



# **O Uso de CFD na Previsão da Dispersão de Gases em Plataformas Offshore**

**Alyson Soares da Silva  
Camila Gonçalves Pupe**

**Monografia em Engenharia Química.**

**Orientador(es)**

**Prof. Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.  
Prof. Márcio Nele de Souza, D.Sc.**

**Fevereiro de 2006**

# O USO DE CFD NA PREVISÃO DA DISPERSÃO DE GASES EM PLATAFORMAS OFFSHORE

*Alyson Soares da Silva*

*Camila Gonçalves Pupe*

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Ricardo Serfaty, D.Sc.

---

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D.Sc.

---

Carlos Eduardo Fontes, D.Sc.

Orientado por:

---

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D.

---

Márcio Nele de Souza, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2006

Silva, Alyson Soares da. e Pupe, Camila Gonçalves.

O Uso de CFD na Previsão da Dispersão de Gases em Plataformas Offshore / Alyson Soares da Silva e Camila Gonçalves Pupe. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2006.

vii, 118p.; il

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2006.  
Orientador(es): Nome(s) do(s) Orientador(es). Márcio Nele de Souza e Ricardo de Andrade Medronho.

1. Dispersão. 2. Plataforma. 3. CFD. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Márcio Nele de Souza e Ricardo de Andrade Medronho I. Título.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **O USO DE CFD NA PREVISÃO DA DISPERSÃO DE GASES EM PLATAFORMAS OFFSHORE**

Alyson Soares da Silva  
Camila Gonçalves Pupe

Fevereiro, 2006

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

O sistema de detecção de gases em plataformas marítimas de exploração de petróleo é normalmente formado por dois subsistemas: um para detecção de gases inflamáveis e outro para detecção de gases tóxicos, especialmente  $H_2S$ . Os dois sistemas monitoram as concentrações destes gases para preservar a vida humana e minimizar danos à estrutura e aos equipamentos da plataforma. O projeto do sistema de detecção é baseado em normas e notas técnicas que não fornecem toda a informação necessária para determinar o número ótimo de detectores. Elas recomendam que os sensores devem ser localizados perto de possíveis pontos de vazamento, não estabelecendo distâncias, metodologias para considerar a influência de variáveis externas, o número mínimo de detectores e a confiança do detector e/ou do sistema.

Devido a estas incertezas é necessário substituir critérios genéricos por uma análise quantitativa, baseada em critérios de engenharia. A metodologia adotada neste trabalho é o uso de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para prever os locais onde as concentrações de gases, acima do limite detectável, irão ocorrer e onde a localização do detector será mais efetiva. Empregando este tipo de solução computacional é possível substituir as tradicionais ferramentas de cálculo de dispersão de gases. Estes modelos são inadequados para solução de dispersão de gases em plataformas offshore, porque são válidos para distâncias acima de cem metros, e não consideram a presença de obstáculos reais. Desta forma, o objetivo principal do trabalho foi modelar e analisar o comportamento de nuvens de gás geradas por vazamento na planta de processo da plataforma, baseada em simulação computacional de dispersão gasosa. As simulações foram conduzidas baseando-se no layout de uma plataforma típica e nas condições meteorológicas da região no entorno da plataforma. Os resultados da simulação computacional foram usados para desenvolver um projeto de alta confiabilidade para o sistema de detecção de gás em uma plataforma *offshore*.

# ÍNDICE

<b>Capítulo I – Introdução</b>	1
I.1 – Motivação	1
I.2 – Objetivo	4
<b>Capítulo II – Detecção e Resposta</b>	5
II.1 – Introdução	5
II.2 – Detecção do Vazamento	5
II.2.1 – Detectores Fixos	6
II.2.1.1 – Sensores Catalíticos	6
II.2.1.2 – Sensores de Infravermelho	8
II.2.1.3 – Sensores de Estado Sólido	9
II.2.1.4 – Sensores Eletroquímicos	9
II.3 – Localização dos Detectores	11
<b>Capítulo III – Vazamentos e Modelos de Dispersão</b>	13
III.1 – Projeto Básico (Fundamentos do Modelo)	14
III.2 – Modelos de Dispersão	15
III.3 – Estatísticas	17
III.3.1 – Sistemas – Maior taxa de falhas ocasionando vazamentos	18
III.3.2 – Equipamentos – Maior taxa de falhas ocasionando vazamentos	19
III.3.3 – Distribuição dos tamanhos dos furos	19
III.3.4 – H <sub>2</sub> S	21
<b>Capítulo IV – Turbulência</b>	23
IV.1 – Introdução à Turbulência	23
IV.2 – Escoamentos Turbulentos	23
IV.3 – Modelagem Matemática	24
<b>Capítulo V – Fluidodinâmica Computacional (CFD)</b>	28
V.1 – Malha	29
<b>Capítulo VI – Materiais e Métodos</b>	30
VI.1 – Software Utilizado	30
VI.2 – Variáveis de Interesse	30
VI.3 – Geometria Utilizada	30

VI.4 – Condições de Contorno	32
VI.5 – Planejamento Experimental	35
<b>Capítulo VII – Resultados e Discussão</b>	<b>38</b>
VII.1.1 – Análise das Direções	39
VII.1.1.1 – Direção Sul	39
VII.1.1.2 – Direção Leste	48
VII.1.1.3 – Direção Oeste	56
VII.1.1.4 – Direção Norte	64
VII.1.1.5 – Direção Noroeste	72
VII.1.1.6 – Direção Sudoeste	81
VII.1.1.7 – Direção Nordeste	90
VII.1.2 – Localização dos Detectores	98
VII.1.2.1 – Análise das Plumas	99
<b>Capítulo VIII – Conclusões</b>	<b>113</b>
<b>Capítulo IX – Sugestões</b>	<b>115</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>116</b>
<b>Referências Eletrônicas</b>	<b>119</b>

## NOMENCLATURA

### LETRAS LATINAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Dimensão</b>
B	Somatório de forças que atuam no corpo	$M L T^{-2}$
$C_{\varepsilon 1}$	Constante sem unidade do modelo $k-\varepsilon$ igual a 1,44	-
$C_{\varepsilon 2}$	Constante sem unidade do modelo $k-\varepsilon$ igual a 1,92	-
$C_{\mu}$	Constante sem unidade do modelo $k-\varepsilon$ igual a 0,09	-
k	Energia cinética turbulenta (por unidade de massa)	$L^2 T^{-2}$
p	Pressão estática parcial	$M L^{-1} T^{-2}$
$p'$	Pressão modificada (modelo viscosidade turbulenta)	$M L^{-1} T^{-2}$
$P_k$	Taxa de produção de turbulência	$M L^{-1} T^{-3}$
$P_{kb}$	Termo de produção de flutuabilidade	$M L^{-1} T^{-3}$
t	Tempo	T
U	Vetor velocidade	$L T^{-1}$

### LETRAS GREGAS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Dimensão</b>
$\varepsilon$	Energia cinética turbulenta (por unidade de massa)	$L^2 T^{-2}$
$\rho$	Densidade	$M L^{-3}$
$\mu$	Viscosidade dinâmica ou absoluta	$M L^{-1} T^{-1}$
$\mu_{eff}$	Viscosidade efetiva	$M L^{-1} T^{-1}$
$\mu_t$	Viscosidade turbulenta	$M L^{-1} T^{-1}$
$\sigma_{\varepsilon}$	Constante adimensional do modelo $k-\varepsilon$ igual a 1,3	-
$\sigma_k$	Constante adimensional do modelo de turbulência para a equação k, igual a 1	-

### OPERADORES DIVERSOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
$\nabla$	Gradiente
$\otimes$	Operador Laplaciano

## **SOBRESCRITOS E SUBESCRITOS**

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
$T$	Matriz transposta

## 1. Introdução

### 1.1. Motivação

Plataformas para extração de petróleo são largamente utilizadas no Brasil, pois 75% das reservas de óleo brasileiro estejam em águas profundas (entre 400 e mil metros) e ultraprofundas (a partir de mil metros) (Figura 1.1)<sup>[25]</sup>.

Nos 100 mil quilômetros quadrados da Bacia de Campos, a Petrobrás tem hoje 40 unidades de produção de petróleo, operando 546 poços, com uma produção média diária de 1 milhão 265 mil barris. Essas 40 unidades se dividem basicamente em três tipos de sistemas definitivos de produção: as plataformas fixas, as semi-submersíveis (Figura 1.2) e os navios adaptados FPSO (da sigla em inglês para *Floating, Production, Storage and Offloading*, ou Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Escoamento) (Figura 1.3).

Em plataformas de petróleo sempre existe o risco de vazamento de óleo ou gás seguido de ignição causando fogo e explosões. Por isso deve-se considerar, durante o projeto destas plataformas, sistemas que detectem vazamentos de gases tóxicos ou venenosos. O labor nas plataformas oferece risco para a vida e saúde dos trabalhadores, isto porque estes trabalham confinados e com difícil acesso a resgate ou socorro. Assim sendo um sistema de detecção de gases deve ser implementado visando diminuir o risco de explosões e intoxicações causadas por vazamento de gases.

O exemplo mais recente de uma explosão em plataformas no Brasil é o da P-36, na época, a maior plataforma de exploração de petróleo do mundo, que sofreu duas explosões em março de 2001 e causou a morte de um funcionário. A P-36 entrou em funcionamento em março de 2000 e se localizava no Campo do Roncador, no litoral norte fluminense. A plataforma tinha capacidade para produzir 120 mil barris de petróleo por dia e operava com 1/3 de sua capacidade (Figura 1.4)<sup>[26]</sup>.

O sistema de detecção de gases em plataformas marítimas de exploração de petróleo é normalmente formado por dois subsistemas: um para detecção de gases inflamáveis e outro para detecção de gases tóxicos, especialmente H<sub>2</sub>S. Os dois sistemas monitoram

as concentrações destes gases para preservar a vida humana e minimizar danos à estrutura e aos equipamentos da plataforma. Estes sistemas são amplamente reconhecidos como uma forma eficaz de proteção das instalações e de redução dos riscos para os seus empregados<sup>[24]</sup>.

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

O projeto do sistema de detecção de gases é baseado em normas e notas técnicas que não fornecem toda a informação necessária para determinar o número ótimo de detectores. Elas recomendam que os sensores devam ser localizados perto de possíveis pontos de vazamento, não estabelecendo distâncias; metodologias para considerar a influência de variáveis externas; o número mínimo de detectores e a confiança do detector e/ou do sistema.

Devido a estas incertezas, é necessário substituir critérios genéricos por uma análise quantitativa, baseada em critérios de engenharia. A metodologia adotada neste trabalho é o uso de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para prever os locais onde as concentrações de gases, acima do limite detectável, irão ocorrer e onde a localização do detector será mais efetiva.

Empregando este tipo de solução computacional é possível substituir as tradicionais ferramentas de cálculo de dispersão de gases, como os modelos de Pasquill-Gifford<sup>[23]</sup>. Estes modelos são inadequados para solução de dispersão de gases em plataformas *offshore*, porque são válidos para distâncias acima de cem metros, e não consideram a presença de obstáculos reais.

A solução computacional do problema de dispersão deve considerar que os vazamentos de gases podem ter variadas fontes: ruptura em um vaso, ao longo de uma tubulação, em

uma válvula de alívio ou em um *vent* de processo<sup>[11]</sup>; e deve levar em conta a presença de obstáculo e até mesmo ser capaz de calcular a dispersão em condições dinâmicas.

Assim sendo, um estudo usando CFD parece ser perfeitamente adequado para prever o posicionamento otimizado de detectores de gás em uma plataforma.

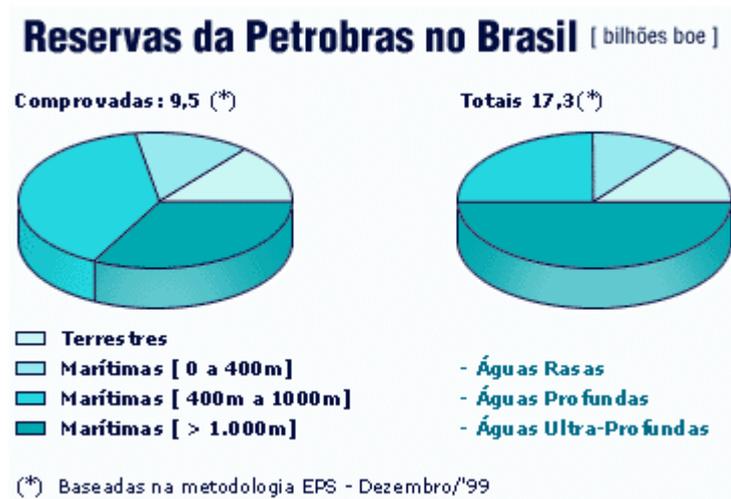


Figura 1.1 - Reservas da Petrobras<sup>[25]</sup>.



Figura 1.2 - FPSO P-32<sup>[25]</sup>.



Figura 1.3 - Plataforma Semi-Submersível P-40<sup>[25]</sup>.



Figura 1.4 - P-36 antes do acidente de março de 2001<sup>[26]</sup>.

## 1.2. Objetivo

O objetivo principal do trabalho é modelar e analisar o comportamento de nuvens de gás geradas por vazamento na planta de processo da plataforma, baseada na simulação computacional da dispersão de gás. As simulações devem ser conduzidas baseando-se no “*layout*” de uma plataforma típica e nas condições meteorológicas da região no entorno da plataforma.

Os resultados da simulação computacional serão usados para auxiliar no projeto do sistema de detecção de gás em uma plataforma *offshore*.

## **2. Detecção e Resposta**

### **2.1. Introdução**

Após um vazamento, a equipe de funcionários da planta deve responder e alertar a população circunvizinha que uma emergência existe no local. Isto é facilitado dispondo de dispositivos de reconhecimento do vazamento e um plano de contingência<sup>[23]</sup>.

Os elementos essenciais estão associados com a mitigação do vazamento. Por causa da rapidez com que uma liberação pode se desenvolver, pode não haver tempo suficiente para conduzir uma evacuação de emergência das populações próximas ao local, nem de uma resposta individual de emergência. Pelo contrário, devem ser protegidos no lugar.

### **2.2. Detecção do Vazamento**

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

Os detectores do vazamento podem ser divididos em duas categorias gerais, em sistemas fixos e em sistemas portáteis (Figura 2.1).

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

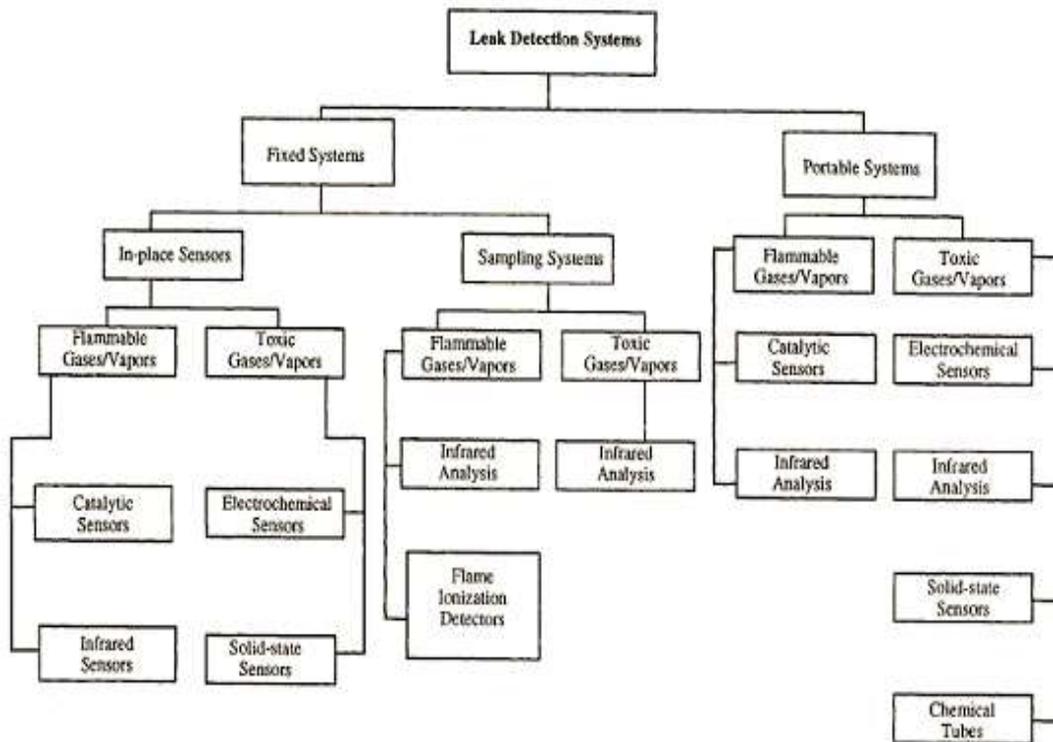


Figura 2.1 - Categorias de detectores de vazamento<sup>[24]</sup>.

### 2.2.1. Detectores Fixos

Detectores fixos, geralmente providos com um único sensor, são montados permanentemente em uma posição específica para detectar vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis. Os instrumentos são conectados geralmente por um cabo com três fios; um fio fornece energia ao detector, o outro o sinal do detector, e o outro serve como um fio terra do sistema. O sinal do detector é alimentado a um painel de alarme central situado em uma sala de controle ou em uma sala de segurança onde, se um nível elevado do sinal for detectado, um alarme ou uma ação automática de mitigação (tal como fechamento de válvulas de isolamento) é iniciado. Como cada detector possui uma posição específica, facilitando a localização da origem do vazamento.

#### 2.2.1.1. Sensores Catalíticos

A operação de um sensor catalítico depende da oxidação do gás inflamável no detector que é constituído de um filamento catalítico eletricamente aquecido.

Este detector é usualmente feito com um cabo fino de platina revestido com uma de uma série de substâncias alternativas – catalisadores de paládio / platina / Tório. Estes catalisadores ajudam a promover a atividade catalítica e prolongam a vida útil dos detectores, evitando que estes trabalhem em baixas temperaturas. O filamento do detector é conectado a uma ponte de *Wheatstone* inativa, e está localizado adjacente ao detector ativo. A unidade inativa permite a compensação da temperatura ambiente. Quando o gás inflamável entra na célula catalítica, os gases entram em combustão no filamento ativo, causando um aumento na temperatura e um desbalanceamento na ponte de *Wheatstone*. O sinal de saída para os gases inflamáveis no ar neste tipo de célula é linear até o limite inferior de explosividade (LEL), (Figura 2.2).

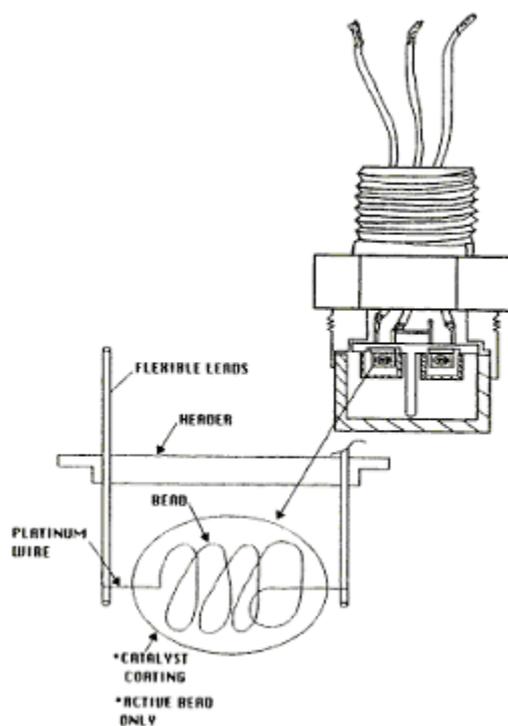


Figura 2.2 - Modelo de um sensor catalítico (Sensidyne Inc., Clearwater, FL.)<sup>[24]</sup>.

Atmosferas industriais contêm contaminantes como silicones, vapores orgânicos, compostos de enxofre, e halogênios que podem envenenar os sensores catalíticos. Fabricantes tentam aprimorar o design dos detectores tentando minimizar a perda da atividade do sensor devido a estas influências.

A razão para que os fabricantes se esforcem para proteger os instrumentos de envenenamento e explosões é que após a falha o detector na mais registrará diferenças

na voltagem, ou seja, não indicará mais quando a atmosfera for explosiva. Como resultado, o potencial vazamento de alguma substância inflamável não será detectado. Portanto, quando se utilizam sensores catalíticos, manutenção e calibração são duas etapas críticas.

### 2.2.1.2. Sensores de Infravermelho

Detectores de infravermelho são usados para detectar a presença de gases inflamáveis. Seu princípio de operação está baseado no ajuste de uma fonte de luz infravermelha para captar ligações carbono – hidrogênio (C-H) (Figura 2.3). O gás inflamável que passa no feixe de luz absorve uma certa quantidade de luz infra-vermelha, causando uma mudança na transmitância da luz. Esta diferença é captada pelo detector e é convertida para um sinal de 4 a 20 mA.

Estes detectores não estão sujeitos a nenhum tipo de envenenamento, porém se houver condensação de misturas nas lentes de reflexão do aparelho, haverá absorção de luz Infravermelha ocasionando um falso alarme. Este problema é eliminado, instalando aquecedores nesta área que contém as lentes, impedindo assim que haja condensação.

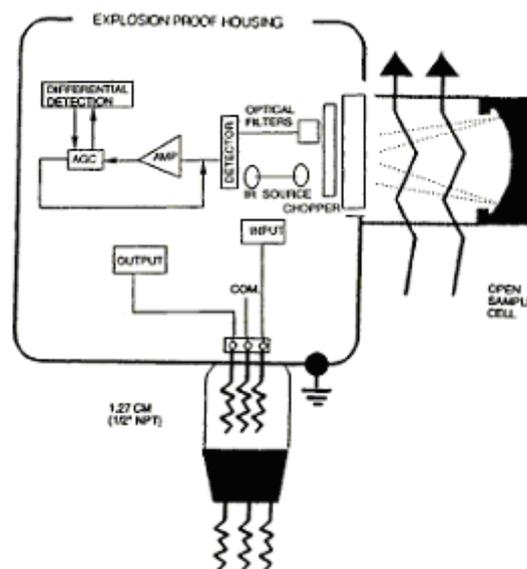


Figura. 2.3 - Esquema de um sensor de infravermelho para detecção de gás inflamável (Astro International Corp.)<sup>[24]</sup>.

### 2.2.1.3. Sensores de Estado Sólido

Os dois elementos-chave de um sensor de estado-sólido (Figura 2.4) são o aquecedor e os eletrodos coletores que são encaixados em um *chip* de um material de estado sólido dopado com um óxido de metal, ou uma mistura de óxidos de metal, com a finalidade de tornar o sensor seletivo a um determinado gás ou grupo de gases. A corrente contínua passa pelo eletrodo contendo o aquecedor para manter a superfície do sensor em uma temperatura constante. Sob exposição de gases tóxicos ou inflamáveis a ser monitorados, a resistência da superfície muda. Esta mudança é captada pelo eletrodo do detector, depois é processada e convertida a um sinal de saída apropriado.

Usando diferentes tipos de óxidos na superfície, detectores de estado-sólido podem ser sensíveis a inúmeros tipos de gases inflamáveis e tóxicos. Também, não são envenenados por silicões, vapores, ou halogênios. Sua resposta não necessita de oxigênio, portanto, estes detectores podem ser usados para detectar gases perigosos em ambientes ricos em nitrogênio e hélio.

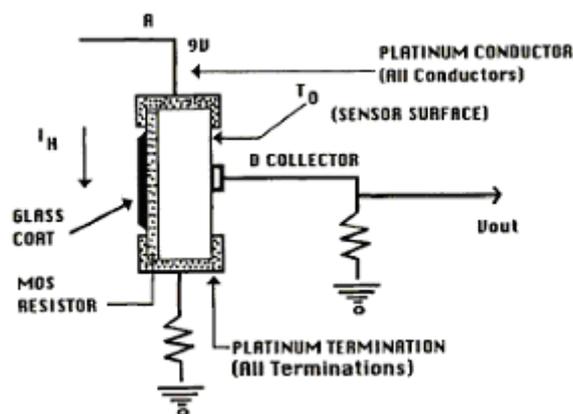


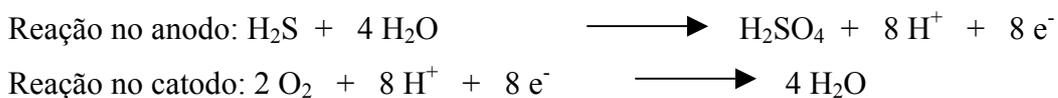
Figura 2.4 - Esquema de um detector de estado sólido (International Sensor Technology, Irvine, CA.)<sup>[24]</sup>.

### 2.2.1.4. Sensores Eletroquímicos

Sensores eletroquímicos (Figura 2.5) são usados para detectar gases tóxicos. Seu princípio de operação está baseado numa reação eletroquímica do gás com um eletrólito contido no sensor. Esta reação é uma reação de oxi-redução em que elétrons são gerados

na proporção da concentração do gás presente. Este fluxo de elétrons então é processado para dar um sinal de saída.

Em muitos casos, este sinal de saída é linear com a concentração do gás. Um exemplo disso é a medição de Ácido sulfídrico. O ácido sulfídrico entra no sensor através de uma barreira de difusão e uma membrana seletiva a gases. A reação ocorre num eletrodo de trabalho (anodo) liberando elétrons que fluem para um outro eletrodo (catodo) onde a segunda reação ocorre. Estas reações podem ou não consumir o eletrólito contido no sensor. As reações que se passam com o ácido sulfídrico são mostradas abaixo:



Como os eletrólitos podem ser consumidos ou os produtos podem ser obtidos neles, os sensores são fabricados de maneira a se tornar fácil o seu reenchimento e facilitar também o seu posicionamento no campo. Os sensores eletroquímicos são aplicáveis a inúmeros gases tóxicos e ainda é útil na detecção de hidrogênio, o que não é o caso dos sensores catalíticos citados anteriormente.

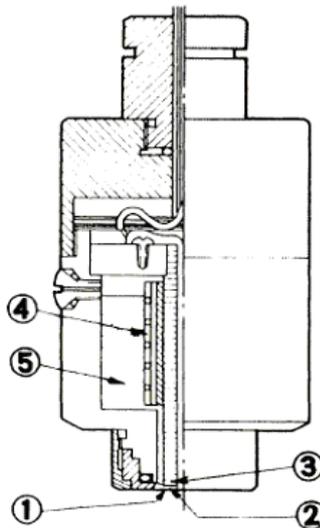


Figura 2.5 - Corte transversal de um sensor eletroquímico. 1: Membrana; 2: Eletrólito de filme fino; 3: Eletrodo de trabalho; 4: Eletrodo de compensação; 5: Eletrólito (Enmet Corporation, Ann Arbor, MI.)<sup>[24]</sup>.

### 2.3. Localização dos Detectores

Os fabricantes de detectores devem ser consultados para recomendações de características de posicionamento e capacidades dos sensores, já que eles estão mais familiarizados com suas capacidades de detecção. Ao mesmo tempo o engenheiro do processo deve realizar sua própria pesquisa para assegurar que o equipamento instalado gerará a resposta desejada<sup>[9]</sup>.

Geralmente, detectores fixos, como os catalíticos, de infravermelho, de estado sólido e eletroquímico, podem ser alocados a uma distância de 3.000 pés da sala de controle. Considerando o posicionamento dos detectores devem ser considerados os elementos que compõem o cenário do local preferido para se proceder um monitoramento. Local esse contendo um corpo que possui um grande potencial de vazamento de gases tóxicos ou inflamáveis, como por exemplo<sup>[23]</sup>:

- Conexões de tubulações;
- Compressores;
- Cabines de análises;
- Tanques ou Vasos de estocagem;
- Torres de resfriamento acima dos ventiladores;
- Trocadores de calor;
- Locais de enchimento ou esvaziamento de cargas.

O segundo grupo de locais para o monitoramento dos detectores são as áreas que podem ser afetadas pelos vazamentos, como:

- Entradas de ar em salas de controle;
- Locais que podem ser atingidos, devido a direção do vento ( prédios de administração, casas de manutenção, comunidades vizinhas e etc.);
- Áreas próximas a pontos que podem causar ignição (fornos, *boilers*, *flares* e etc.) e pontos com potencial de vazamento;
- Entradas de ar em abrigos temporários projetados para se proteger de possíveis vazamentos.

Também considerando o posicionamento dos detectores, a elevação em que estes serão posicionados deve levar em consideração a densidade do vapor / gás. Detectores para

gases densos, como Cloro, são tipicamente ajustados a uma altura de 0.3 a 1 m, enquanto que para gases leves, detectores são instalados a uma altura de 1.5 a 2.4 m acima do solo.

Por último, o engenheiro de processo deve conhecer as limitações do equipamento para assegurar a seleção do equipamento apropriado a suas necessidades.

### 3. Vazamentos e Modelos de Dispersão

Durante um acidente, equipamentos de processo podem liberar materiais tóxicos muito rapidamente e em quantidades suficientes para se formar nuvens tóxicas sobre a planta do processo ou sobre a comunidade local. Alguns exemplos são listados abaixo<sup>[23]</sup>:

- Ruptura explosiva de um vaso do processo proveniente de alta pressão causada por uma reação extremamente exotérmica não controlada;
- Ruptura de um duto contendo um material tóxico a alta pressão;
- Ruptura de um tanque contendo material tóxico armazenado a uma temperatura acima da temperatura normal de ebulição;
- Ruptura de um veículo de transporte contendo material tóxico seguido de um acidente.

Acidentes sérios (como em Bhopal) enfatizam a importância de um planejamento de emergência e de se projetar plantas de processo que minimizem a ocorrência e as conseqüências de vazamentos de material tóxico. Modelos de vazamentos tóxicos são rotineiramente usados para estimar os efeitos do vazamento no ambiente industrial e comunitário.

Um excelente programa de segurança empenha-se em identificar os problemas antes que eles ocorram. Os profissionais que projetam e operam a planta devem entender todos os aspectos dos vazamentos tóxicos para prevenir potenciais situações de vazamento e para reduzir o impacto destes uma vez que ocorram. Para isso, é necessário um modelo de vazamento de material tóxico.

Existem três passos a serem seguidos ao se utilizar um modelo de vazamento de material tóxico<sup>[24]</sup>:

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

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

Várias opções estão disponíveis baseadas em predições do modelo de vazamento. (1) desenvolvimento de um plano de emergência com a comunidade adjacente a planta, (2) desenvolvimento de modificações no projeto da planta para eliminar origens de possíveis vazamentos, (3) cercar o vazamento em potencial e adicionar exaustores ou outro equipamento de remoção de vapor, (4) redução do inventário de materiais perigosos para reduzir a quantidade de gás liberada, e (5) adição de equipamentos de monitoração da área capazes de detectar vazamentos e providenciar válvulas de bloqueio e controles para eliminar vazamentos e dispersões perigosas.

