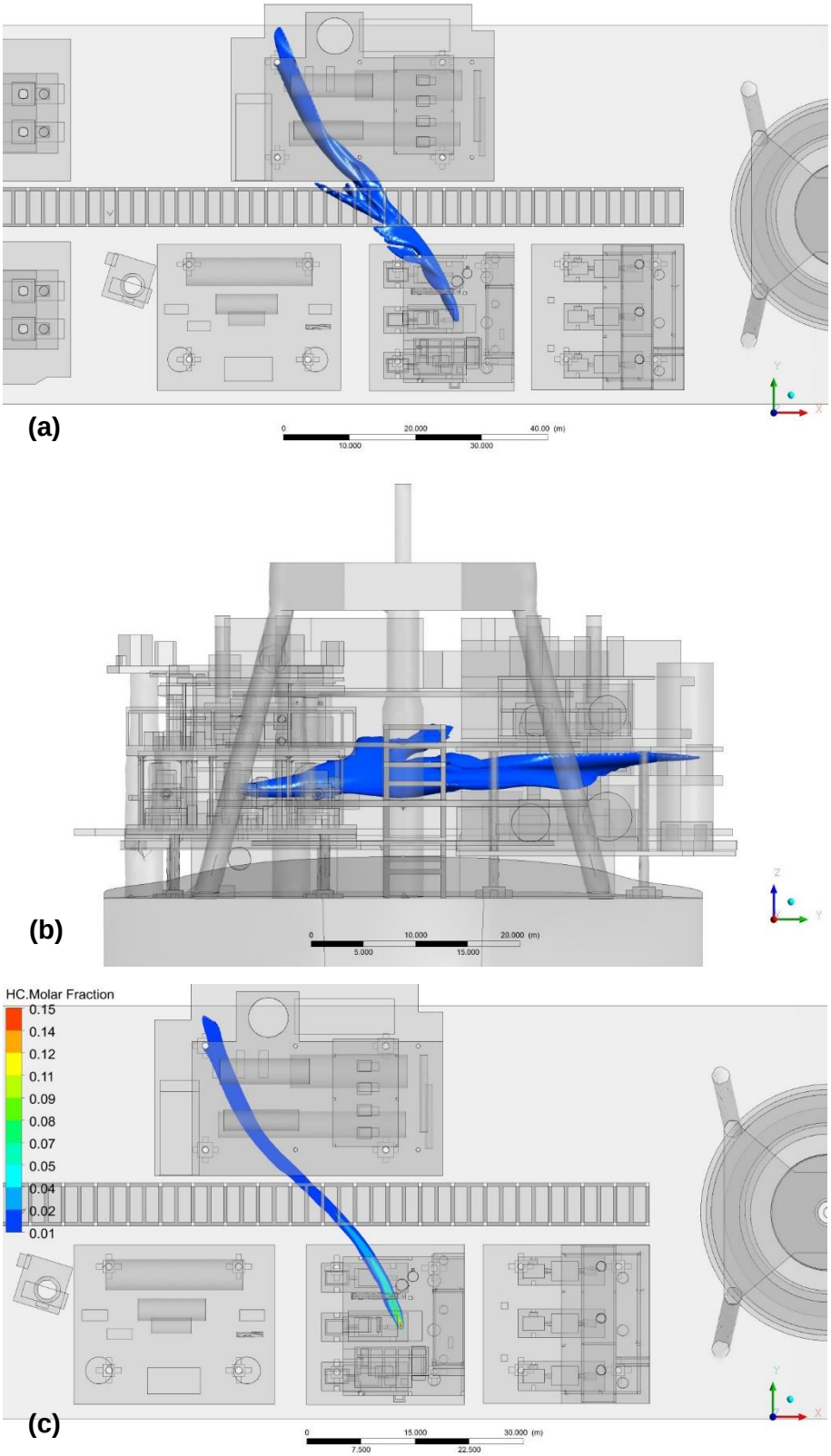

Figura A.15 – Caso 18 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 19 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em 0°

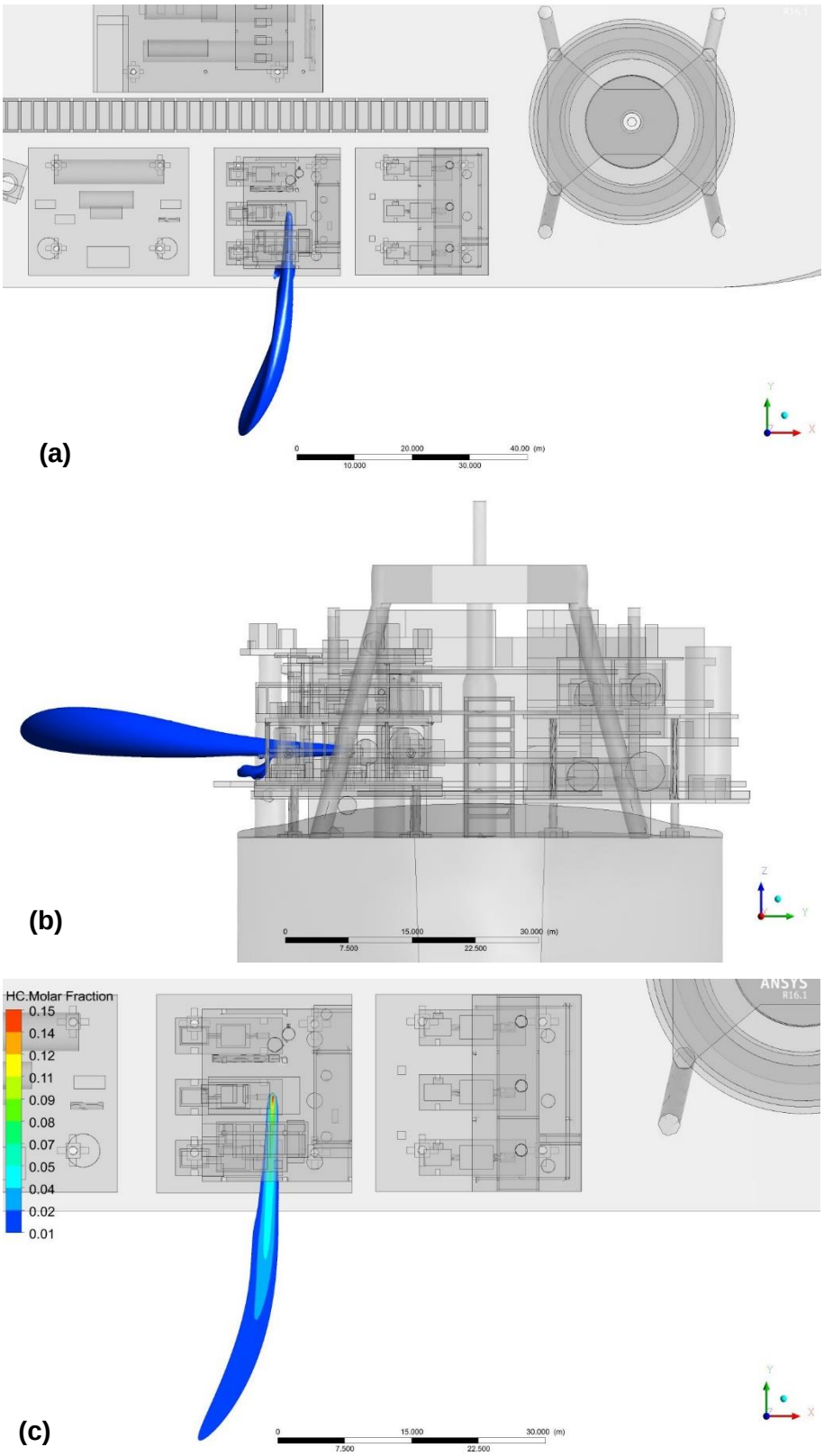

Figura A.16 – Caso 19 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 20 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em +30°

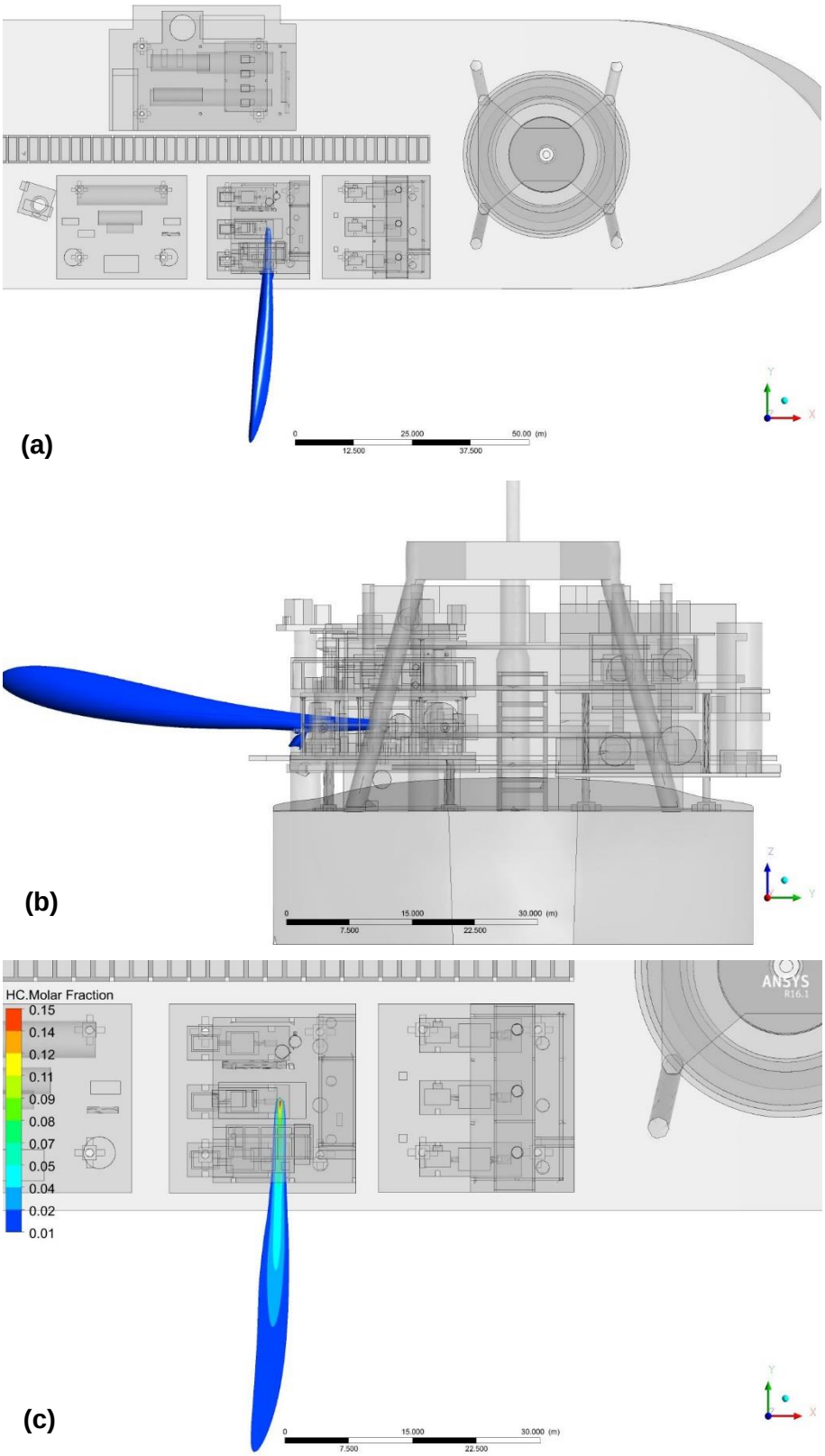

Figura A.17 – Caso 20 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 21 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em -30°

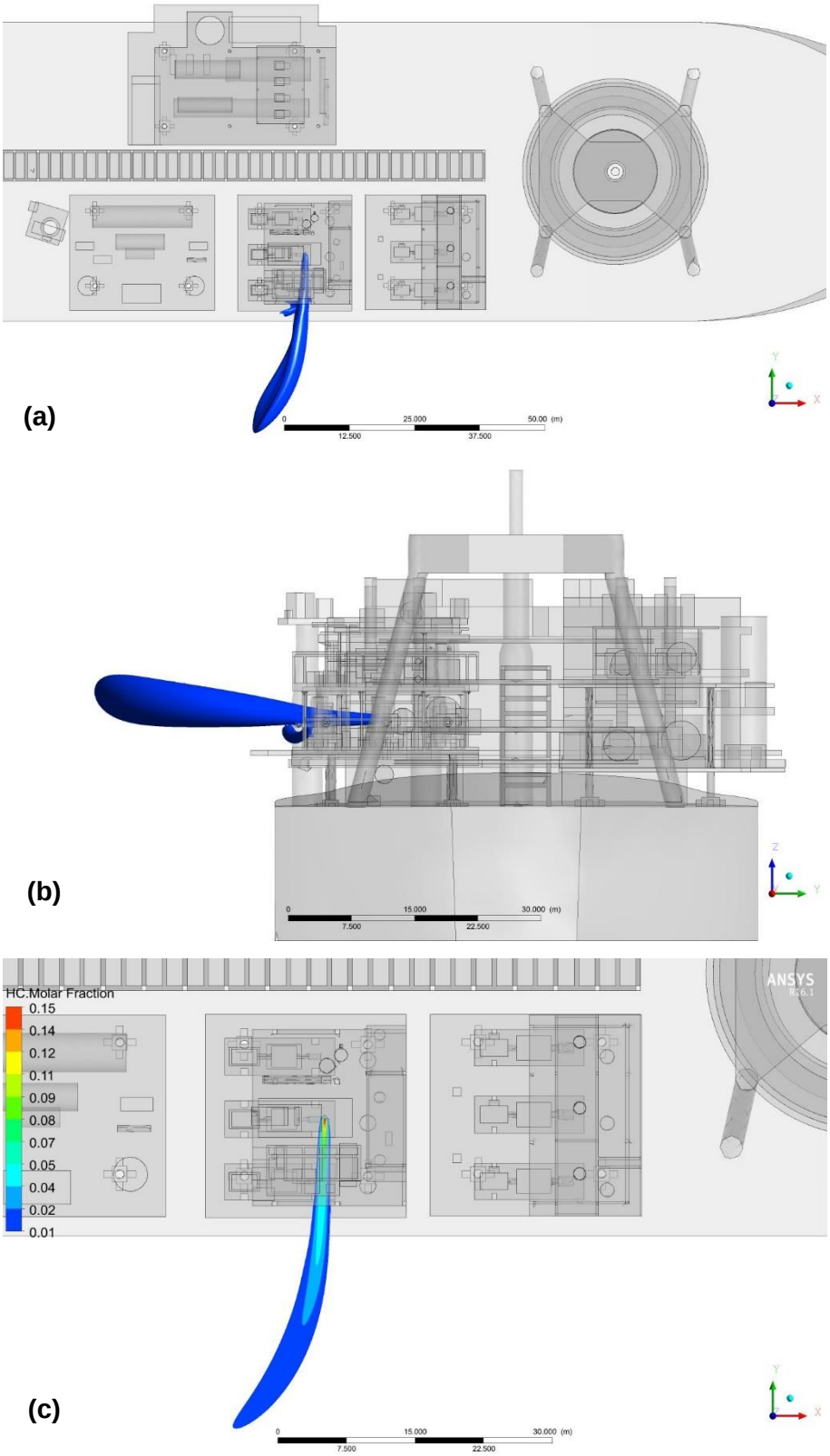

Figura A.18 – Caso 21 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 22 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em 0°

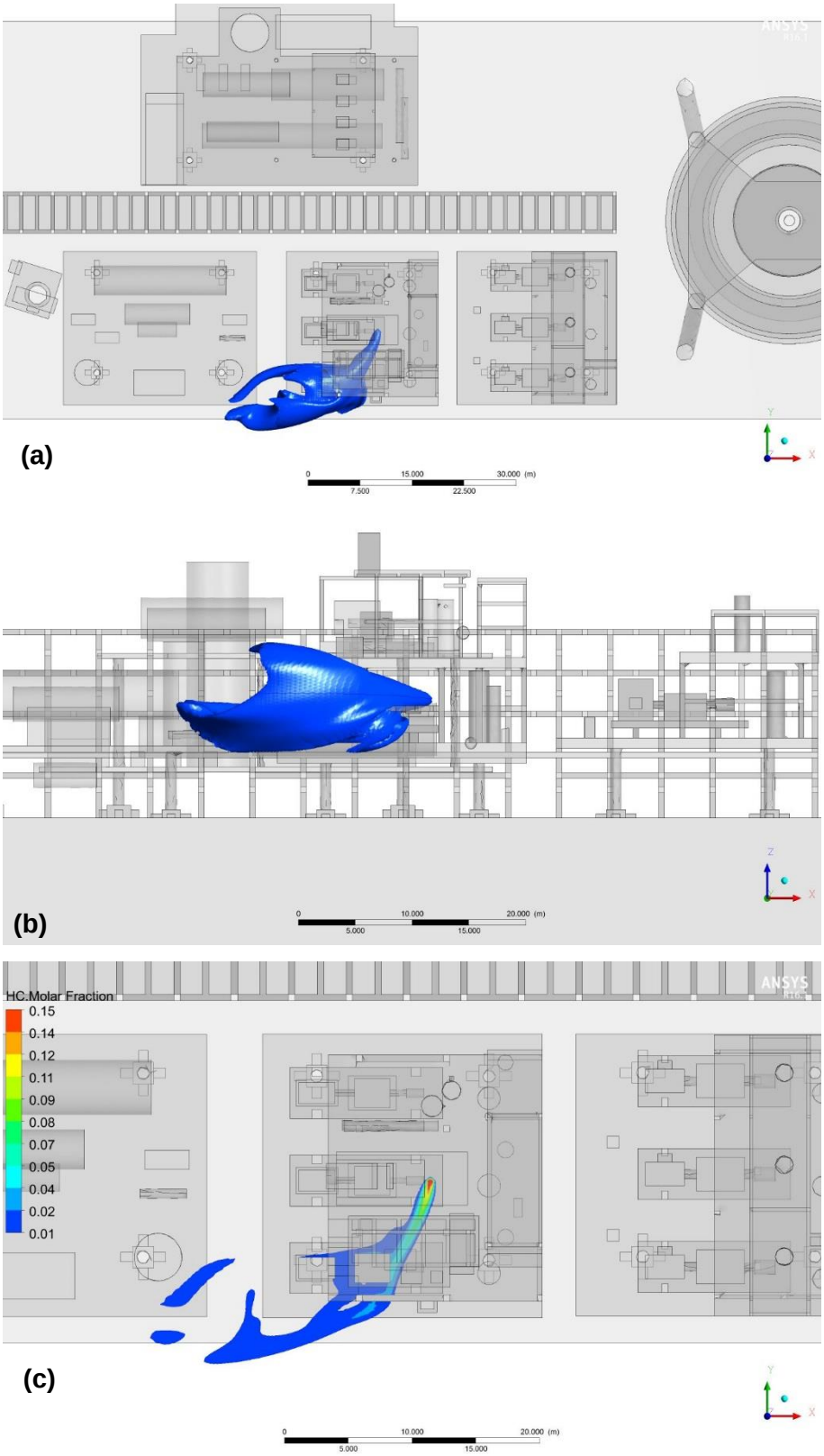

Figura A.19 – Caso 22 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 23 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em +30°

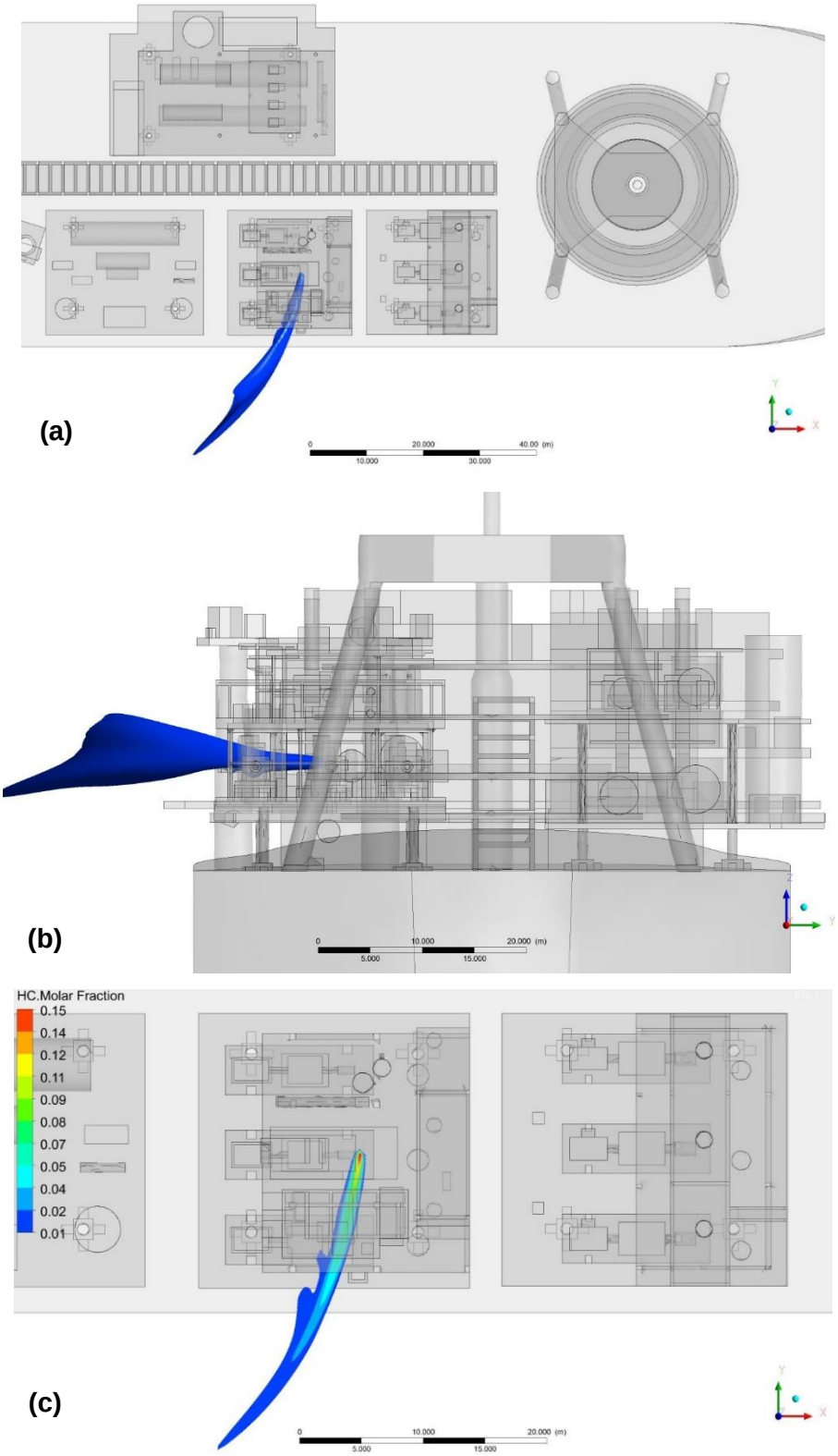

Figura A.20 – Caso 23 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 25 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em 0°