### **3.1. Projeto Básico (Fundamentos do Modelo)**

O projeto básico descreve os vários cenários de vazamentos de material tóxico; ele direciona para as possíveis falhas. Para cada processo químico de complexidade razoável, milhares de cenários de vazamento são possíveis; obviamente, não é possível elucidar todos os potenciais vazamentos de cada cenário. A maioria dos estudos de vazamentos tóxicos tenta determinar o maior vazamento provável e o maior potencial de vazamento. O maior vazamento provável considera vazamentos que possuem razoável chance de ocorrer. Nisto incluem-se rupturas em dutos, furos em tanques de armazenagem e em vasos de processo, derramamento de material tóxico, e etc. O maior potencial de vazamento é considerado uma situação catastrófica resultando numa liberação de uma enorme quantidade de material. Nisto estão incluídos, derramamento completo de um material contido num tanque, ruptura de um duto de grande diâmetro, ruptura explosiva de reatores e etc.

O projeto básico completo descreve (1) a falha, (2) o estado do material disperso (sólido, líquido ou gasoso), (3) o mecanismo do vazamento (duto com ruptura, furo em um vaso) e (4) a dispersão do material.

### 3.2. Modelos de Dispersão

Modelos de dispersão descrevem o transporte dos materiais tóxicos, usualmente pelo ar, do local do vazamento até a planta de processo e a comunidade. Depois de um vazamento, a “nuvem” tóxica é carregada pelos ventos em uma pluma característica ou na forma de “puff” (Figuras 3.1 e 3.2). A máxima concentração do material tóxico ocorre no ponto do vazamento (que pode não ser no nível do solo). A concentração ao longo da nuvem tende a diminuir devido a mistura turbulenta e dispersão da substância tóxica com o ar<sup>[24]</sup>.

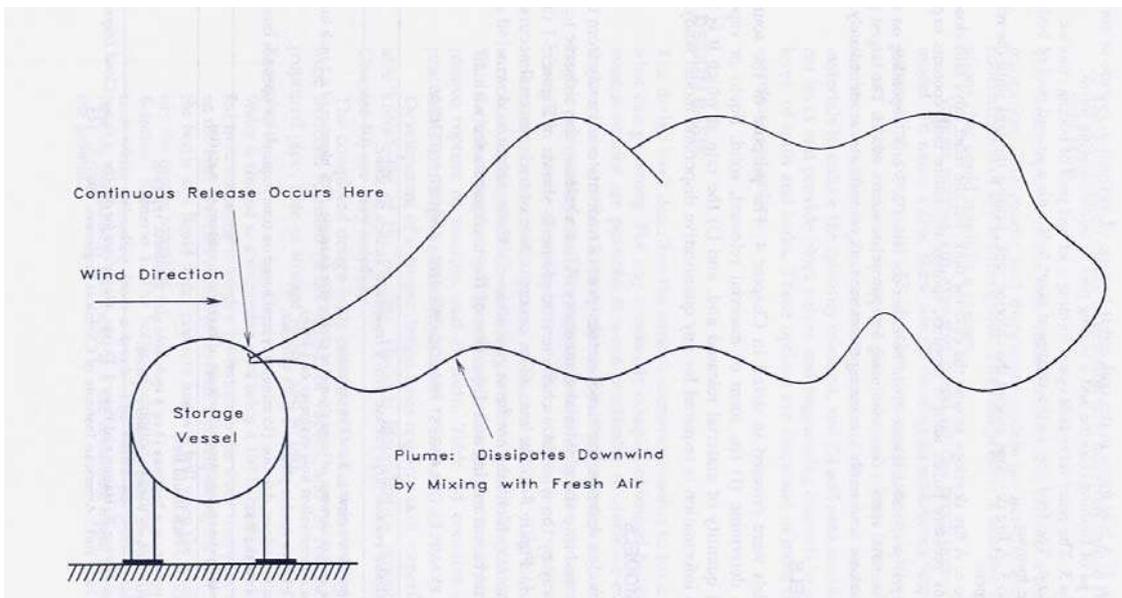


Figura. 3.1 - Pluma característica formada por um vazamento contínuo<sup>[24]</sup>.

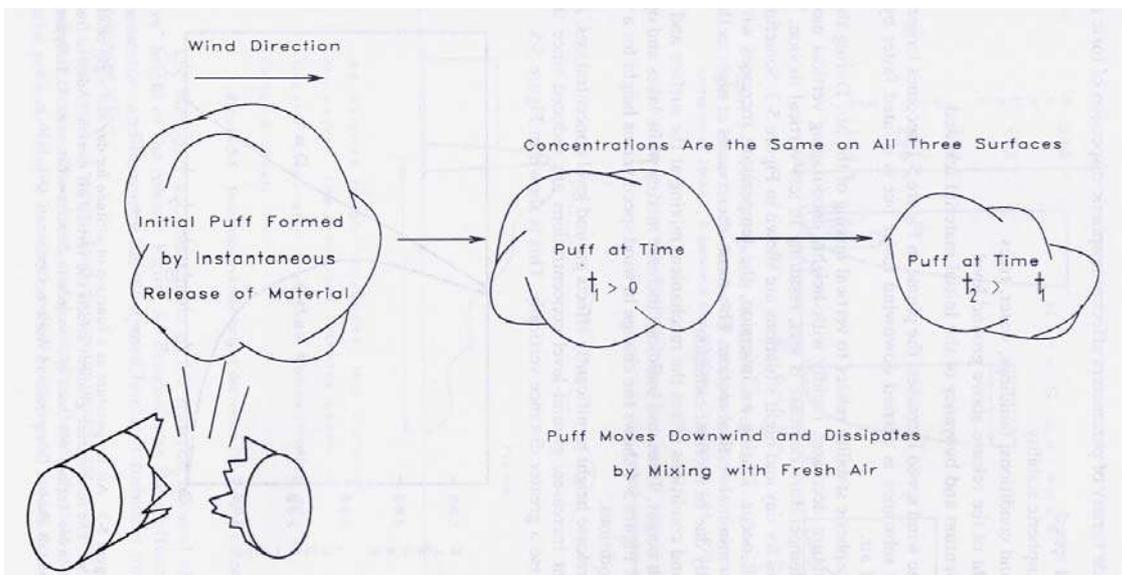


Figura. 3.2 - Puff formado por um vazamento instantâneo<sup>[24]</sup>.

Um grande número de parâmetros afeta a dispersão atmosférica de um material tóxico<sup>[11]</sup>.

- Velocidade do Vento;
- Estabilidade Atmosférica;
- Condições do solo, prédios, água e árvores;
- Altura do vazamento acima do nível do solo;
- Momento e fluidez do material inicialmente disperso.

Com o crescimento da velocidade do vento, a pluma da Figura 3.1. torna-se mais larga e mais comprida; a substância é carregada com maior velocidade, mas é também mais facilmente diluída pela grande quantidade de ar.

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

As condições do solo afetam o mecanismo de mistura na superfície e o perfil do vento em função da altura. Árvores e prédios aumentam a mistura enquanto lagos e áreas abertas a diminuem.

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

A fluidez e o momento do material disperso alteram a “altura efetiva” do vazamento. Após a dissipação da fluidez e do momento inicial, a mistura turbulenta do ambiente torna-se o efeito dominante.

Dois tipos de modelos de dispersão de nuvem de vapor são comumente usados: os modelos de pluma e “*puff*”. O modelo de pluma descreve a concentração em estado-estacionário do material disperso de um vazamento contínuo. O modelo de “*puff*” descreve a concentração temporal do material de um vazamento único de uma quantidade fixa do material. Para o modelo de pluma, um exemplo seria a contínua dispersão de gases de um cigarro aceso. Uma pluma em estado-estacionário é formada a

partir do cigarro. Um exemplo do modelo de “*puff*” seria um vazamento repentino de uma quantidade fixa de material devido à ruptura de um vaso de estocagem. Uma grande nuvem de vapor é formada e se afasta do ponto de ruptura.

O modelo de “*puff*” pode ser usado para descrever a pluma; a pluma é simplesmente o vazamento de contínuos “*puffs*”. Se a informação de uma pluma em estado-estacionário é tudo que se necessita, o modelo de pluma é recomendado uma vez que é mais facilmente aplicado. Para estudos envolvendo plumas dinâmicas (por exemplo, o efeito em uma pluma com a mudança da direção do vento), o modelo de “*puff*” deve ser usado.

### 3.3. Estatísticas

A base de dados estatísticos que constituem as informações deste trabalho compreende dados dos relatórios, ano 2001 e 2002, da HSE (Health & Safe Executive) que tem como título “Análise e Estatísticas de Vazamentos Offshore de Hidrocarbonetos”<sup>[7,8]</sup>.

A Comissão de Saúde e Segurança é responsável pela regulação de saúde e segurança na Inglaterra. A executiva de saúde e segurança e o governo local são as autoridades que trabalham em parceria com a Comissão<sup>[7,8]</sup>.

A utilização do banco de dados dos relatórios da HSE teve por finalidade encontrar informações dos vazamentos mais prováveis e das situações com potencial de se ocorrer os mesmos. O programa de mitigação de vazamentos desenvolvidos pela HSE na Inglaterra é um dos mais completos e estruturados existentes, sendo assim, mundialmente recomendado como base de informações e direcionamentos no combate a vazamentos e outras situações de risco.

Segundo os dados do relatório de 2002, 2.312 vazamentos foram reportados, avaliados e inseridos no banco de dados durante o período de 9 anos e 6 meses desde a criação do Banco de Dados de Vazamentos de Hidrocarbonetos em 1 de outubro de 1992, até 31 de março de 2002 inclusive<sup>[7]</sup>.

Os vazamentos de gás constituem a maior parte destes vazamentos, isto é, 1267 dos 2312 (54,8%). Os outros tipos ranqueados em ordem decrescentes são vazamentos de

óleo 403 (17.4%), em sistemas fora do processo 269 (11.6%), bi-fásicos 205 (8.9%) e condensados 168 (7.3%) (Figura 3.3)<sup>[7]</sup>.

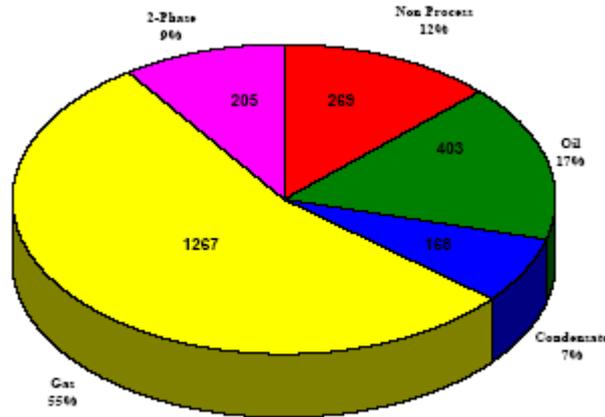


Figura 3.3 – Tipo de hidrocarboneto liberado em vazamentos – (HSE, 2002)<sup>[7]</sup>.

### 3.3.1. Sistemas – Maior taxa de falhas ocasionando vazamentos

O sistema com maior taxa de falhas que ocasionam vazamentos é o compressor de gás, com uma taxa anual de  $2.90 \times 10^{-1}$  falhas. Operações com altas temperaturas e pressões, vibrações e os efeitos conseqüentes em itens vulneráveis dos equipamentos tais como flanges, conexões e dutos de pequeno diâmetro são considerados os maiores contribuintes para a frequência dos vazamentos neste tipo de sistema (Figura 3.4)<sup>[7]</sup>.

O segundo maior sistema com elevadas taxas de falhas é a exportação de óleo ( $1.56 \times 10^{-1}$  falhas por ano) e em seguida a queima de gás ( $1.38 \times 10^{-1}$  falhas por ano).

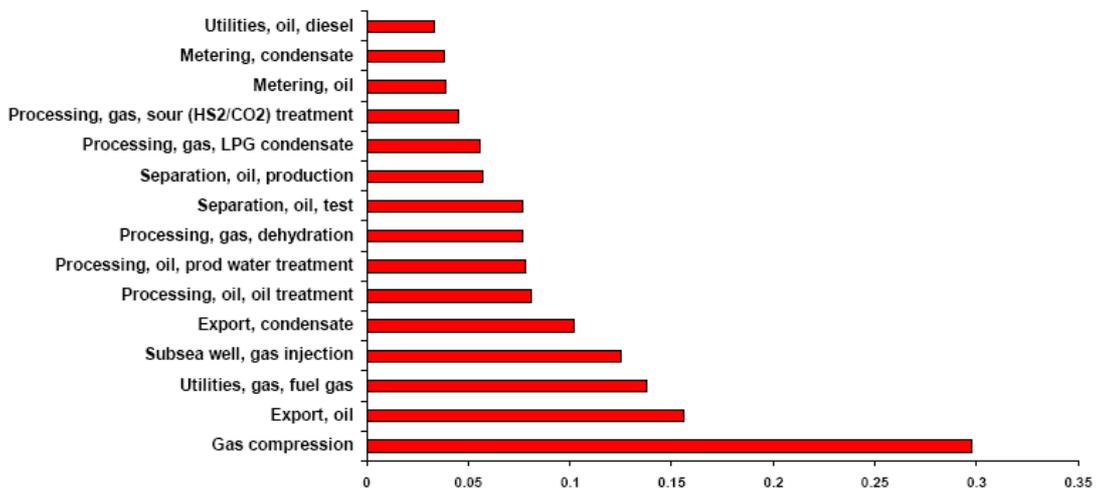


Figura 3.4 – Taxas de falhas em sistemas (vazamento / sistema ano) (HSE, 2002)<sup>[7]</sup>.

### 3.3.2. Equipamentos – Maior taxa de falhas ocasionando vazamentos

Os equipamentos com as maiores taxas de vazamentos são as turbinas com  $7.24 \times 10^{-2}$  falhas por equipamento por ano, e os compressores (“*reciprocating compressors*”) com  $6.52 \times 10^{-2}$  falhas por equipamento por ano, ambos indicaram grande ligação com os sistemas listados acima (Figura 3.5)<sup>[7]</sup>.

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

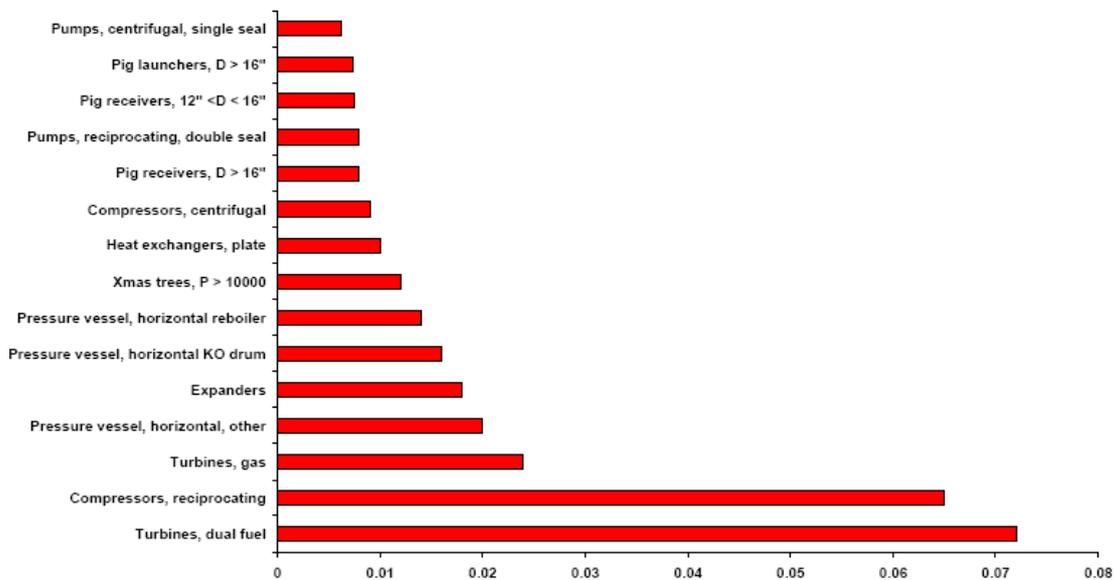


Figura 3.5 – Taxas de falhas em equipamentos (vazamento / equipamento ano) – (HSE, 2002)<sup>[7]</sup>.

### 3.3.3. Distribuição dos tamanhos dos furos

O número total de vazamentos para cada sistema foi dividido em sete categorias divididas por tamanhos de furos, juntamente com a frequência de cada uma destas divisões (Figura 3.6).

TABLE 1 : SYSTEM FAILURE RATES & SEVERITY / HOLE SIZE DISTRIBUTION														
SYSTEM (ALL TYPES)	YEAR	SYSYEARS (Note 1)	SEVERITY DISTRIBUTION				RATE (PER YEAR) (Note 2)	HOLE SIZE DISTRIBUTION						
			MAJOR	SIGNIFICANT	MINOR	TOTAL		<10 mm	10<25 mm	25<50 mm	50<75 mm	75<100 mm	>=100 mm	N/A (note 3)
NOTES:		1. Previous = Total for all previous years from 1 October 1992 to 31 March 1999 2. Rate = Total Leaks divided by Total System Years. If no leaks reported, then Rate is not calculated. 3. Hole size is not applicable for some scenarios e.g. where open vessels such as shale shakers are involved or for liquid carry-over incidents, etc.												
CAUTION : DO NOT USE SEVERITY AND HOLE SIZE DISTRIBUTION FACTORS TOGETHER.														
GAS COMPRESSION.	Previous	835	16	172	51	239		181	36	9	0	3	5	5
	1999/00	141	2	37	10	49		44	4	1	0	0	0	0
	2000/01	145	1	26	21	48		44	2	1	1	0	0	0
	Total:	1121	19	235	82	336	3.00E-01	269	42	11	1	3	5	5
			0.06	0.70	0.24	< DISTRIBUTION >		0.80	0.13	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01
IMPORT, CONDENSATE	Previous	80	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
	1999/00	9	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
	2000/01	9	0	0	0	0	Note 2	0	0	0	0	0	0	0
	Total:	78	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
			0	0	0	< DISTRIBUTION >		0	0	0	0	0	0	0
IMPORT, GAS,	Previous	1231	2	12	4	18		14	2	1	0	0	1	0
	1999/00	185	0	0	2	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	188	0	1	1	2		2	0	0	0	0	0	0
	Total:	1604	2	13	7	22	1.37E-02	18	2	1	0	0	1	0
			0.09	0.59	0.32	< DISTRIBUTION >		0.82	0.09	0.05	0.00	0.00	0.05	0.00
IMPORT, OIL,	Previous	802	1	13	8	22		16	1	2	0	0	2	1
	1999/00	139	0	2	0	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	139	0	0	1	1		1	0	0	0	0	0	0
	Total:	1080	1	15	9	25	2.31E-02	19	1	2	0	0	2	1
			0.04	0.60	0.36	< DISTRIBUTION >		0.76	0.04	0.08	0.00	0.00	0.08	0.04
MANIFOLD, GAS	Previous	1728	3	13	2	18		16	2	0	0	0	0	0
	1999/00	281	0	1	1	2		2	0	0	0	0	0	0
	2000/01	283	2	0	0	2		1	1	0	0	0	0	0
	Total:	2292	5	14	3	22	9.60E-03	19	3	0	0	0	0	0
			0.23	0.64	0.14	< DISTRIBUTION >		0.86	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MANIFOLD, OIL	Previous	1417	3	17	3	23		17	2	2	0	0	2	0
	1999/00	253	0	5	4	9		8	1	0	0	0	0	0
	2000/01	253	0	1	2	3		3	0	0	0	0	0	0
	Total:	1923	3	23	9	35	1.82E-02	28	3	2	0	0	2	0
			0.09	0.66	0.26	< DISTRIBUTION >		0.80	0.09	0.06	0.00	0.00	0.06	0.00

Figura 3.6 - Taxas e severidade de falhas em sistemas offshore e distribuição de tamanho de orifícios<sup>[8]</sup>.

Pela análise da figura 3.6 é possível verificar que 80% dos vazamentos em compressores de gás tinham orifícios com menos de 10mm de diâmetro. Logo é razoável propor que o diâmetro do orifício de um vazamento seja de 10mm.

### 3.4. H<sub>2</sub>S

O H<sub>2</sub>S é um gás incolor, tóxico e inflamável, que é responsável pelo odor de “ovos podres”. Pequenas quantidades de H<sub>2</sub>S estão no petróleo cru, mas este pode compor até 28% do gás natural. Vulcões emitem H<sub>2</sub>S, onde este pode ser formado através da hidrólise de minerais contendo enxofre, dando um óxido do mineral e H<sub>2</sub>S. No ar é possível encontrar em torno de 0,0001 – 0,0002 ppm de H<sub>2</sub>S<sup>[27]</sup>.

Este gás é altamente tóxico. Ele é um pouco mais pesado que o ar, logo tende a se depositar no fundo de locais mal ventilados – poços profundos e fundo de tanques. Ele é também bastante inflamável, formando uma mistura explosiva com o ar em uma grande faixa de concentração (4,3-46% ou 43000-460000 ppm)<sup>[23]</sup>.

Respirar o H<sub>2</sub>S pode paralisar o nervo olfativo tornando impossível sentir a presença do gás após uma exposição intensa. O efeito é reversível, ou seja, as pessoas que sobrevivem a uma intensa exposição ao H<sub>2</sub>S voltam a sentir o cheiro do gás.

O H<sub>2</sub>S gerado em água de esgoto tem um comportamento perigoso. Quando o esgoto fica parado por um longo período de tempo, o H<sub>2</sub>S se conserva em grande concentração – até 6000 ppm – e é liberado rapidamente quando o esgoto é perturbado, formando rapidamente uma mistura de concentração letal. Em circunstâncias excepcionais quando o gás está em altas concentrações, é possível que as pessoas percam a consciência.

Abaixo estão as quantidades que uma pessoa pode suportar de H<sub>2</sub>S e suas consequências<sup>[27]</sup>:

- 0,0047 ppm é a concentração onde o H<sub>2</sub>S é reconhecido, 50% das pessoas conseguem detectar o H<sub>2</sub>S nesta concentração;

- 10-20 ppm é o limite até uma possível irritação nos olhos;

- 50-100 ppm leva a defeito nos olhos;
- 150-250 ppm o nervo olfativo é paralisado após algumas inalações, e o senso de cheiro desaparece;
- 320-530 ppm leva a edema pulmonar com possibilidade de morte;
- 530-1000 ppm causa forte estimulação ao sistema nervoso central e respiração acelerada, causando falta de ar, 800 ppm é a concentração letal para 50% dos seres humanos depois de uma exposição de 5 minutos;
- Concentrações acima de 1000 ppm causa colapso imediato com falta de ar, mesmo após apenas uma inalação.

## 4. Turbulência

### 4.1. Introdução à Turbulência

A turbulência pode ser entendida como o movimento caótico dos fluidos - seja ele a poeira cósmica interestelar em galáxias espirais, atmosferas gasosas planetárias, ou água fluindo através de uma torneira<sup>[28]</sup>.

Turbulência é um processo complexo, especialmente porque é tridimensional, envolvendo, principalmente, transferências convectivas de momento, massa e energia, instável e dependente do tempo e da posição no espaço. Podendo causar significativo efeito nas características do escoamento. Turbulência é dissipativa, ou seja, as tensões viscosas internas aumentam a energia interna<sup>[3]</sup>.

A turbulência ocorre quando as forças de inércia no fluido se tornam significativas se comparadas às forças de viscosidade, e é caracterizada por um alto número de *Reynolds*<sup>[29]</sup>.

### 4.2. Escoamentos Turbulentos

Com número de *Reynolds* acima de  $2,1 \cdot 10^3$  o movimento laminar será mantido temporariamente se a superfície do escoamento for lisa e sem vibração, mas se o sistema for perturbado ou se houver uma superfície rugosa, o movimento laminar irá se transformar em um movimento aleatório, o que caracteriza o escoamento turbulento<sup>[1]</sup>.

A afirmativa anterior é uma simplificação, considerando que o movimento não é aleatório em toda a extensão da tubulação, por exemplo. No centro do tubo as flutuações na velocidade são quase completamente aleatórias. Mas, na vizinhança imediata da parede as flutuações na direção axial são maiores que as flutuações na direção radial, e todas as flutuações tendem a zero próximo a parede<sup>[1]</sup>.

Pode-se comparar os escoamentos turbulento e laminar considerando as flutuações de velocidade (nas três direções), pressão e temperatura. Essas flutuações se superpõem sobre o valor médio de cada propriedade (Figura 4.1).

Os escoamentos turbulentos são aleatórios, isto é, não determinísticos. Neste tipo de escoamento não são moléculas do fluido que se deslocam aleatoriamente na direção do escoamento e ortogonal a ela mais ‘pacotes de fluido’ ou ‘macro-moléculas’ denominados turbilhões. O tamanho dos turbilhões determina a escala da turbulência.

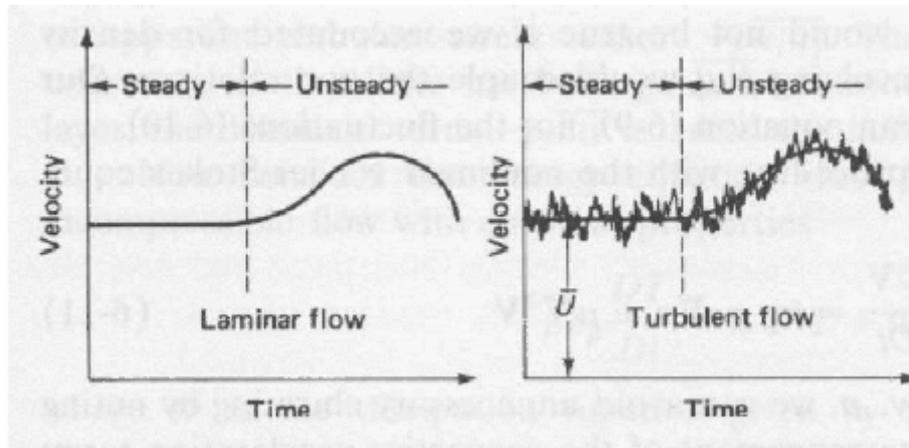


Figura 4.1 - Comparação das flutuações em escoamento laminar e turbulento<sup>[29]</sup>.

A turbulência não se mantém por ela mesma, mas depende do ambiente para obter energia. A produção de novos ‘turbilhões’ por meio de fornecimento de energia substitui aqueles perdidos pela dissipação viscosa. Uma fonte comum de energia para as flutuações de velocidade é a ‘deformação’ do campo de escoamento com a presença de um gradiente de velocidade<sup>[29]</sup>.

### 4.3 Modelagem Matemática

Os escoamentos turbulentos possuem alto grau de liberdade, o que caracteriza este tipo de sistema dinâmico. Este número de graus de liberdade é função do número de *Reynolds*. Assim sendo, quanto maior o número de *Reynolds*, maior será o número de graus de liberdade<sup>[5]</sup>.

A princípio, as equações de *Navier-Stokes* descrevem tanto os escoamentos laminares quanto os turbulentos sem a necessidade de informações adicionais. Contudo, escoamentos turbulentos com valores reais de número de *Reynolds* alcançam grandes escalas de comprimento e tempo e geralmente envolvem escalas de comprimento muito

maiores do que os pequenos volumes finitos que podem ser usados em uma análise numérica<sup>[4]</sup>.

A Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation* - DNS) desses escoamentos iria requer um poder computacional superior ao que está disponível nos dias de hoje.

Para permitir que os efeitos da turbulência sejam previstos, foram desenvolvidos os modelos de turbulência. Esses modelos foram desenvolvidos para que os efeitos da turbulência fossem detectados sem a necessidade de uma malha muito refinada e o uso da DNS. A maioria dos modelos de turbulência são estatísticos<sup>[4]</sup>.

No estudo de escalas de tempo muito maior que as escalas de tempo de flutuações turbulentas, pode-se dizer que os escoamentos turbulentos exibem características médias. Por exemplo, um componente de velocidade pode ser dividido num componente médio, e um componente que varia no tempo.

No presente trabalho foi utilizado o modelo  $k-\varepsilon$  a duas equações. Os modelos de turbulência a duas equações são largamente usados, por oferecerem uma boa combinação entre esforço numérico e exatidão computacional. Nos modelos a duas equações, as escalas de velocidade e do comprimento são resolvidas usando equações de transporte distintas, donde advém o nome para esses modelos<sup>[22]</sup>.

O modelo  $k-\varepsilon$  a duas equações usa a hipótese do gradiente de difusão para relacionar as tensões de *Reynolds* com os gradientes médios de velocidade e com a viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta é modelada como o produto de uma velocidade turbulenta e uma escala de comprimento turbulenta<sup>[22]</sup>.

O modelo  $k-\varepsilon$  introduz duas novas variáveis no sistema de equações de conservação:

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (4.1)$$

- Equação de momento:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla(\rho U \otimes U) - \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla U) = \nabla p' + \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla U)^T + B \quad (4.2)$$

onde  $B$  é a soma das forças sobre o corpo e  $p'$  é a pressão modificada, dada por:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (4.3)$$

e

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (4.4)$$

O modelo  $k-\varepsilon$  assume que a viscosidade turbulenta está ligada a energia cinética de turbulência e dissipação através da relação

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (4.5)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante,  $k$  é a energia cinética turbulenta e  $\varepsilon$  é a taxa dissipação da energia cinética turbulenta.

Os valores de  $k$  e  $\varepsilon$  são diretamente calculados a partir da equação diferencial de transporte para energia cinética de turbulência e da taxa de dissipação de turbulência.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho U \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (4.7)$$

onde  $P_k$  representa a produção de turbulência devido as forças viscosas e flutuante, as quais são modeladas usando

$$P_k = \mu_t \nabla U (\nabla U + \nabla U^T) - \frac{2}{3} (\nabla U) (3\mu_t \nabla U + \rho k) + P_{kb} \quad (4.8)$$

## 5. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

O objetivo da dinâmica dos fluidos computacional é ajudar a entender os eventos físicos que ocorrem num escoamento de fluidos, num determinado volume de controle, através da simulação computacional dos fenômenos que os envolve. A simulação em CFD é feita pela discretização de equações diferenciais parciais das equações de transporte (momento, massa e energia) que descrevem o escoamento<sup>[4]</sup>.

CFD é muito utilizado para simular escoamentos turbulentos, porém, a maior parte das soluções para esse tipo de escoamento contém modelos de turbulência que são apenas aproximações das características físicas reais do mesmo, e /ou que dependem de dados empíricos para a obtenção de diversas constantes agregadas nesses modelos.

Os erros gerados na solução numérica podem levar a pouca representatividade, ou a nenhuma, da solução, quando comparada com a realidade física. Logo, a ferramenta numérica é adequada e confiável quando se está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais, e de um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico. Vale ressaltar que a correta visualização e interpretação das soluções geradas são tão importantes quanto a solução em si<sup>[22]</sup>.

A aplicação de CFD, usando o *software* CFX, a problemas físicos, e sua resolução pela aplicação de modelos matemáticos num domínio limitado, segue os seguintes passos ou etapas, visualizadas na Figura (5.1) abaixo:

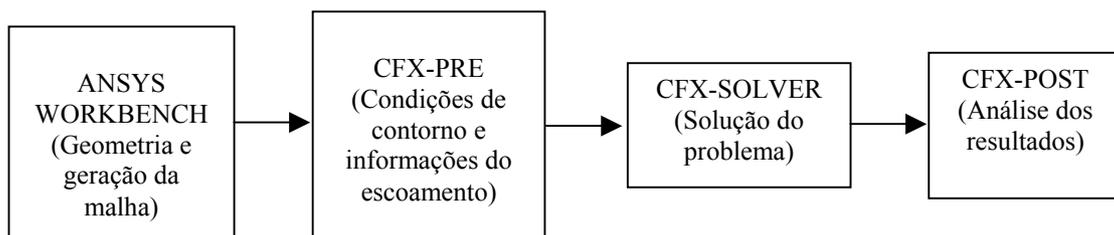


Figura. 5.1 - Passos para uma simulação de CFD usando o CFX.

## **5.1 Malha**

A malha é o conjunto de sub-regiões, ou elementos, em que se divide o domínio geométrico do problema. As equações são resolvidas gerando variáveis com valores discretos, em cada elemento, e a solução de um elemento será utilizada como condição de contorno para o elemento adjacente. Devido a isso, devemos ter uma malha apropriada, com refinamento em regiões cujos gradientes de variação das variáveis são mais elevados, para que se possa captar essas variações (como ocorre nas regiões de parede)<sup>[4]</sup>.

## 6. Materiais e Métodos

### 6.1. Software Utilizado

O software utilizado para a geração da geometria e da malha foi o *Ansys Workbench* e o pacote para a simulação do problema foi o CFX 10.0 da *Ansys Technology*.

### 6.2. Variáveis de Interesse

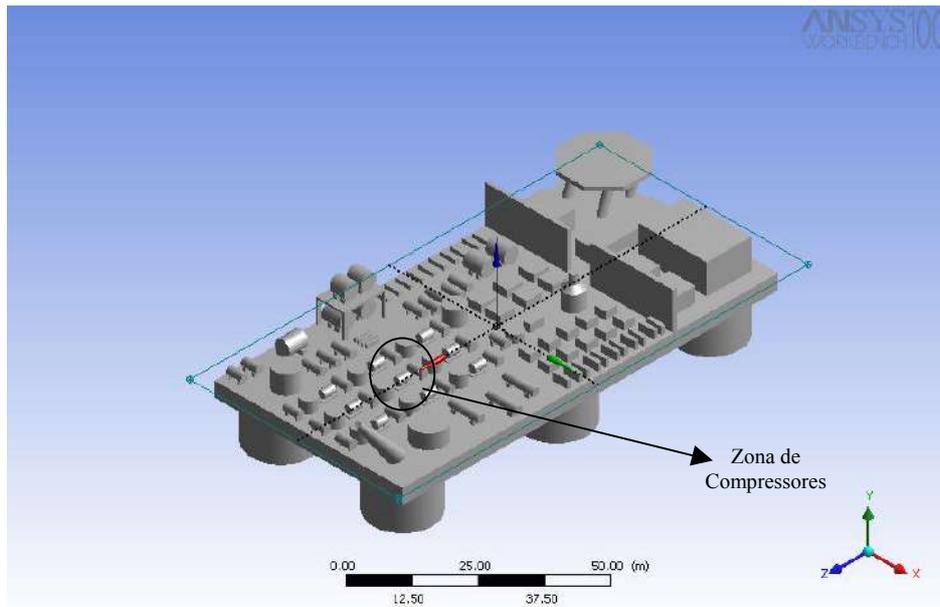
Na simulação da dispersão de gases em uma plataforma de petróleo é necessário analisar os perfis de velocidade gerados no volume de contorno adotado, as concentrações dos gases liberados em um vazamento e também as características da pluma formada após a dispersão, bem como a possível formação de zonas com acúmulo de gás.

### 6.3. Geometria Utilizada

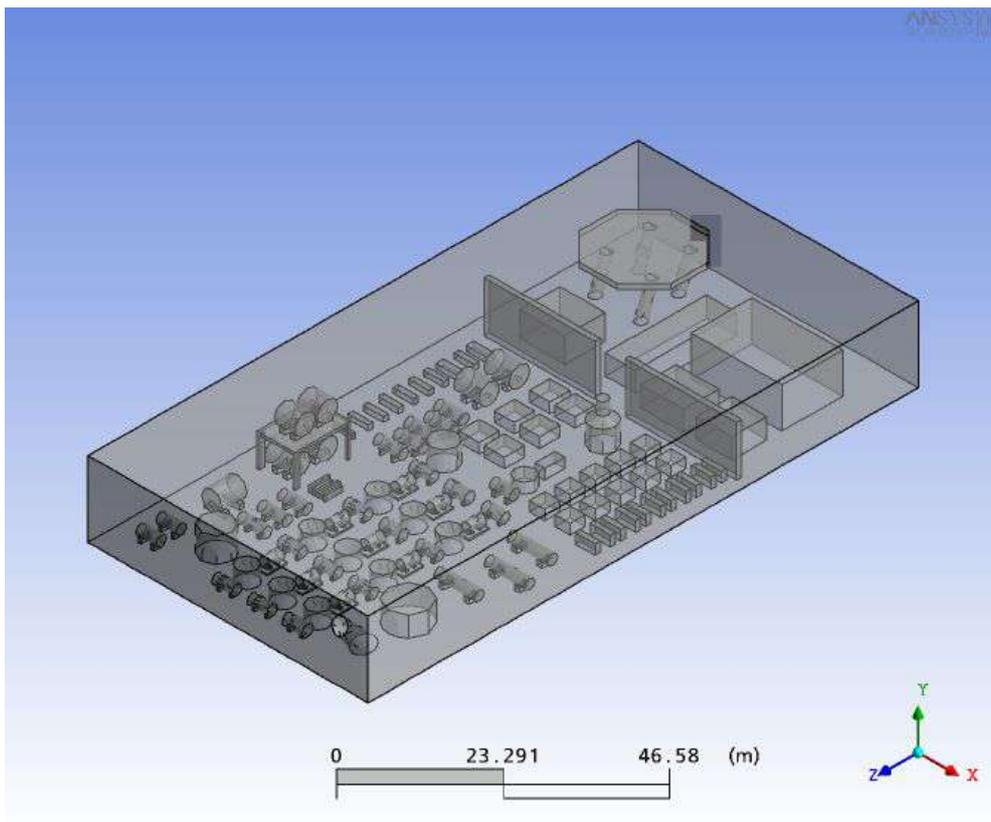
A geometria utilizada foi adaptada a partir de fotos de livros, revistas e jornais das plataformas de petróleo, em funcionamento, da Petrobrás S/A. Assim sendo, a geometria adotada foi a de, uma plataforma que se assemelha às plataformas semi-submersíveis posicionadas na Bacia de Campos, RJ.

A Figura 6.1 mostra o modelo de plataforma utilizado nas simulações. A este modelo foi adicionado um contorno equivalente ao ar ambiente no entorno da plataforma. Para que este volume não ficasse grande em demasia, a parte superior da lança do *flare* foi descartada (Figura 6.2).

Usando a ferramenta de geração de malha (CFX-MESH), foi gerada a malha correspondente à geometria da Figura 6.2. A malha gerada é composta por elementos tetraédricos, contendo camadas de células prismáticas próximo às paredes (*inflated boundaries*). Além de ter sido colocado um *point control* em cada possível ponto de vazamento (Figura 6.3).



**Figura 6.1 - Geometria de uma plataforma semi-submersível semelhantes às usadas pela Petrobrás S/A.**



**Figura 6.2 - Geometria inscrita no contorno da plataforma.**

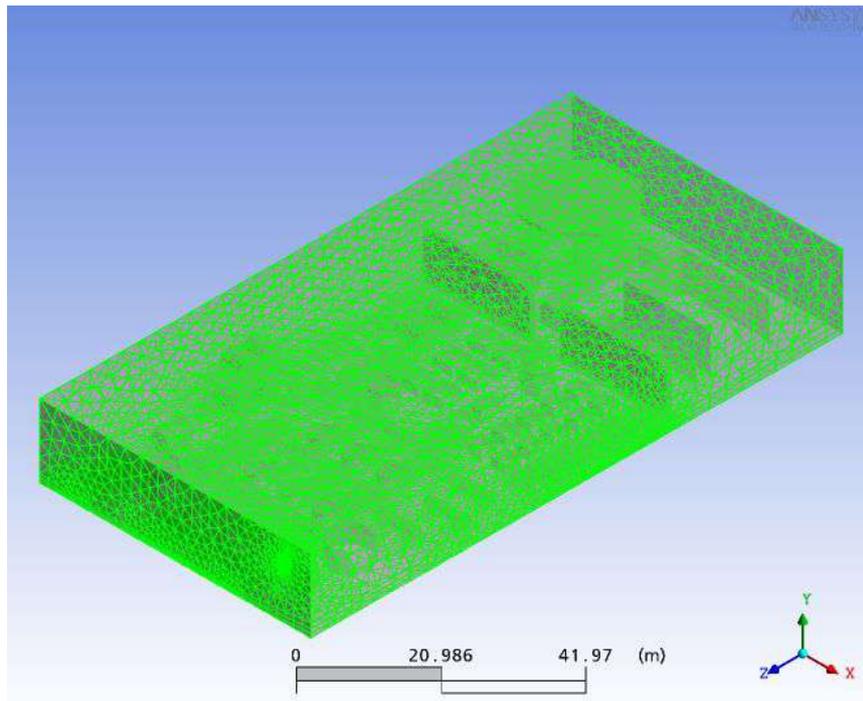


Figura. 6.3 - Malha gerada no CFX-MESH a partir da geometria usada.

#### 6.4. Condições de Contorno

No CFX-MESH foram definidas as regiões 2D que deveriam ser consideradas no CFX-PRE, para a modelagem do problema. Ou seja, as direções para orientação da plataforma (Tabela 6.1) e os possíveis locais de vazamento.

Considerando que a plataforma utilizada no presente trabalho foi idealizada a partir de fotos de plataformas semi-submersíveis da Petrobrás, não foi possível prever o real posicionamento da mesma na Bacia de Campos. Assim sendo, foi determinada uma face do volume de contorno como sendo a de entrada na direção norte, esta foi a face onde está o *flare* (Figura 6.4).

Os possíveis locais de vazamento foram determinados através dos estudos de maior probabilidade de vazamento em plataformas *offshore*. Como já mencionado, os compressores são os pontos que oferecem maior probabilidade de acidentes, logo foi tomado o compressor mais congestionado como o ponto crítico na geometria proposta no presente trabalho. Este é o compressor do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores (Figura 6.5).

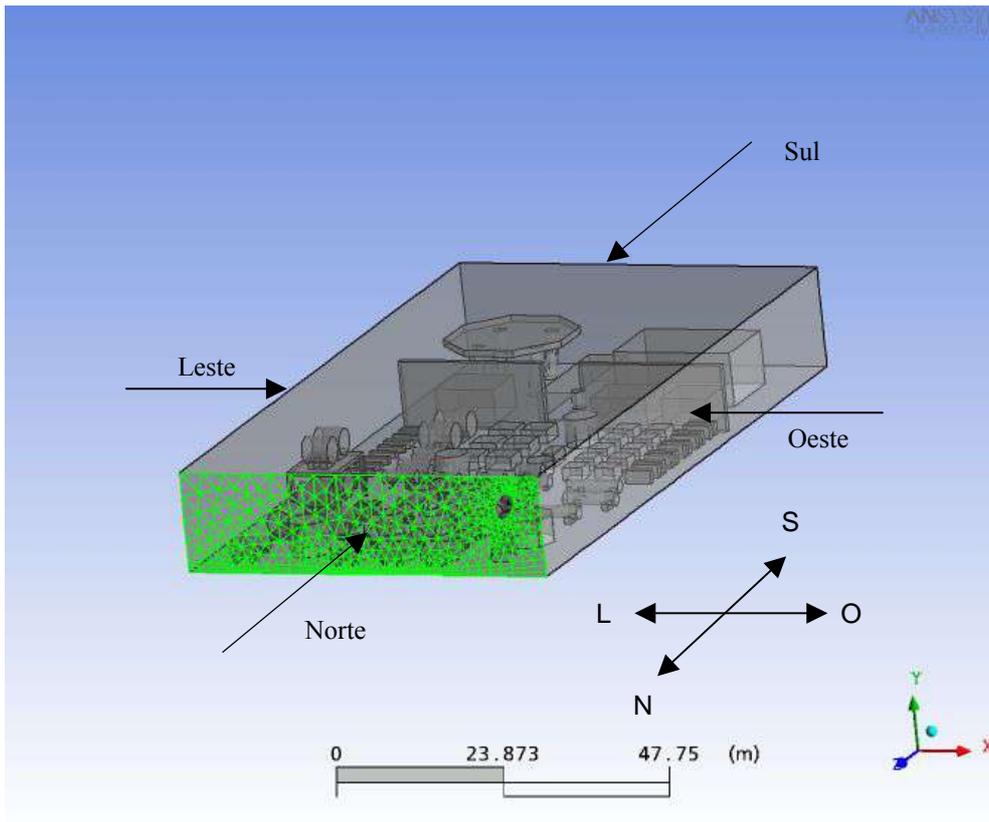
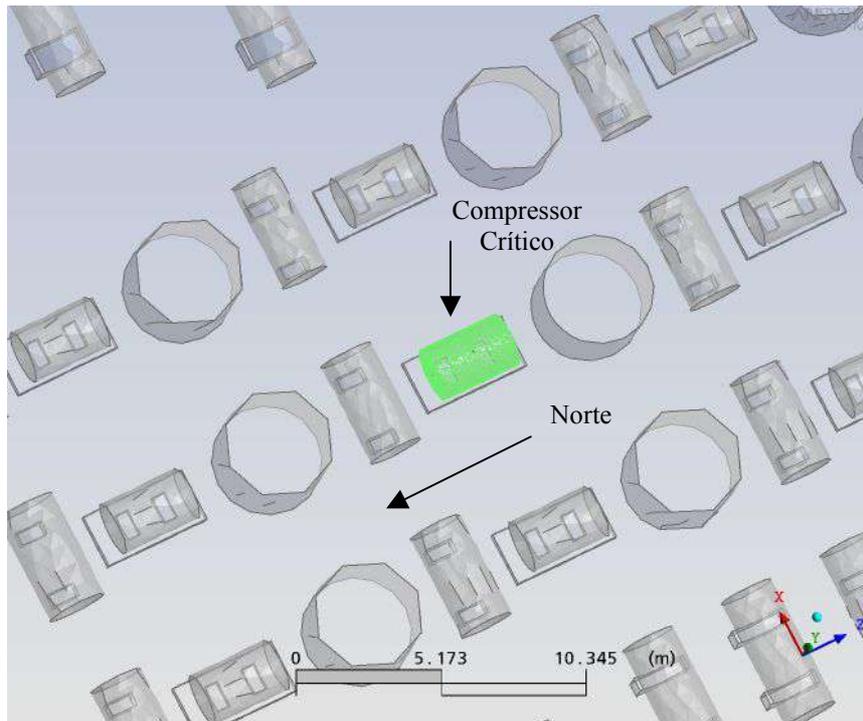


Figura. 6.4 - Malha da direção de entrada no volume de controle escolhida como norte e direção dos ventos.

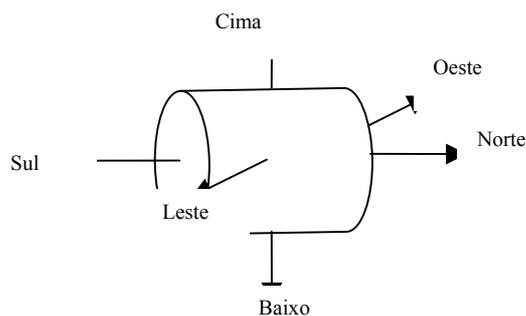
Tabela 6.1 - Direções do vento e suas respectivas velocidades médias (Fonte: SIMO / Bacia de Campos)

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



**Figura 6.5 - Malha do compressor do segundo estágio de compressão do segundo trem de compressores, escolhido como compressor crítico.**

Foram analisadas seis possíveis direções para o vazamento neste compressor, um esquema foi montado para a possível visualização de como os vazamentos foram tratados (Figura 6.6). A identificação dos vazamentos foi feita com a ajuda da orientação dos eixos que está disponível no *Workbench*. As direções com *m* na identificação, representam as direções negativas.



**Figura. 6.6 - Direções de possíveis vazamentos no compressor escolhido como o mais crítico.**

O diâmetro de 10mm adotado para o orifício de vazamento foi estimado a partir dos dados obtidos das estatísticas de vazamentos de hidrocarbonetos do HSE<sup>[8]</sup>.

Como a pressão média dentro de um compressor que está no segundo estágio de compressão é de 100 Kgf/cm<sup>2</sup>, e o escoamento do gás será contra a pressão atmosférica, temos que o escoamento será crítico ou sônico, logo a velocidade de escoamento na saída do orifício de vazamento deve ser a velocidade do som, 340 m/s.

A composição do gás de estudo está representada na Tabela 6.2.

Adotou-se, para o gás de estudo, uma composição típica de gás extraído em plataformas de perfuração (Tabela 6.2).

**Tabela 6.2 - Composição do gás.**

Material	Fração Molar
Inertes	0,13
CH <sub>4</sub>	0,80
CO <sub>2</sub>	1,2 10 <sup>-3</sup>
H <sub>2</sub> S	1,5 10 <sup>-5</sup>
H <sub>2</sub> O	0,07

Durante a formulação do problema no CFX-PRE foi necessário especificar como o CFX-SOLVER iria tratar as faces do volume de contorno durante as simulações. As regiões 2D poderiam ser tratadas das seguintes formas: *inlet*, *outlet*, *wall* (*free slip* ou *no slip*) ou *opening*.

Quando uma região 2D é tratada como sendo *inlet*, significa que o fluido especificado estará entrando no volume de controle. No caso de *outlet* o fluido estará saindo do volume. Quando a região for uma *wall*, deve-se dizer se ela é *free slip* (sem aderência) ou *no slip* (com aderência). E também se pode especificar a região como sendo um caso de *opening*, onde o fluido poderá estar entrando ou saindo do volume de controle.

### 6.5. Planejamento Experimental

Foi determinado que pelos orifícios de vazamento apenas entraria, no volume de controle, o gás especificado na tabela 6.2 e pelas regiões 2D somente entraria ou sairia ar.

Todas as simulações foram feitas usando a mesma geometria e malha da plataforma idealizada, os parâmetros que variaram foram: direção da entrada do ar e sua respectiva velocidade, a direção da saída do ar, o orifício de vazamento e a velocidade do gás no orifício.

Na tabela 6.3 estão especificadas as simulações realizadas.

Com todo o problema formulado no CFX-PRE foi gerado o arquivo com os modelos e condições de contorno adotados, e este foi simulado com a ajuda do CFX-SOLVER.

**Tabela 6.3 - Especificação das simulações realizadas.**

Simulação	Inlet	Outlet	Vel. (m/s)	Vazamento	Paredes	Obs.
Sim1	Norte	Sul	8,23	X	Leste/Oeste	
Sim2	Norte	Sul	8,23	mX	Leste/Oeste	<i>Opening</i>
Sim3	Norte	Sul	8,23	Y	Leste/Oeste	
Sim4	Norte	Sul	8,23	mY	Leste/Oeste	
Sim5	Norte	Sul	8,23	Z	Leste/Oeste	
Sim6	Norte	Sul	8,23	mZ	Leste/Oeste	
Sim7	Sul	Norte	6,54	X	Leste/Oeste	
Sim8	Sul	Norte	6,54	mX	Leste/Oeste	
Sim9	Sul	Norte	6,54	Y	Leste/Oeste	
Sim10	Sul	Norte	6,54	mY	Leste/Oeste	
Sim11	Sul	Norte	6,54	Z	Leste/Oeste	
Sim12	Sul	Norte	6,54	mZ	Leste/Oeste	
Sim13	Oeste	Leste	5,69	X	Norte/Sul	
Sim14	Oeste	Leste	5,69	mX	Norte/Sul	
Sim15	Oeste	Leste	5,69	Y	Norte/Sul	
Sim16	Oeste	Leste	5,69	mY	Norte/Sul	
Sim17	Oeste	Leste	5,69	Z	Norte/Sul	
Sim18	Oeste	Leste	5,69	mZ	Norte/Sul	
Sim19	Leste	Oeste	6,13	X	Norte/Sul	
Sim20	Leste	Oeste	6,13	mX	Norte/Sul	
Sim21	Leste	Oeste	6,13	Y	Norte/Sul	<i>Opening</i>
Sim22	Leste	Oeste	6,13	mY	Norte/Sul	
Sim23	Leste	Oeste	6,13	Z	Norte/Sul	
Sim24	Leste	Oeste	6,13	mZ	Norte/Sul	
Sim25	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	X	-	
Sim26	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	mX	-	
Sim27	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	Y	-	Erro
Sim28	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	mY	-	
Sim29	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	Z	-	
Sim30	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	mZ	-	
Sim31	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	X	-	
Sim32	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	mX	-	
Sim33	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	Y	-	
Sim34	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	mY	-	
Sim35	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	Z	-	
Sim36	Sul/Oeste	Norte/Leste	4,94	mZ	-	
Sim37	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	X	-	
Sim38	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	mX	-	
Sim39	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	Y	-	
Sim40	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	mY	-	
Sim41	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	Z	-	
Sim42	Norte/Oeste	Sul/Leste	3,38	mZ	-	
Sim43	Norte/Leste	Sul/Oeste	5,81	Y	-	

## **7. Resultados e Discussão**

Os resultados foram apresentados sob duas formas de visualização, com as quais foi facilitada a verificação dos riscos inerentes ao vazamento, dada uma determinada direção do vento e posição do vazamento. (a) a primeira forma de apresentação é a visualização da pluma formada após o vazamento. Adotou-se, para traçar esta pluma, a região onde a fração volumétrica do gás natural dispersado é igual a 0,001 (ou 1.000 ppm); (b) a segunda região é apresentada na forma de um plano que possui uma variação de coloração em função da fração volumétrica do gás.

A partir dos resultados obtidos, puderam-se tecer considerações a respeito do pior cenário envolvido no vazamento, sendo este o que proporciona maior risco a pessoas que se encontrem na região atingida pelo vazamento.

Dois fatores principais serviram para direcionar a verificação deste cenário de maior risco: espalhamento (dispersão) do gás após o vazamento e concentração do gás em função da posição. Conseqüentemente, quanto maior o espalhamento do gás, maior será a área submetida ao risco inerente a este fenômeno. No caso da concentração do gás, quanto maior a concentração do gás em áreas de possível acesso de pessoas, maior será o risco a que estas estarão submetidas.

Os resultados serão apresentados divididos em função da direção do vento, sendo apontado o cenário de maior risco em cada direção.

## **7.1. Análise das Direções**

### **7.1.1. Direção Sul**

As Figuras 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 7.9 e 7.11 ilustram as plumas formadas após os vazamentos no compressor com vento na direção sul. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

Enquanto isso, as Figuras 7.2, 7.4, 7.6, 7.8, 7.10 e 7.12 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro desta e correndo de norte a sul.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidades para o escoamento do ar na direção sul estão nas Figuras 7.13 e 7.14.

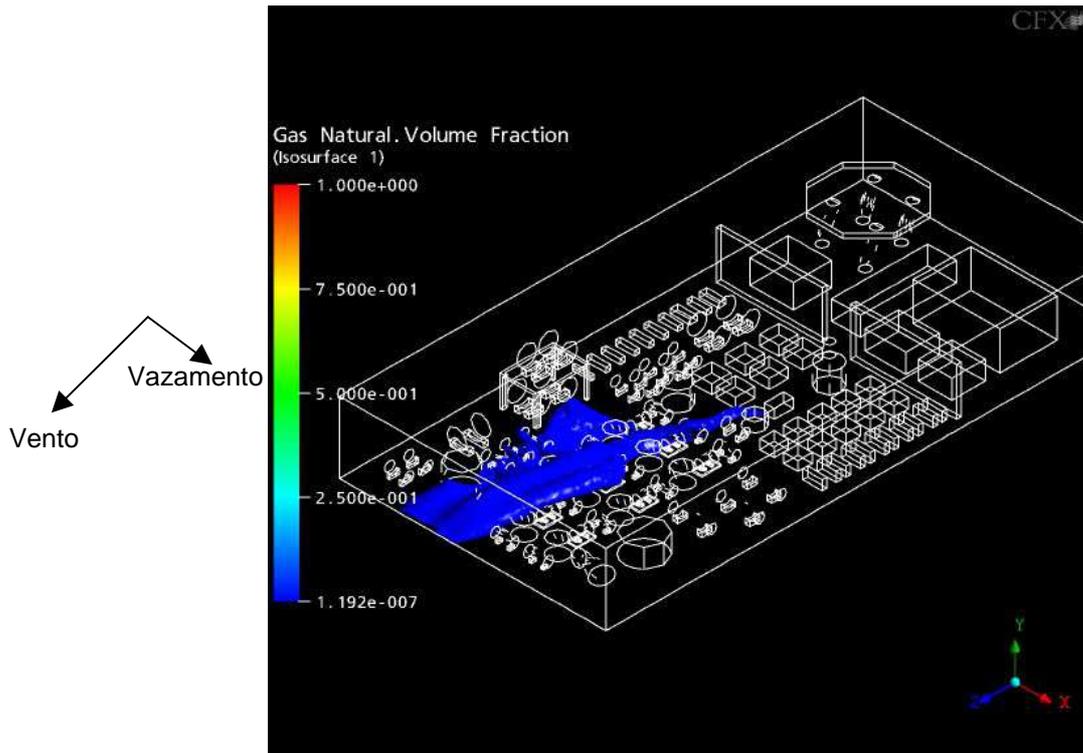


Figura. 7.1. - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção leste.

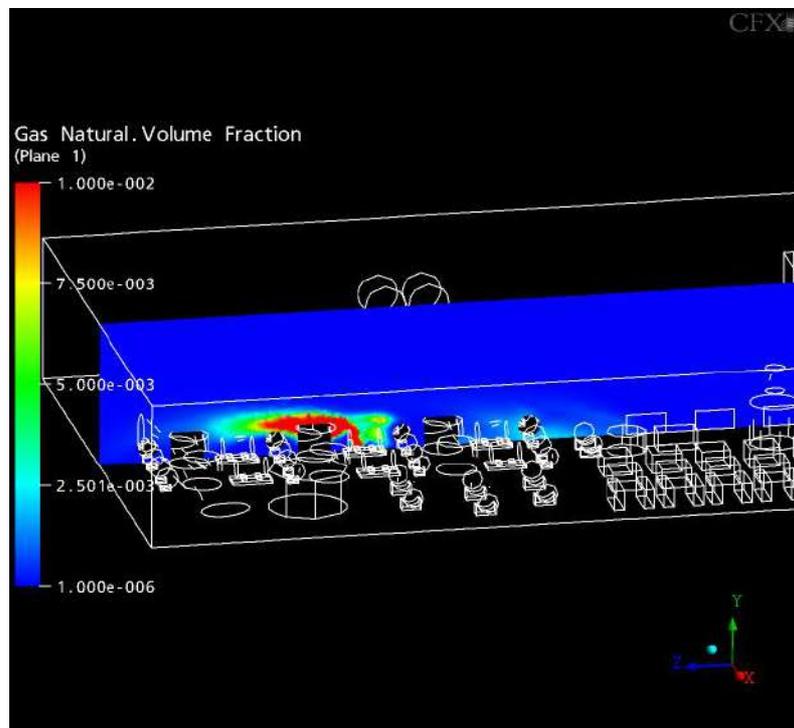


Figura. 7.2. - Plano do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção leste.

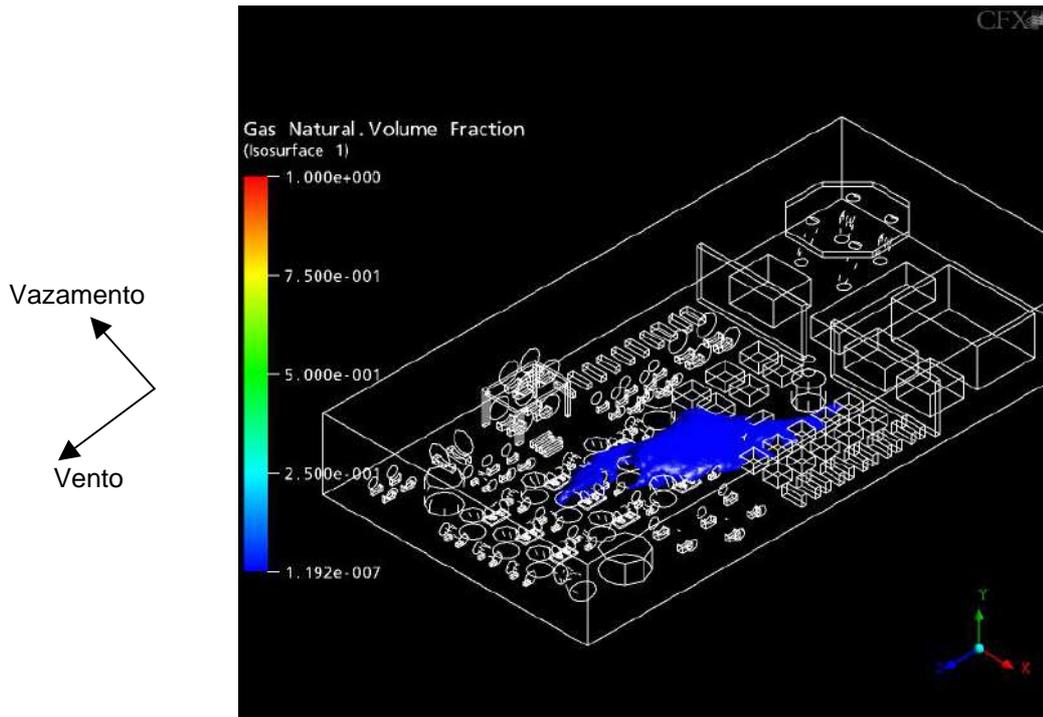


Figura. 7.3. - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção oeste.