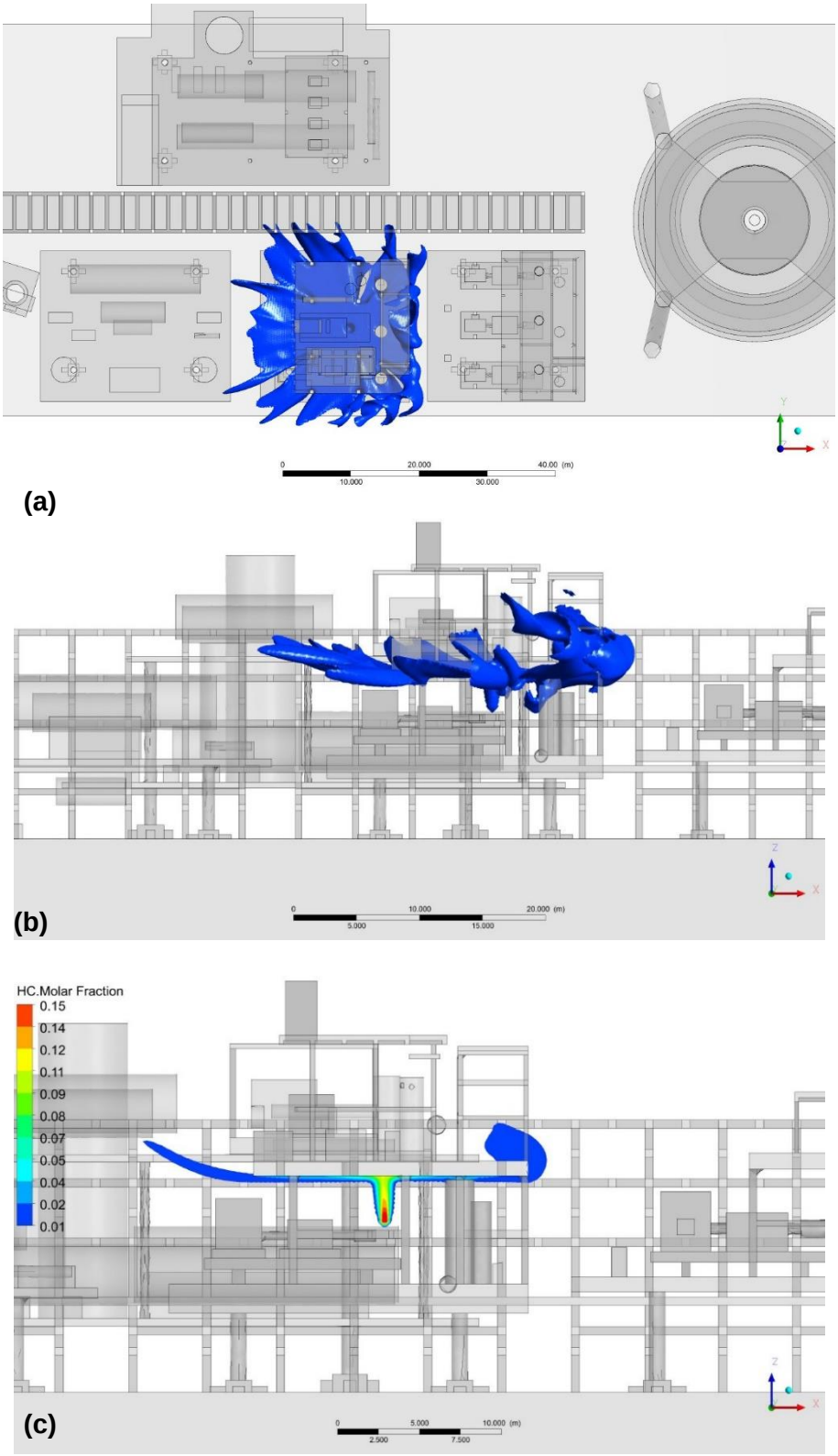

Figura A.21 – Caso 25 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 26 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em +30°

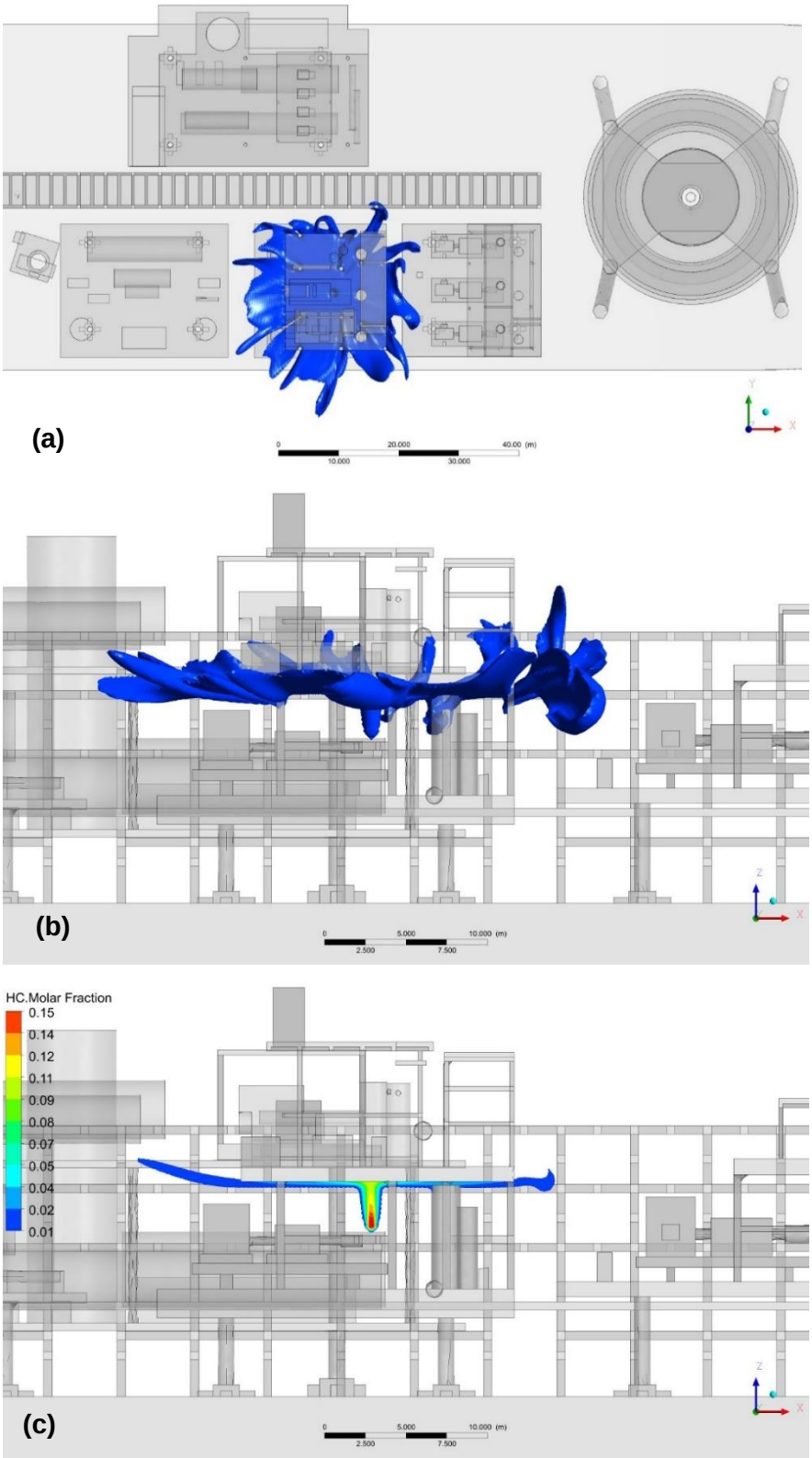

Figura A.22 – Caso 26 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 27 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em -30°

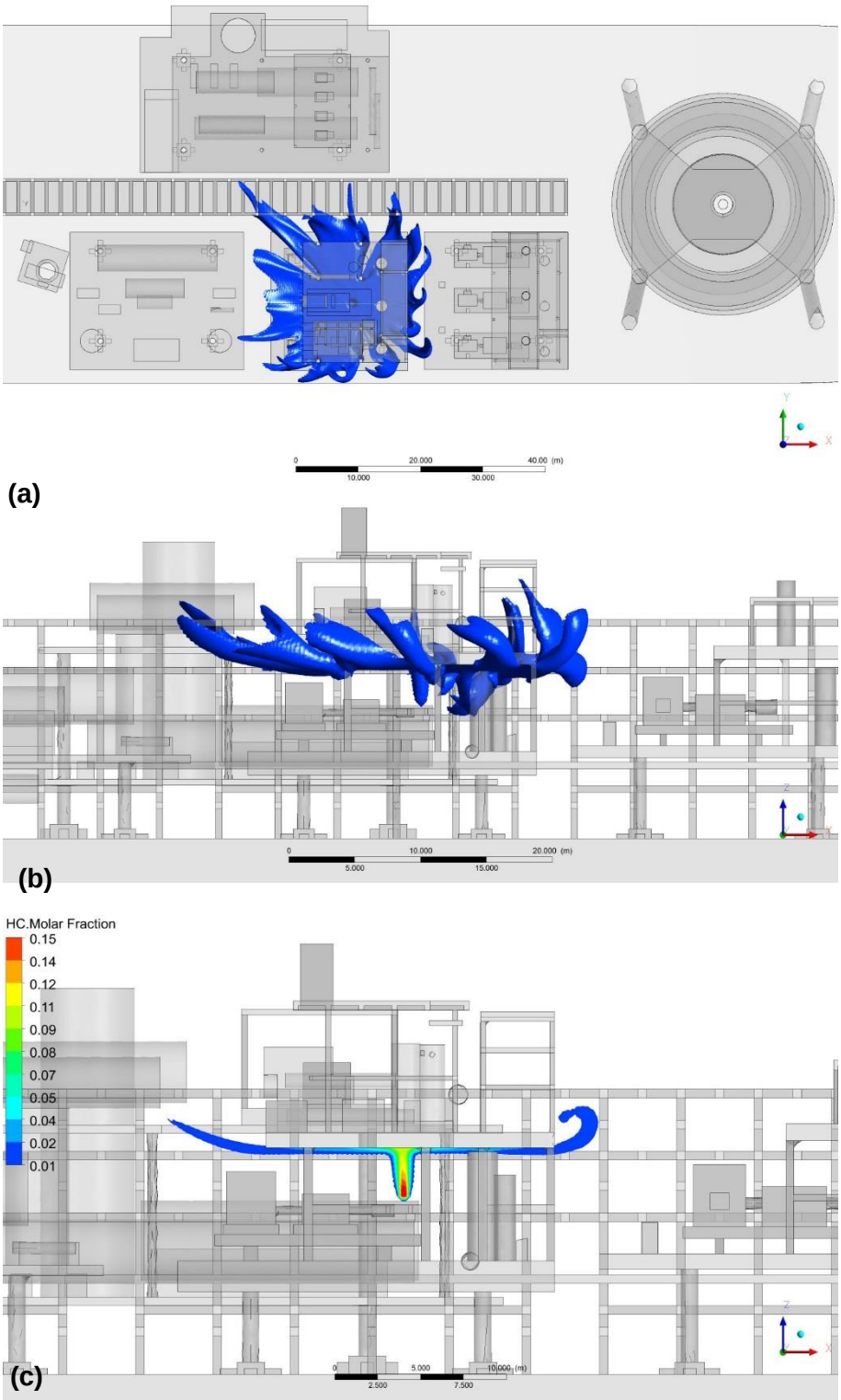

Figura A.23 – Caso 27 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 29 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em +30°

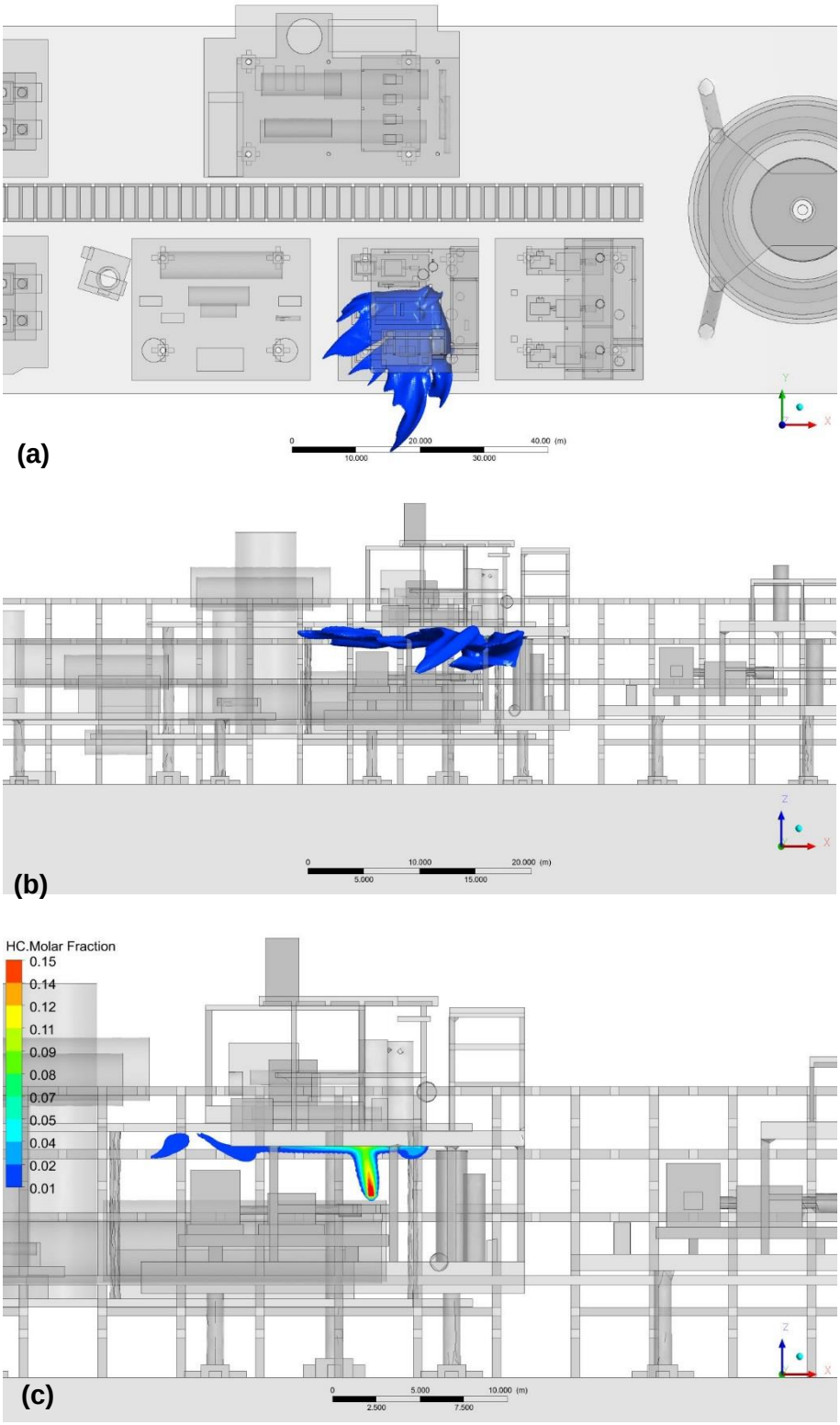

Figura A.24 – Caso 29 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 30 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em -30°

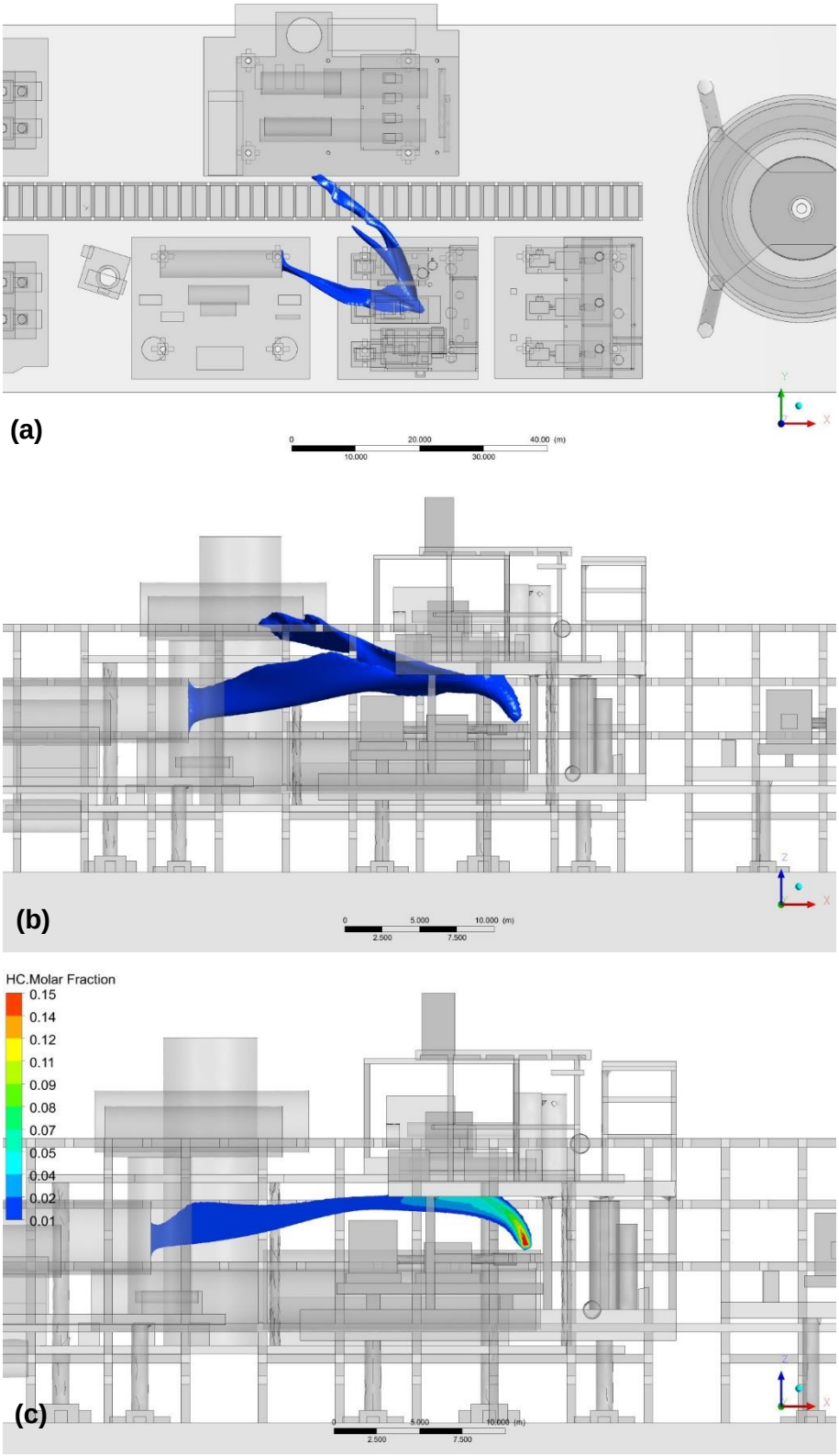

Figura A.25 – Caso 30 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 31 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em 0°

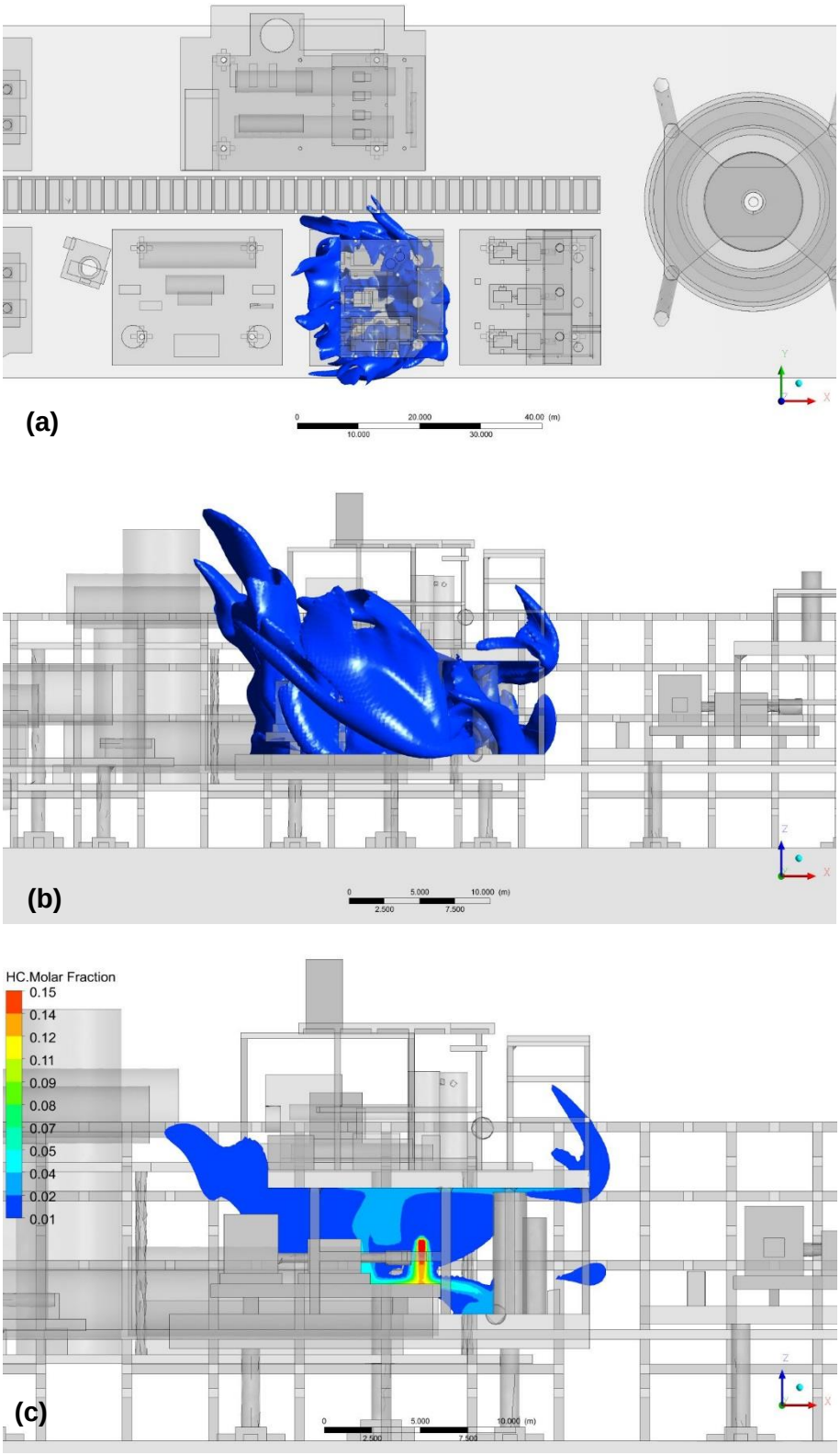

Figura A.26 – Caso 31 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 33 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em -30°

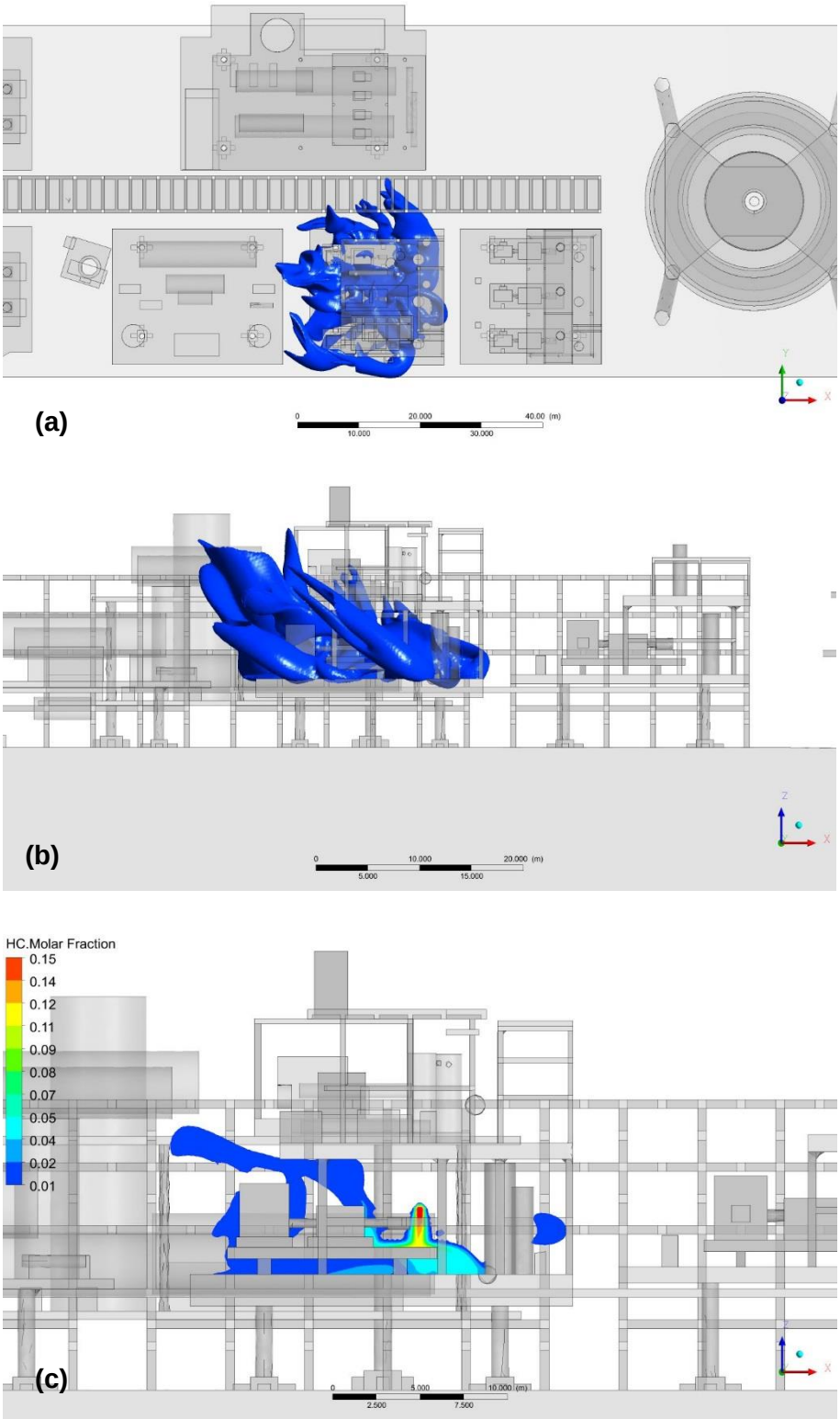

Figura A.27 – Caso 33 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 34 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em 0°

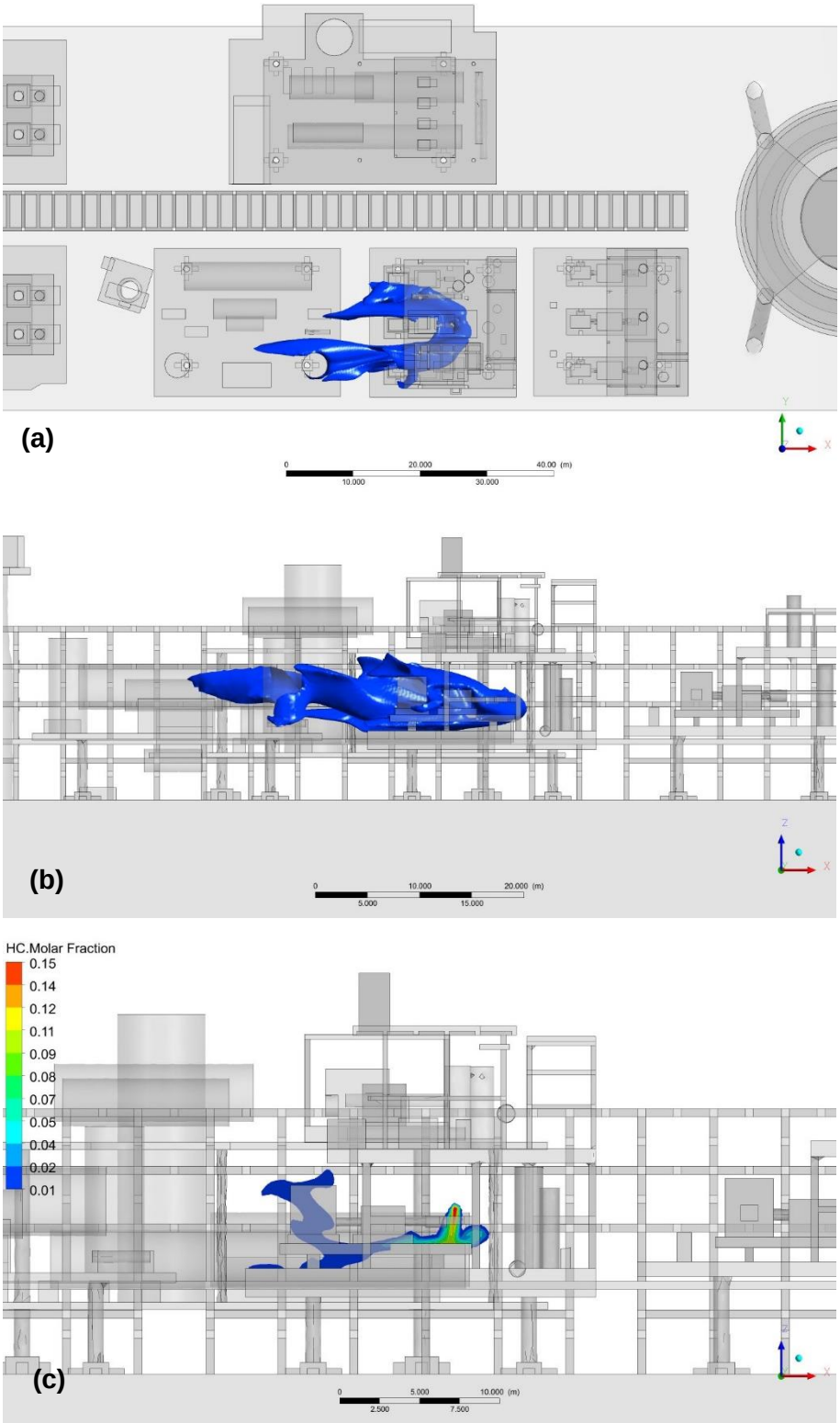

Figura A.28 – Caso 34 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 35 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em +30°

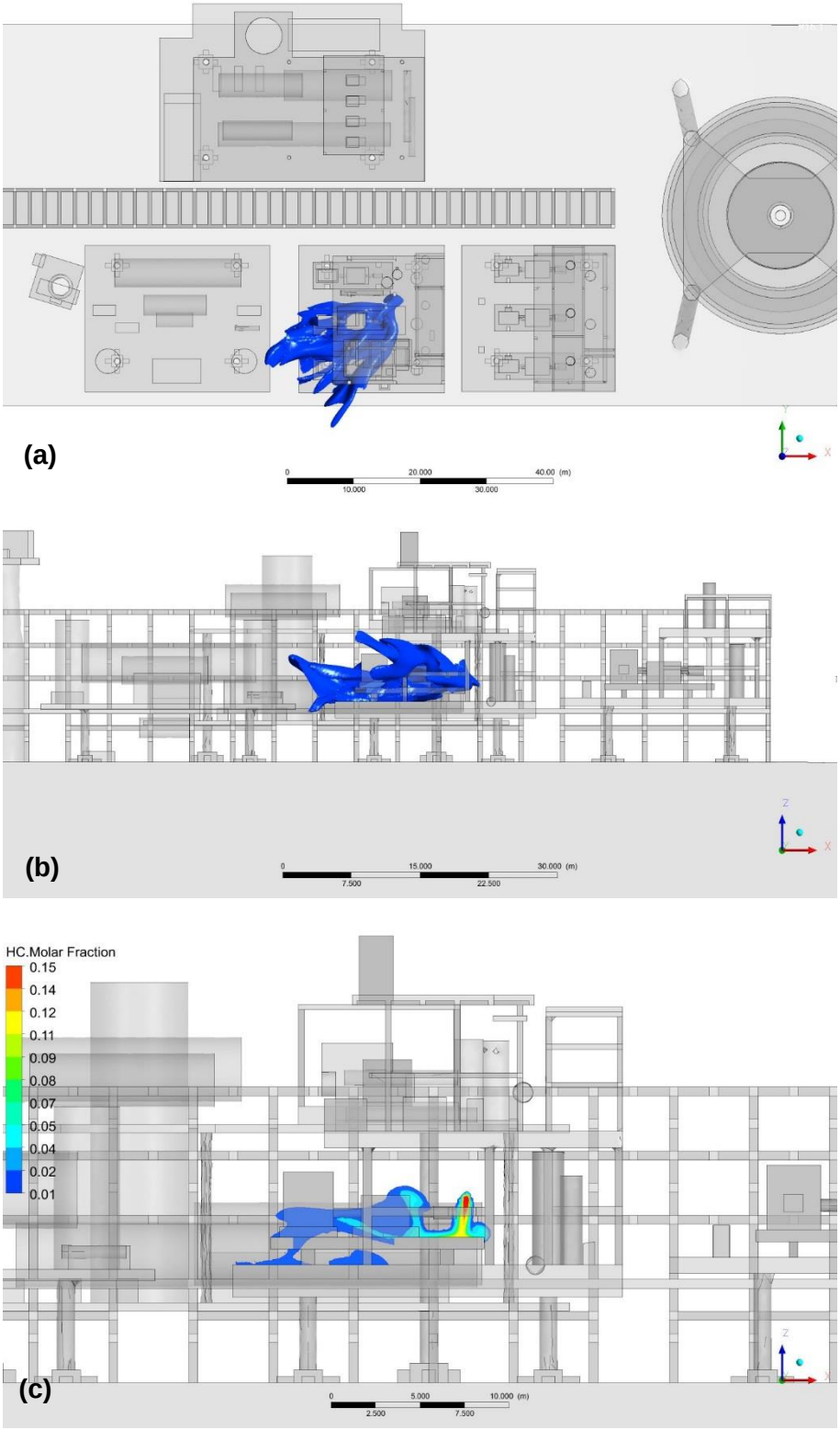

Figura A.29 – Caso 35 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

Caso 36 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

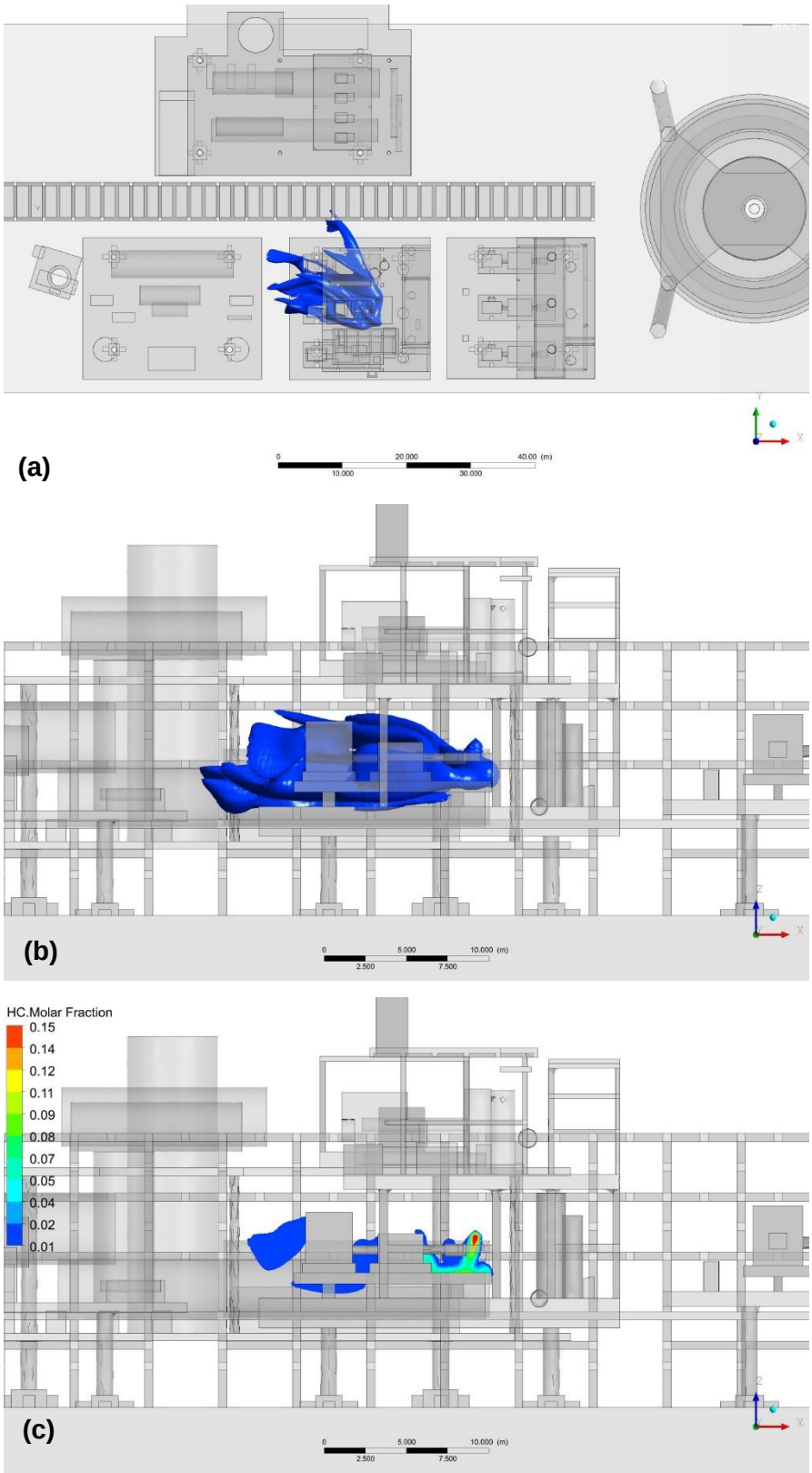

Figura A.30 – Caso 36 em (a) vista lateral (b) vista superior e (c) corte de concentração no interior da nuvem

B. Resultados Transientes

A Figura B.1 até a Figura B.30 apresentam uma pluma na forma de isossuperfície, na concentração (frações volumétricas) de gás referentes ao limite de detectabilidade dos sensores comerciais, iguail a 0,01.