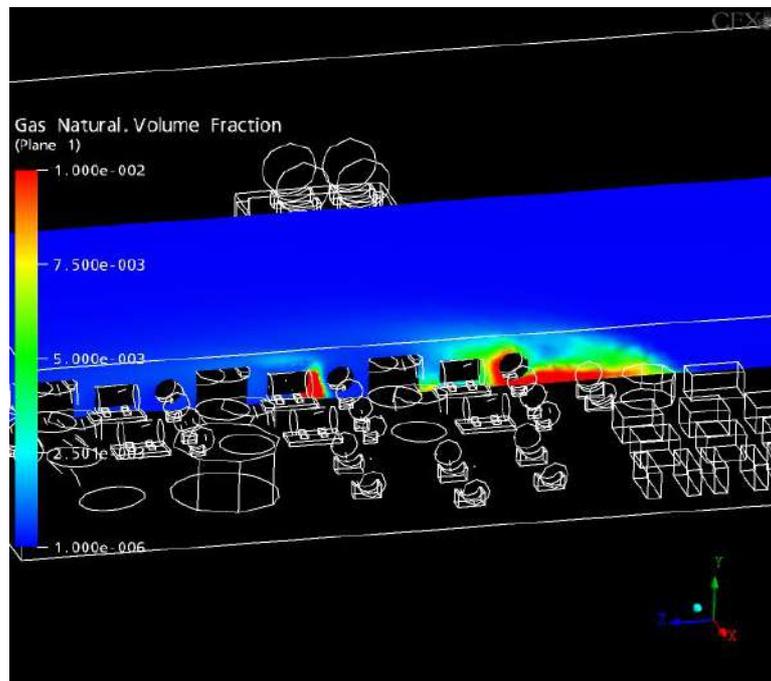


Figura. 7.4. - Plano do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção oeste.

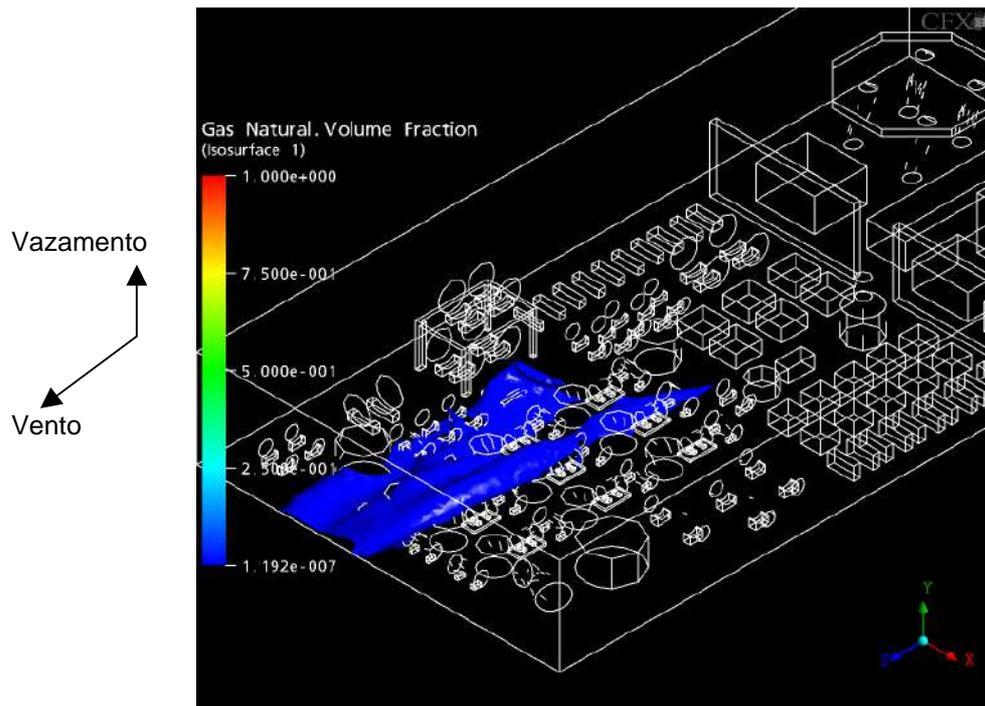


Figura. 7.5. - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção para cima.

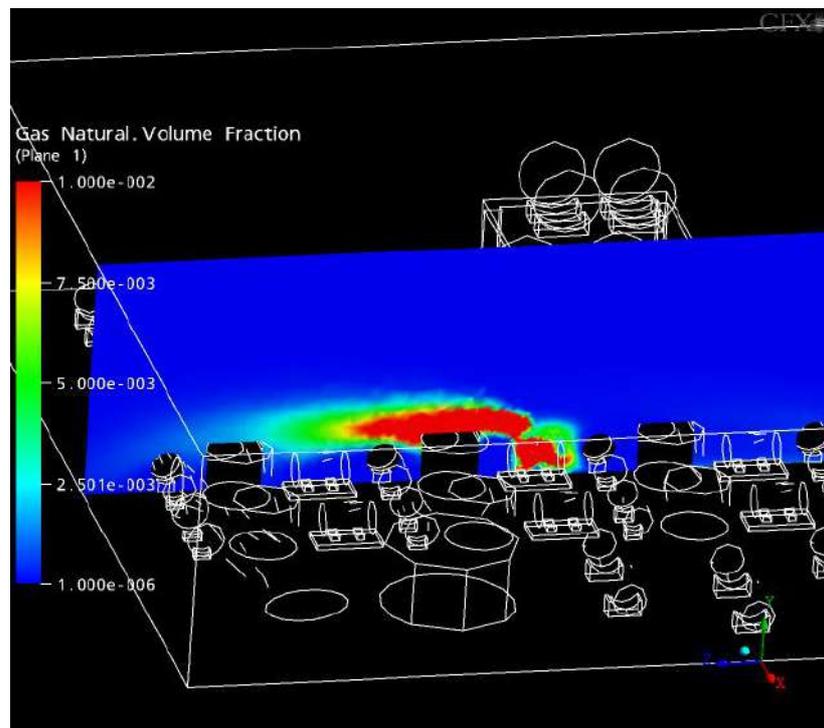


Figura. 7.6. - Plano do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção para cima.

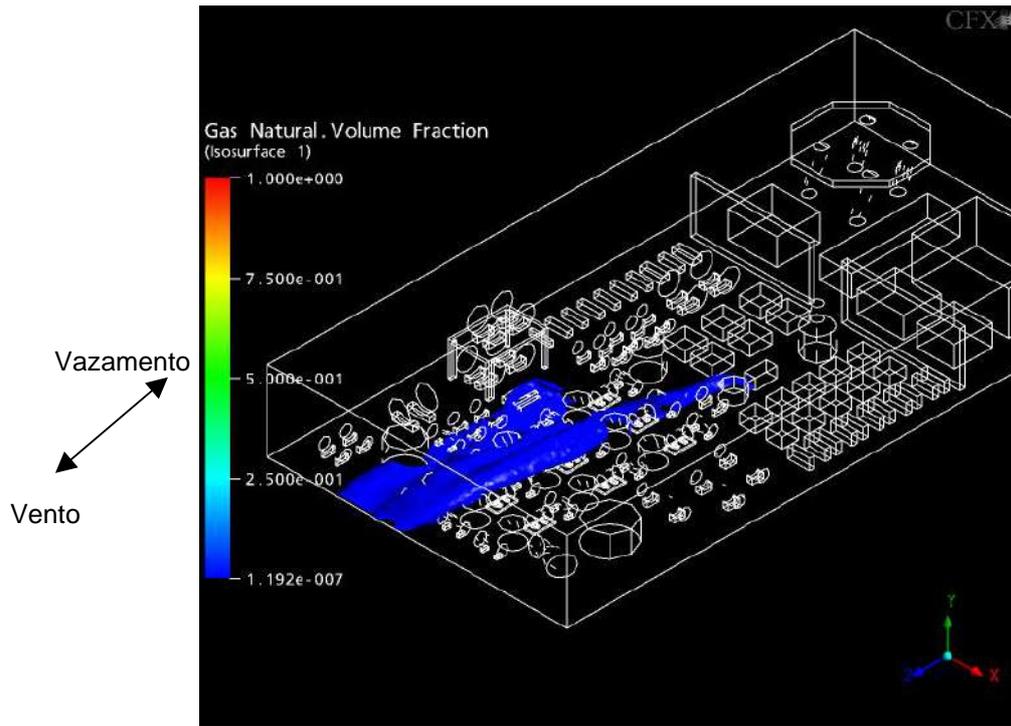


Figura. 7.7. - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção norte.

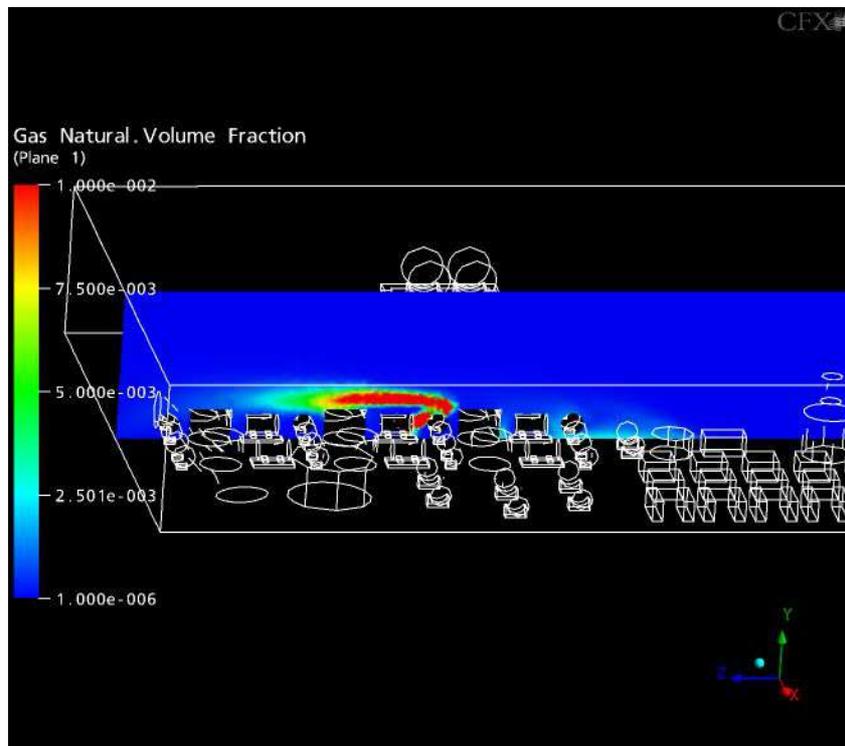


Figura. 7.8. - Plano do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção norte.

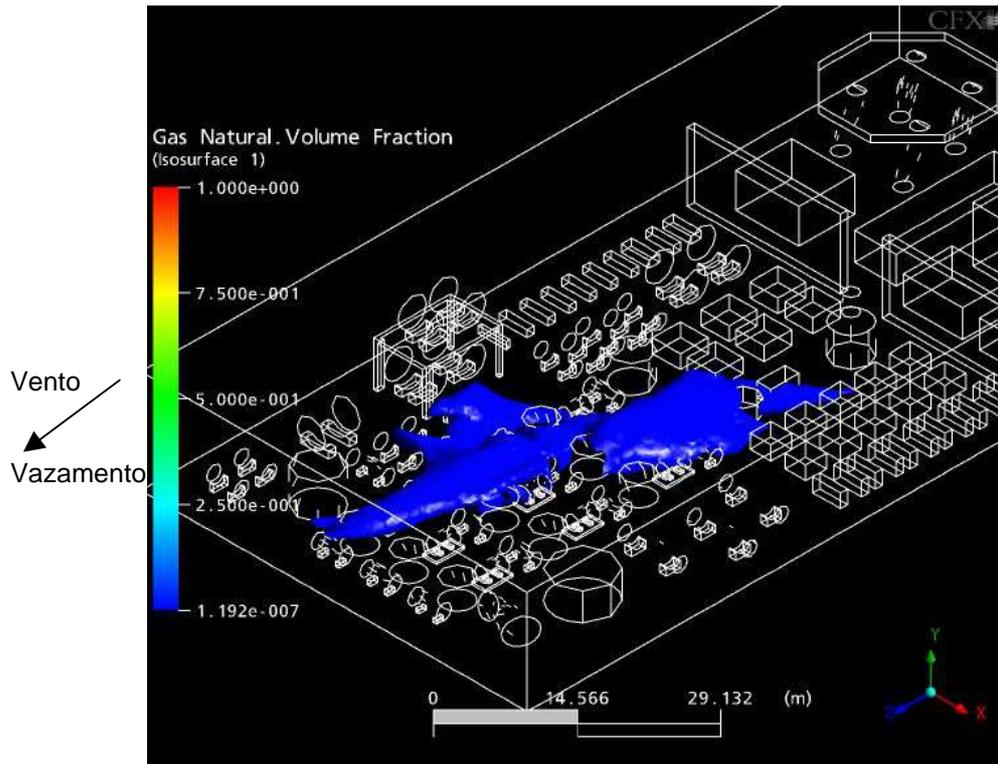


Figura. 7.9. - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção sul.

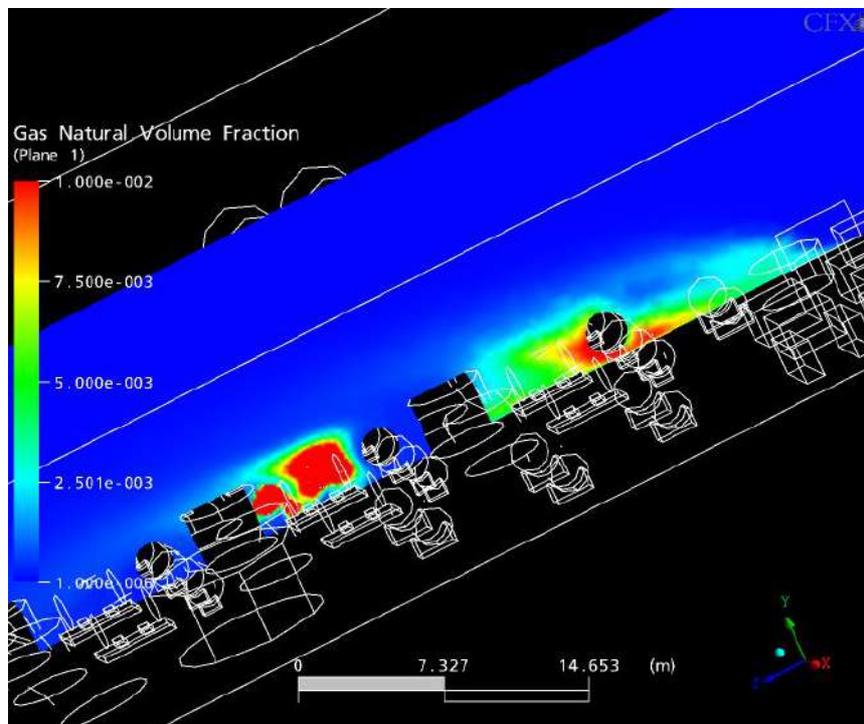


Figura. 7.10. - Plano vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção sul.

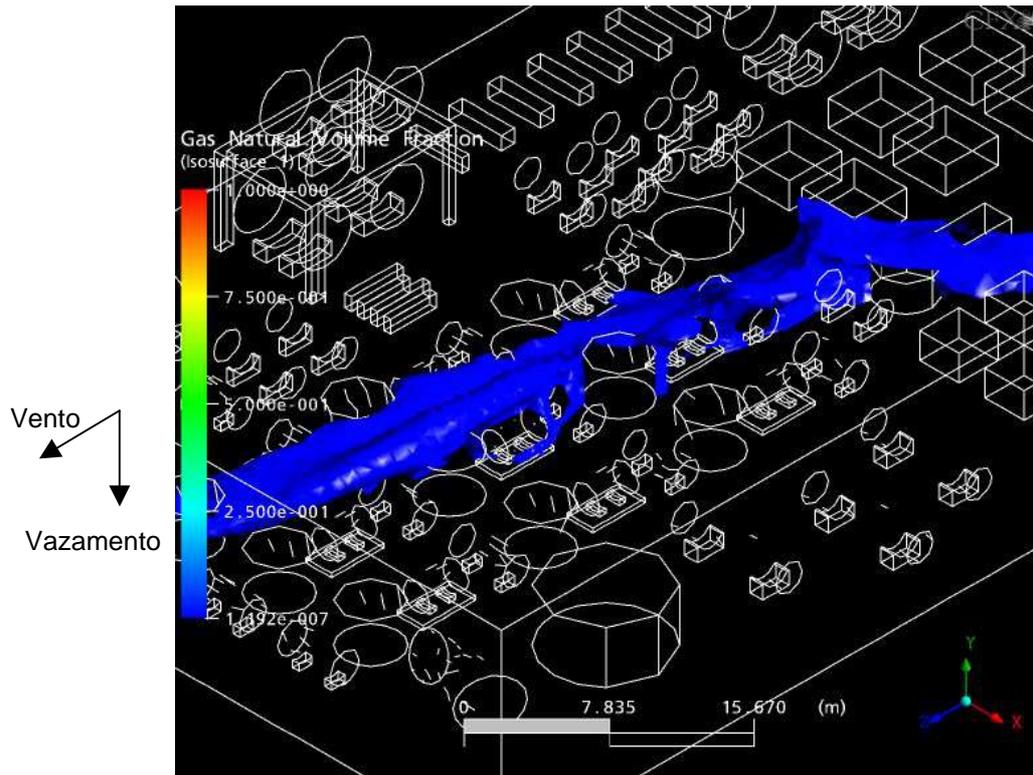


Figura. 7.11 - Pluma do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção para baixo.

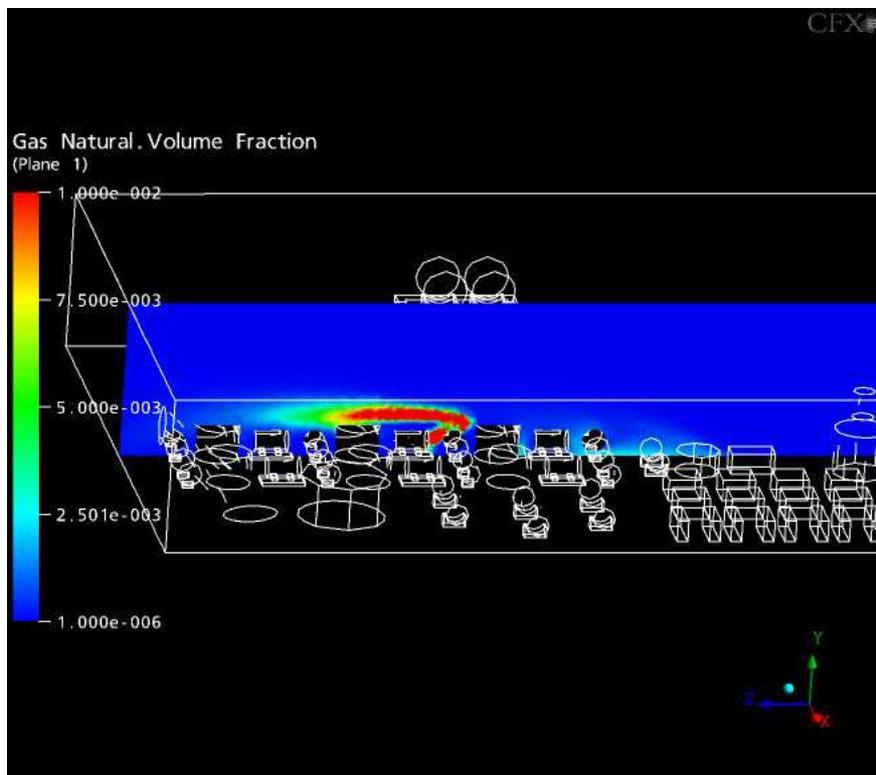


Figura. 7.12 - Plano do vazamento com vento de 6,54 m/s na direção sul e vazamento na direção para baixo.

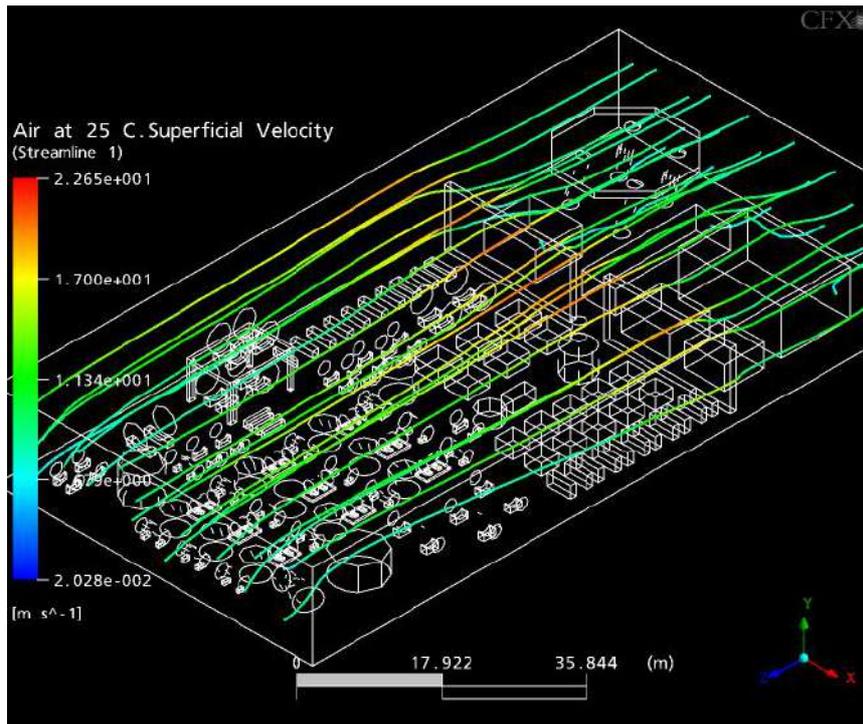


Figura. 7.13 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Sul.

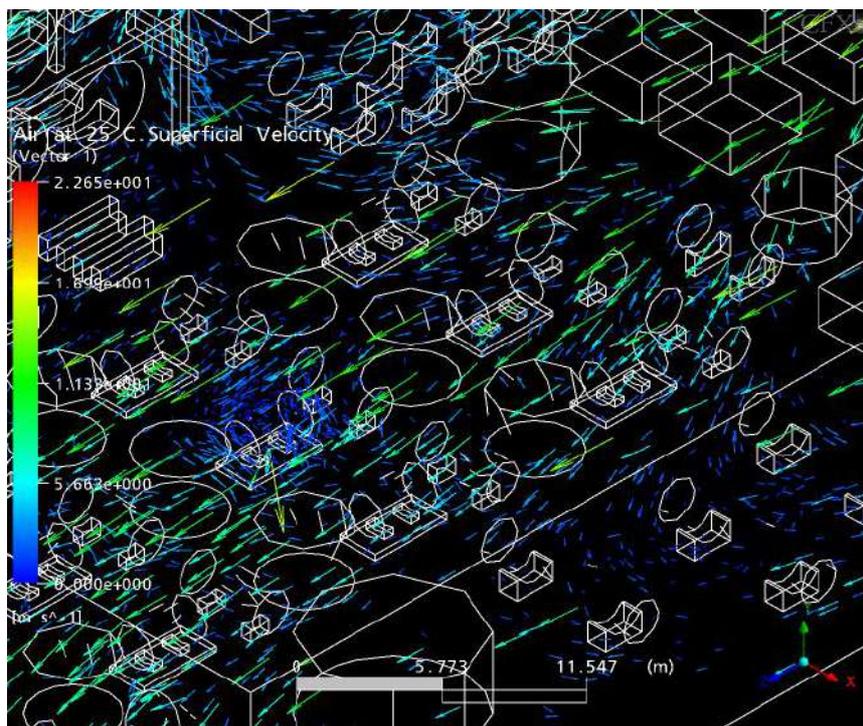


Figura. 7.14 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Sul.

Uma análise das Figuras 7.13 e 7.14 mostra a formação de zonas de recirculação de ar devido aos impedimentos que a geometria da plataforma oferecem ao escoamento do ar.

Essas zonas de recirculação, com baixa velocidade, podem ocasionar no confinamento do gás liberado, fazendo com que sua dispersão seja dificultada, agravando o cenário.

Outra observação a ser feita, a respeito dos resultados da região sul, é o alto grau de espalhamento do gás; lembrando que a pluma é uma região de mesma fração volumétrica de valor 0,001 ou 1.000 ppm, concentração essa suficiente para causar irritabilidade e mal estar a pessoas expostas. Tal espalhamento é proveniente da dificuldade de arraste do vento vindo do sul da plataforma (região do helideck) devido ao impedimento do fluxo de ar ocasionado pelos “*fire-walls*”, facilitando o espalhamento do gás vazado.

Os “*fire-walls*” servem para impedir a extensão de incêndios eventuais para as instalações como: refeitórios, dormitórios, salas de controle e demais áreas com maior número de pessoas. Estas áreas estão localizadas na parte sul da plataforma. Ao mesmo tempo, estes anteparos diminuem drasticamente o fluxo do vento proveniente da região sul, ocasionando, na região após o “*fire-wall*” (área de processo), uma diminuição no poder de arraste do vento, principalmente na região próxima ao piso, onde ocorrem recirculações que propiciam um aumento na região atingida pelo vazamento.

Em termos da extensão da pluma formada após o vazamento, o vazamento para baixo (Figura 7.11) foi o maior dentre os demais. O gás liberado se espalhou da ponta norte da plataforma até a “*fire-wall*”, ocasionando assim, numa grande área exposta ao risco desse tipo de vazamento. Entretanto, o grau de espalhamento é apenas uma das características do vazamento que nos levam a posicioná-lo como o que apresenta maior ou menor risco. Outro fator igualmente importante é o perfil de concentração em função da posição.

Um fato surpreendente é que em todos os tipos de vazamento, pode-se verificar uma zona de alta concentração de gás entre a região sul da plataforma (de onde provêm os ventos) e o vazamento em si, mais precisamente no trocador de calor localizado na terceira bateria de compressores na mesma direção do vazamento. Era de se esperar que o fluxo de ar arrastasse a pluma do vazamento para a região norte da plataforma. Isto, entretanto, não ocorre em função das recirculações existentes.

Dentro do perfil de concentração obtido, o vazamento oeste (Figura 7.4) apresentou maior área de elevada concentração na região da terceira bateria de compressores, como também na região do vazamento em si. Nesta figura, pode-se verificar o acúmulo de gás desde o nível da plataforma até o topo do trocador. Portanto, conclui-se que o cenário obtido com o vazamento oeste é o que expõe ao trabalhador a um ambiente de maiores riscos de intoxicação, tanto pela grande área de dispersão do gás quanto pelas elevadas concentrações ao nível da plataforma.

### **7.1.2. Direção Leste**

As Figuras 7.15, 7.17, 7.19, 7.21, 7.23 e 7.25 apresentam as plumas formadas após os vazamentos no compressor com vento na direção sul. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

Já as Figuras 7.16, 7.18, 7.20, 7.22, 7.24 e 7.26 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro do compressor crítico e correndo de leste a oeste.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidades superficiais do ar para o escoamento na direção Leste estão nas Figuras 7.27 e 7.28.

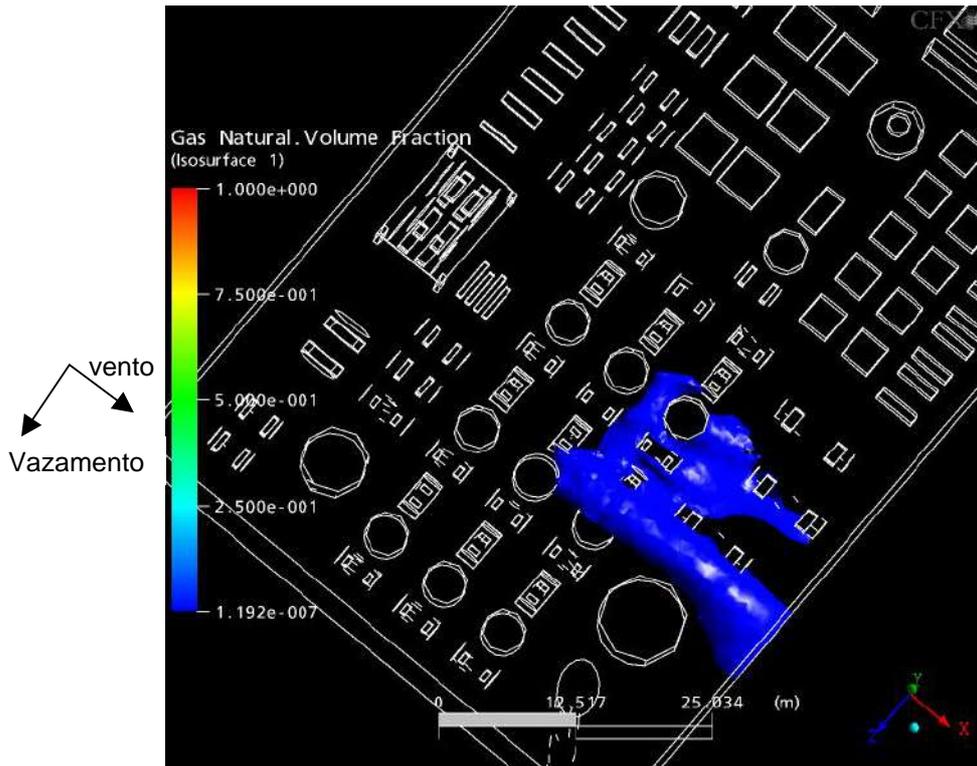


Figura. 7.15 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção sul.

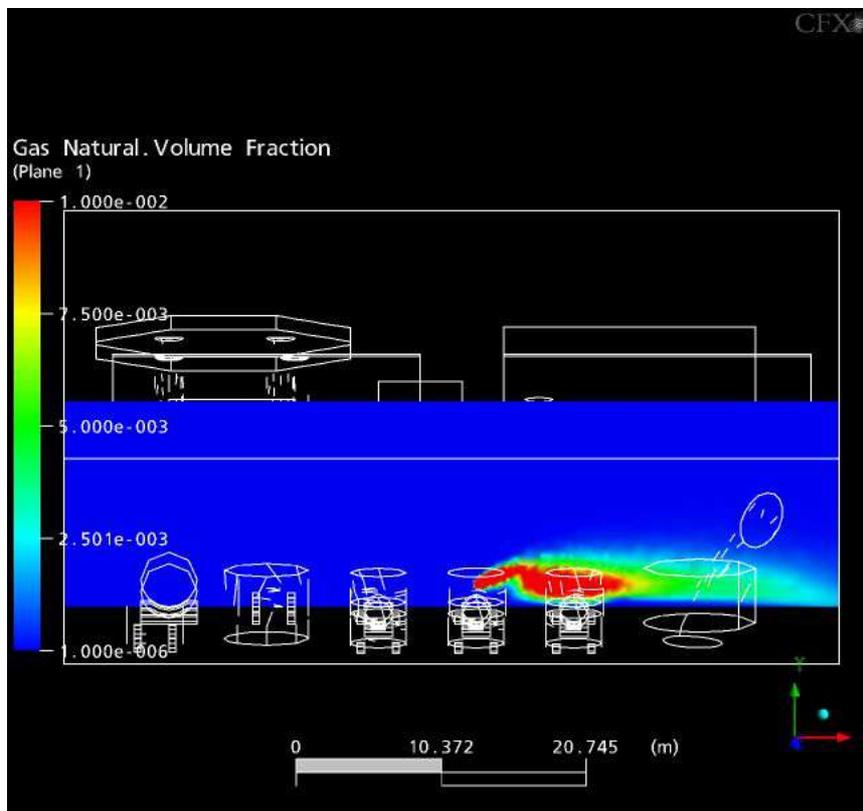


Figura. 7.16 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção sul.