Caso 01 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em 0°

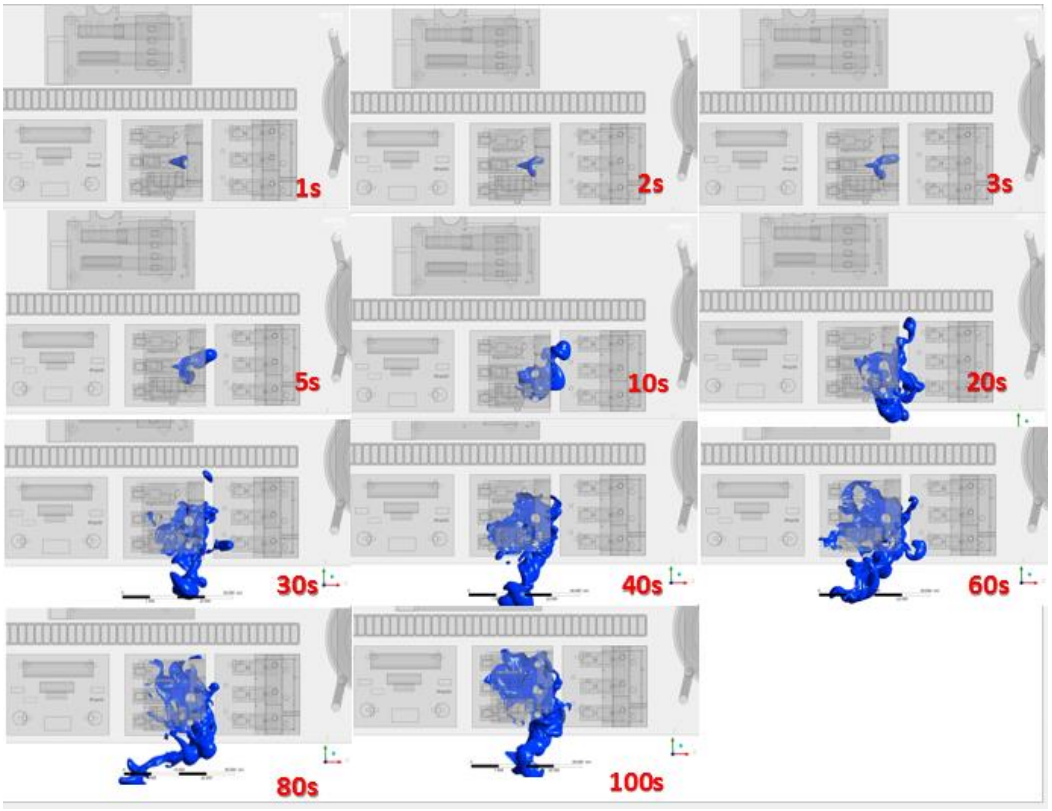

Figura B.1 – Caso 1 vista superior

Caso 02 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em +30°

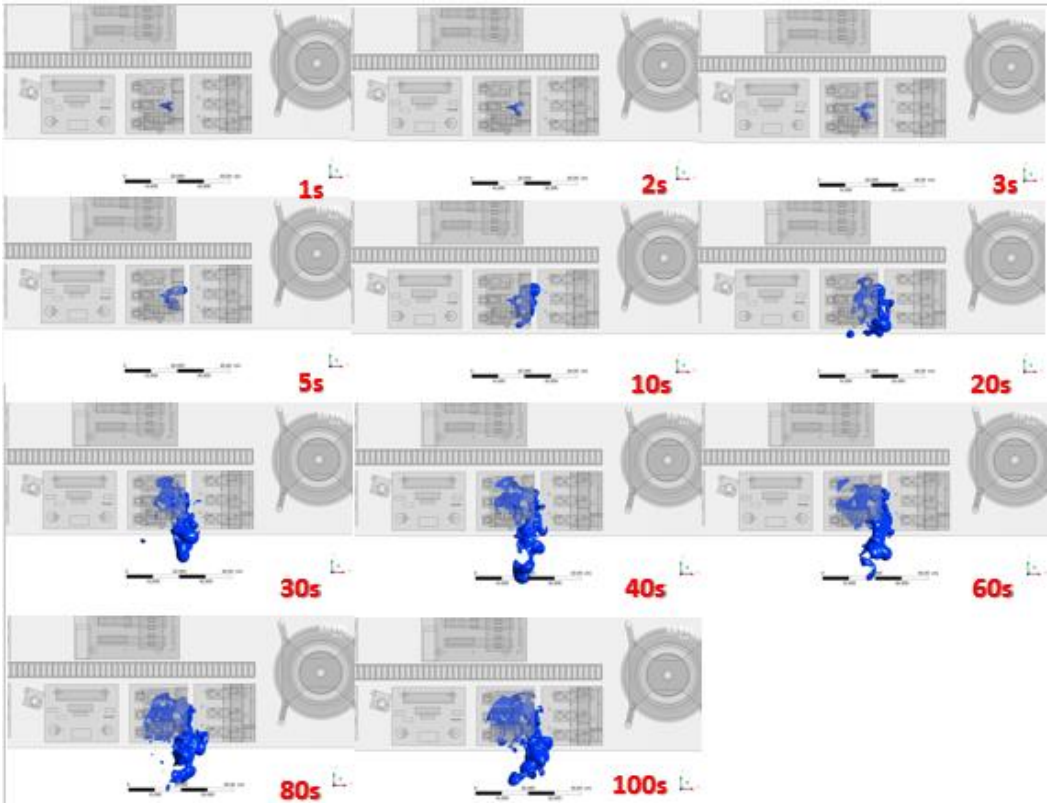

Figura B.2 – Caso 2 vista superior

Caso 03 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em -30°

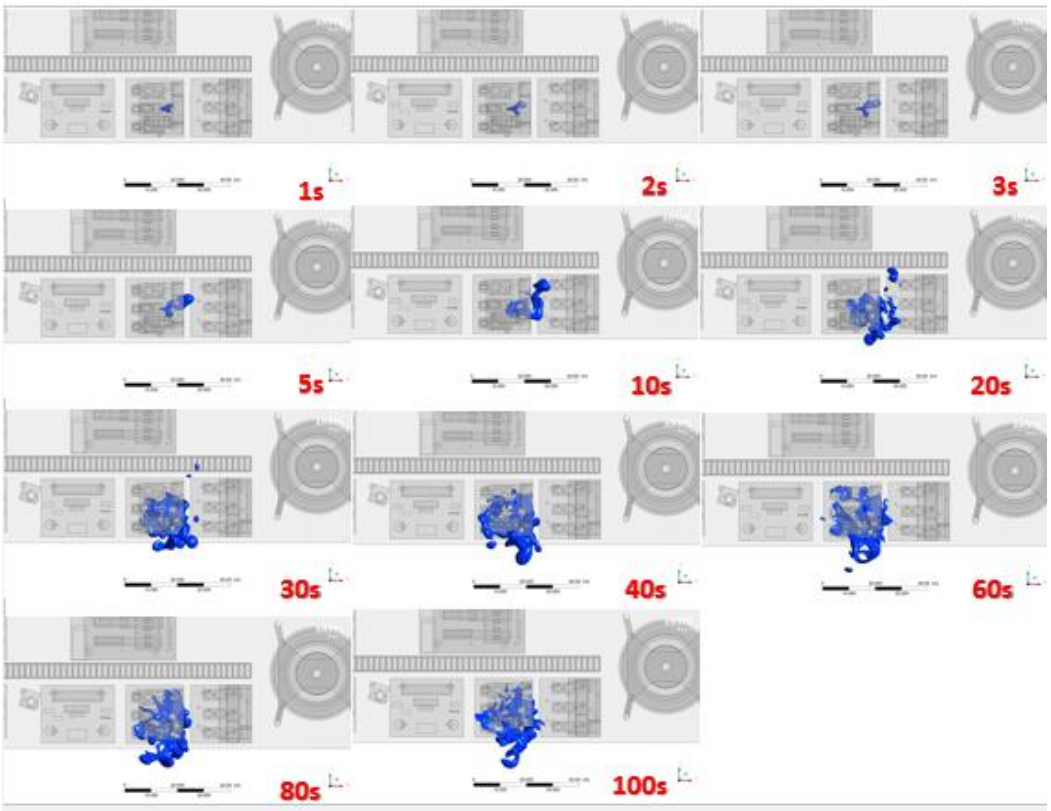

Figura B.3 – Caso 3 vista superior

Caso 04 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em 0°

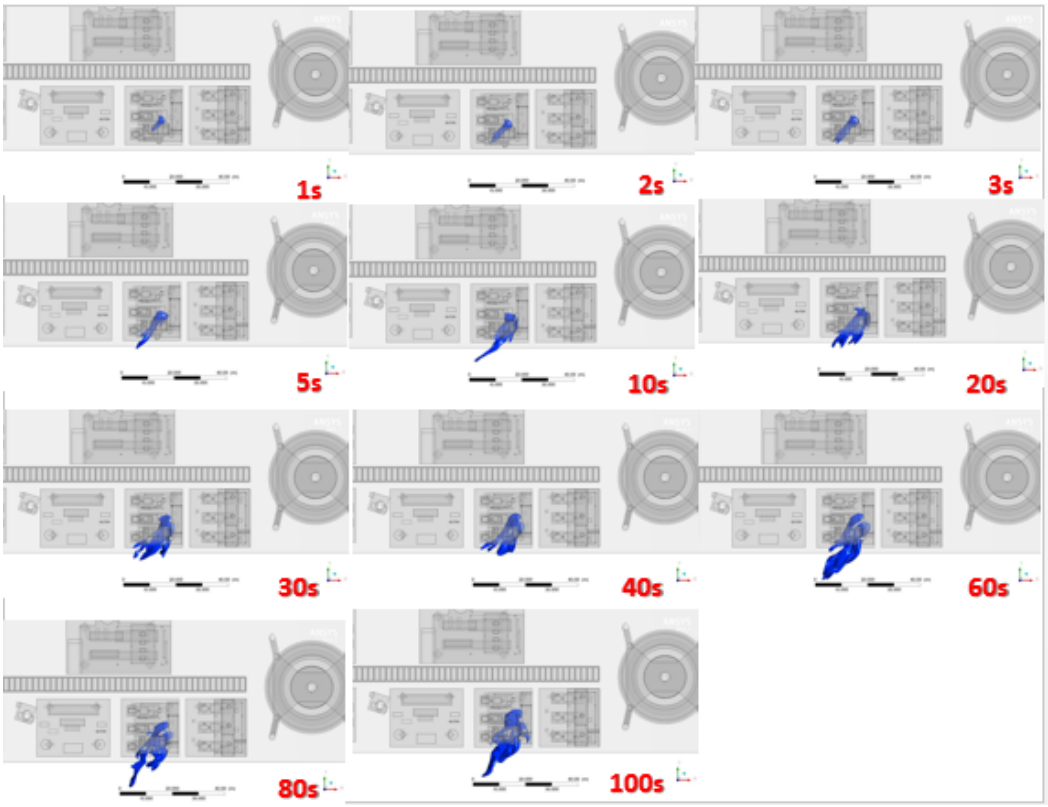

Figura B.4 – Caso 4 vista superior

Caso 05 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em +30°

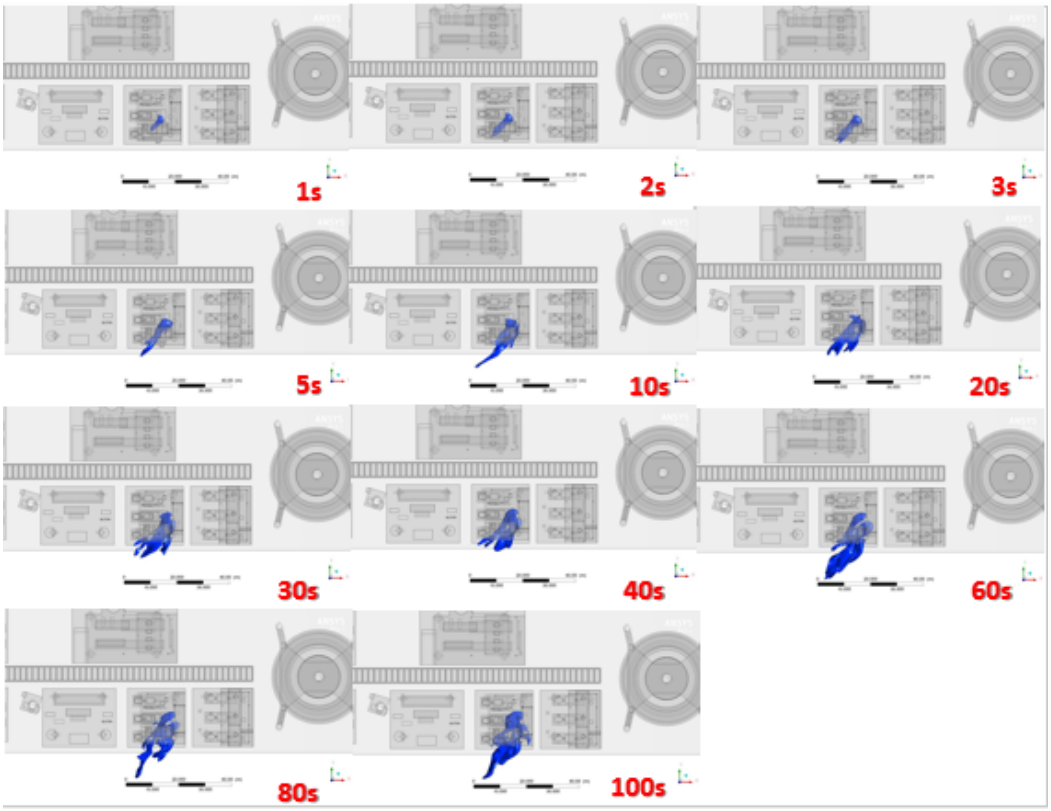

Figura B.5 – Caso 5 vista superior

Caso 08 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em +30°

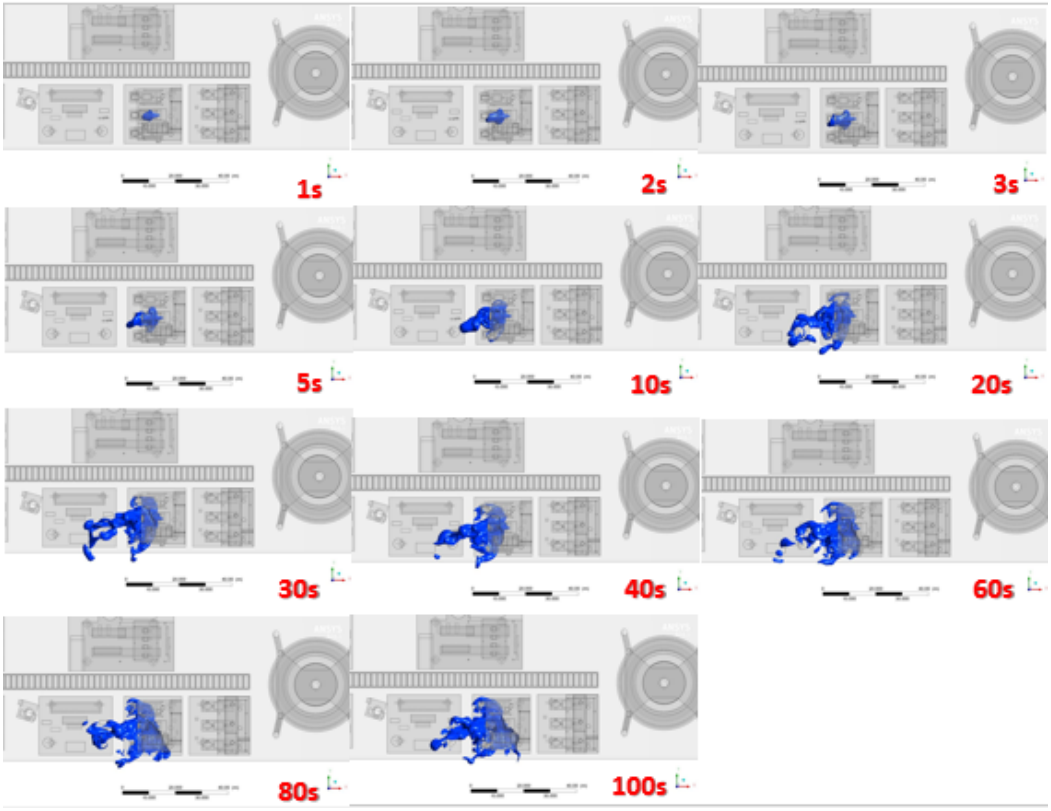

Figura B.6 – Caso 8 vista superior

Caso 09 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em -30°

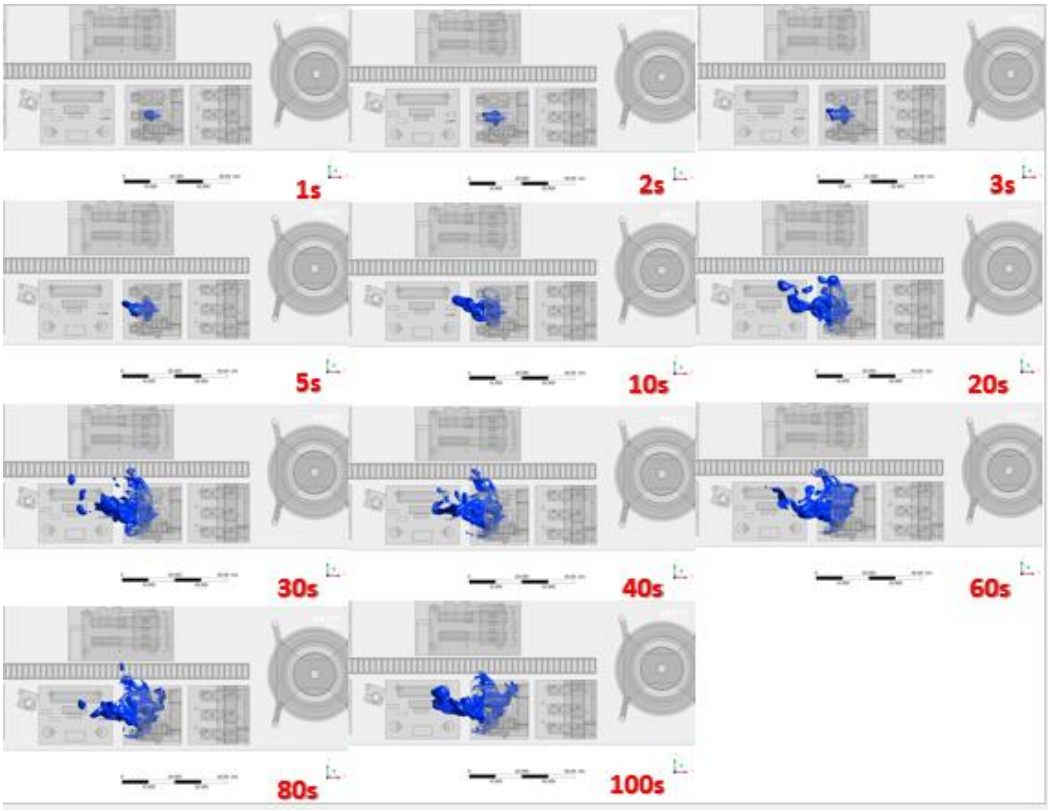

Figura B.7 – Caso 9 vista superior

Caso 10 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em 0°

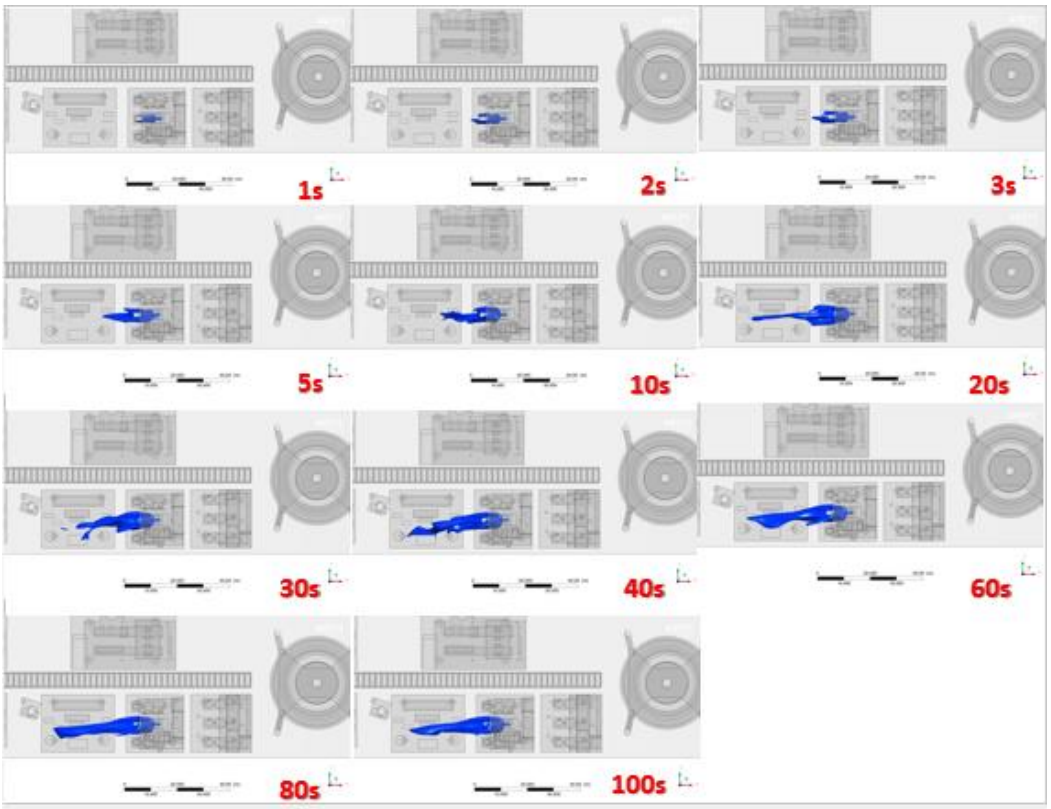

Figura B.8 – Caso 10 vista superior

Caso 11 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em +30°

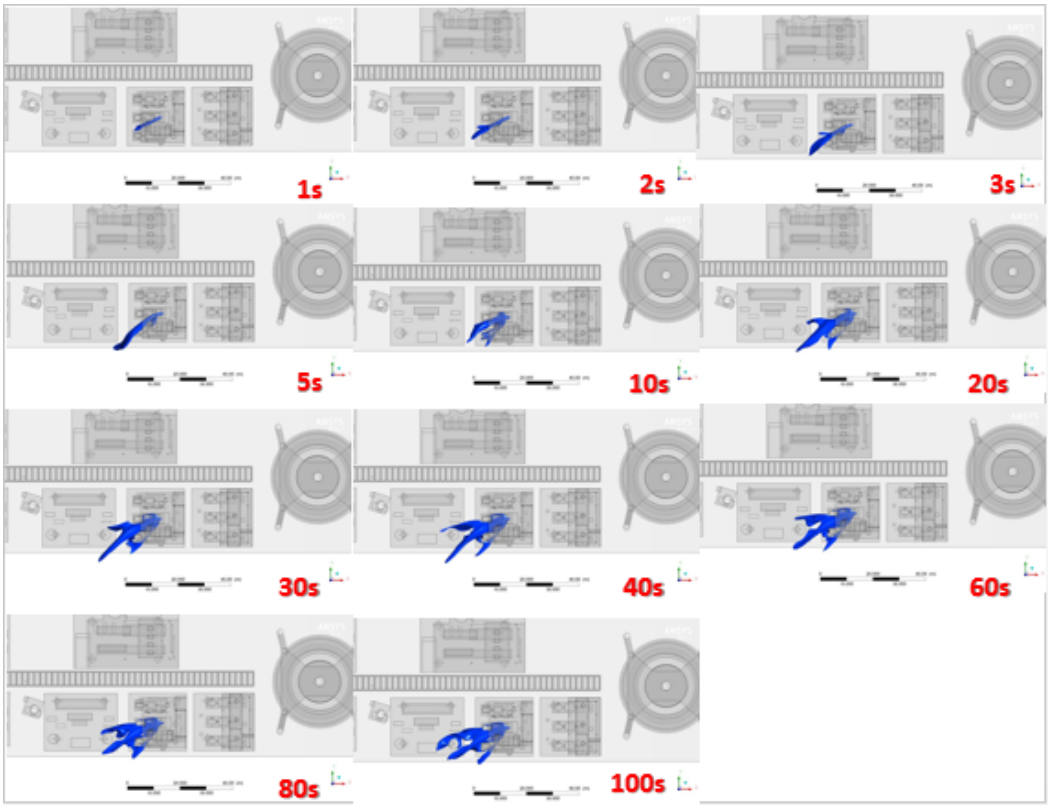

Figura B.9 – Caso 11 vista superior

Caso 12 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em -30°

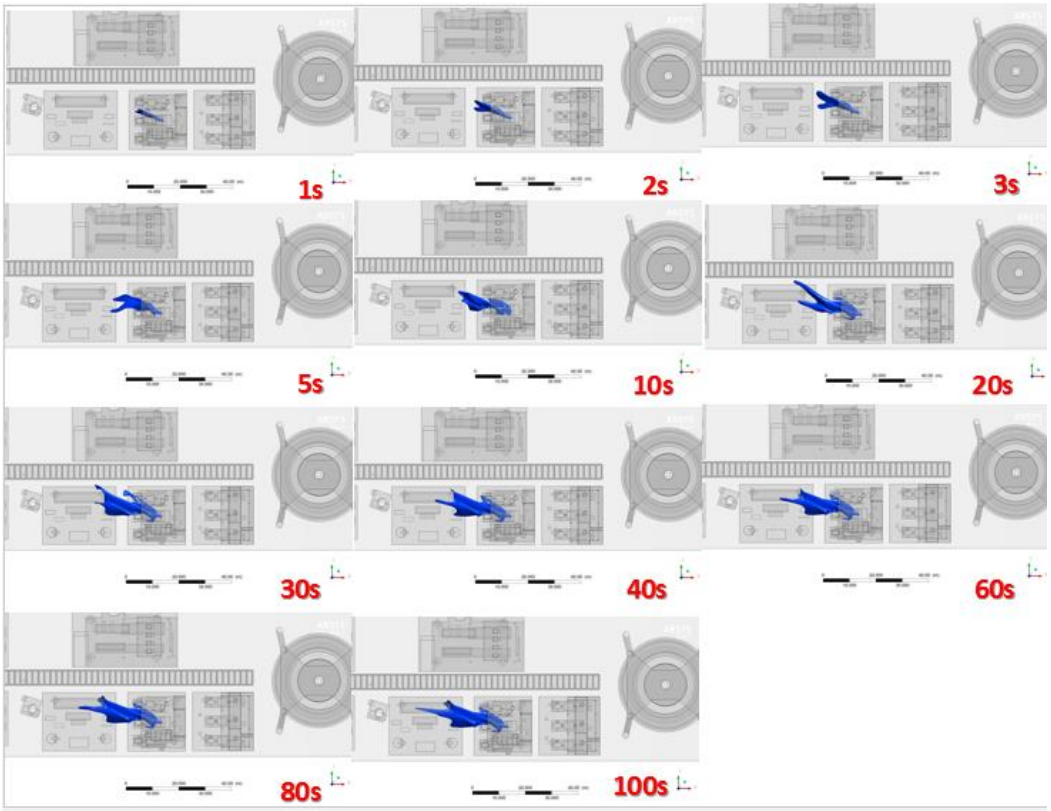

Figura B.10 – Caso 12 vista superior

Caso 14 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em +30°

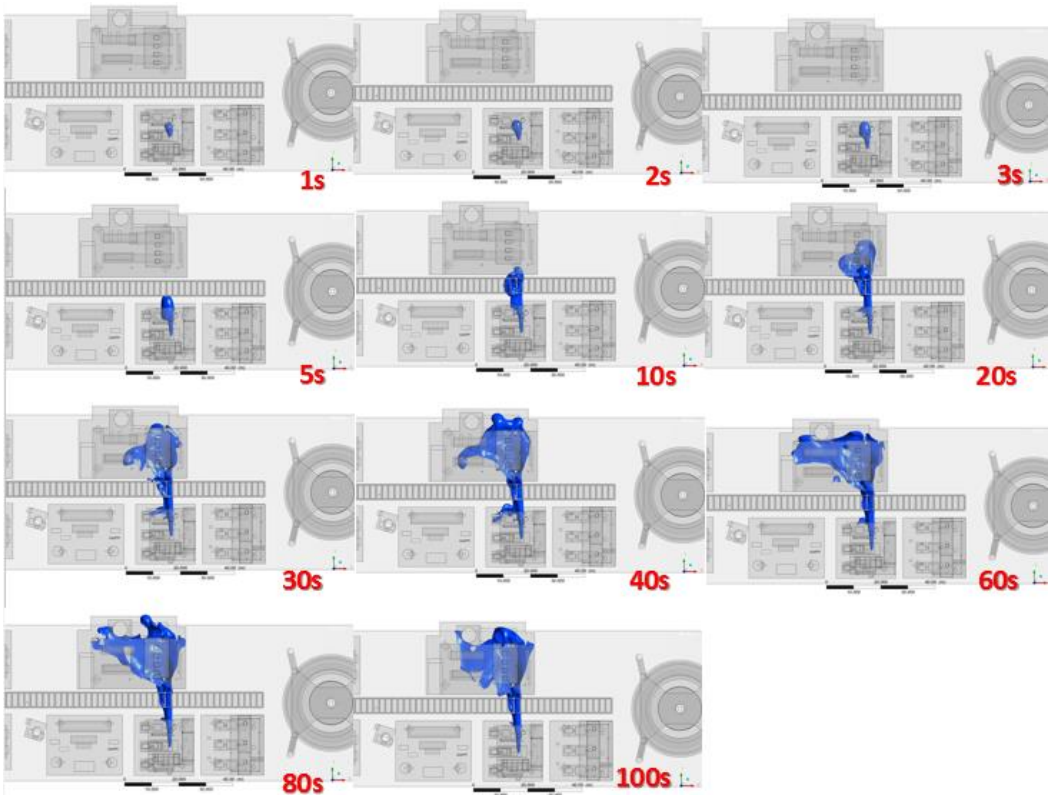