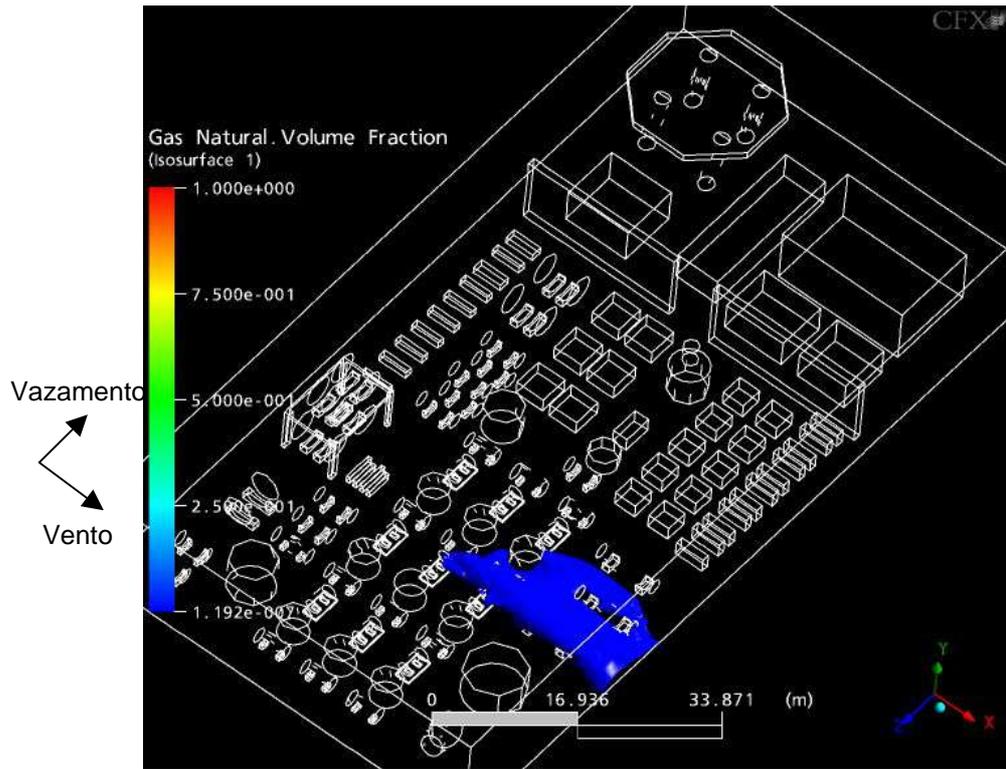


Figura. 7.17 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção norte.

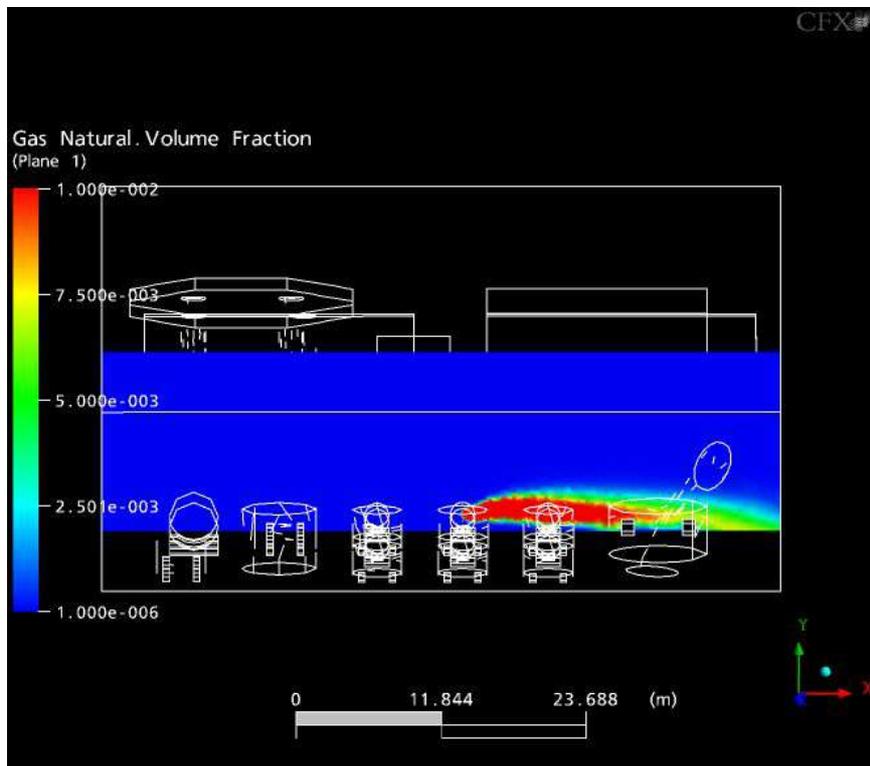


Figura. 7.18 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção norte.

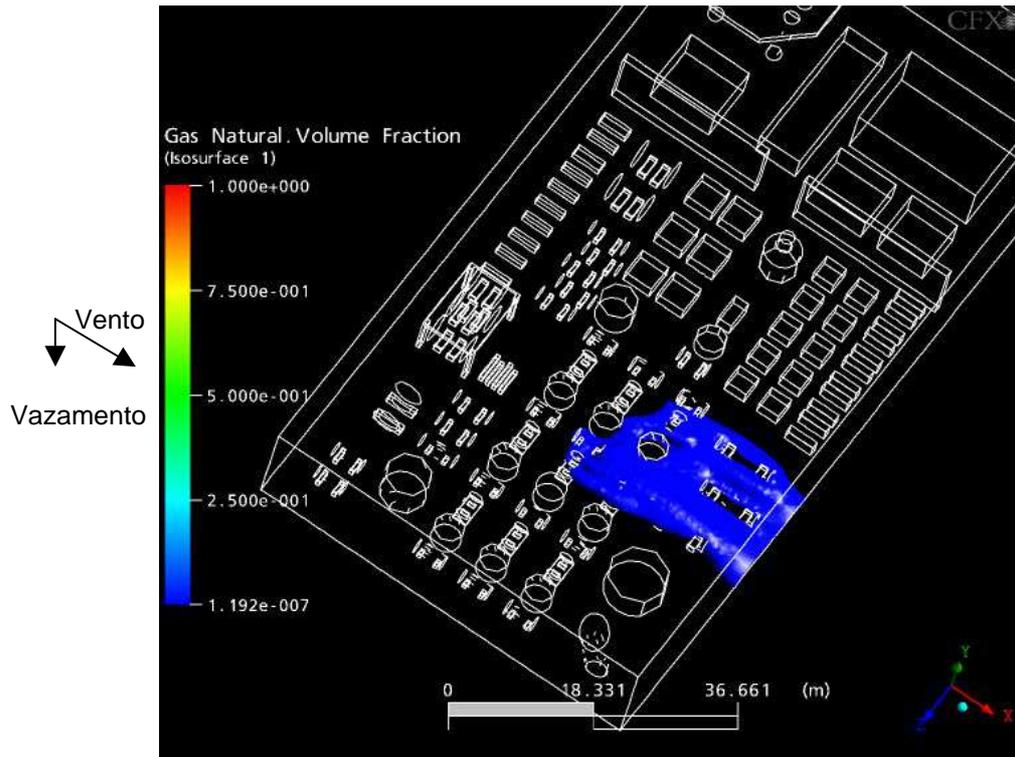


Figura. 7.19 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento para baixo.

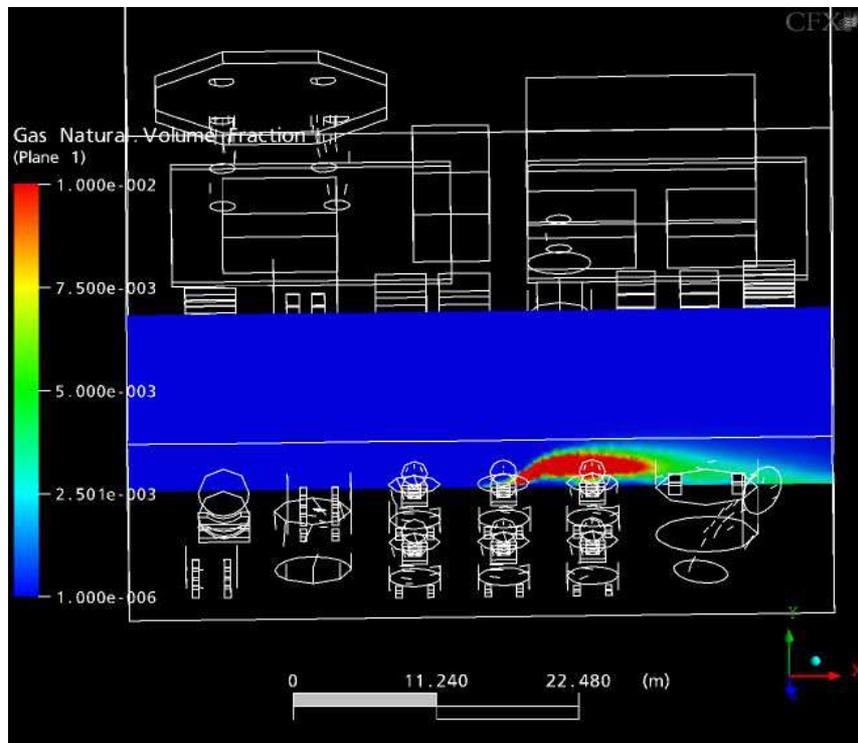


Figura. 7.20 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento para baixo.

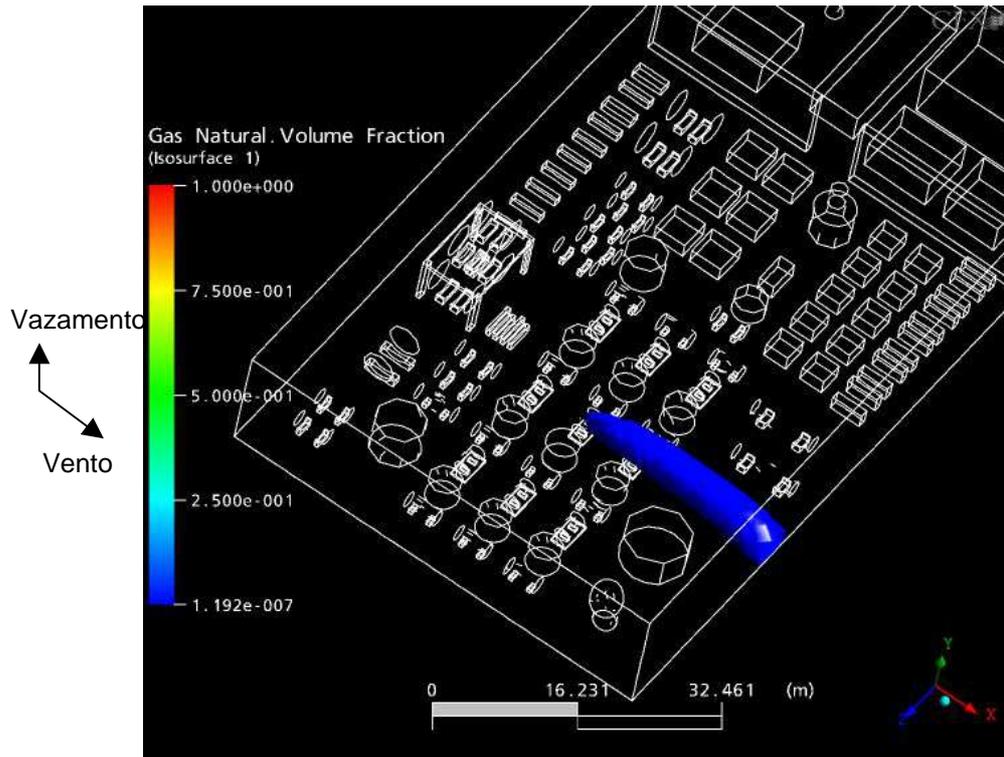


Figura. 7.21 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento para cima.

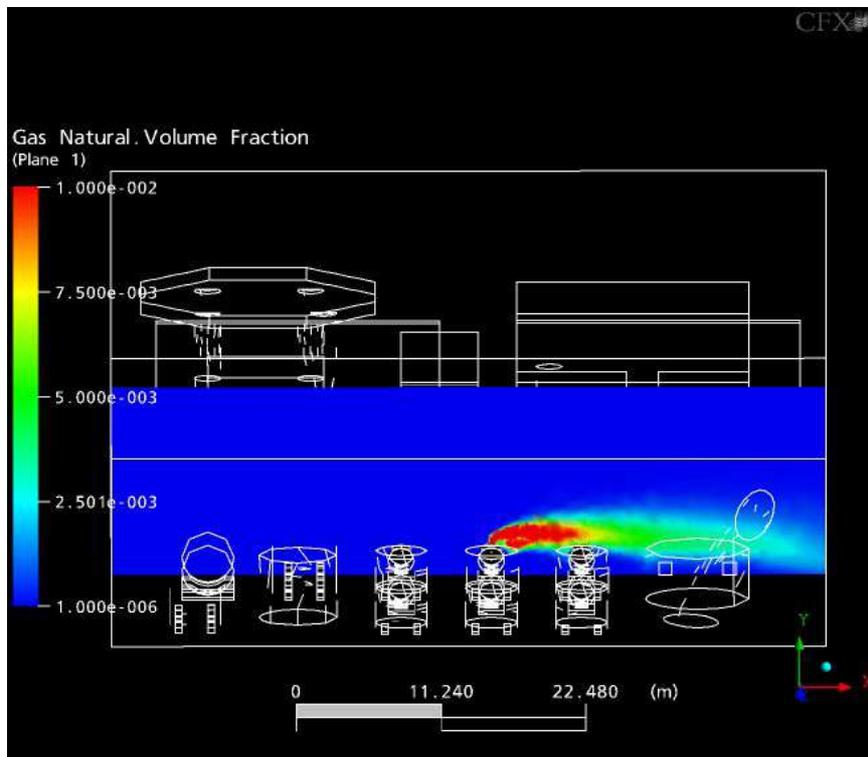


Figura. 7.22 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento para cima.

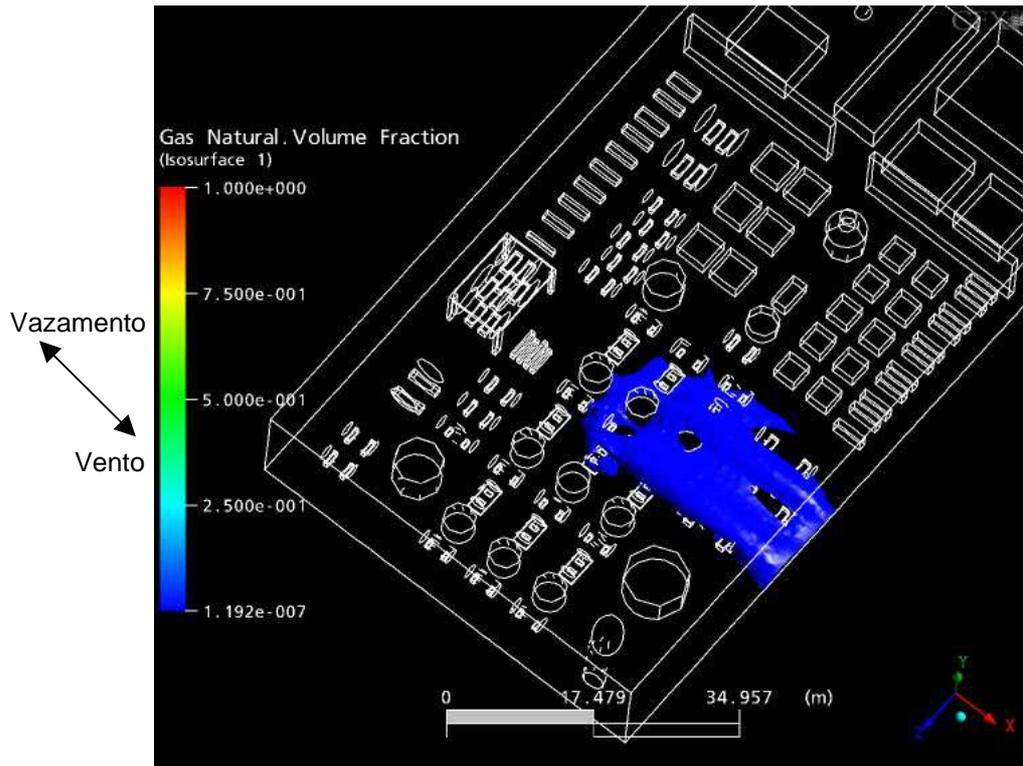


Figura. 7.23 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção oeste.

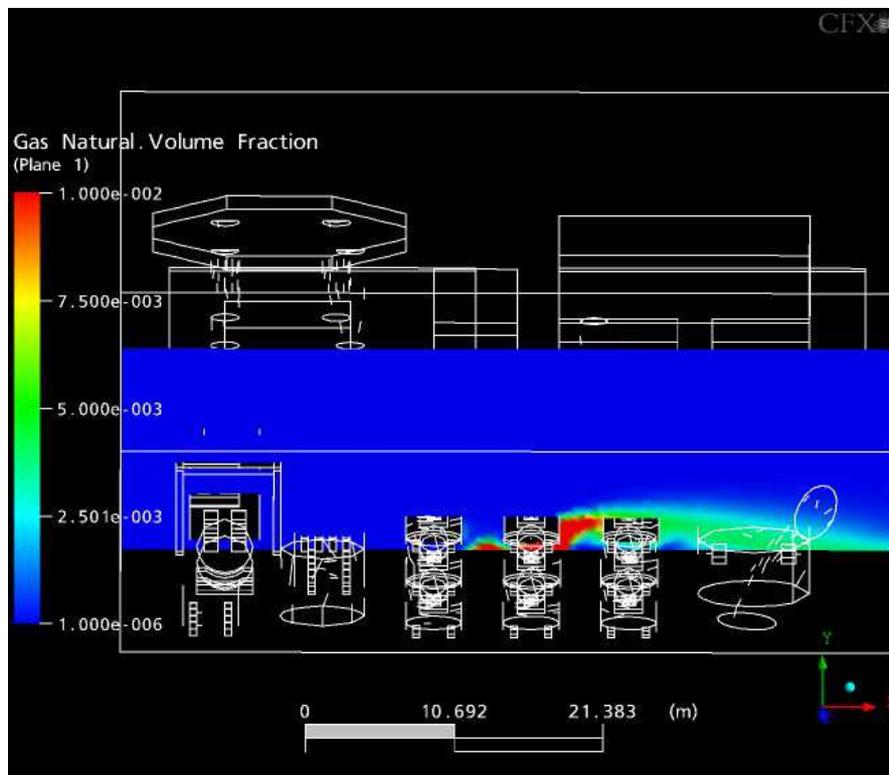


Figura. 7.24 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção oeste.

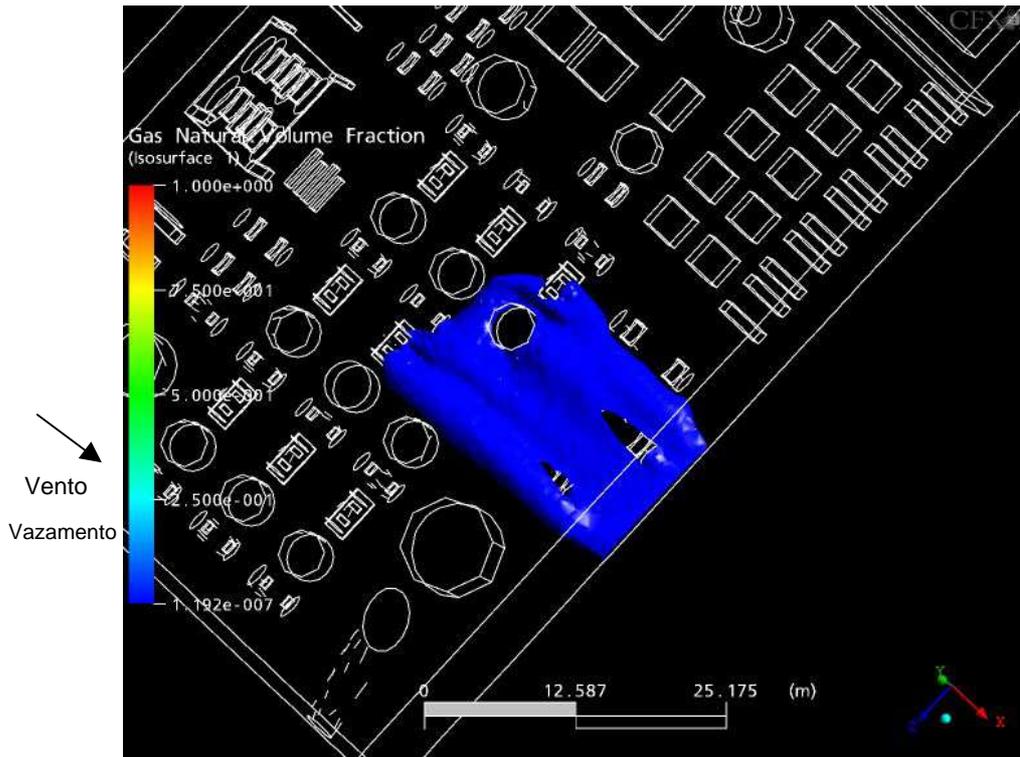


Figura. 7.25 - Pluma do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção leste.



Figura. 7.26 - Plano do vazamento com vento 6,13 m/s na direção leste e vazamento na direção leste.

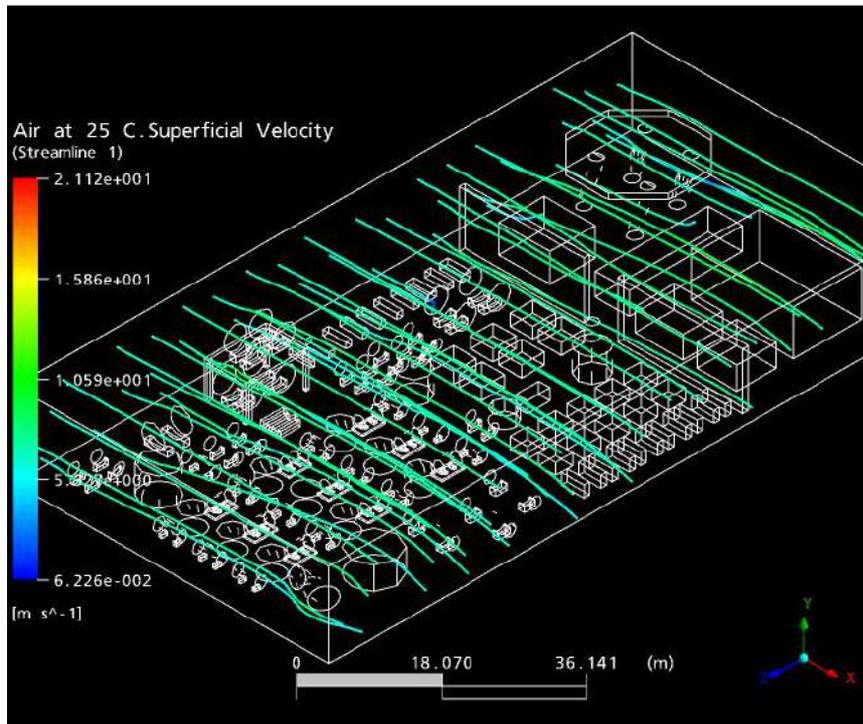


Figura. 7.27 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Leste.

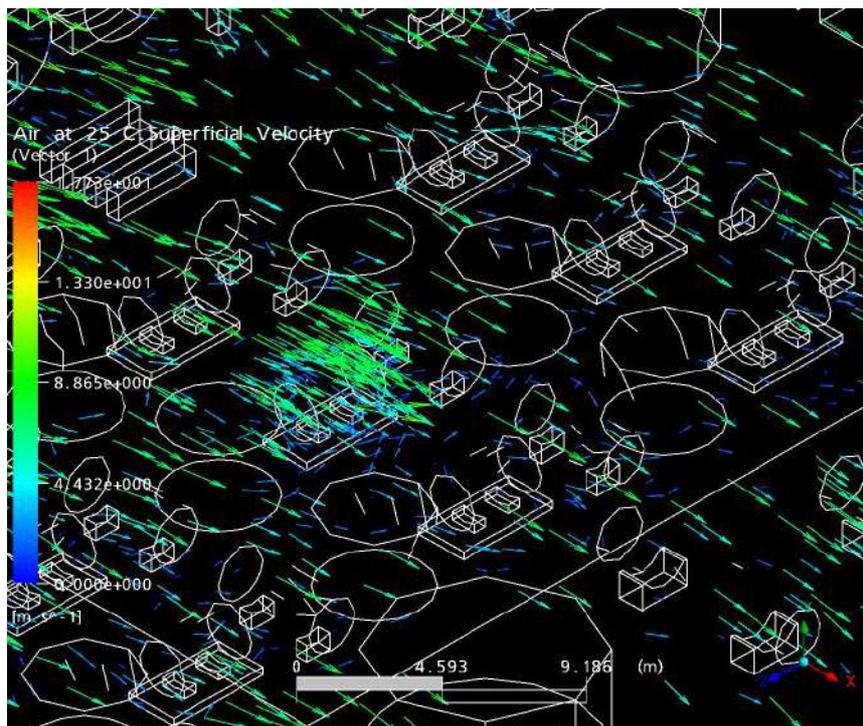


Figura. 7.28 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Leste.

Partindo dos mesmos critérios de avaliação da direção anterior, verifica-se que em função do grau de espalhamento do gás liberado, os vazamentos para cima, oeste e leste (Figuras 7.19, 7.23 e 7.25) foram os que apresentaram uma maior área de dispersão,

mas em comparação com a direção anterior as áreas expostas aos riscos do vazamento são menores.

Analisando os perfis de concentração de cada tipo de vazamento, verifica-se uma situação de extremo risco uma vez que as concentrações atingem valores maiores que 100 ppm em regiões ao nível da plataforma, e conseqüentemente ao nível dos trabalhadores. Esta situação se observa no vazamento norte (Figura 7.18). Vale ressaltar que os limites inferiores e superiores de flamabilidade dos hidrocarbonetos são respectivamente, 5.3 e 15 % no ar<sup>[23]</sup>. A pluma gerada por este vazamento se estende desde o furo no compressor até a borda da lateral oeste da plataforma, com uma zona de concentração elevada próxima ao vazamento.

Portanto, conclui-se que o vazamento norte é o que tende a ocasionar um ambiente de maior risco. Mesmo sendo um vazamento onde a pluma formada não cobriu a maior área da região do processo da plataforma, o perfil de concentração da mesma apresentou uma maior área de concentração elevada (> que 10.000 ppm) ao nível da plataforma, sendo assim, potencialmente mais perigosa.

Assim como na direção sul, a Figura 7.28 mostra as zonas de recirculação de ar.

### **7.1.3. Direção Oeste**

As Figuras 7.29, 7.31, 7.33, 7.35, 7.37 e 7.39 apresentam as plumas, de mesma fração volumar, formadas após os vazamentos no compressor escolhido como crítico com vento na direção oeste. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

As Figuras 7.30, 7.32, 7.34, 7.36, 7.38 e 7.40 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, cortando a região do vazamento e correndo de leste a oeste.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidades superficiais do ar para o escoamento na direção oeste estão nas Figuras 7.41 e 7.42.

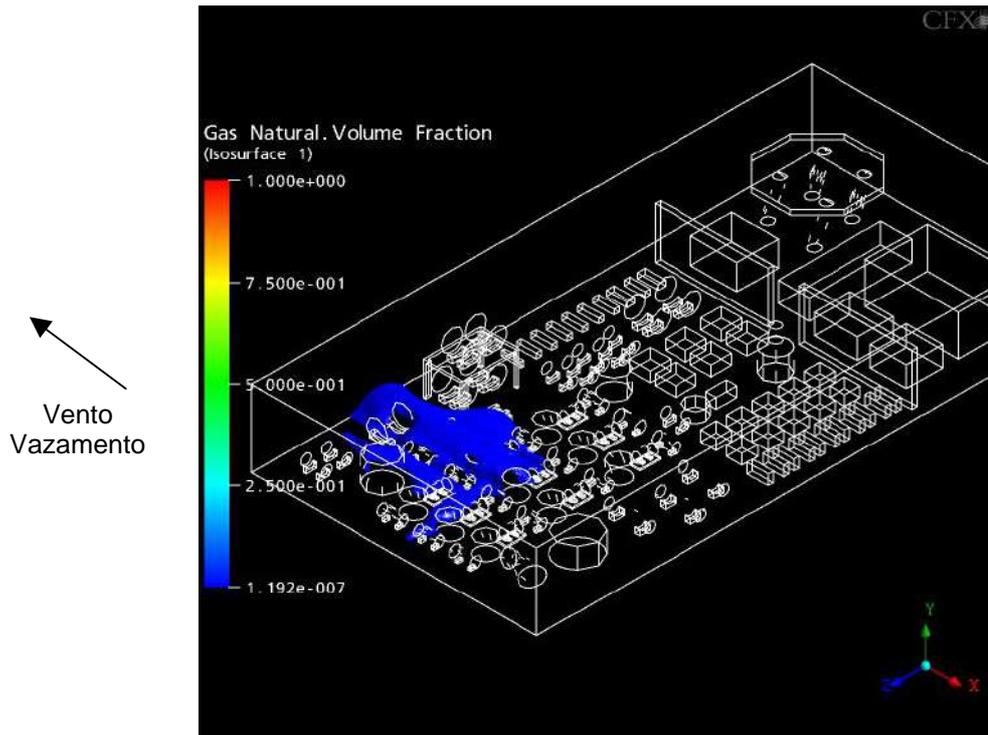


Figura. 7.29 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção oeste.

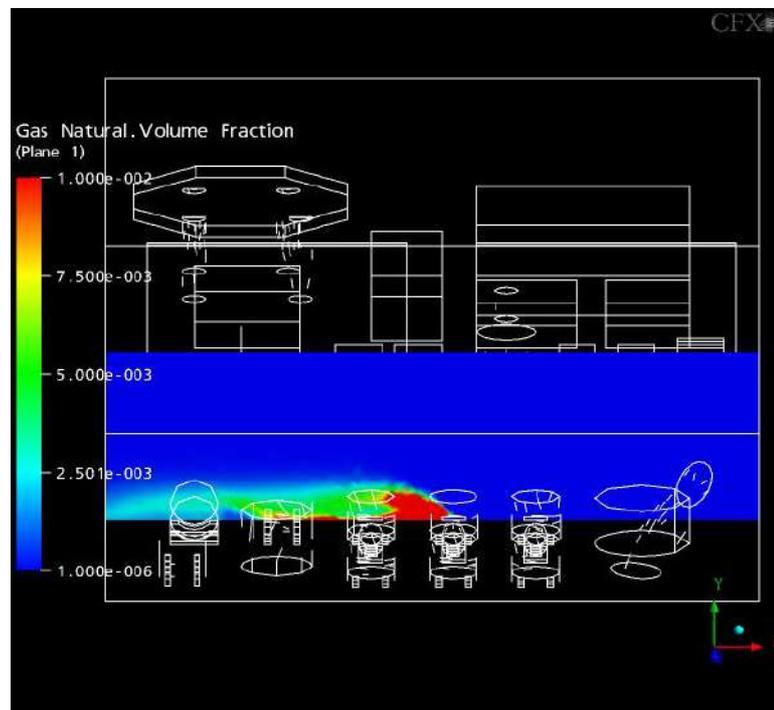


Figura. 7.30 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção oeste.