Figura B.11 – Caso 14 vista superior

Caso 15 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em -30°

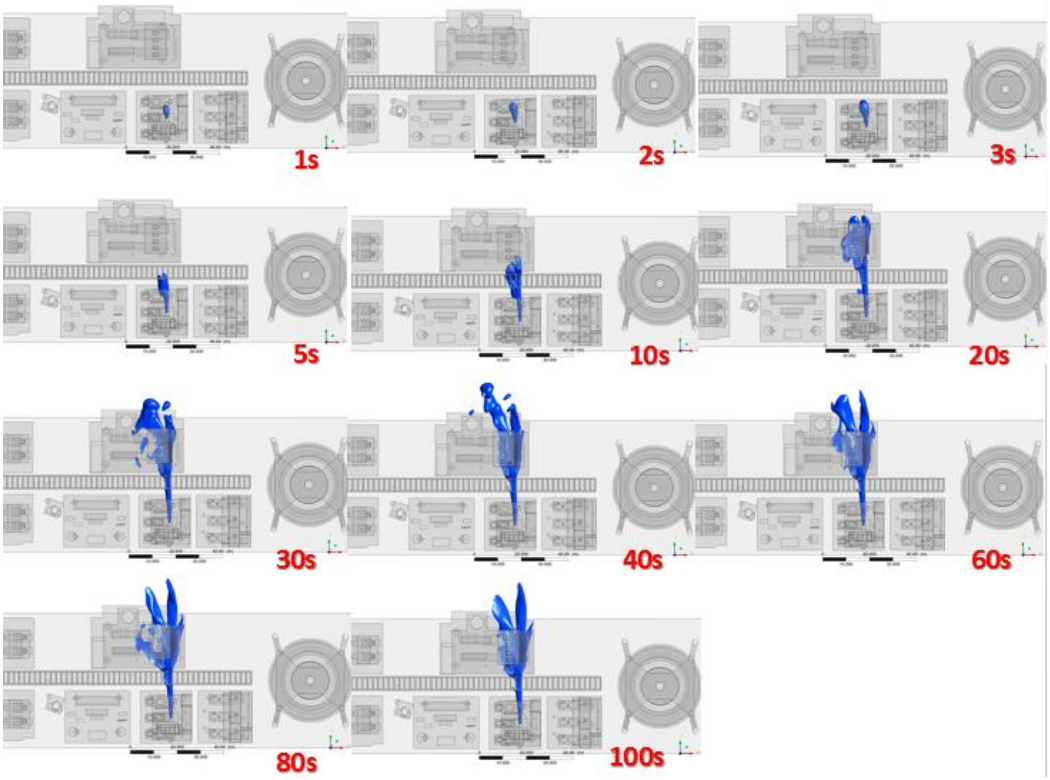

Figura B.12 – Caso 15 vista superior

Caso 16 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em 0°

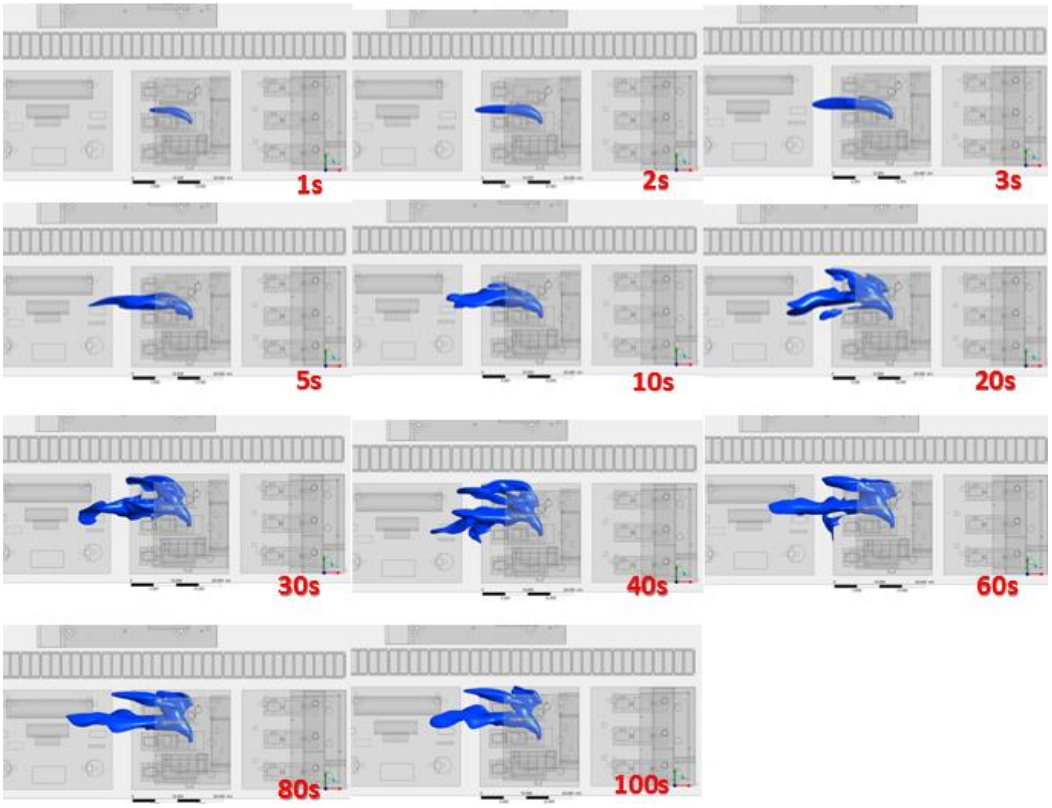

Figura B.13 – Caso 16 vista superior

Caso 17 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em +30°

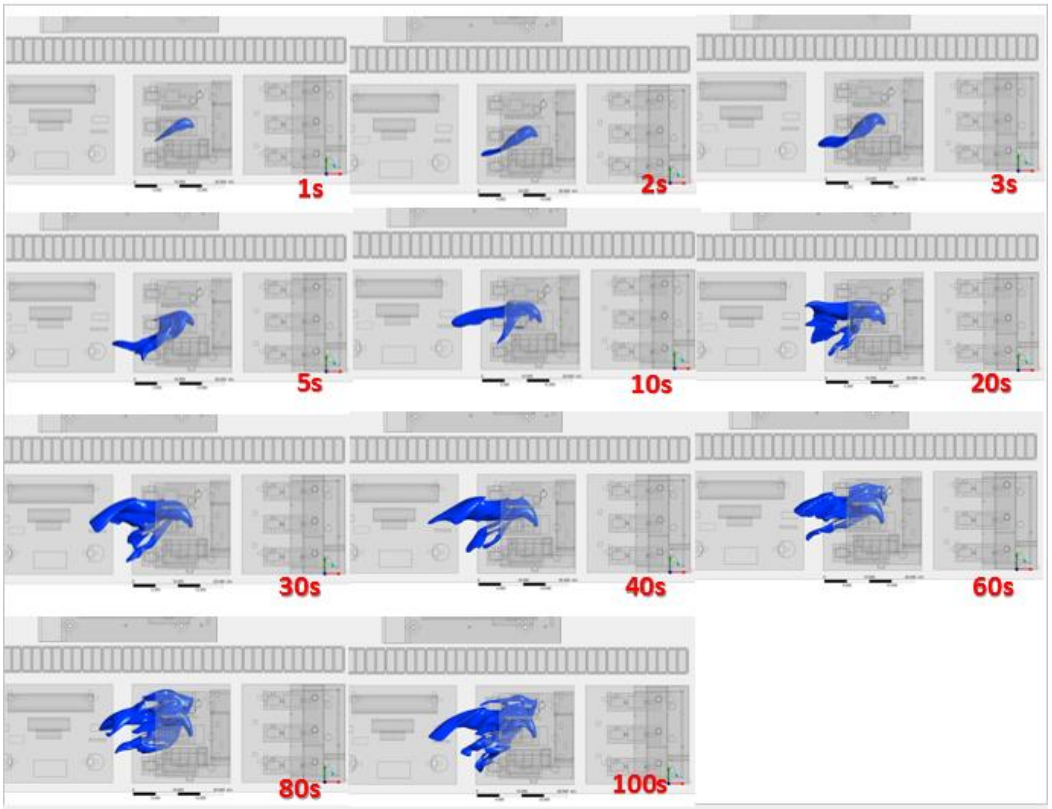

Figura B.14 – Caso 17 vista superior

Caso 18 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em -30°

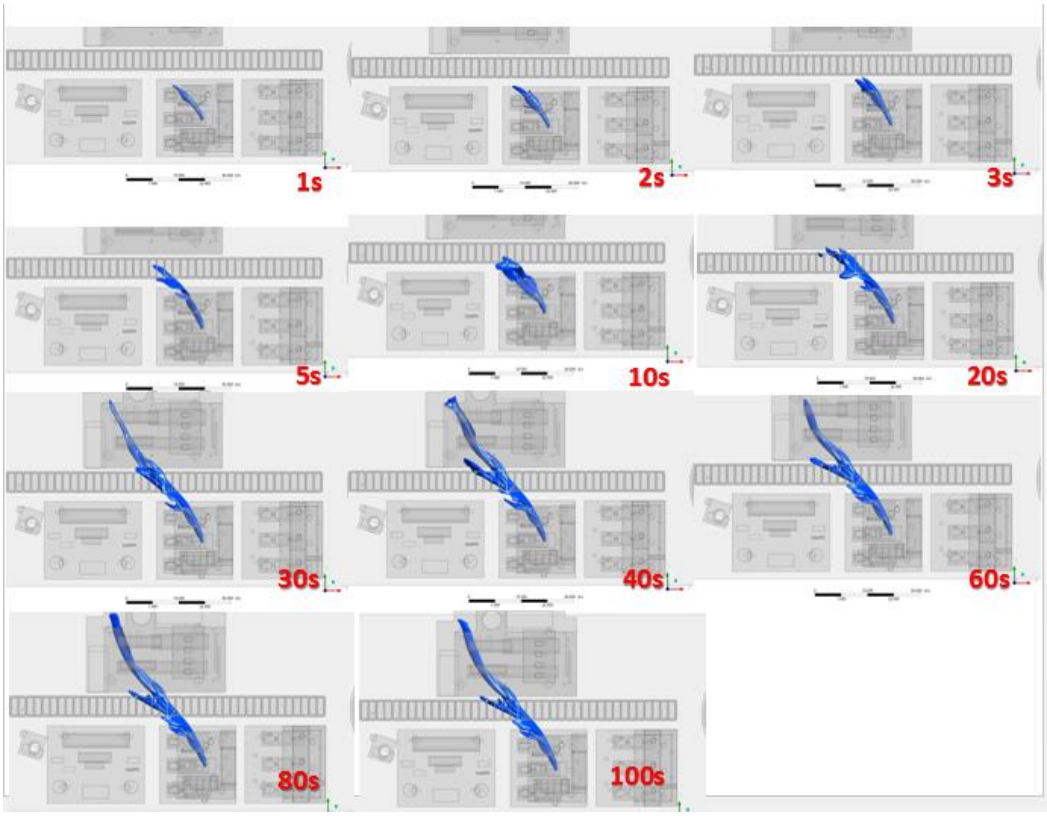

Figura B.15 – Caso 18 vista superior

Caso 19 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em 0°

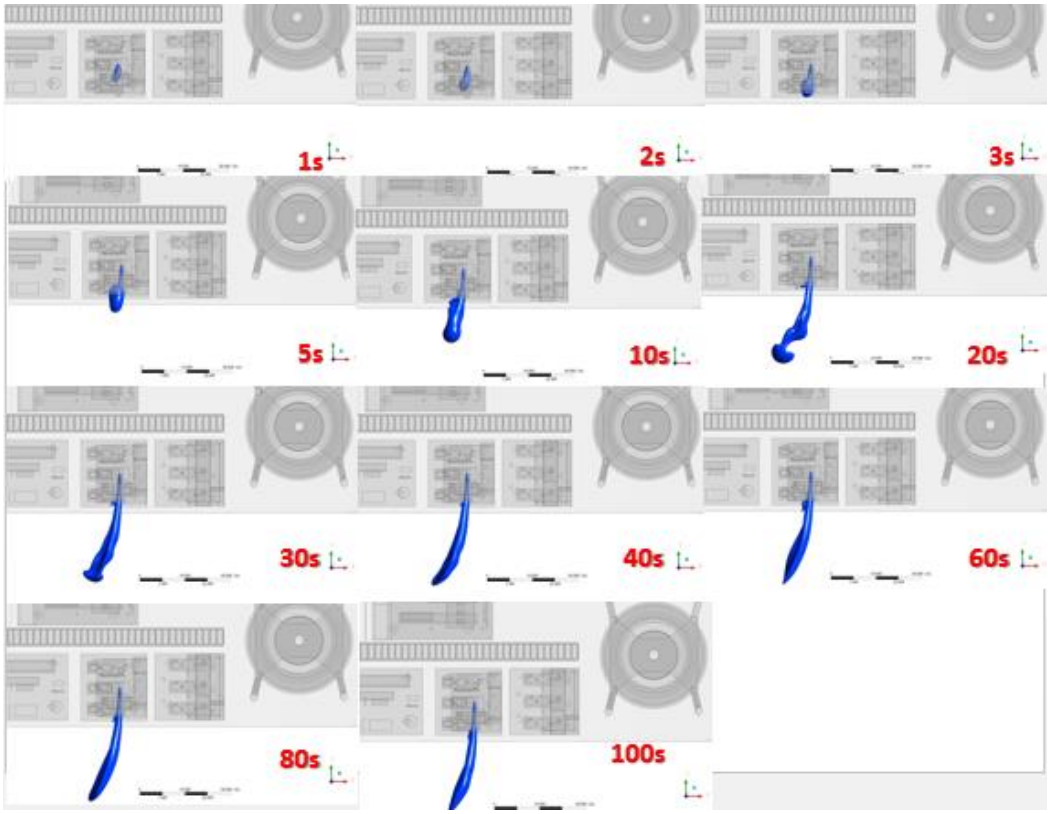

Figura B.16 – Caso 19 vista superior

Caso 20 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em +30°

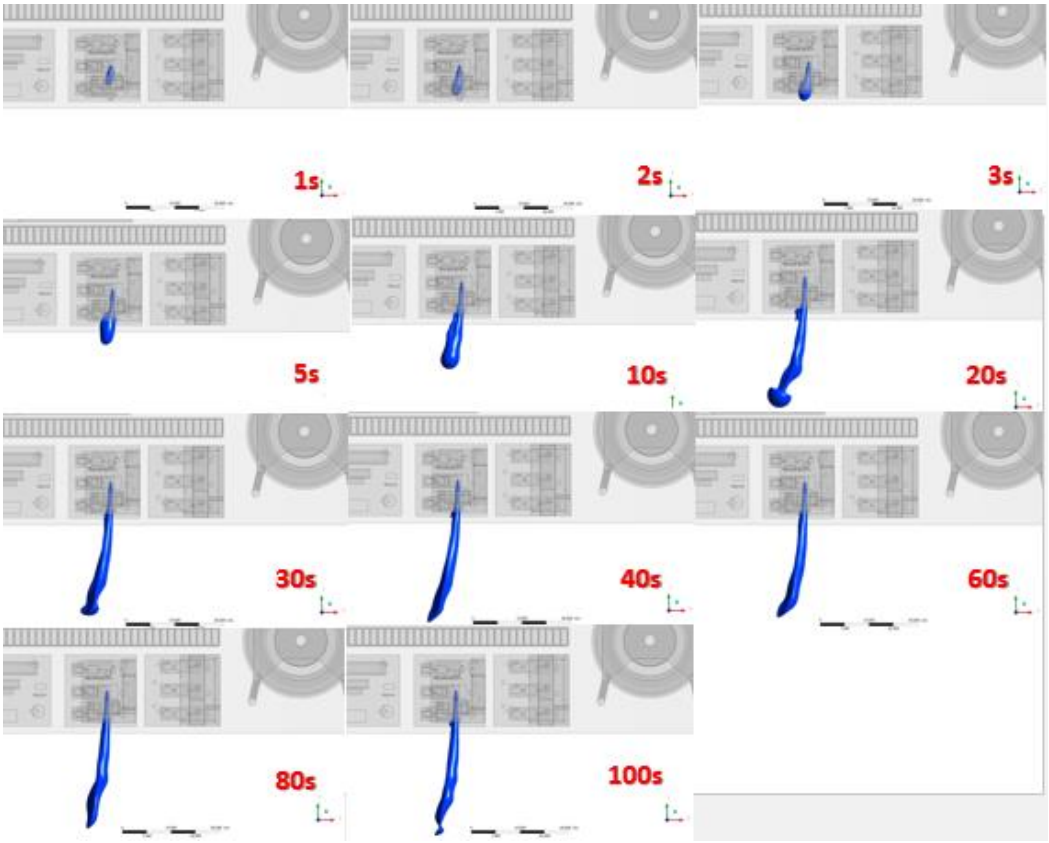

Figura B.17 – Caso 20 vista superior

Caso 21 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em -30°

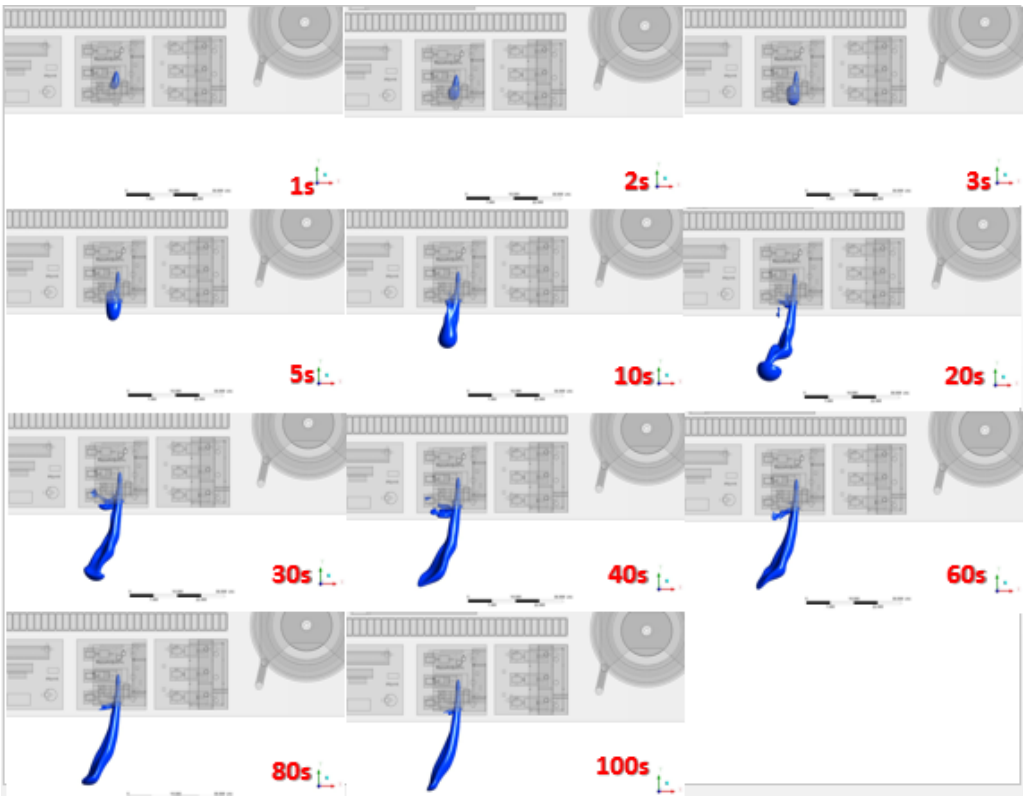

Figura B.18 – Caso 21 vista superior

Caso 22 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em 0°

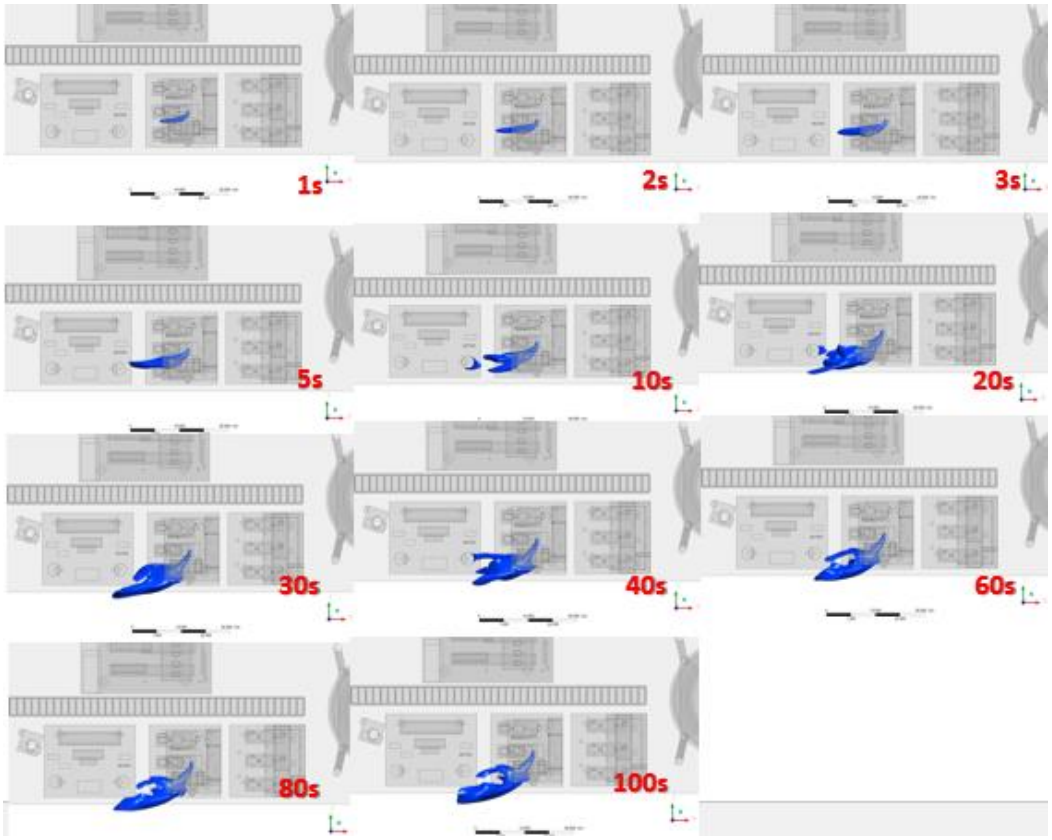

Figura B.19 – Caso 22 vista superior

Caso 23 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em +30°

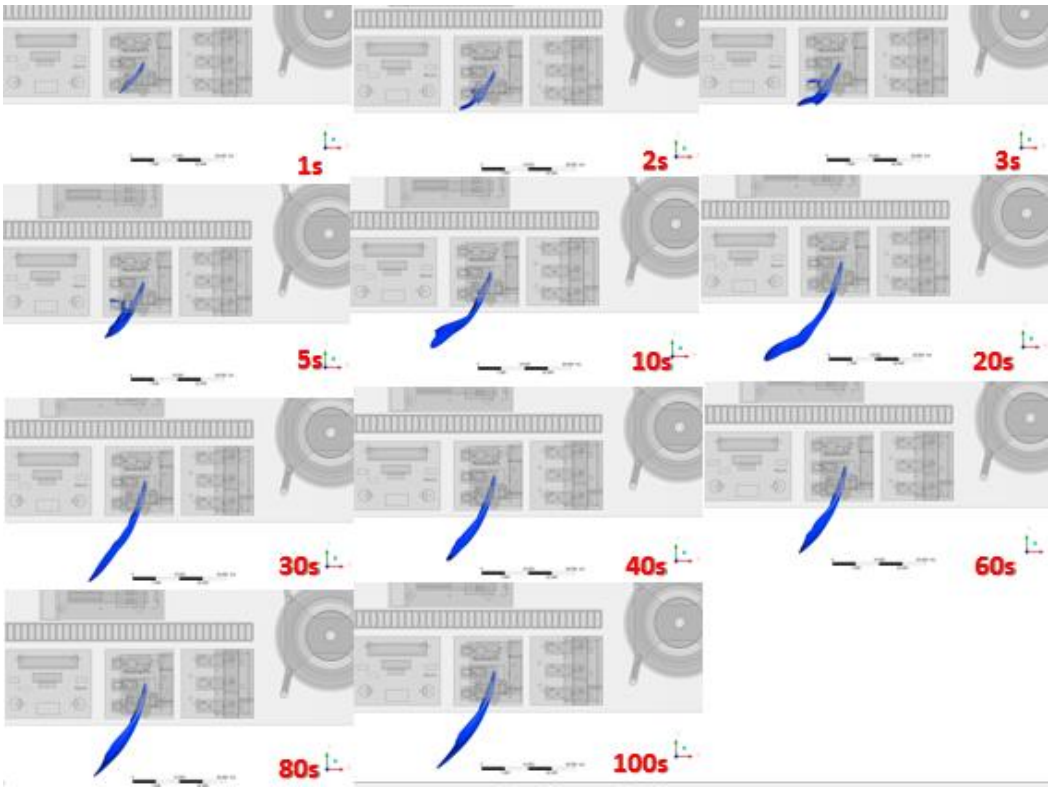

Figura B.20 – Caso 23 vista superior

Caso 25 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em 0°

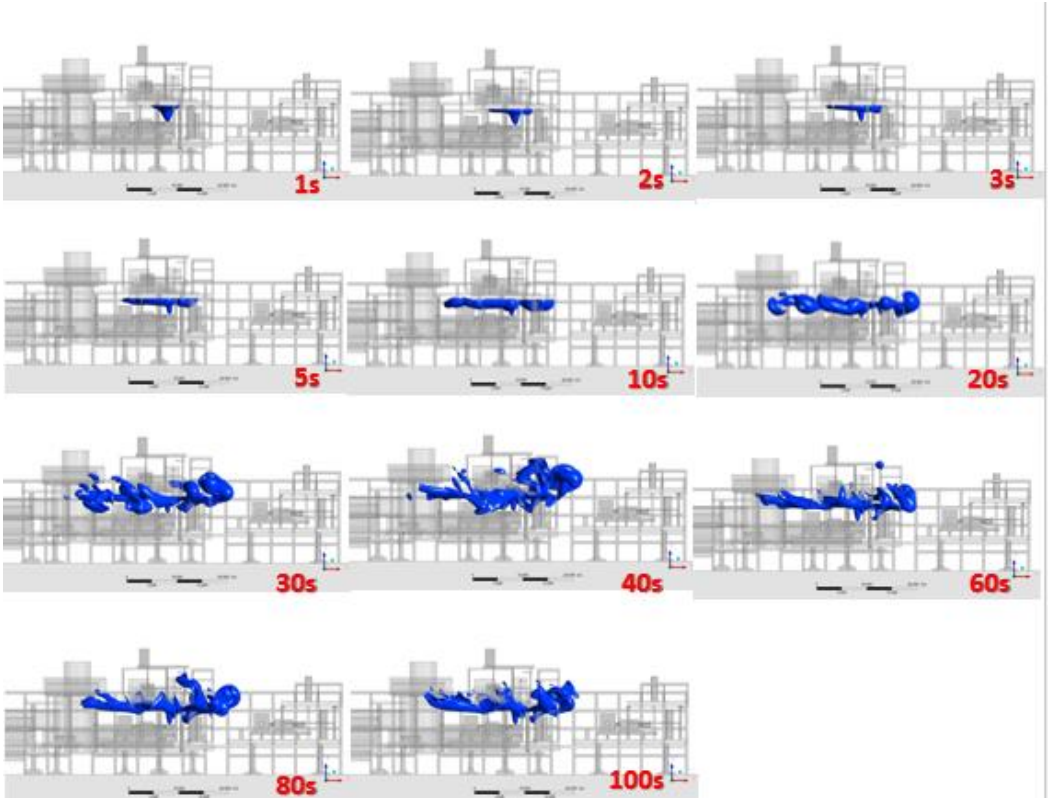

Figura B.21 – Caso 25 vista lateral

Caso 26 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em +30°

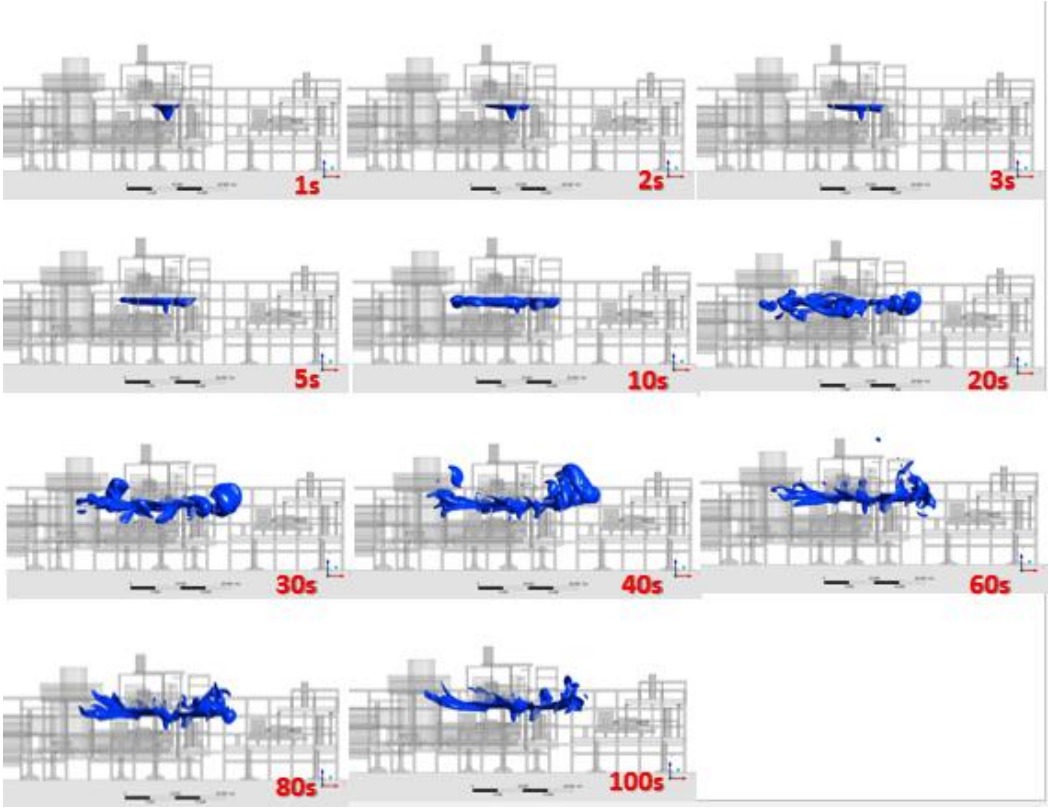

Figura B.22 – Caso 26 vista lateral

Caso 27 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em -30°

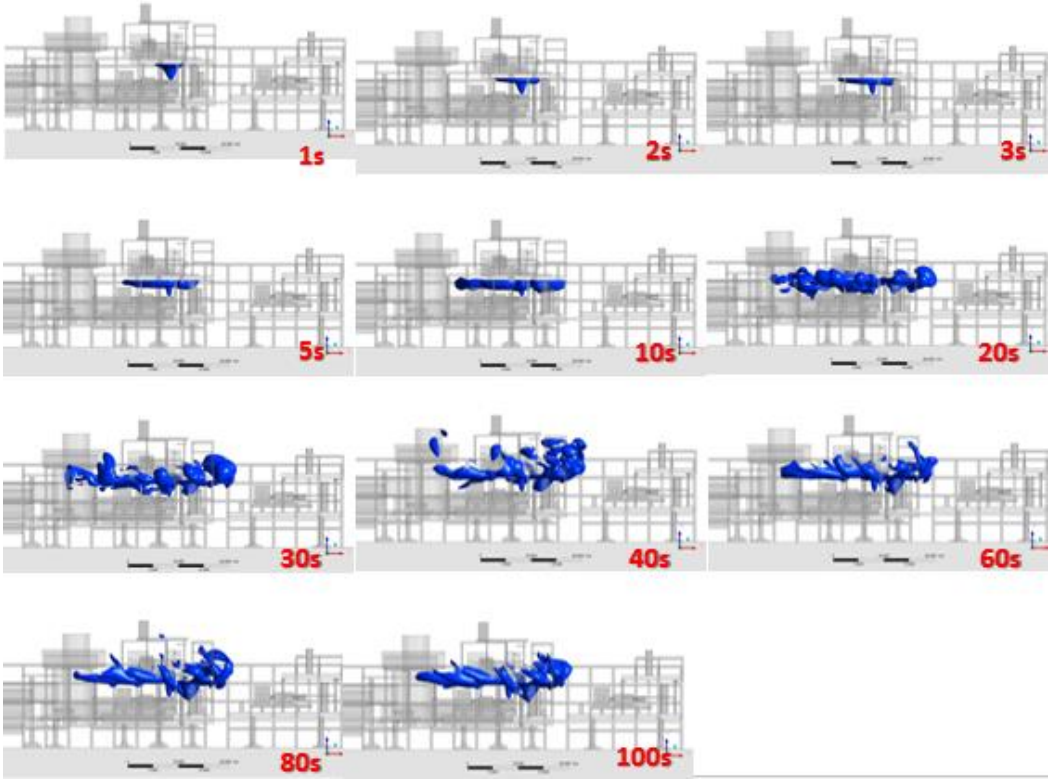

Figura B.23 – Caso 27 vista lateral

Caso 29 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em +30°

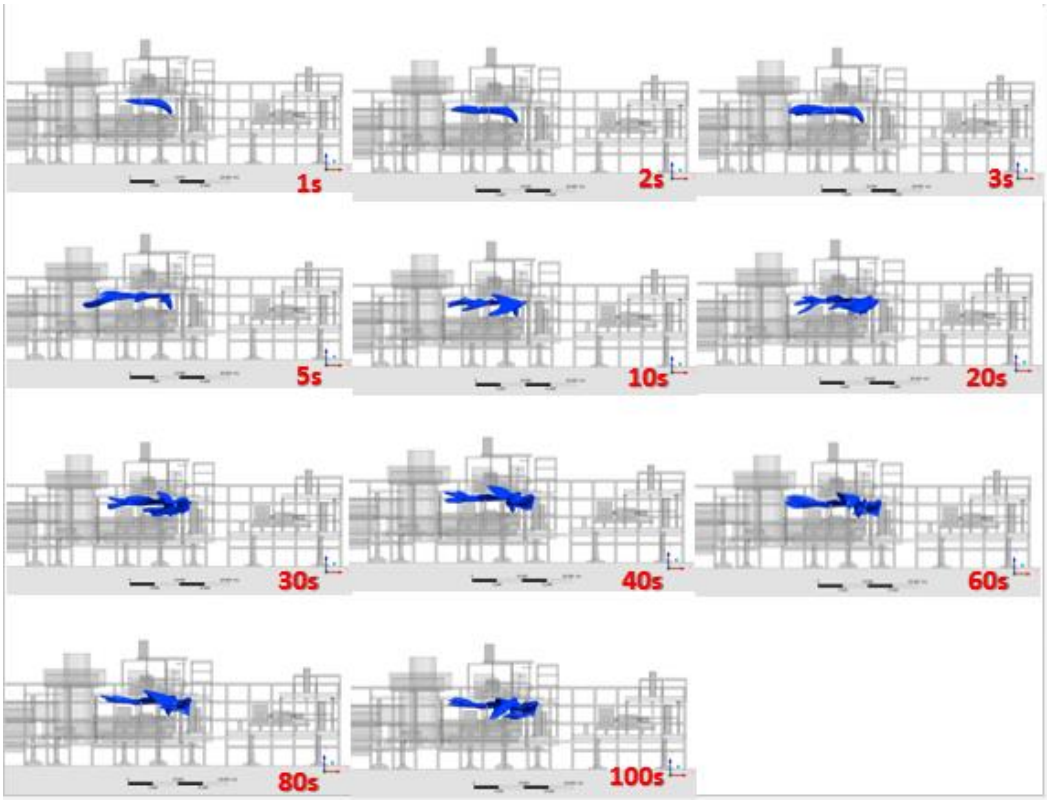

Figura B.24 – Caso 29 vista lateral

Caso 30 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em -30°

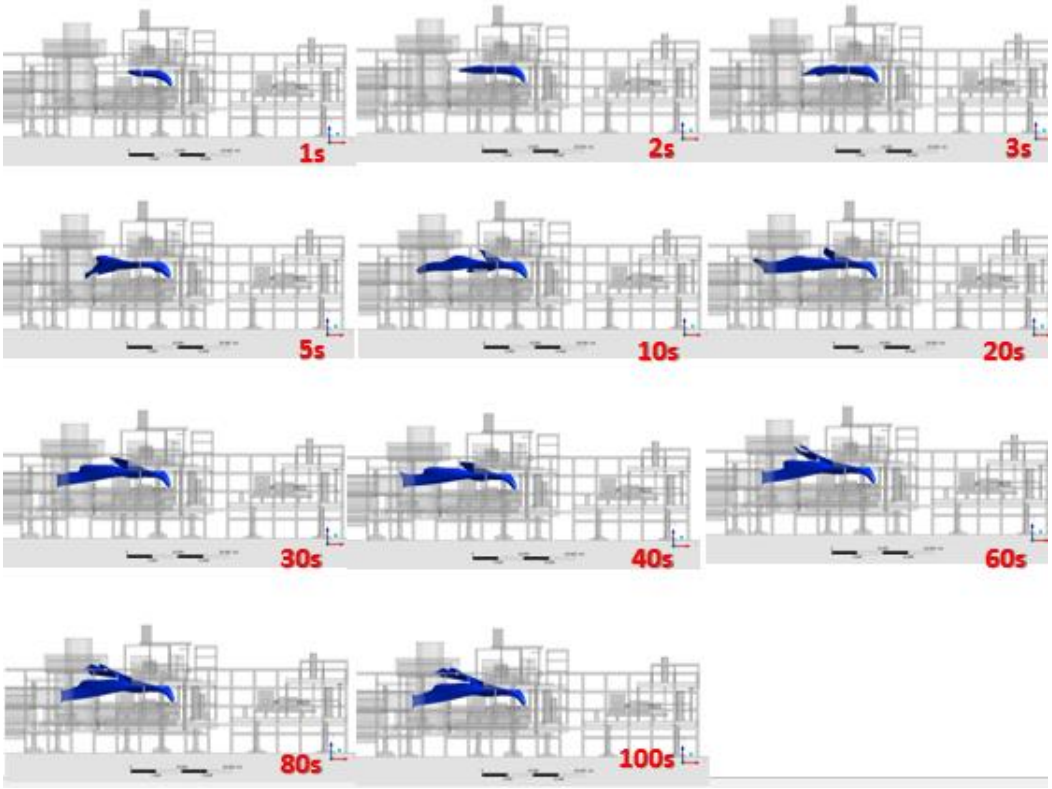

Figura B.25 – Caso 30 vista lateral

Caso 31 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em 0°

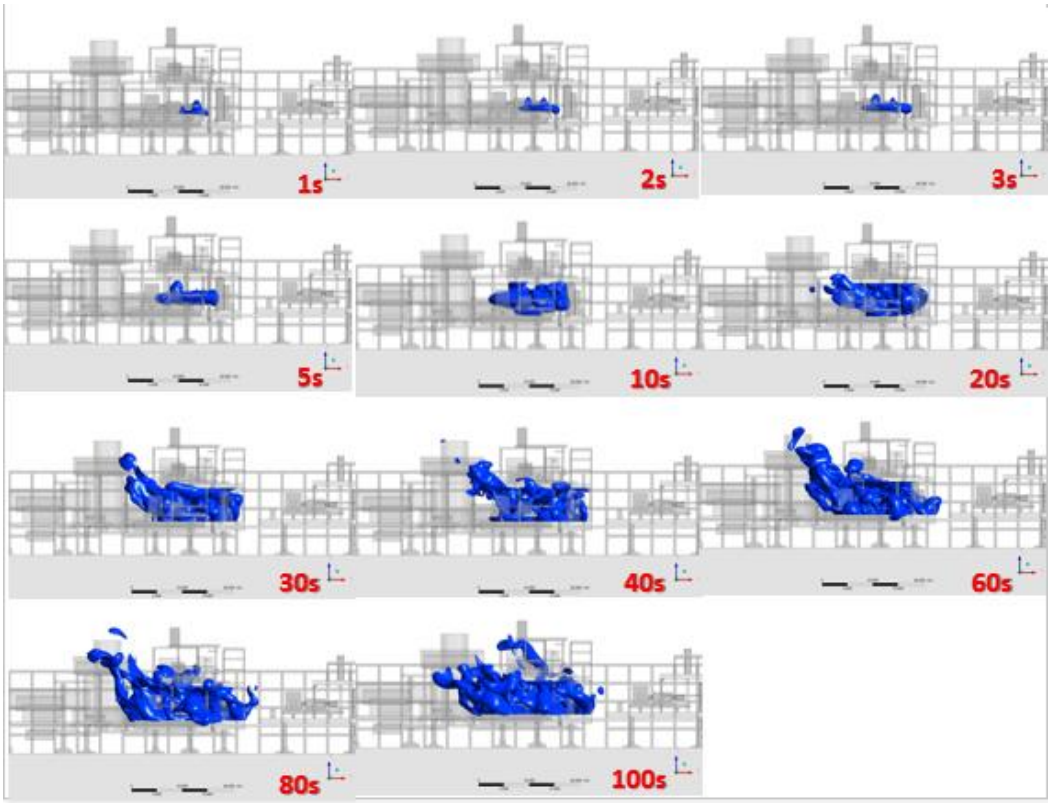

Figura B.26 – Caso 31 vista lateral

Caso 33 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em -30°

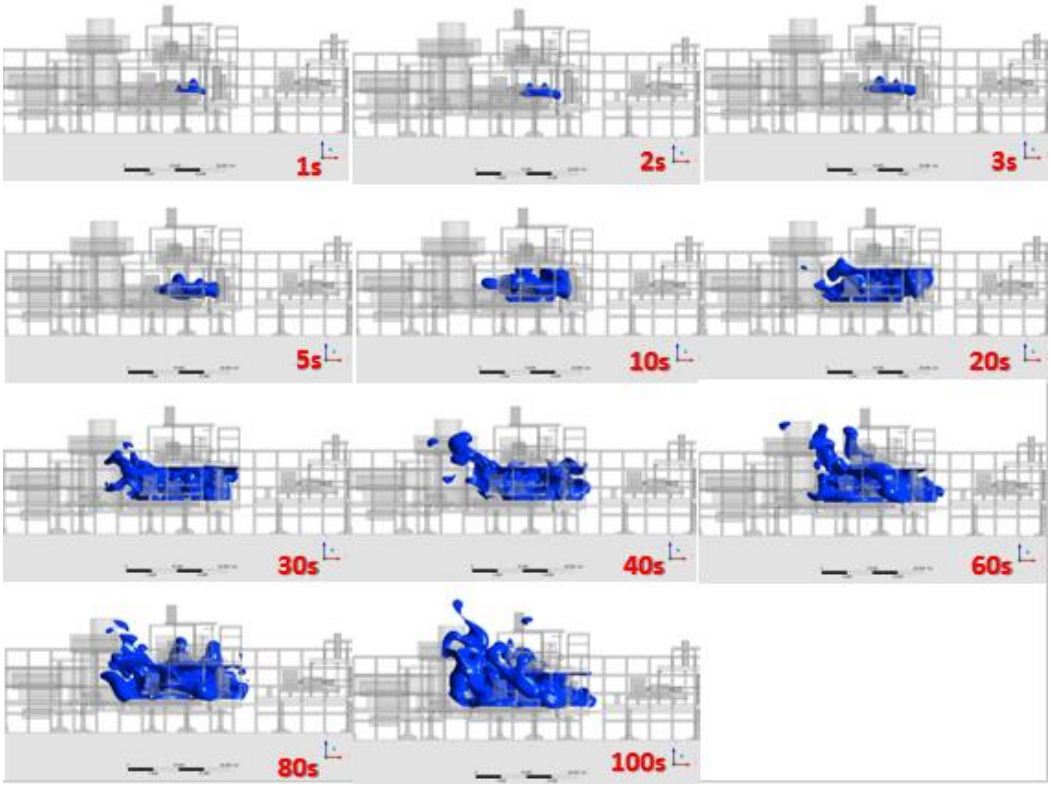

Figura B.27 – Caso 33 vista lateral

Caso 34 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em 0°

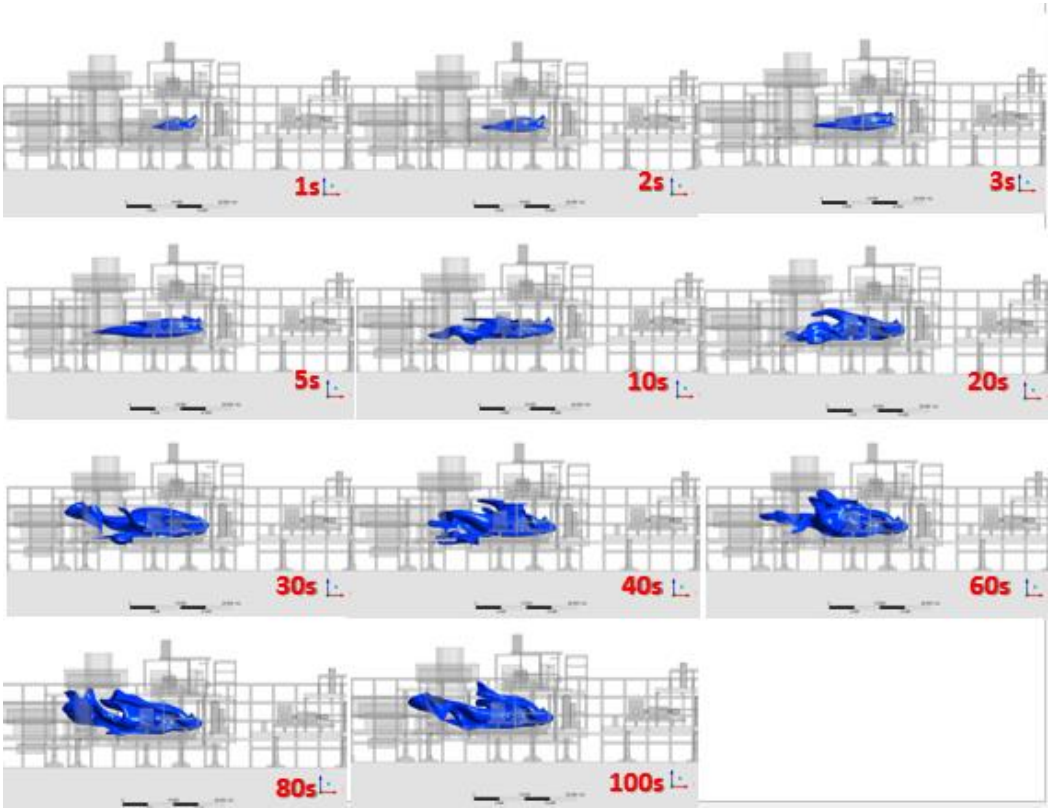

Figura B.28 – Caso 34 vista lateral

Caso 35 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em +30°

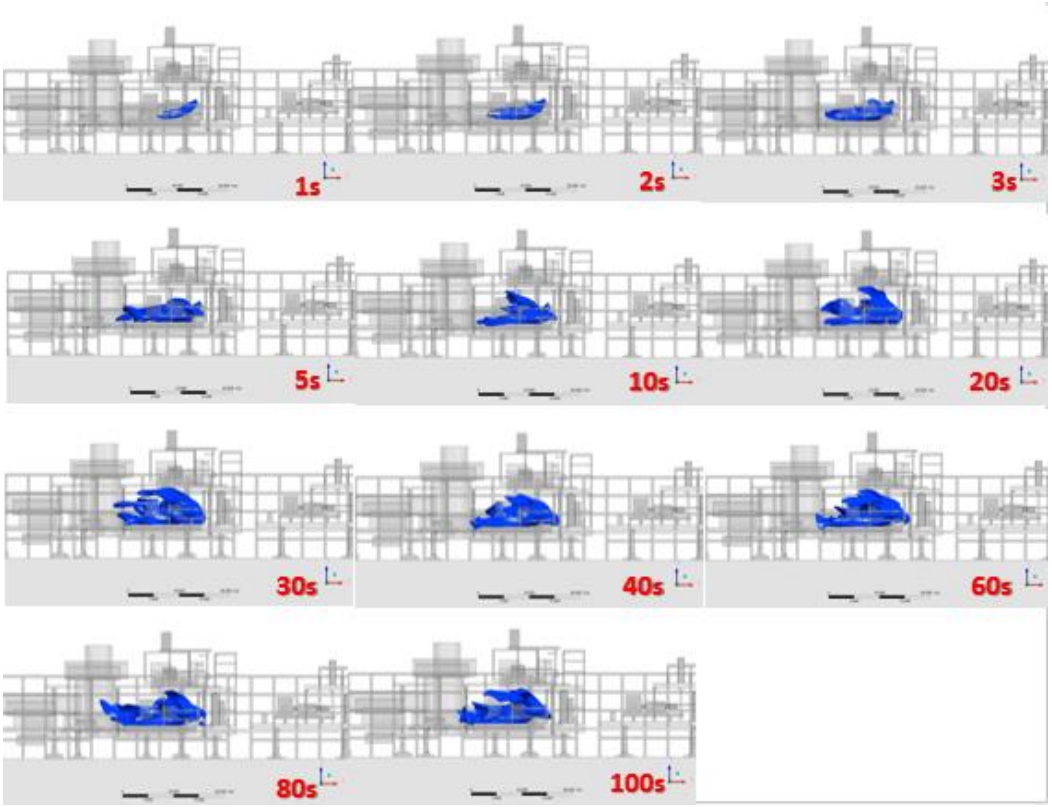

Figura B.29 – Caso 35 vista lateral

Caso 36 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

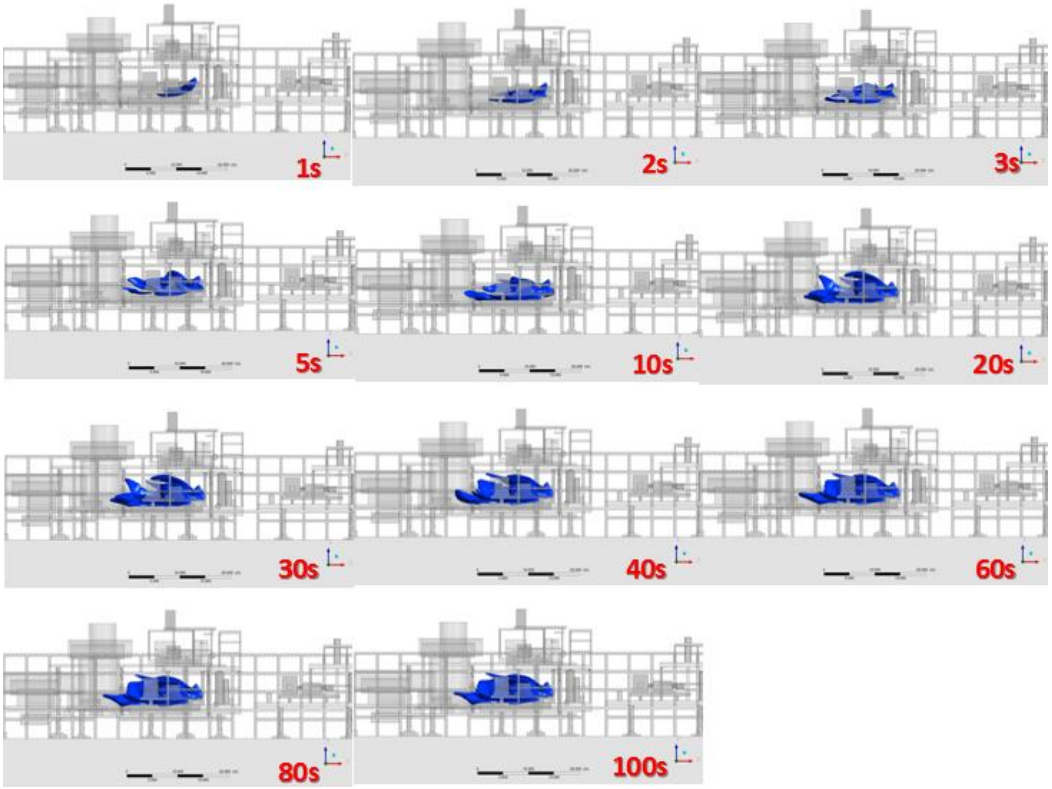

Figura B.30 – Caso 36 vista lateral

C. Resultados Estacionário (densidade local) e (malha adaptativa)

A Figura C.1 até a Figura C.30 apresentam uma pluma na forma de isossuperfície, na concentração (frações volumétricas) de gás referentes ao limite de detectabilidade dos sensores comerciais, iguail a 0,01.