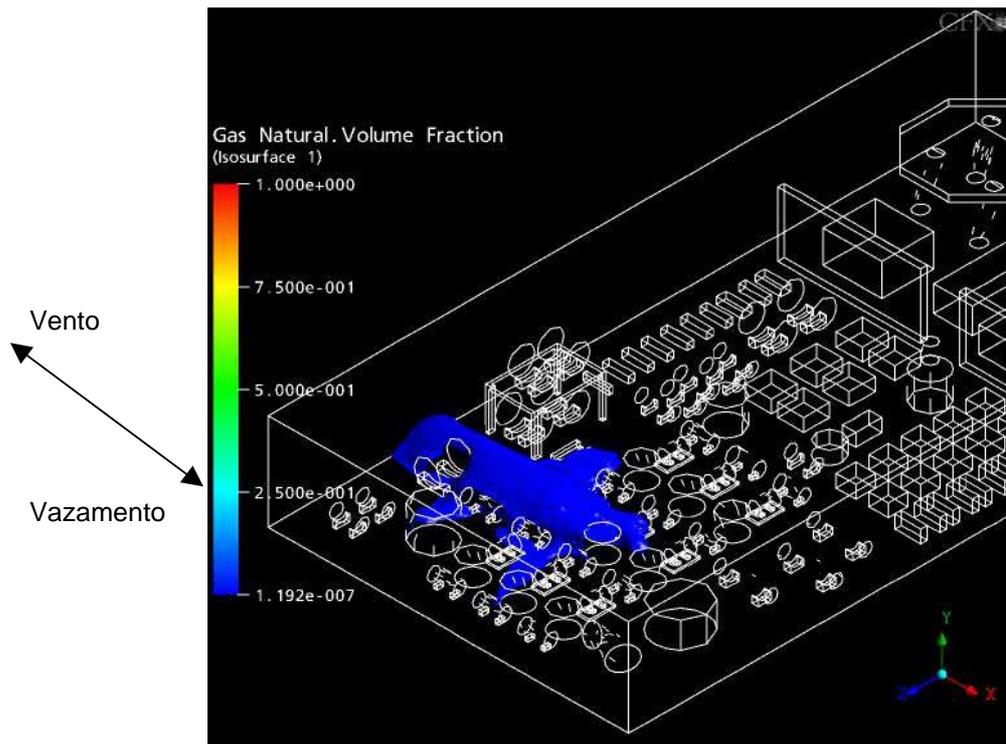


Figura. 7.31 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção leste.

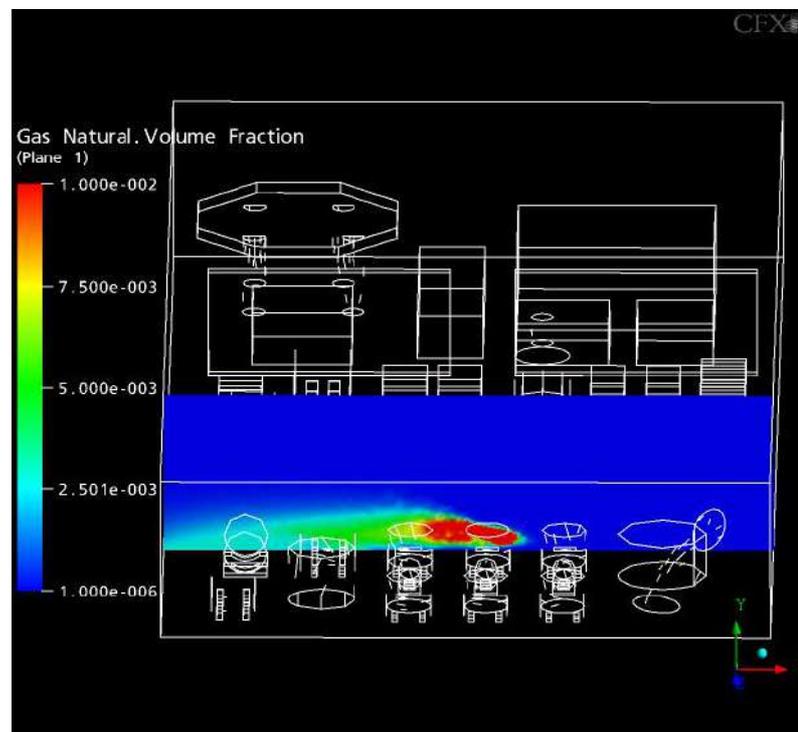


Figura. 7.32 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção leste.

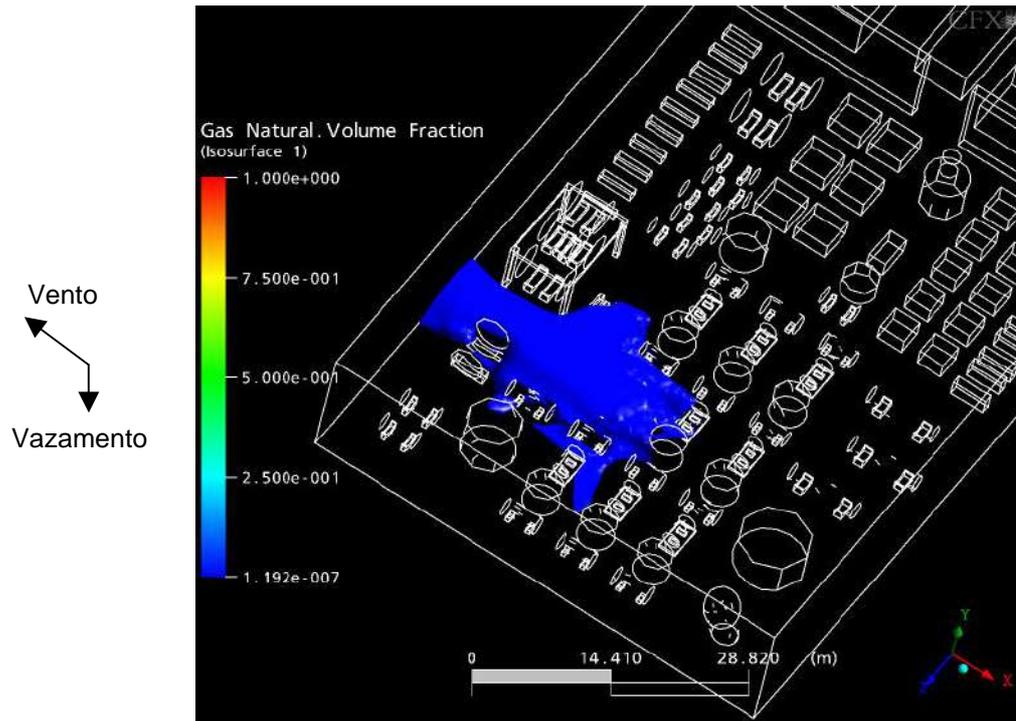


Figura. 7.33 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento para baixo.

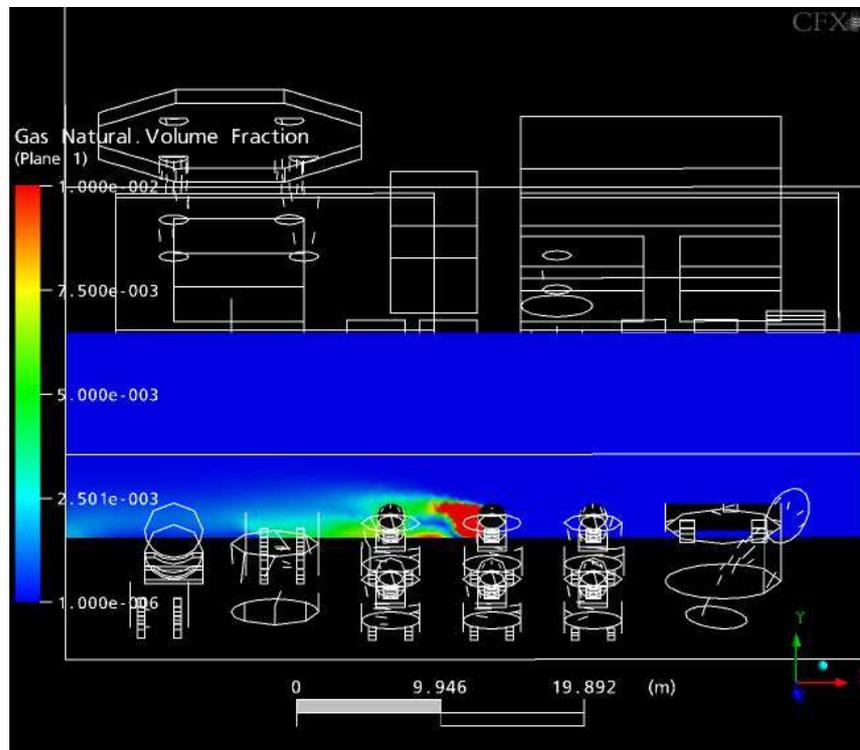


Figura. 7.34 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento para baixo.

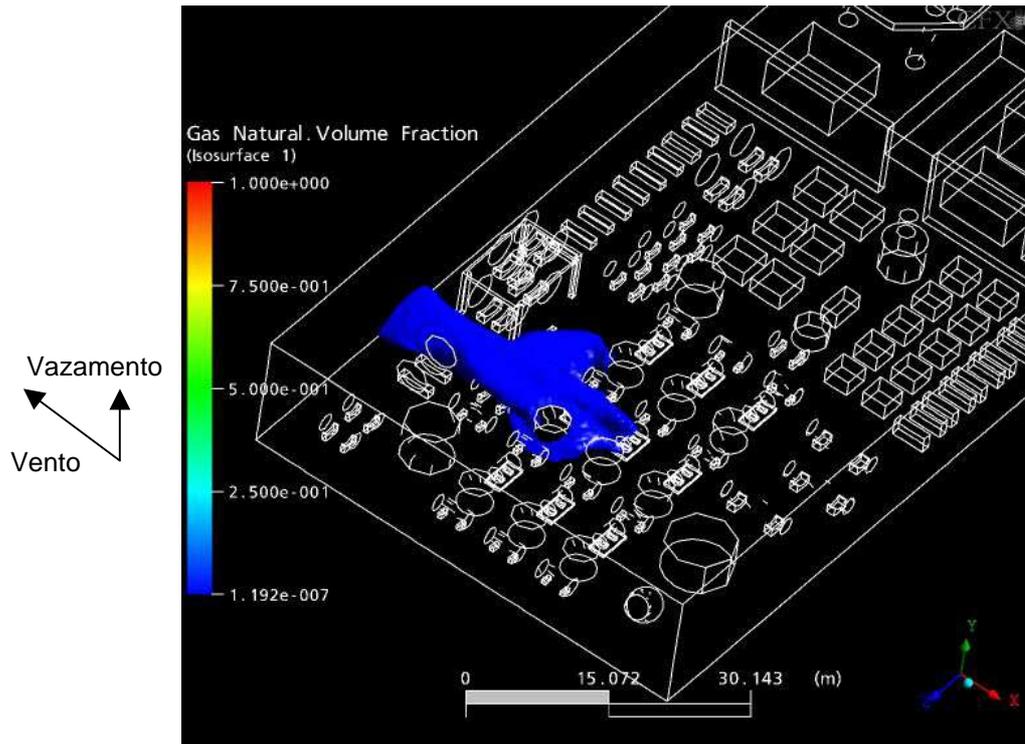


Figura. 7.35 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento para cima.

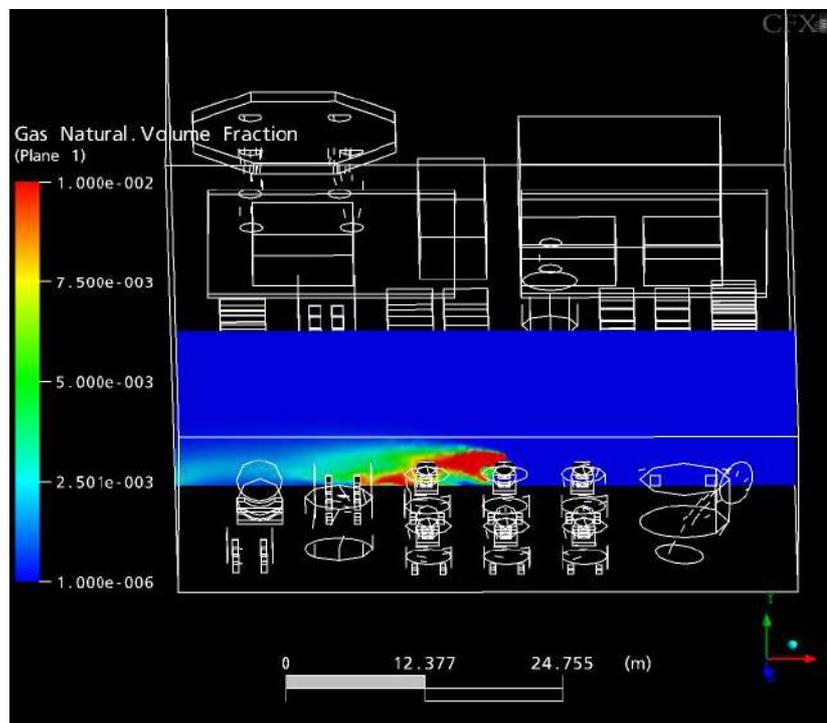


Figura. 7.36 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento para cima.

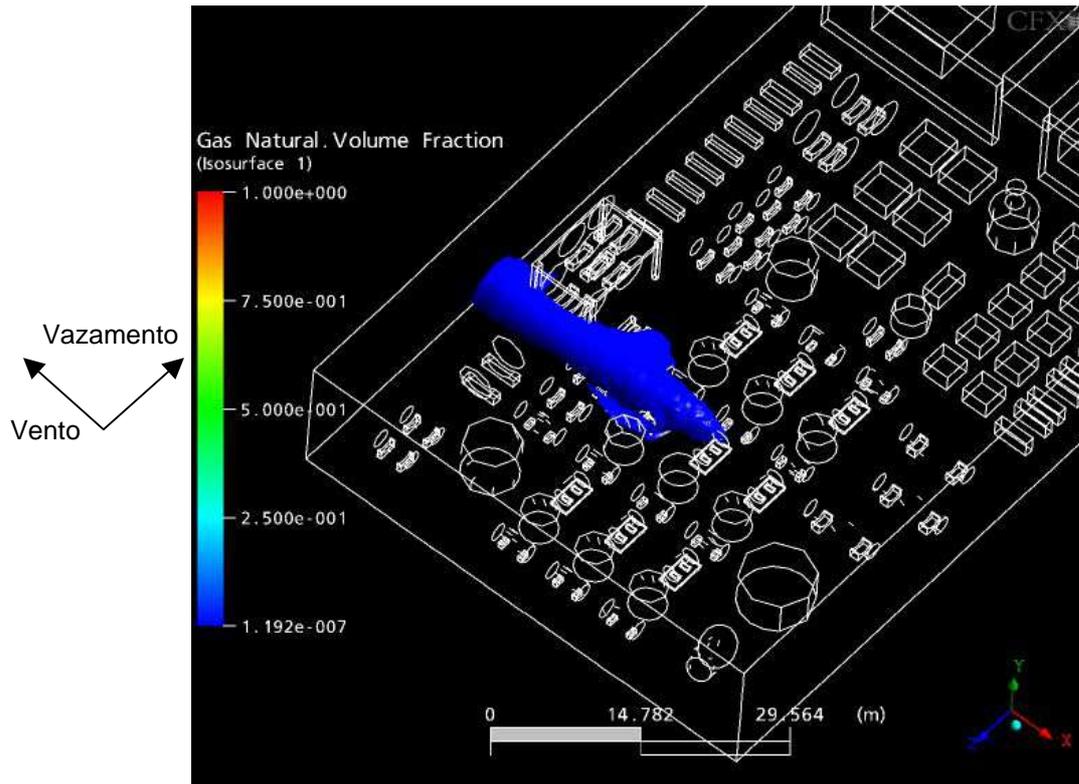


Figura. 7.37 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção norte.

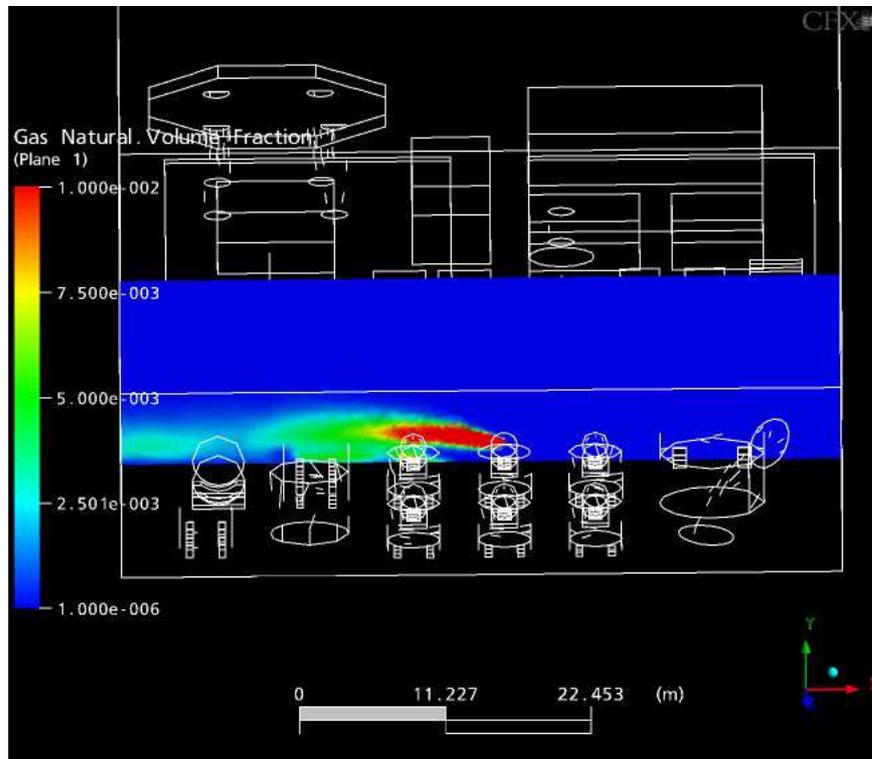


Figura. 7.38 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção norte.

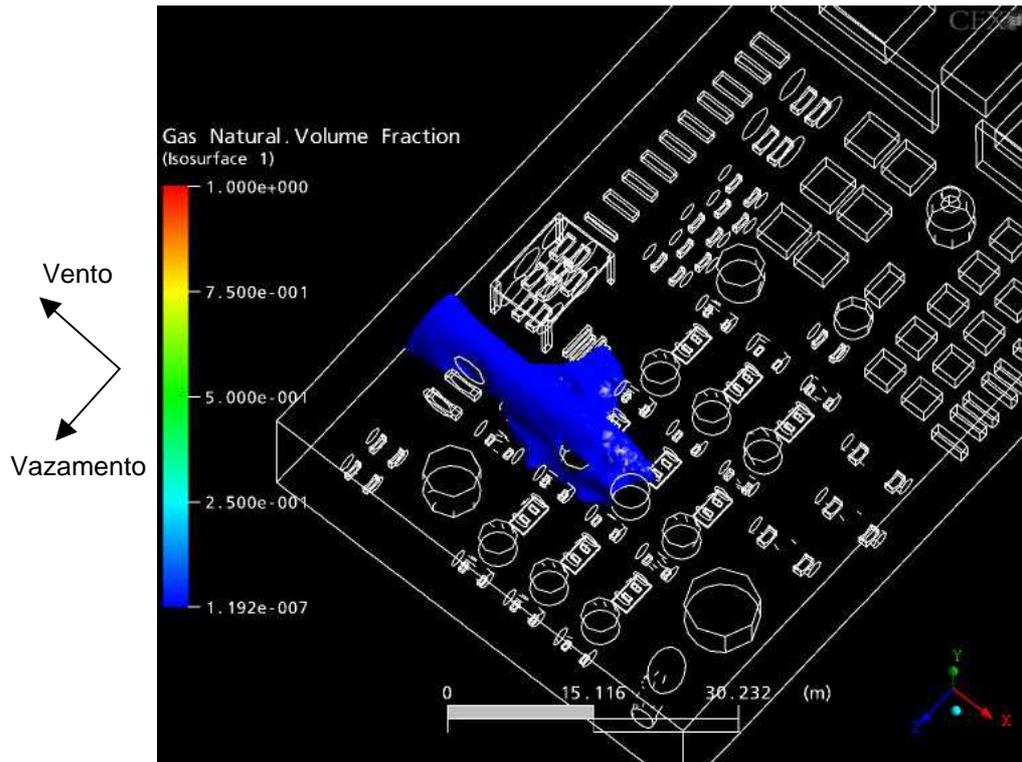


Figura. 7.39 - Pluma do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção sul.

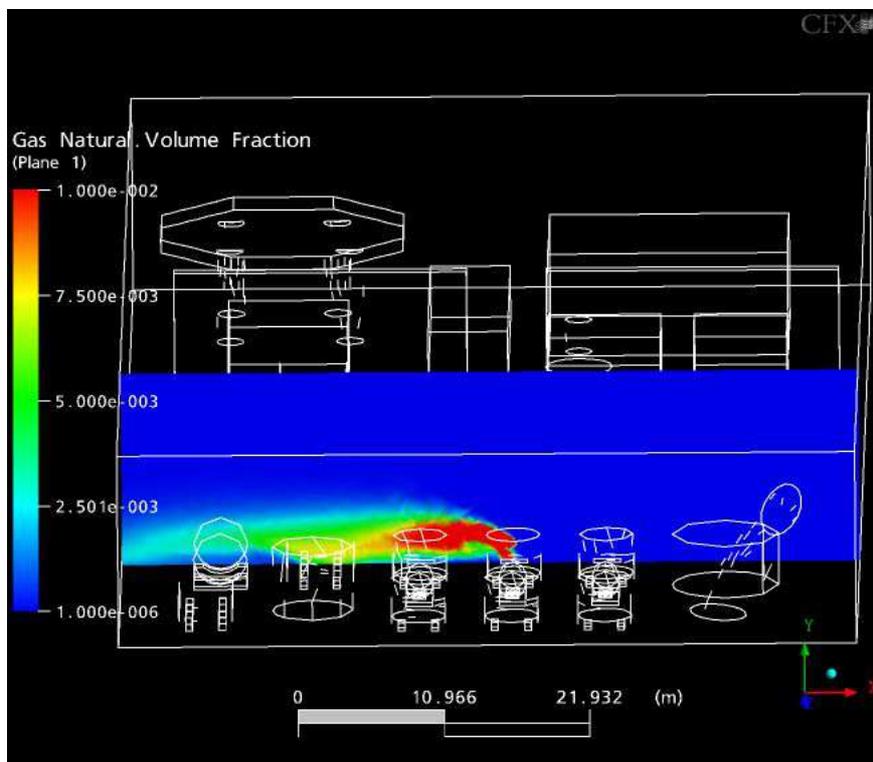


Figura. 7.40 - Plano do vazamento com vento 5,69 m/s na direção oeste e vazamento na direção sul.

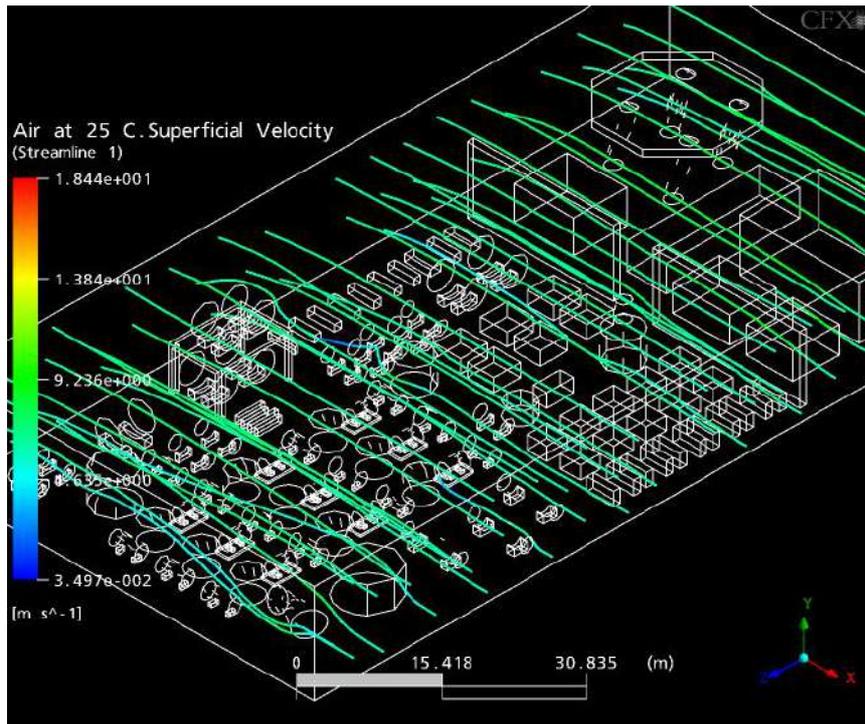


Figura. 7.41 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Oeste.

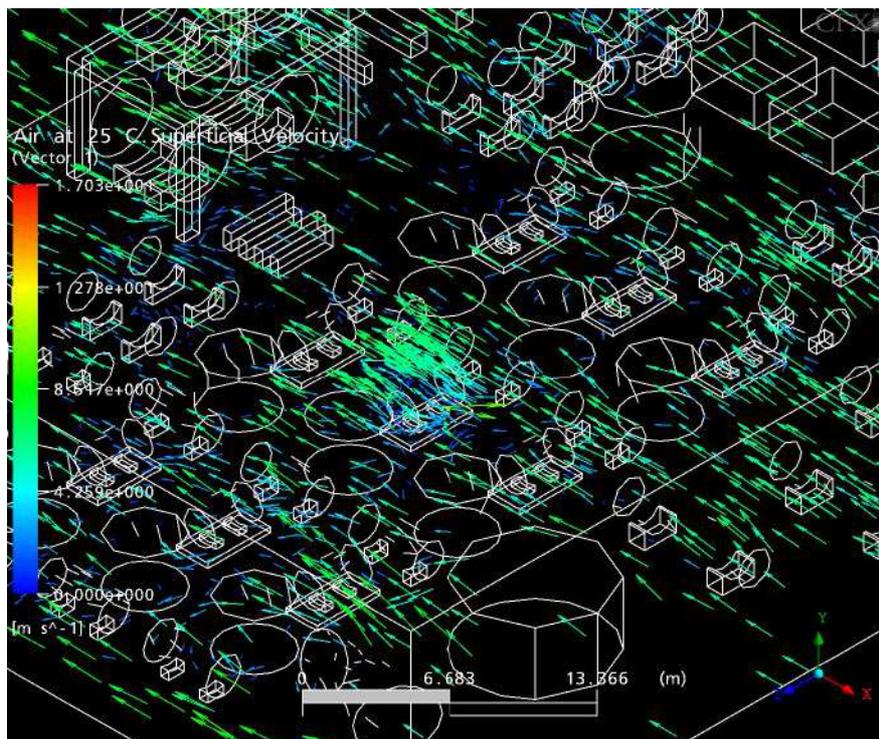


Figura. 7.42 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Oeste.

A partir da análise das Figuras, verifica-se que os vazamentos que acarretaram em uma pluma mais dispersa, e ao mesmo tempo com maior concentração de gás em regiões ao nível da plataforma, foram os vazamentos na direção leste. O vazamento oeste (Figura

7.29) apresentou uma pluma com alto grau de espalhamento, acarretando numa grande área coberta pelo material liberado e conseqüentemente maior área de risco. O vazamento leste (Figura 7.31) apresenta uma região de elevadas concentrações que começa na origem do vazamento e se estende até a lateral leste da plataforma.

Os demais vazamentos também ocasionariam situações de elevado risco, uma vez que suas plumas se espalharam consideravelmente e estas apresentaram regiões de alta concentração ao nível da plataforma. Porém, o foco do presente trabalho é avaliar os cenários de vazamento potencialmente existentes, com o fim de encontrar aqueles que ofereçam maior risco aos trabalhadores e à manutenção das instalações e equipamentos.

As Figuras 7.41 e 7.42 ajudam na observação das zonas de recirculação e de baixas velocidades do ar que entra no volume de controle.

#### **7.1.4. Direção Norte**

As Figuras 7.43, 7.45, 7.47, 7.49, 7.51 e 7.53 apresentam as plumas, de mesma fração volumar, formadas após os vazamentos no compressor escolhido como crítico com vento na direção norte. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas.

As Figuras 7.44, 7.46, 7.48, 7.50, 7.52 e 7.54 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro desta e correndo de norte a sul.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidades superficiais do ar para o escoamento na direção Norte estão nas Figuras 7.55 e 7.56.

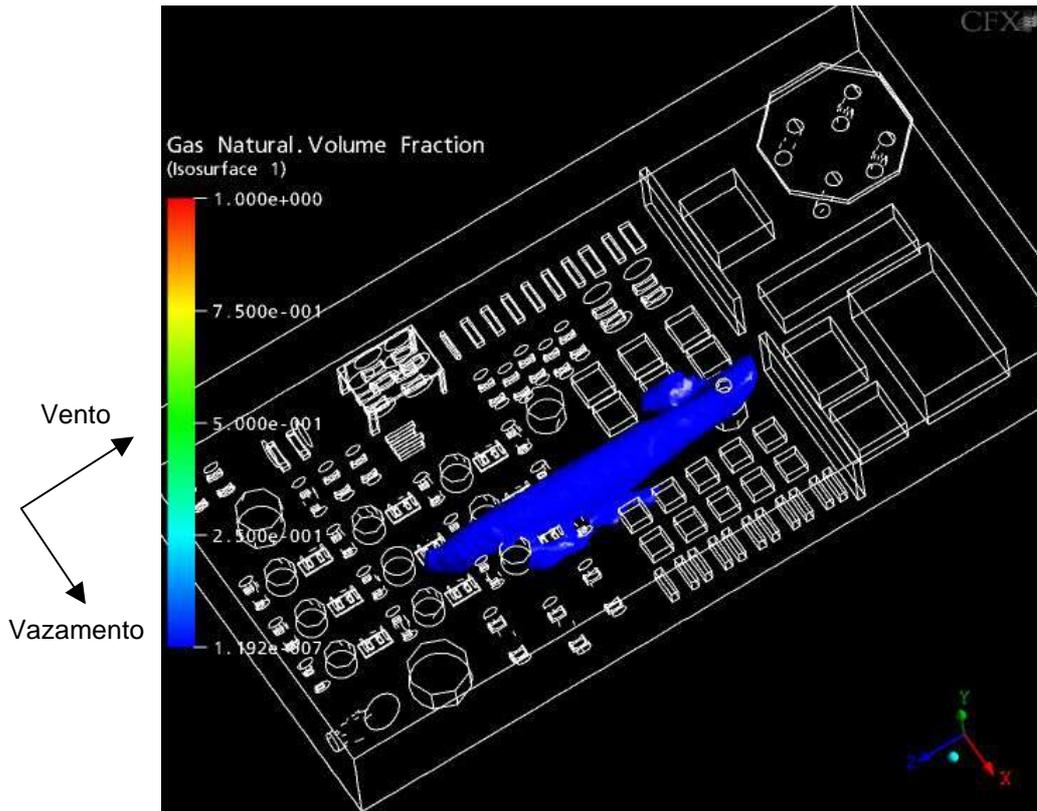


Figura. 7.43 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção leste.