Caso 01 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em 0°

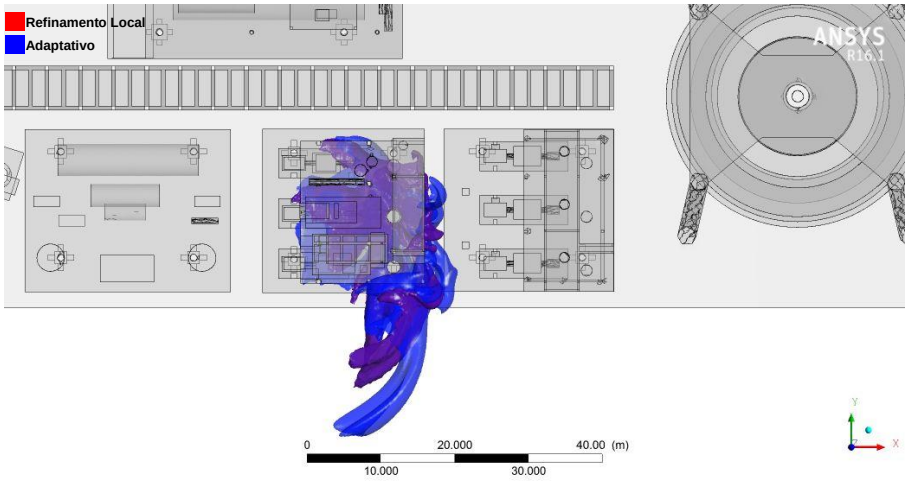

Figura C.1 – Caso 1 vista superior

Caso 02 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em +30°

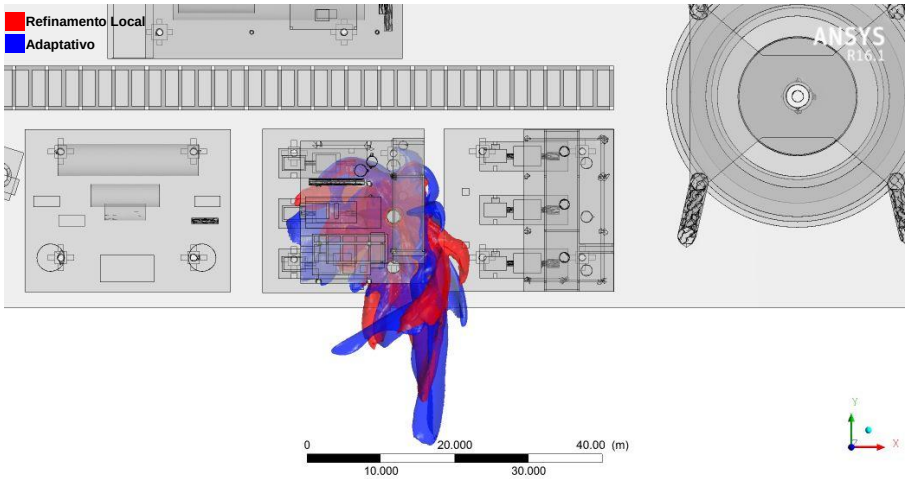

Figura C.2 – Caso 2 vista superior

Caso 03 - Vazamento com jato +X e vento de 0,5 m/s em -30°

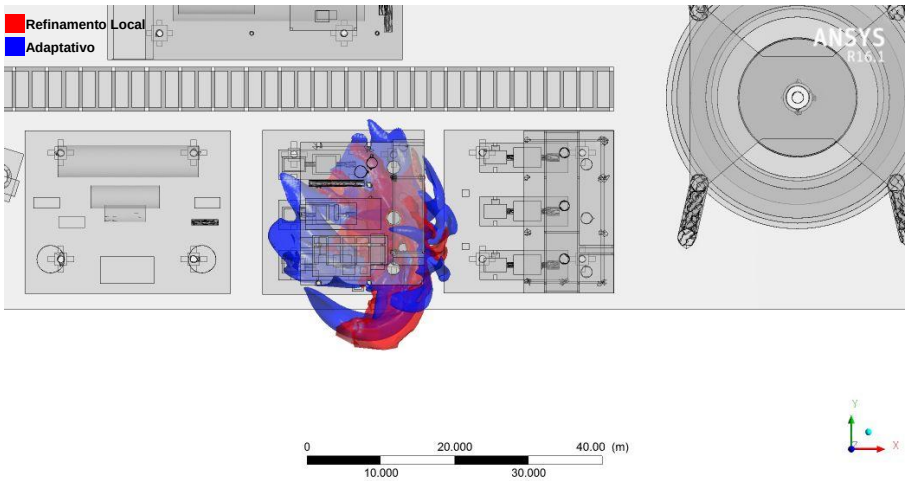

Figura C.3 – Caso 3 vista superior

Caso 04 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em 0°

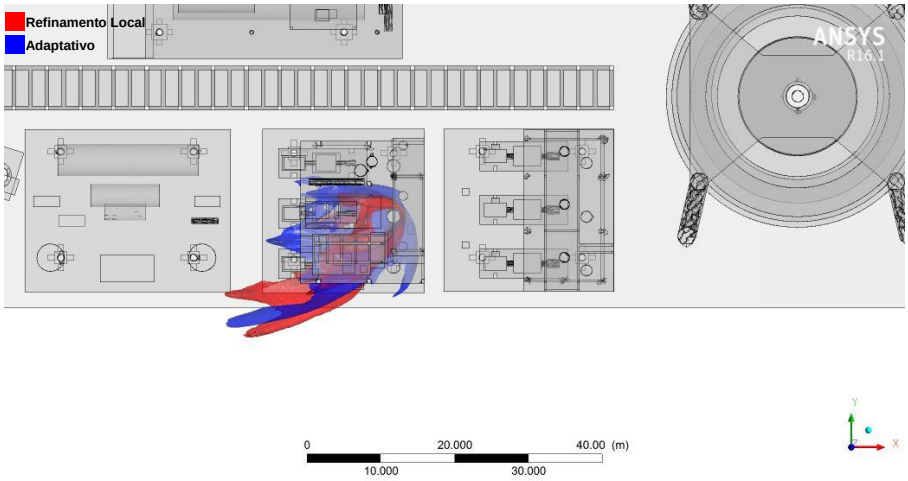

Figura C.4 – Caso 4 vista superior

Caso 05 - Vazamento com jato +X e vento de 6,5 m/s em +30°

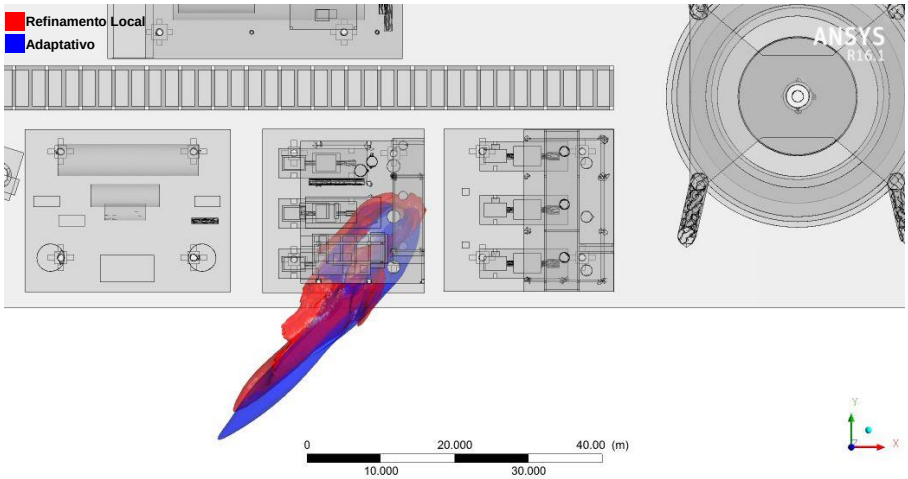

Figura C.5 – Caso 5 vista superior

Caso 08 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em +30°

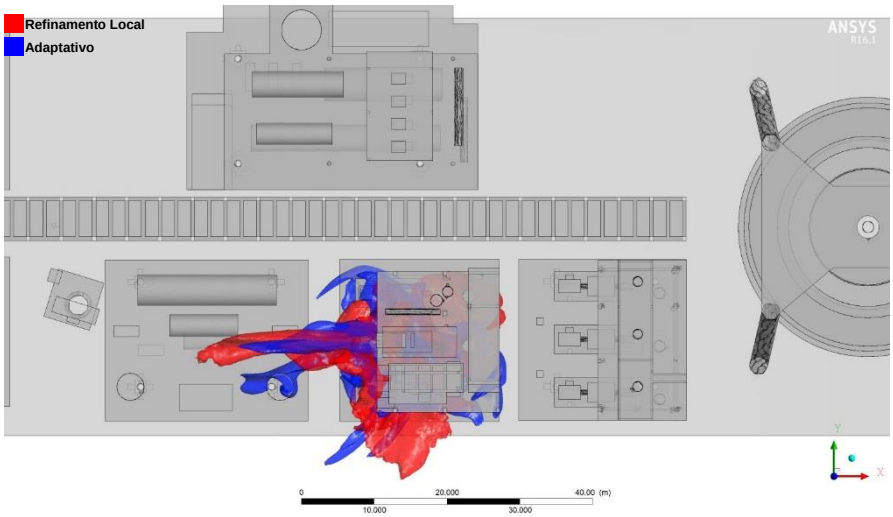

Figura C.6 – Caso 8 vista superior

Caso 09 - Vazamento com jato -X e vento de 0,5 m/s em -30°

Figura C.7 – Caso 9 vista superior

Caso 10 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em 0°

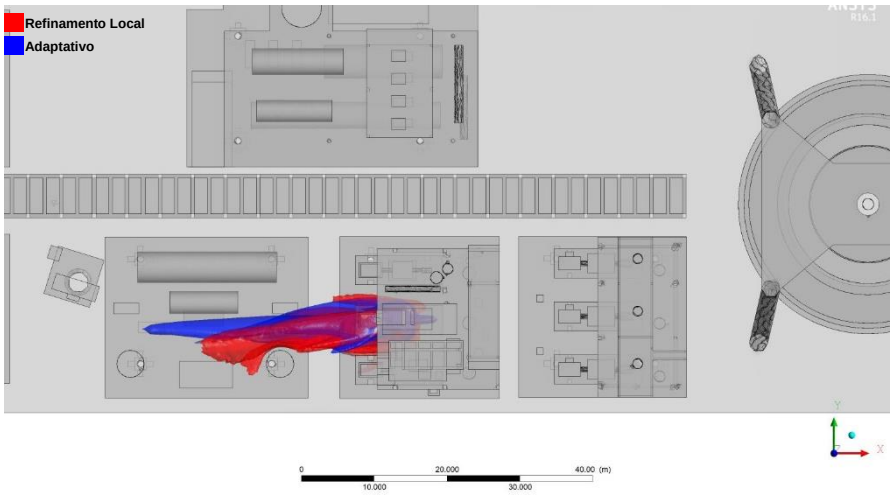

Figura C.8 – Caso 10 vista superior

Caso 11 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em +30°

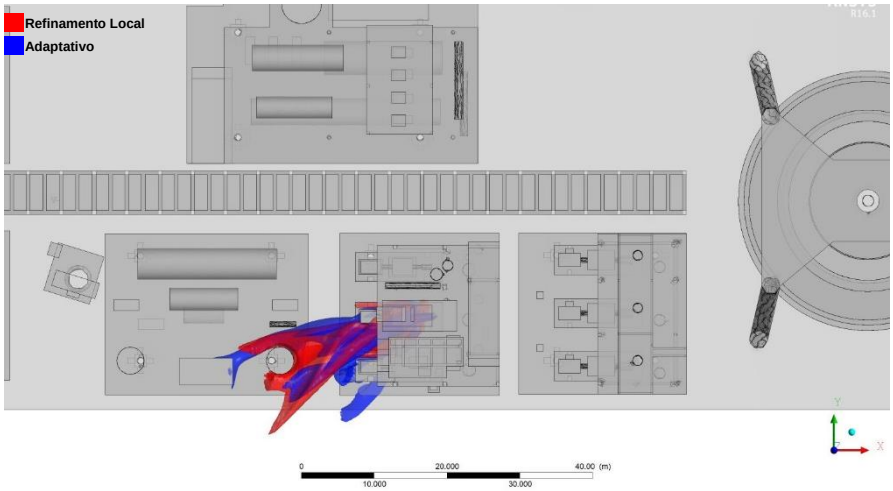

Figura C.9 – Caso 11 vista superior

Caso 12 - Vazamento com jato -X e vento de 6,5 m/s em -30°

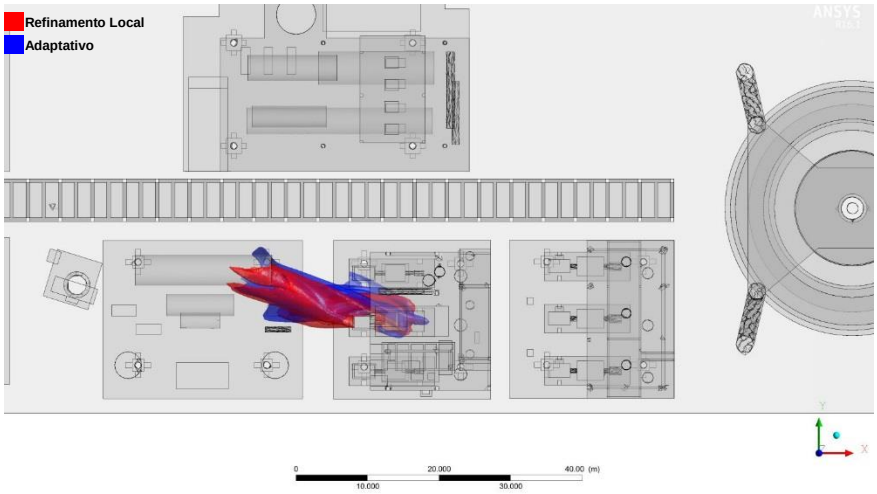

Figura C.10 – Caso 12 vista superior

Caso 14 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em +30°

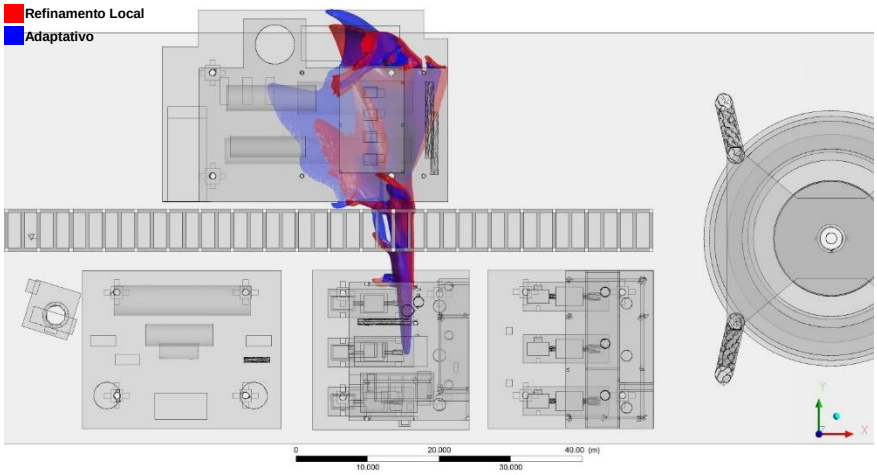

Figura C.11 – Caso 14 vista superior

Caso 15 - Vazamento com jato +Y e vento de 0,5 m/s em -30°

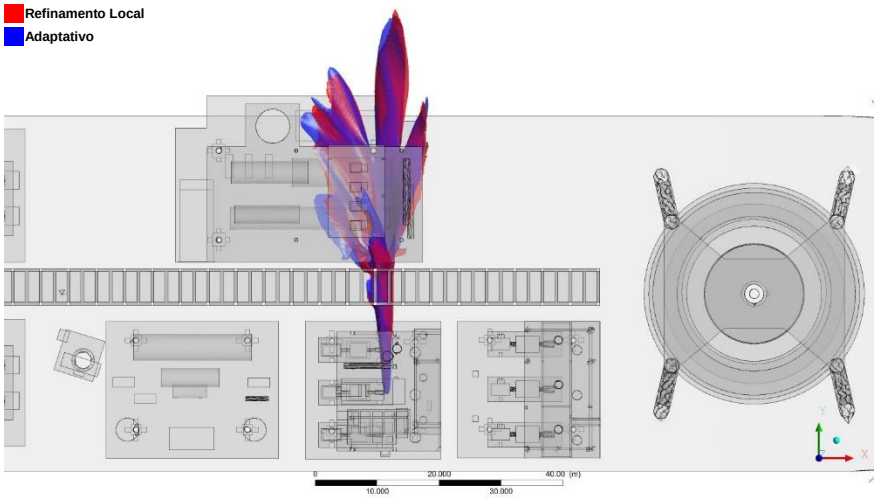

Figura C.12 – Caso 15 vista superior

Caso 16 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em 0°

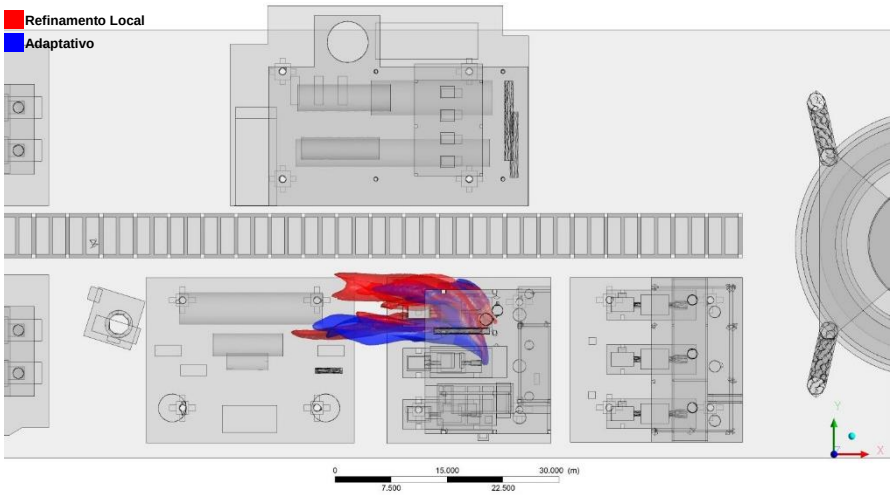

Figura C.13 – Caso 16 vista superior

Caso 17 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em +30°

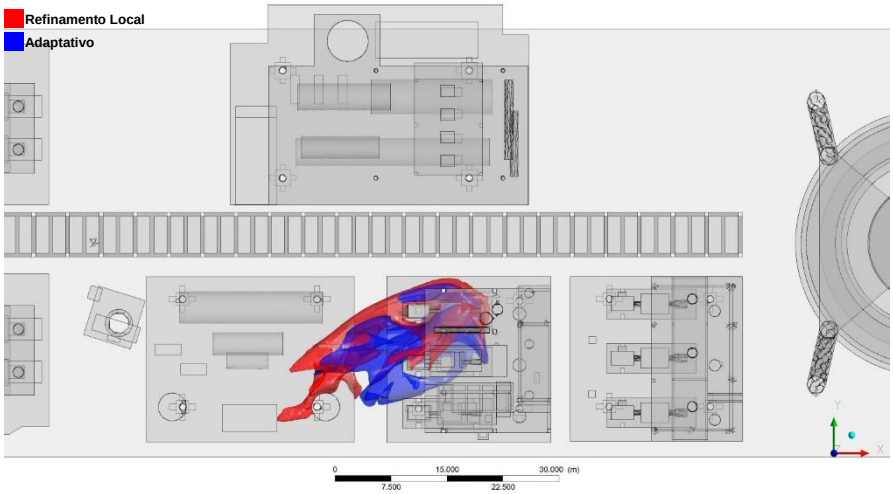

Figura C.14 – Caso 17 vista superior

Caso 18 - Vazamento com jato +Y e vento de 6,5 m/s em -30°

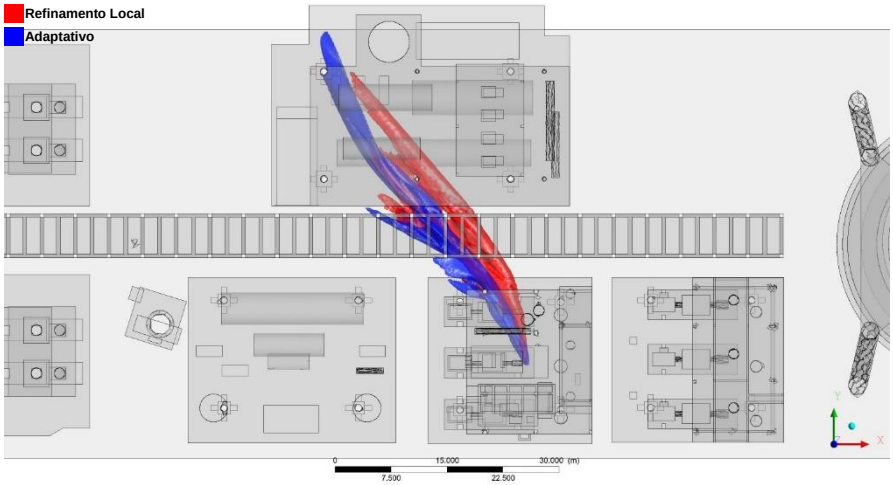

Figura C.15 – Caso 18 vista superior

Caso 19 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em 0°

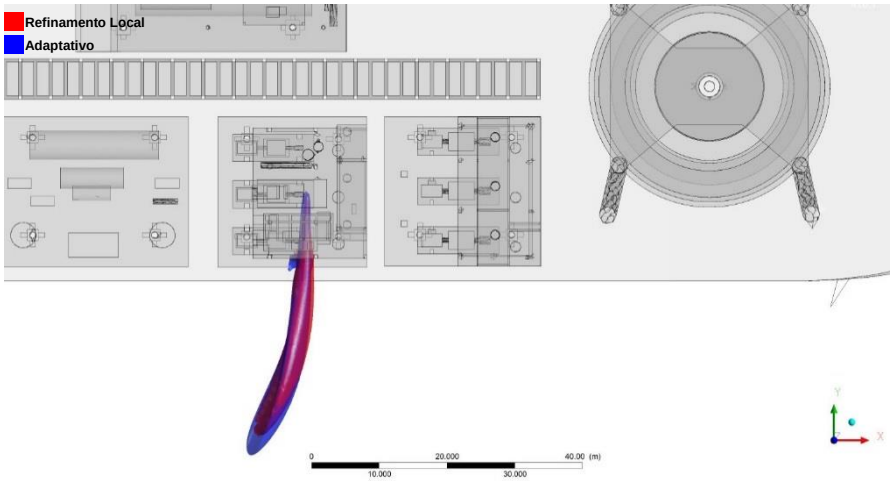

Figura C.16 – Caso 19 vista superior

Caso 20 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em +30°

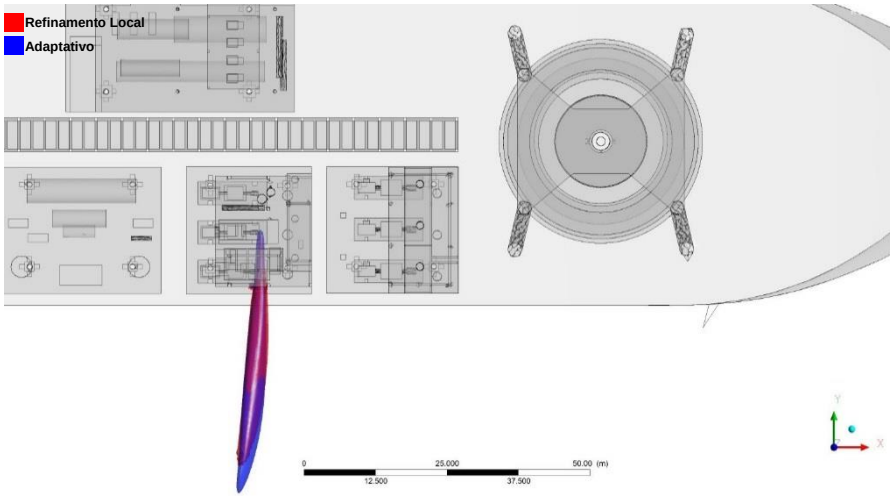

Figura C.17 – Caso 20 vista superior

Caso 21 - Vazamento com jato -Y e vento de 0,5 m/s em -30°

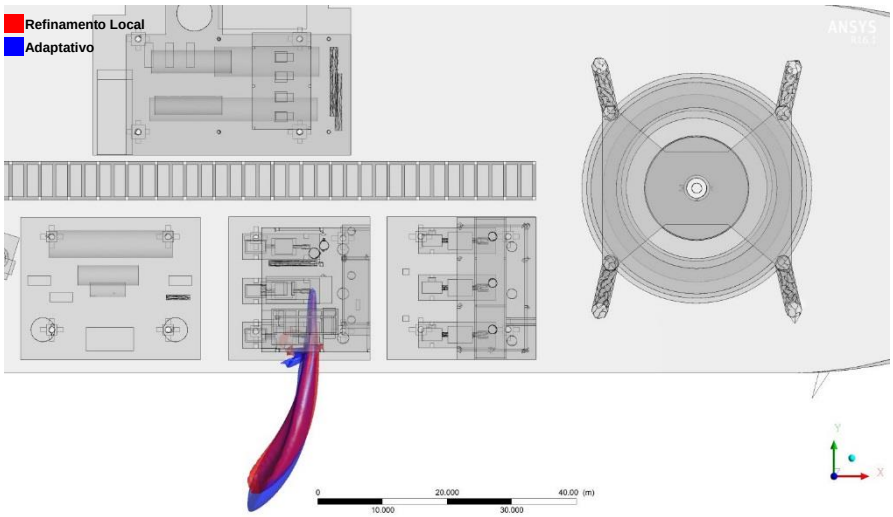

Figura C.18 – Caso 21 vista superior

Caso 22 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em 0°

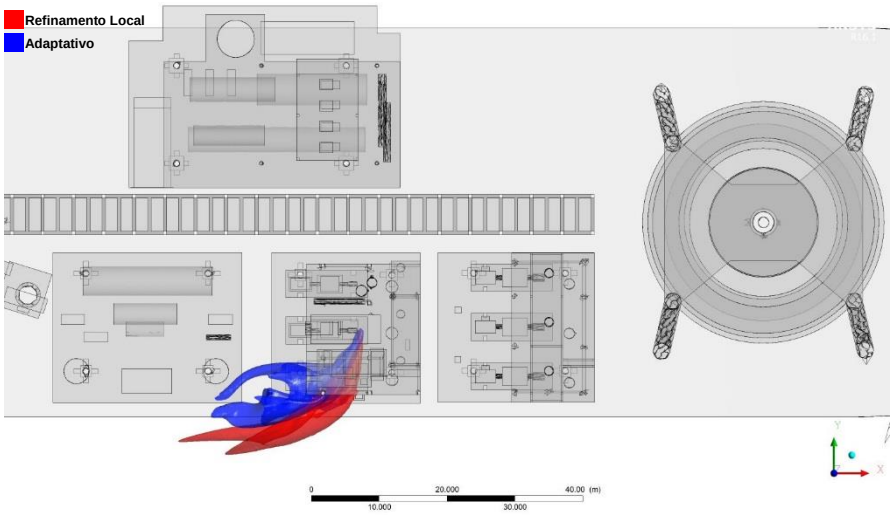

Figura C.19 – Caso 22 vista superior

Caso 23 - Vazamento com jato -Y e vento de 6,5 m/s em +30°

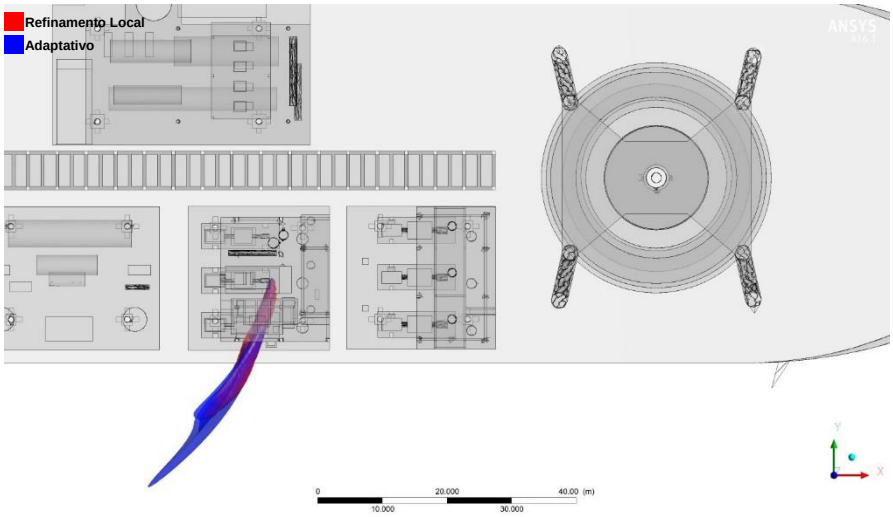

Figura C.20 – Caso 23 vista superior

Caso 25 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em 0°

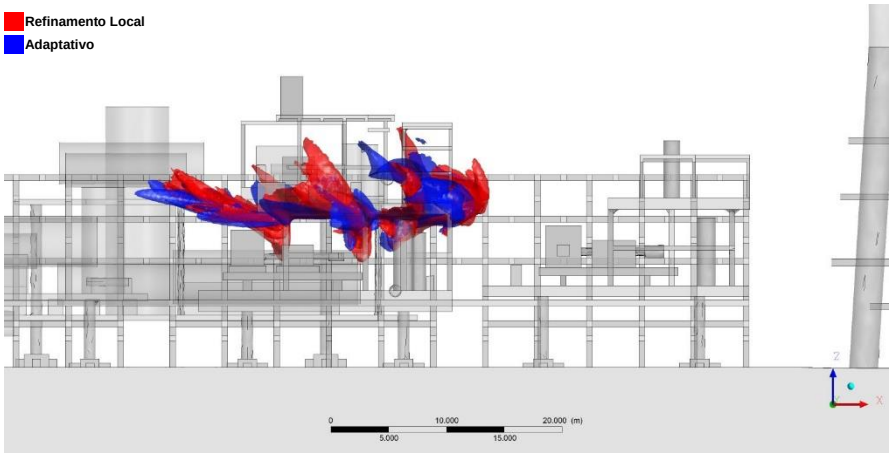

Figura C.21 – Caso 25 vista superior

Caso 26 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em +30°

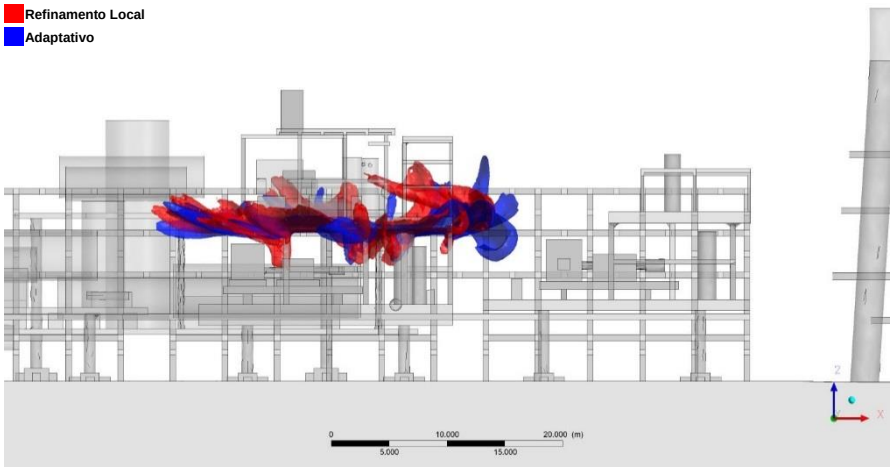

Figura C.22 – Caso 26 vista superior

Caso 27 - Vazamento com jato +Z e vento de 0,5 m/s em -30°

Figura C.23 – Caso 27 vista superior

Caso 29 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em +30°

Figura C.24 – Caso 29 vista superior

Caso 30 - Vazamento com jato +Z e vento de 6,5 m/s em -30°

Figura C.25 – Caso 30 vista superior

Caso 31 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em 0°

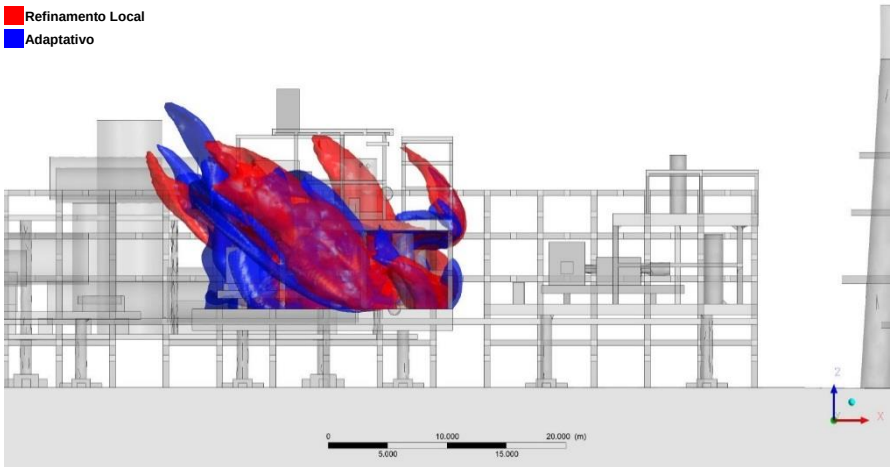

Figura C.26 – Caso 31 vista superior

Caso 33 - Vazamento com jato -Z e vento de 0,5 m/s em -30°

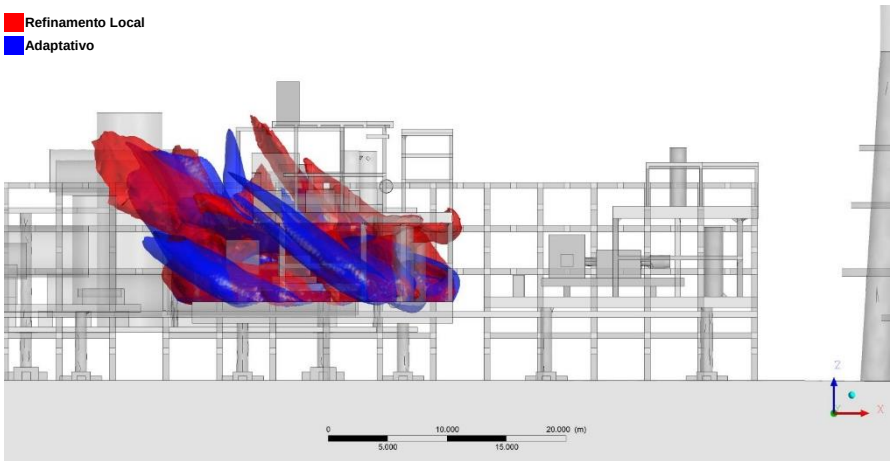

Figura C.27 – Caso 33 vista superior

Caso 34 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em 0°

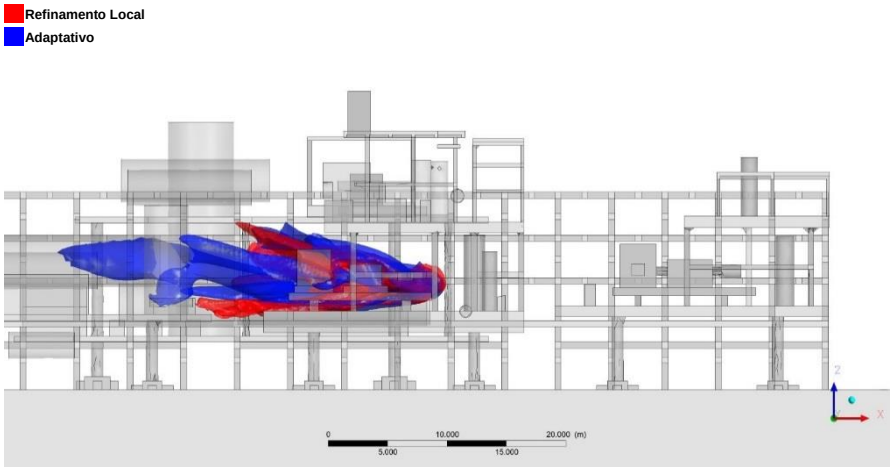

Figura C.28 – Caso 34 vista superior

Caso 35 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em +30°

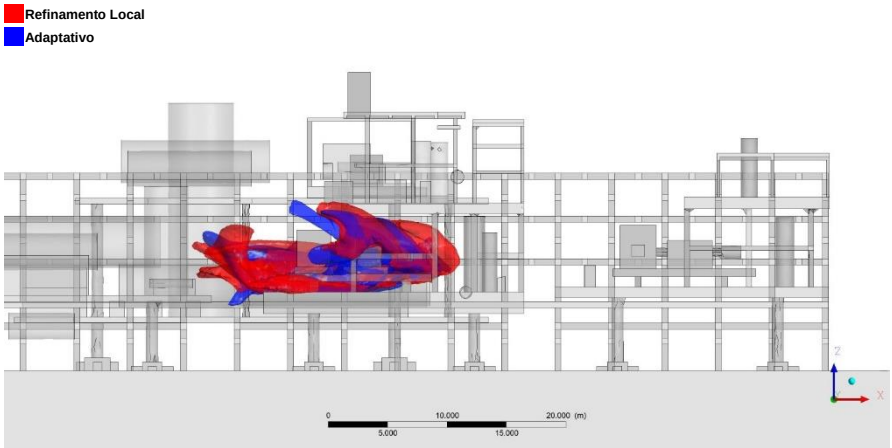

Figura C.29 – Caso 35 vista superior

Caso 36 - Vazamento com jato -Z e vento de 6,5 m/s em -30°

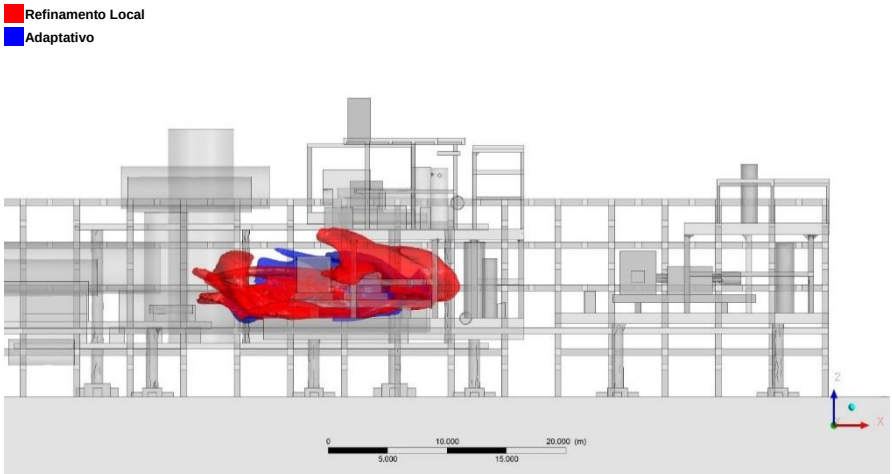

Figura C.30 – Caso 36 vista superior