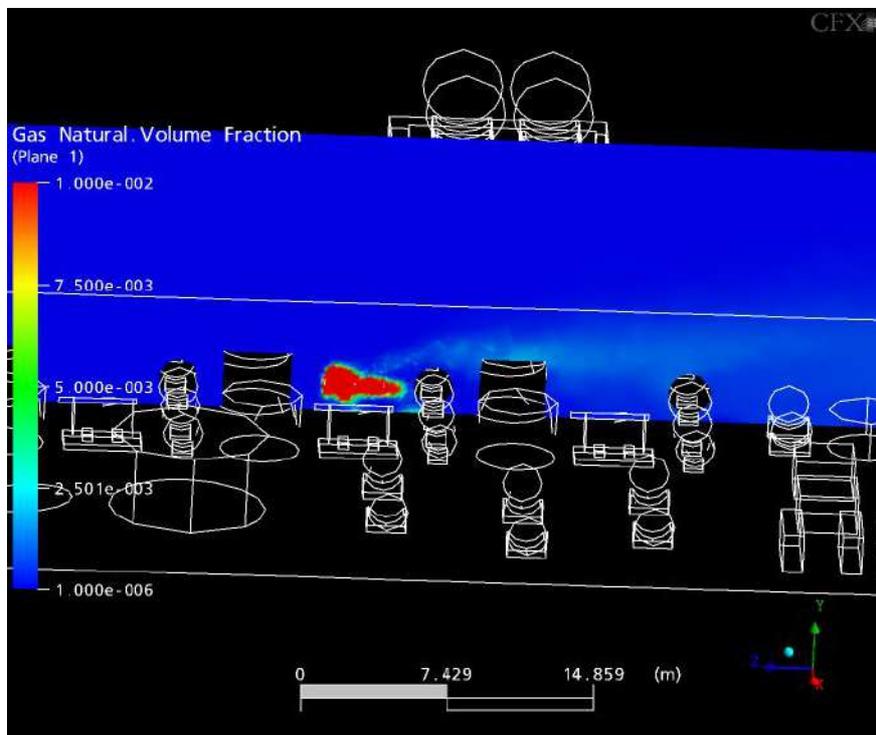


Figura. 7.44 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção leste.

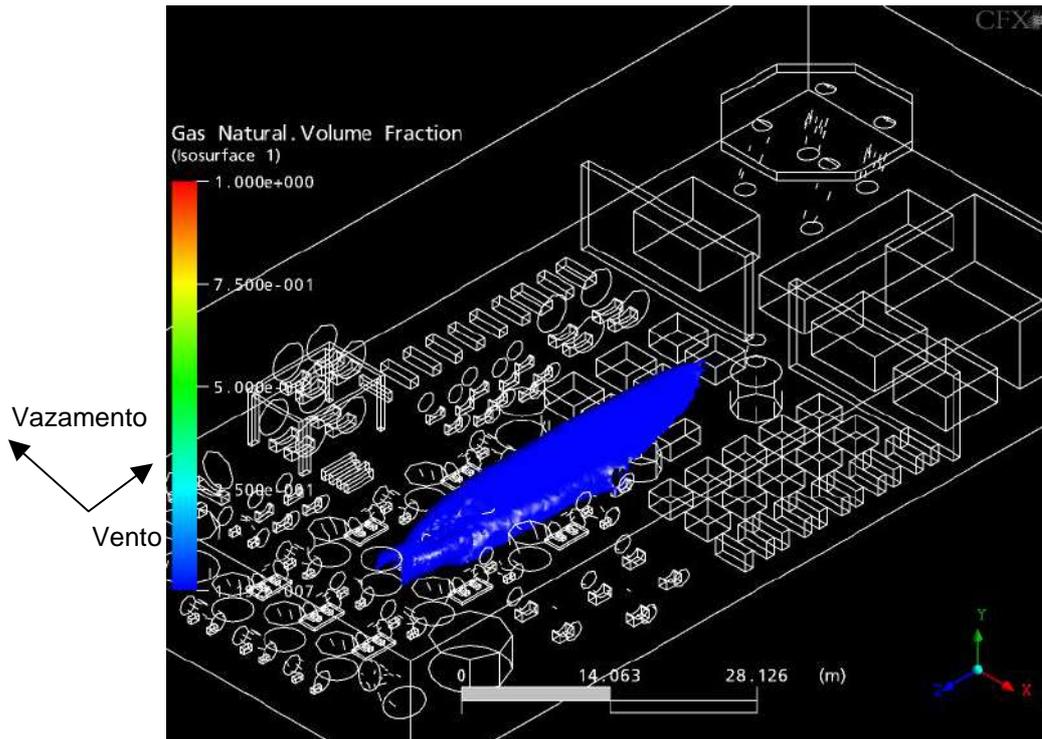


Figura. 7.45 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção oeste.

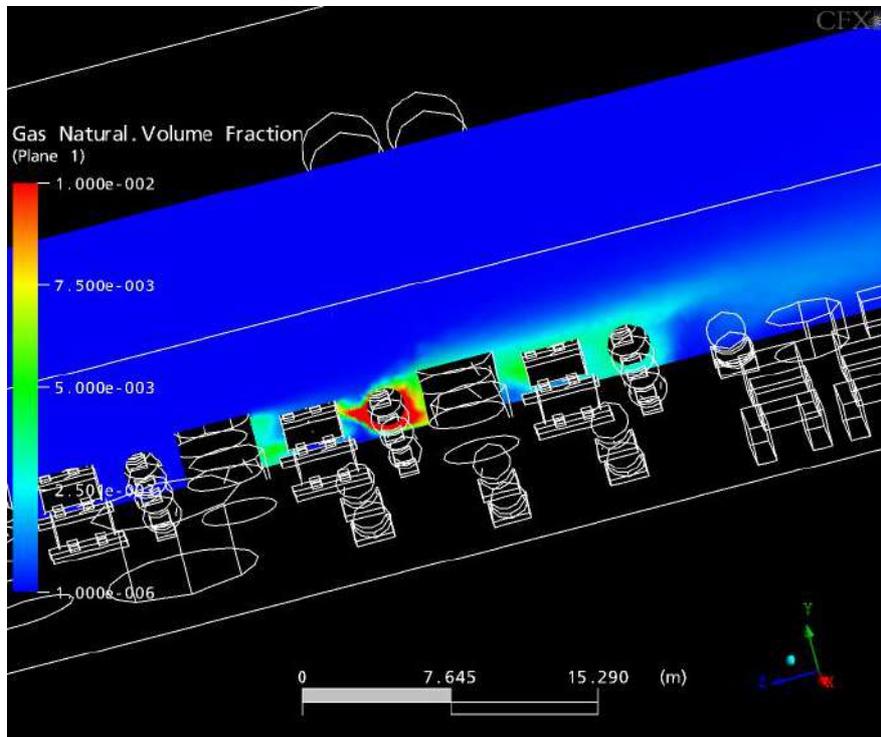


Figura. 7.46 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção oeste.

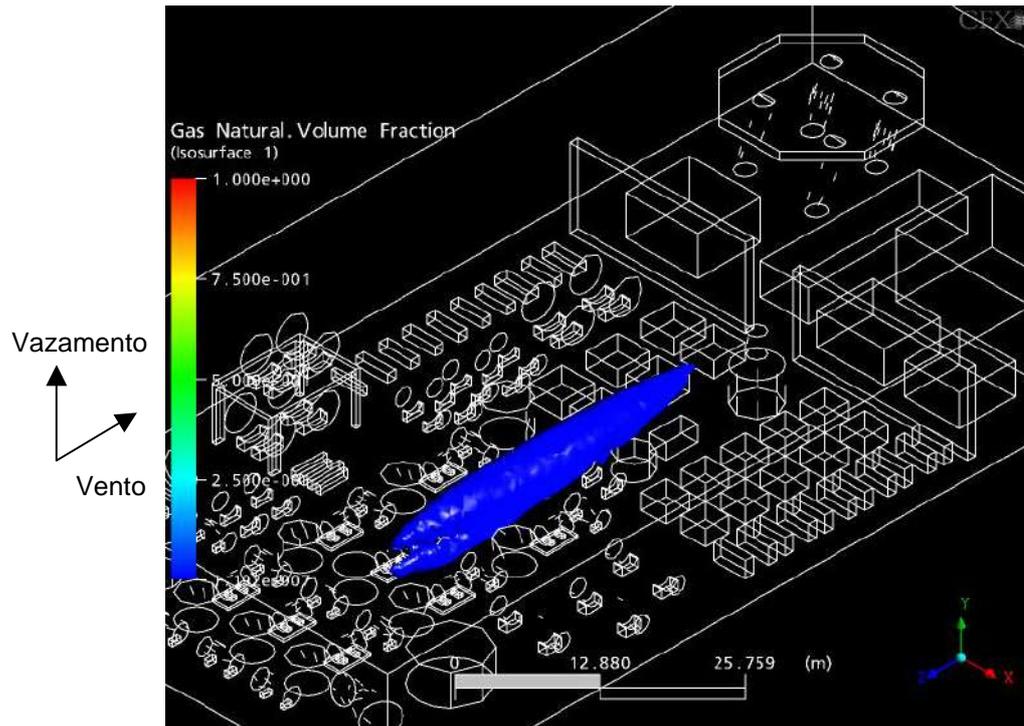


Figura. 7.47 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento para cima.

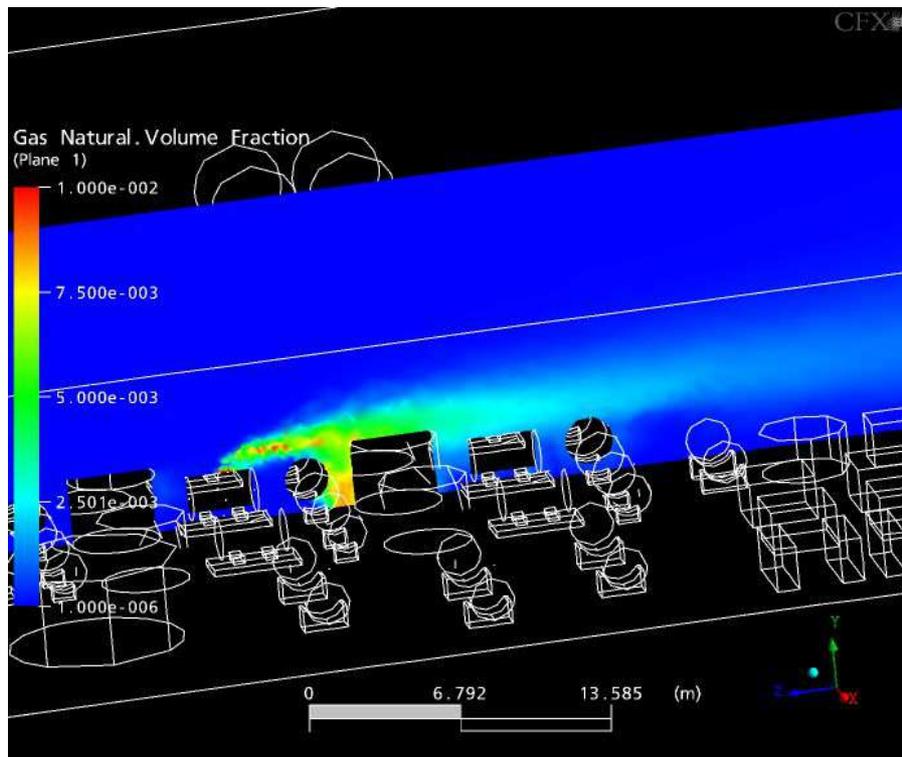


Figura. 7.48 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento para cima.

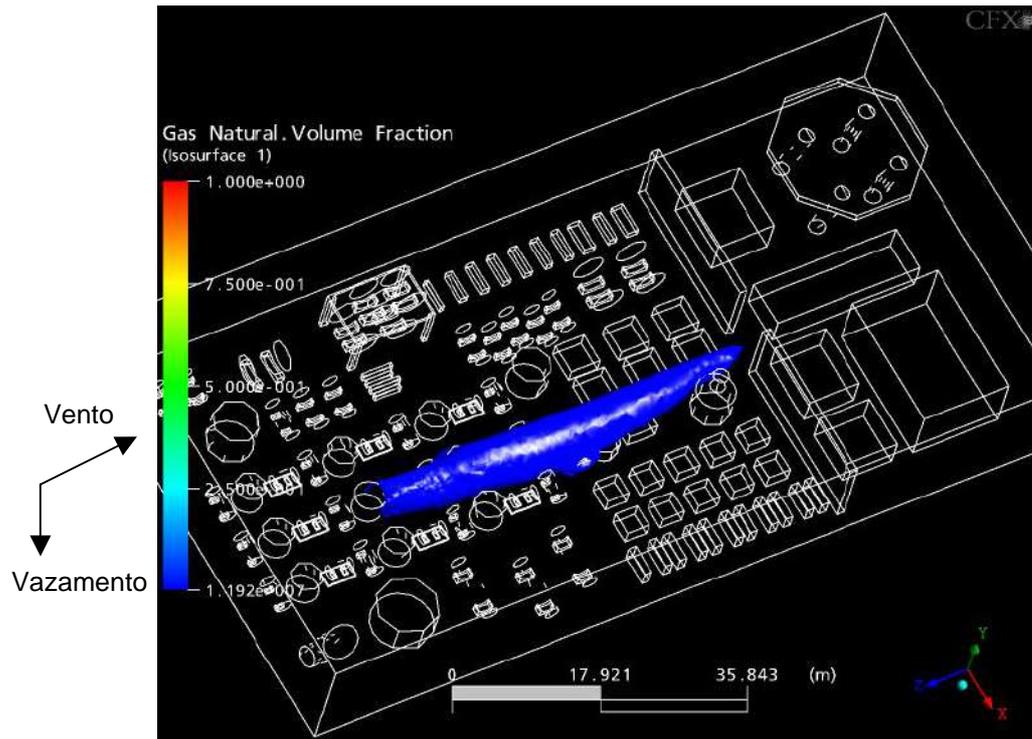


Figura. 7.49 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento para baixo.

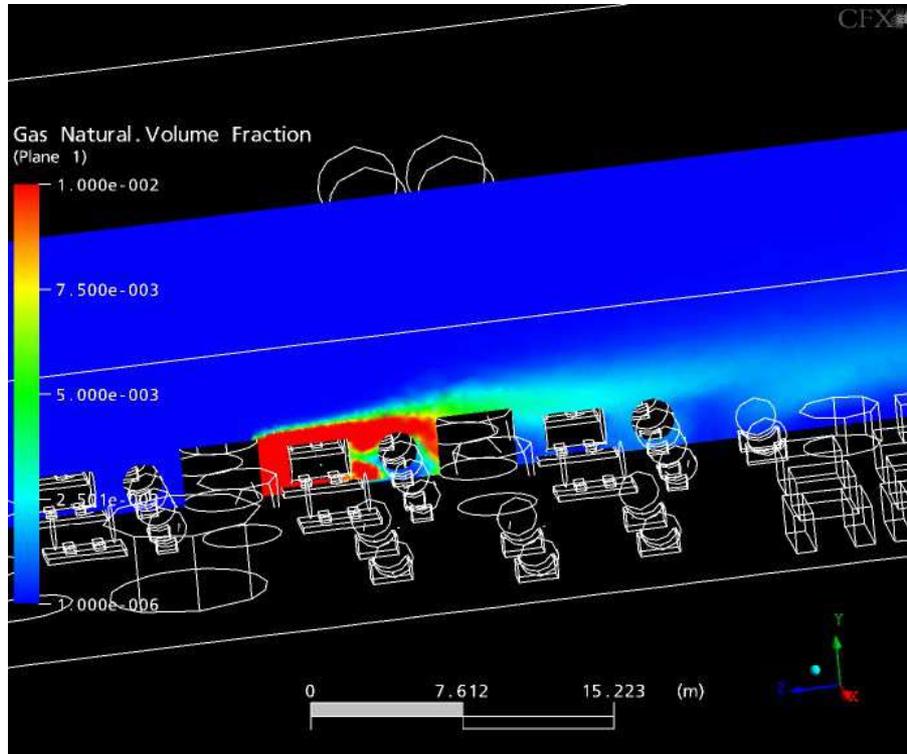


Figura. 7.50 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento para baixo.

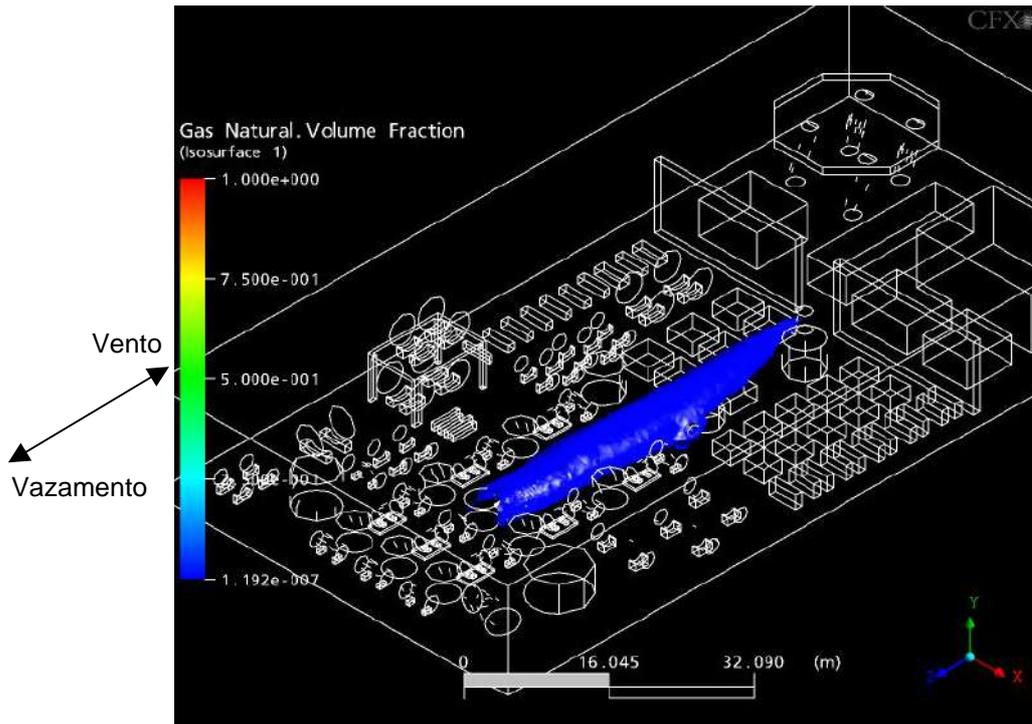


Figura. 7.51 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção sul.

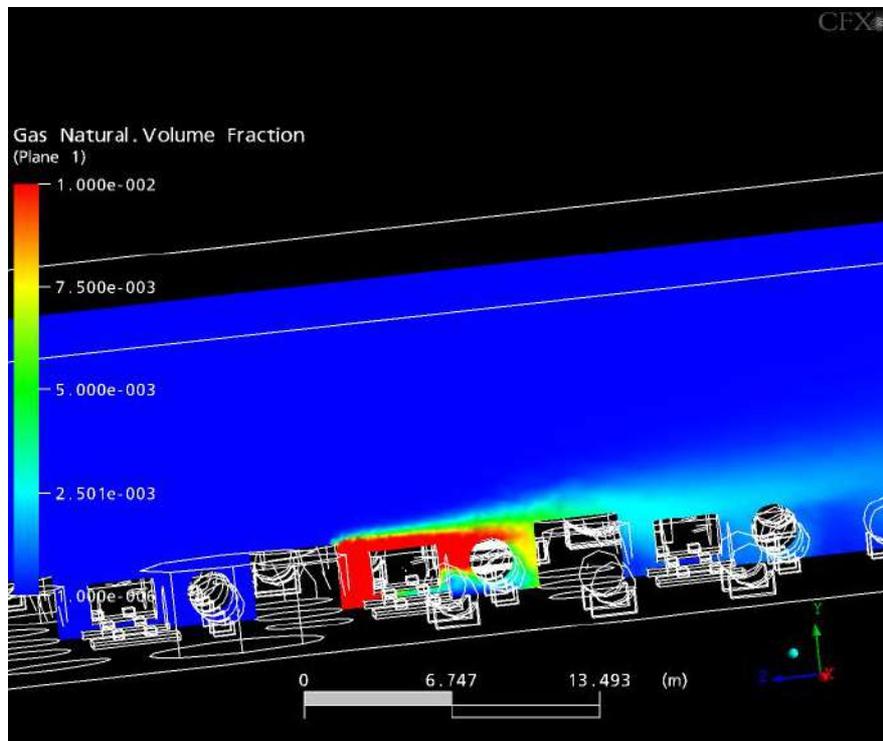


Figura. 7.52 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção sul.

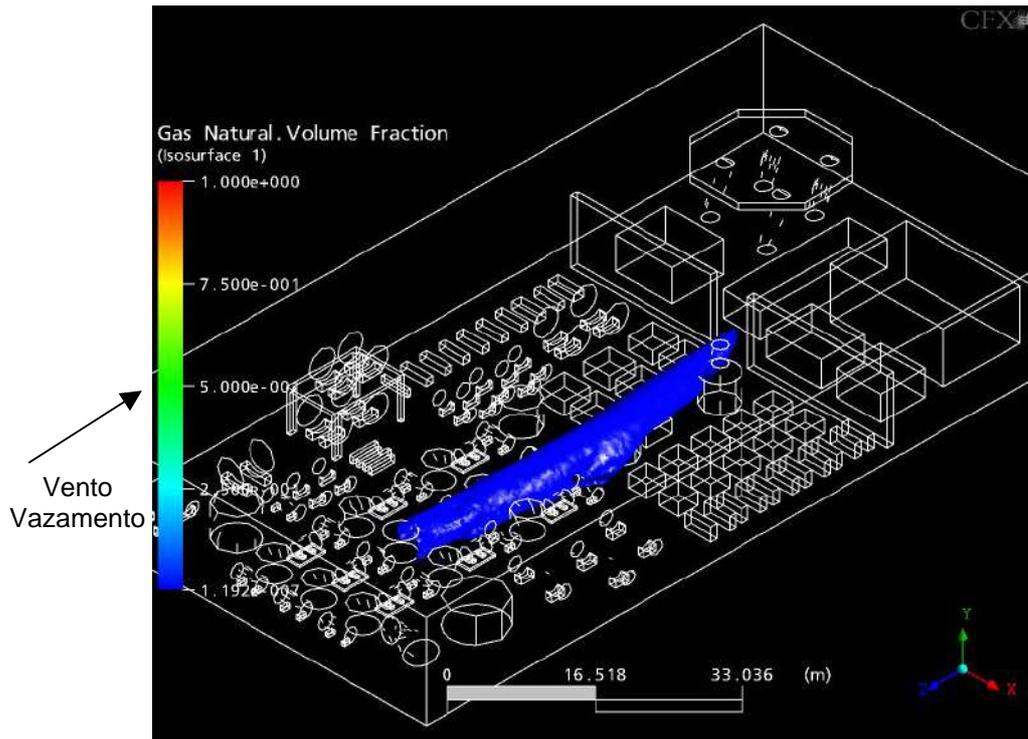


Figura. 7.53 - Pluma do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção norte.

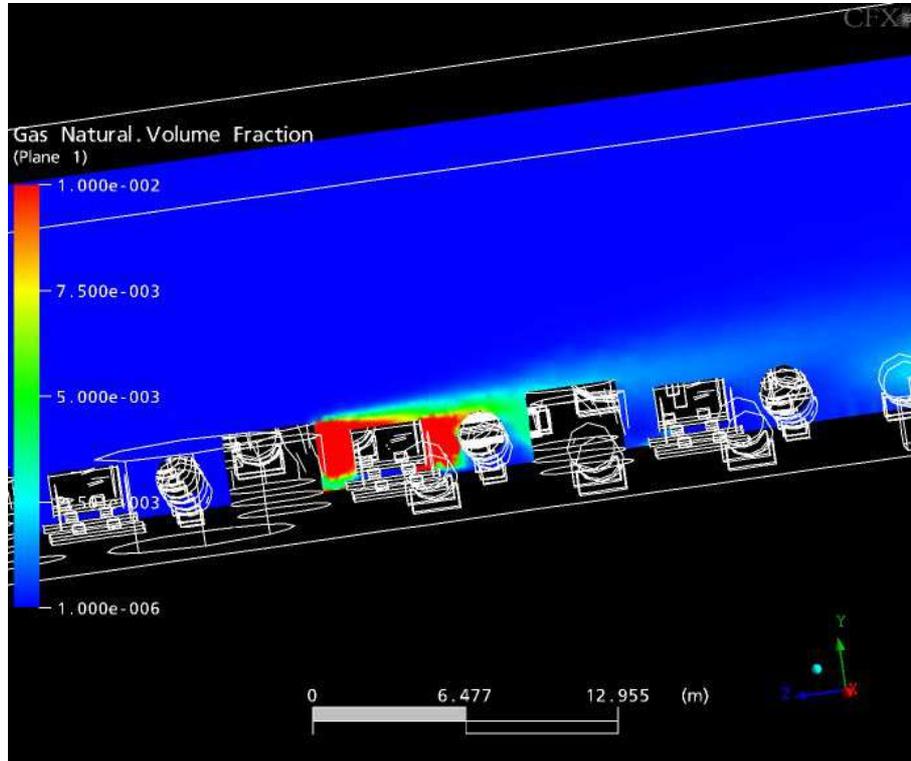


Figura. 7.54 - Plano do vazamento com vento 8,23 m/s na direção norte e vazamento na direção norte.

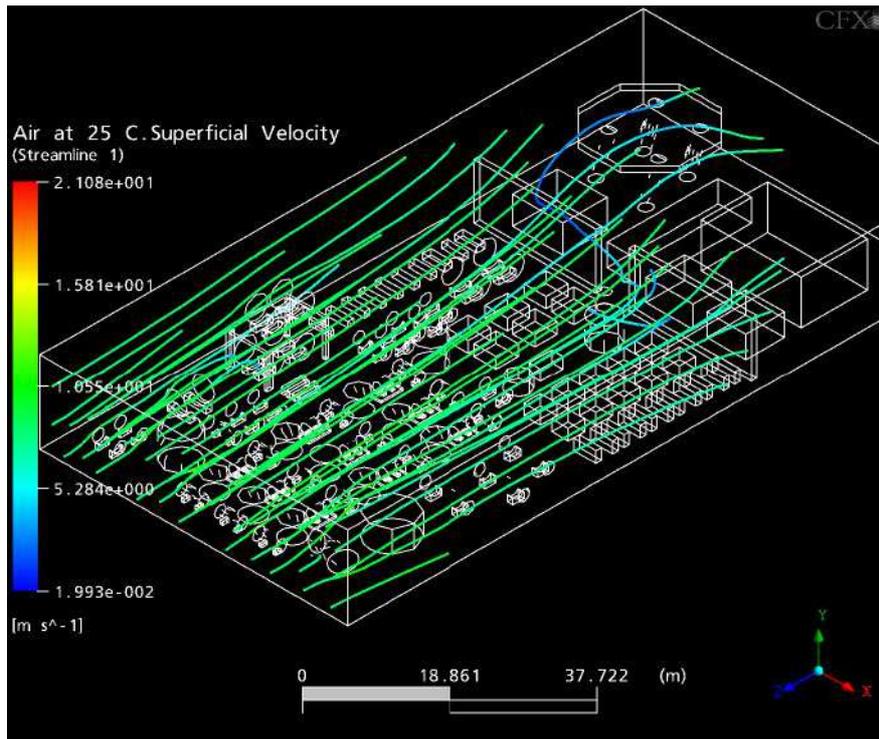


Figura. 7.55 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Norte.

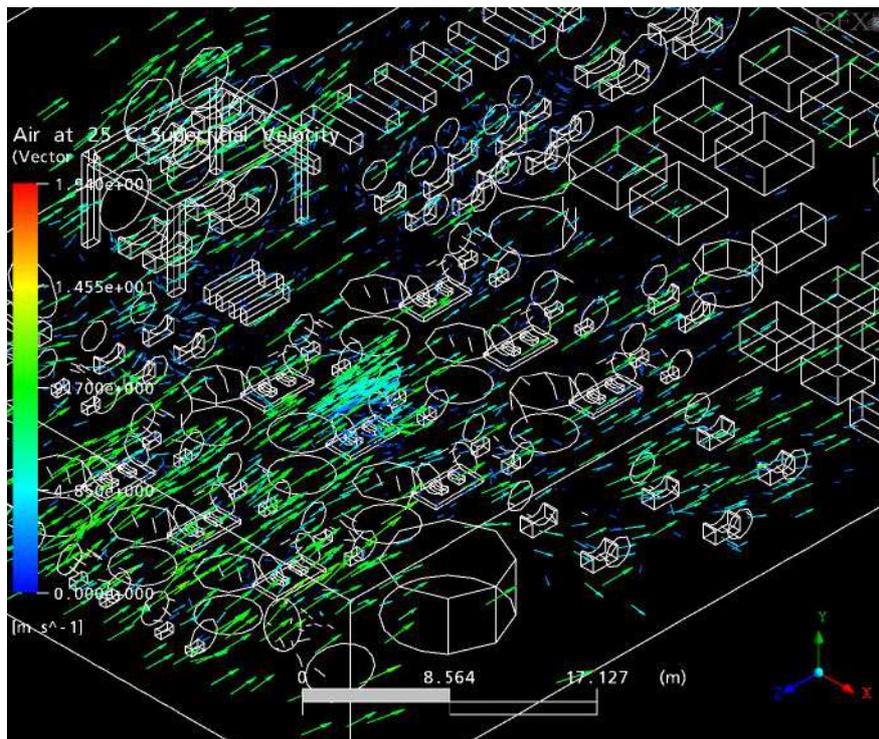


Figura. 7.56 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Norte.

As plumas formadas pelo vento da direção norte não apresentaram espalhamento, isto pode ser justificado pelo fato de a geometria não apresentar barreiras ao vento. Uma pequena diferença pode ser observada na ilustração do vazamento na direção leste

(Figura 7.43), onde o contorno da plataforma foi tratado como *opening*. Neste caso, houve um pequeno espalhamento, que pode ser explicado pela possibilidade de entrada e/ou saída de ar pelas laterais e parte superior da geometria.

Nos casos dos vazamentos para baixo, sul e norte (Figuras 7.50, 7.52 e 7.54, respectivamente), observou-se o acúmulo de gás com alta concentração ao redor do compressor, o que representa risco para os trabalhadores e para o patrimônio da plataforma; isto porque esse acúmulo de gás pode formar uma mistura inflamável, podendo ocasionar em incêndio, ou também, pode resultar em regiões com composição tóxica.

#### **7.1.5. Direção Noroeste**

As Figuras 7.57, 7.59, 7.61, 7.63, 7.65 e 7.67 ilustram as plumas formadas após os vazamentos no compressor com vento na direção noroeste. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

Enquanto isso, as Figuras 7.58, 7.60, 7.62, 7.64, 7.66 e 7.68 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro desta e correndo de norte a sul.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidade superficial do ar para o escoamento do ar na direção noroeste, estão nas Figuras 7.69 e 7.70.

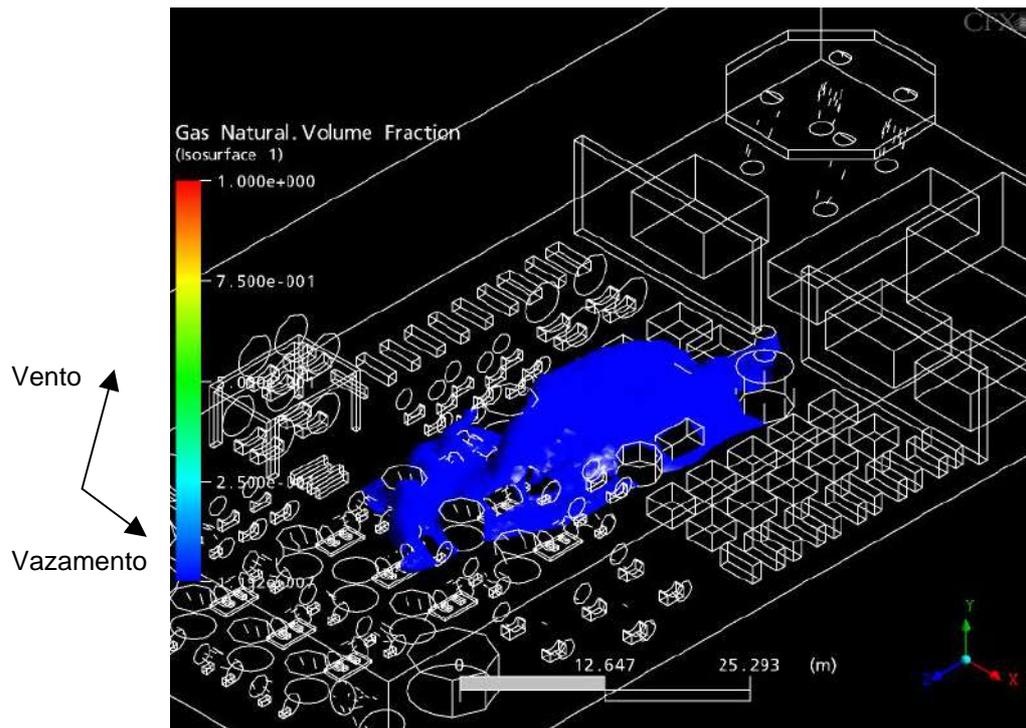


Figura. 7.57 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.

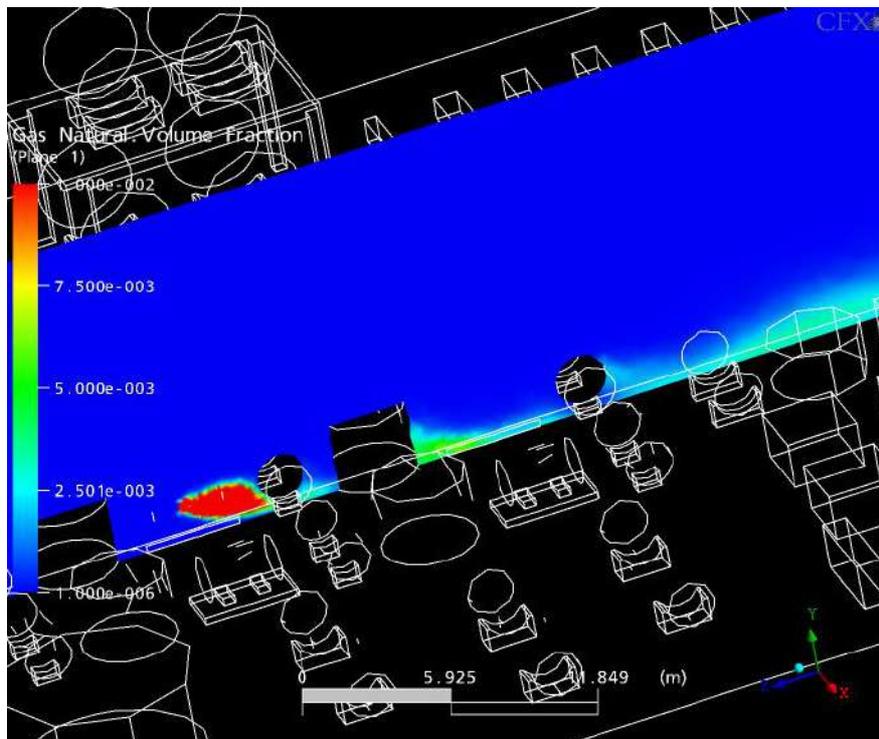


Figura. 7.58 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.

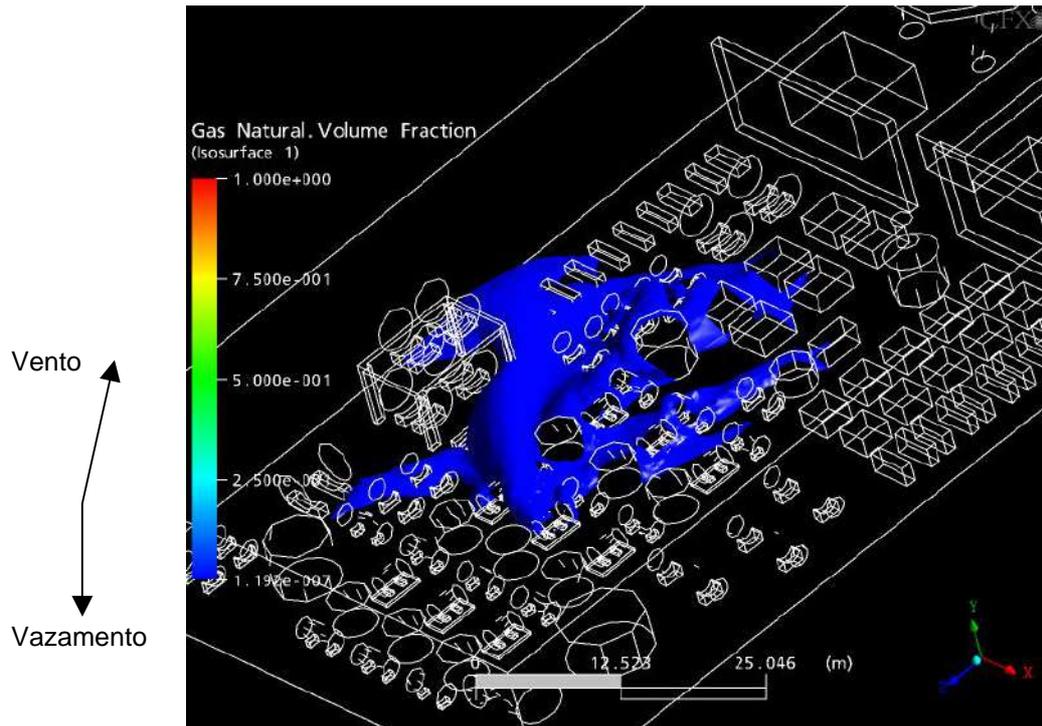


Figura. 7.59 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo.

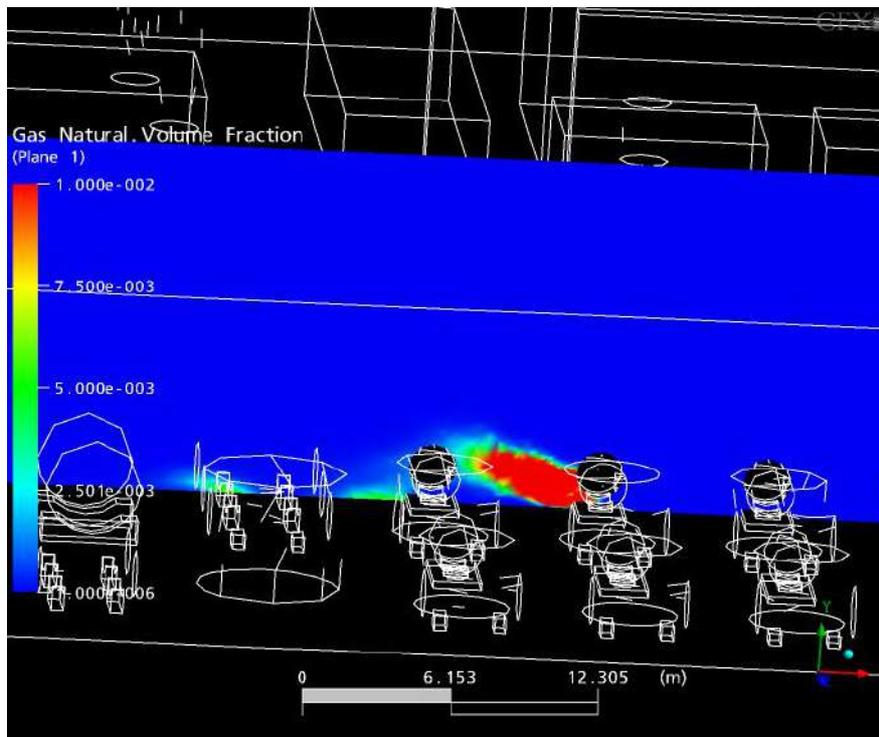


Figura. 7.60 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo.

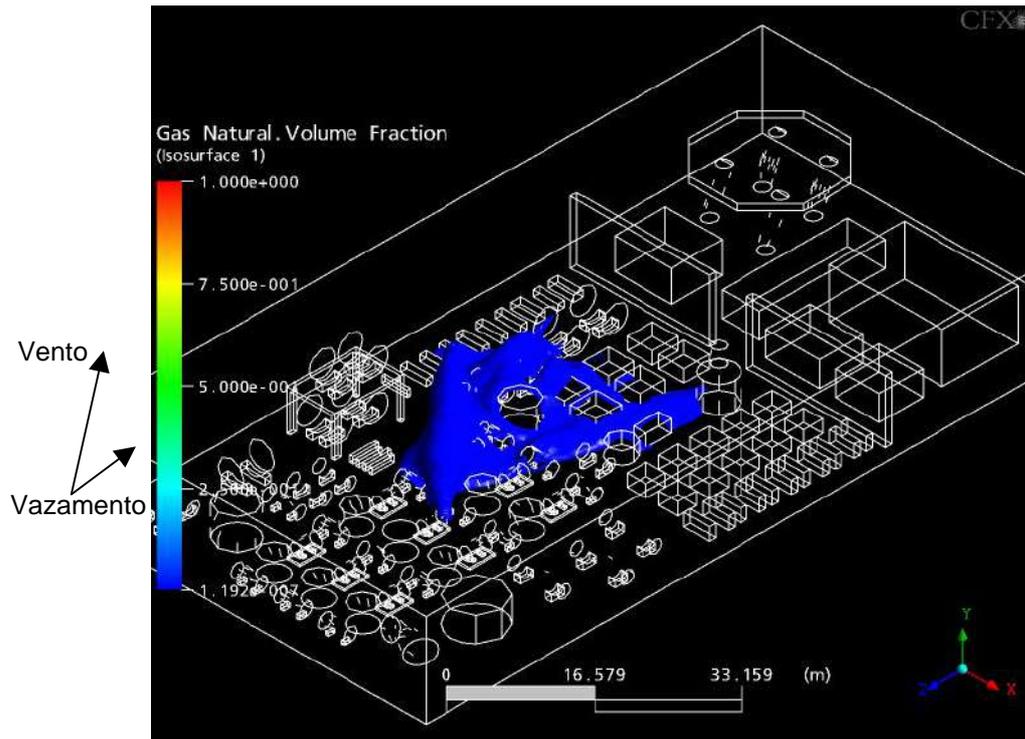


Figura. 7.61 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.

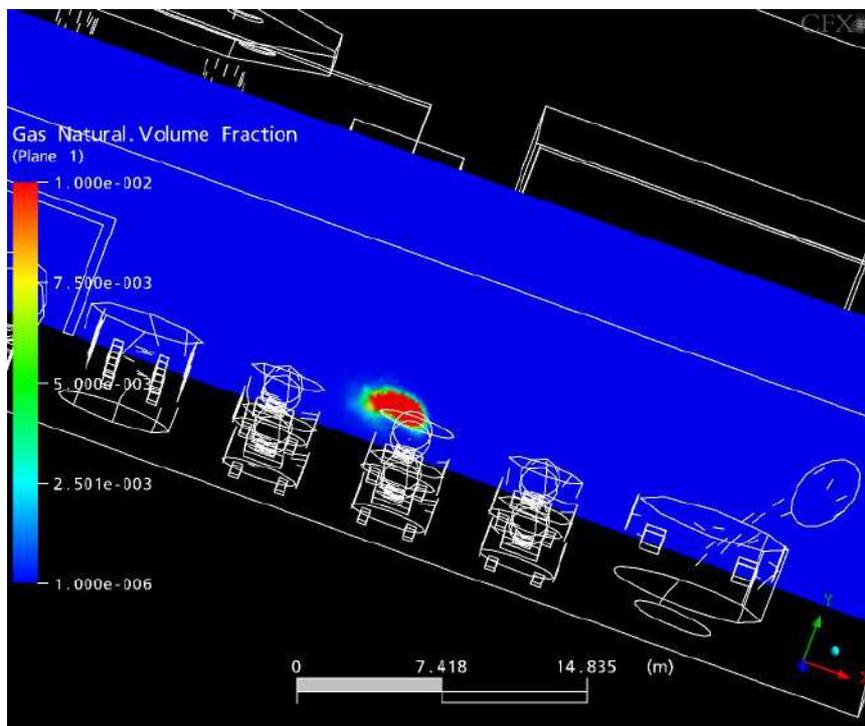
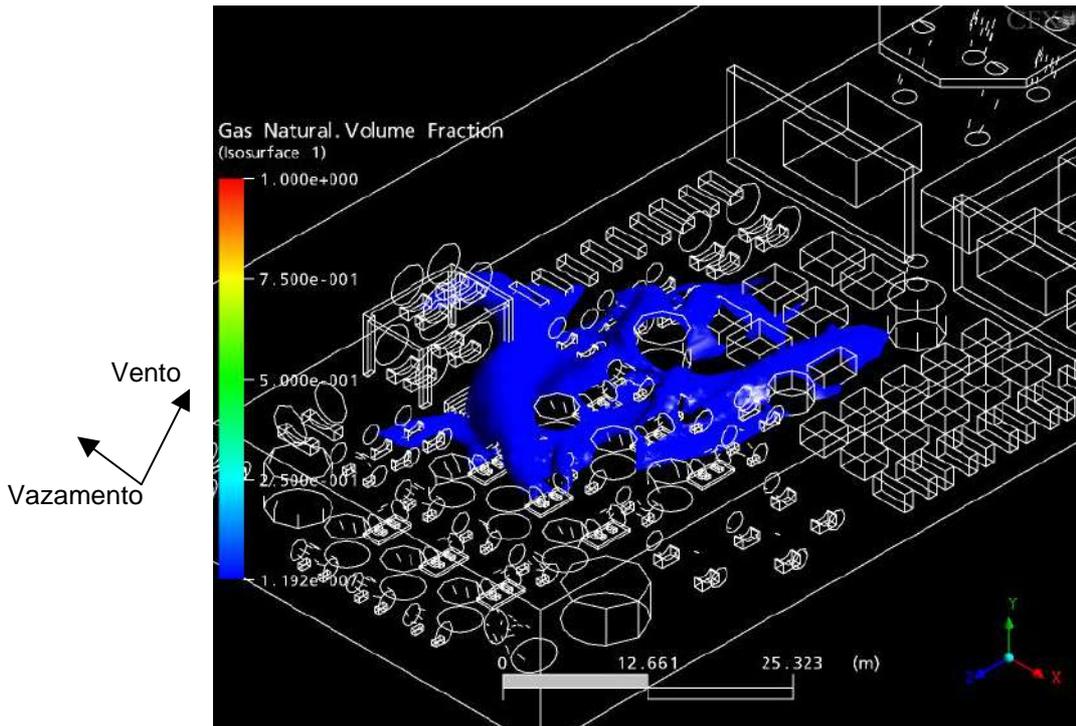


Figura. 7.62 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.



**Figura. 7.63 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.**



**Figura. 7.64 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.**

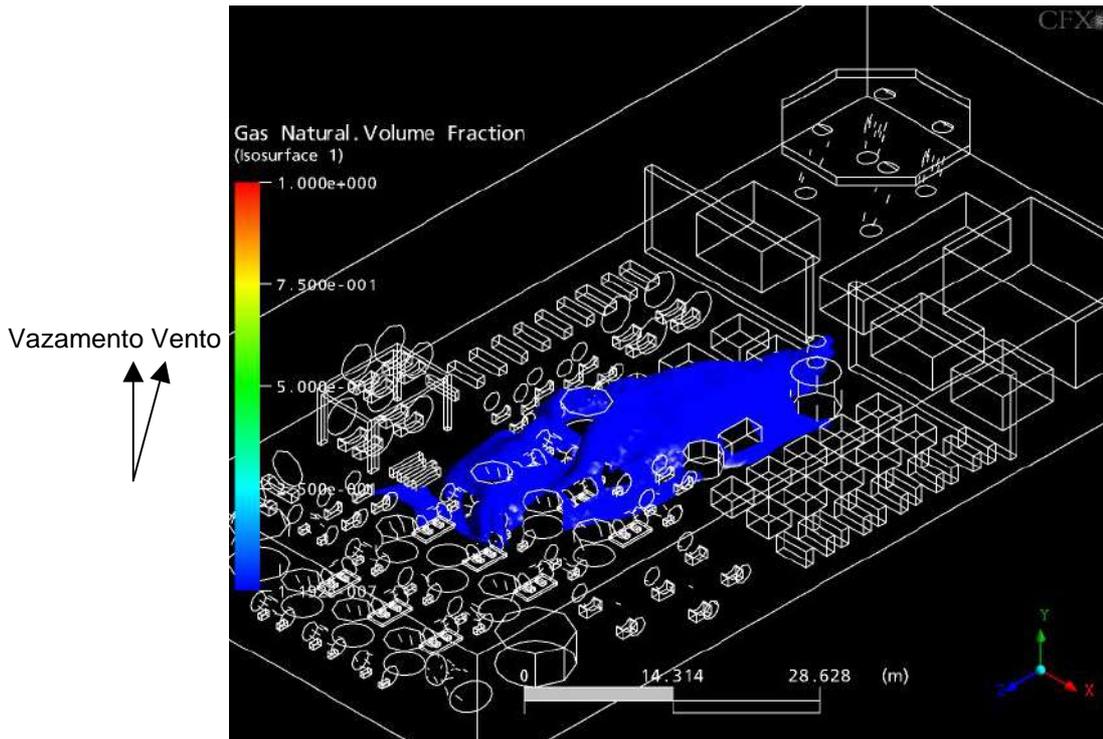


Figura. 7.65 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

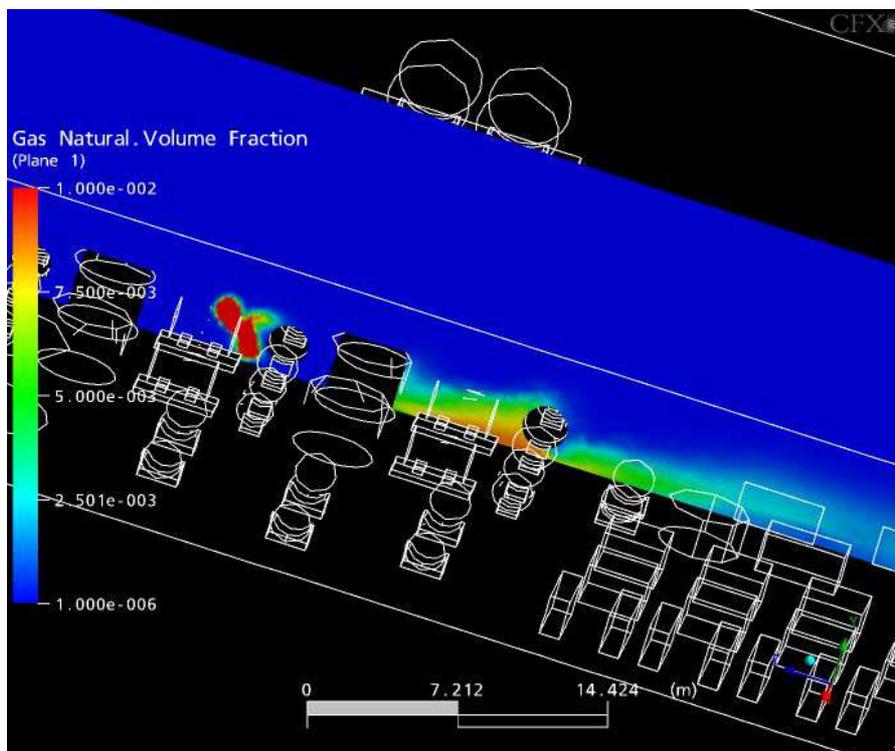


Figura. 7.66 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

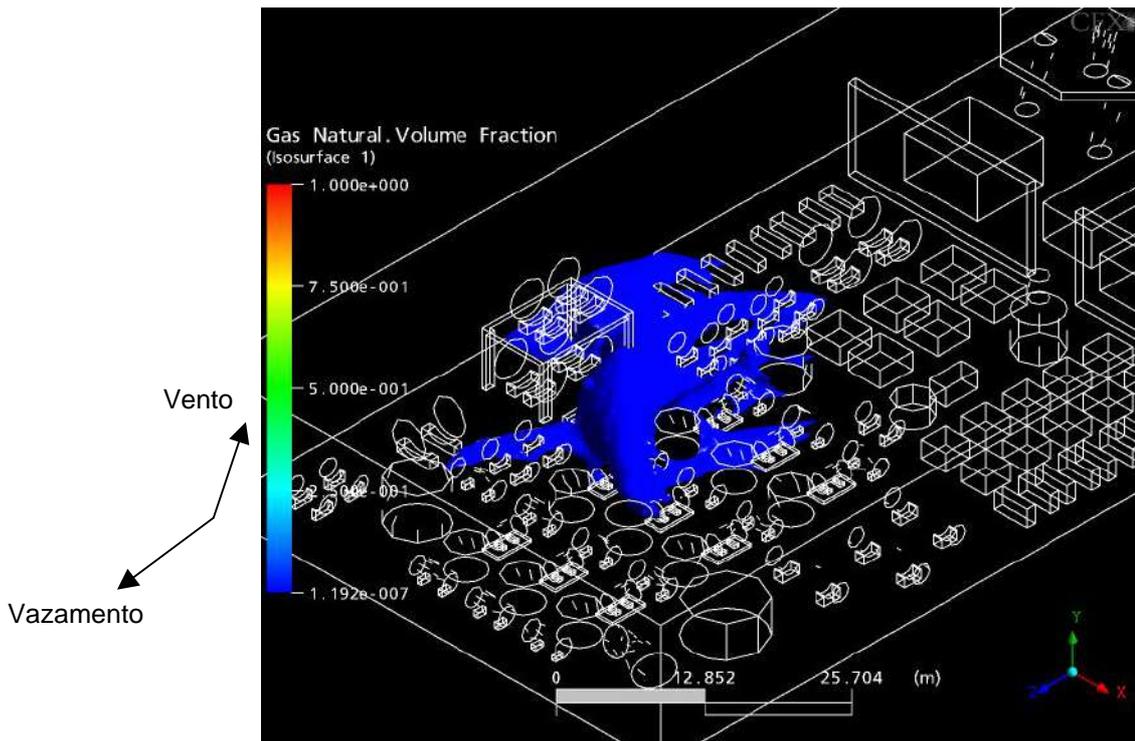


Figura. 7.67 - Pluma do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

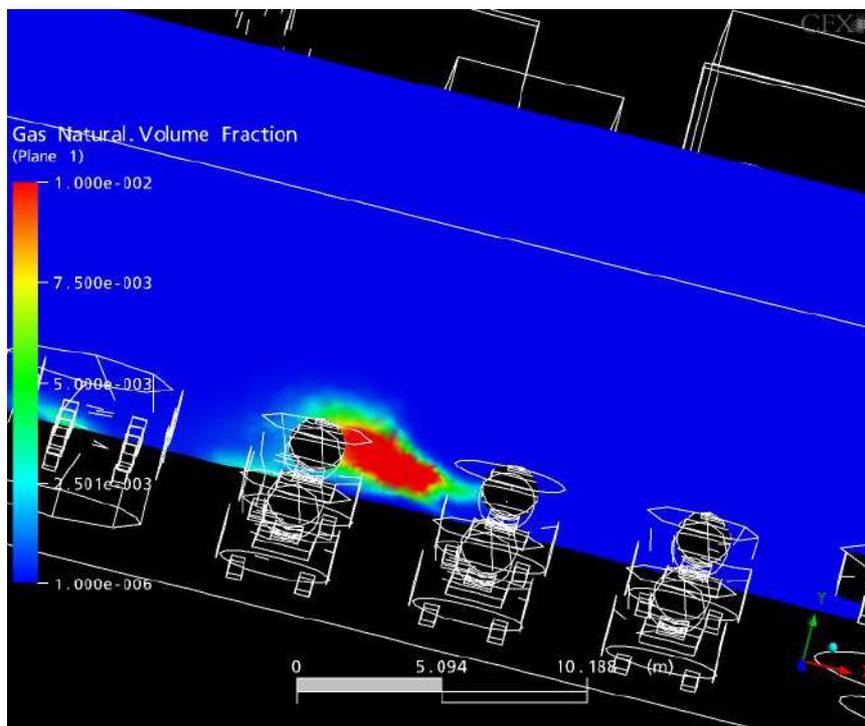


Figura. 7.68 - Plano do vazamento com vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

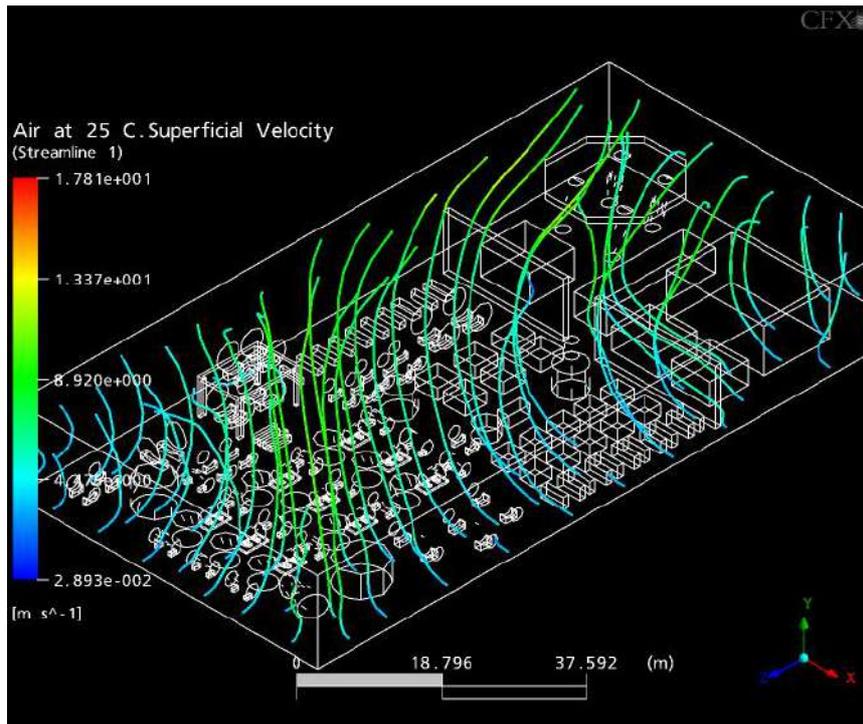


Figura. 7.69 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Noroeste.

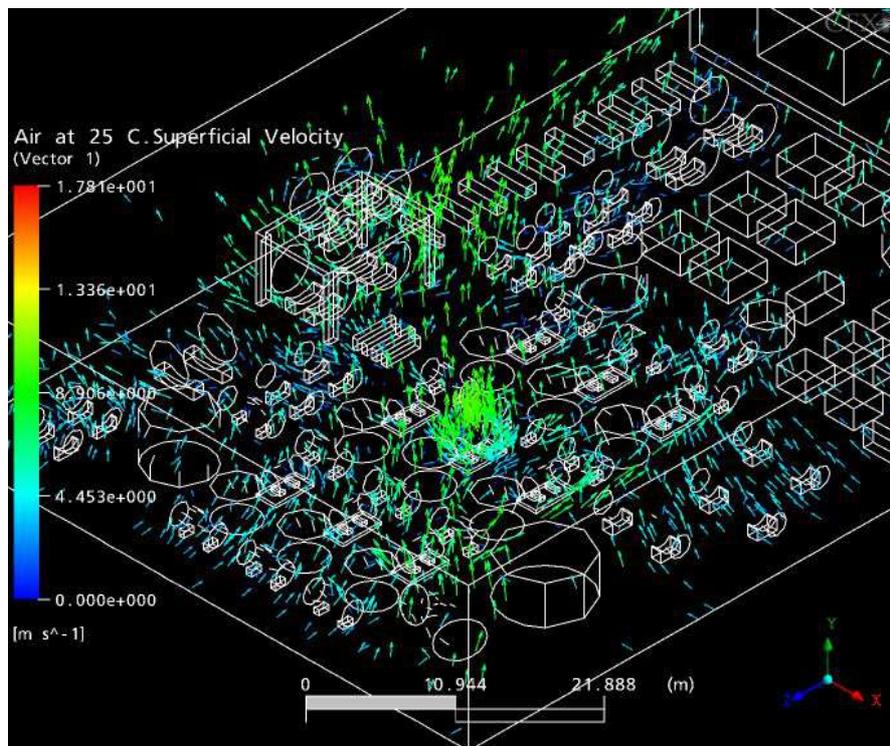
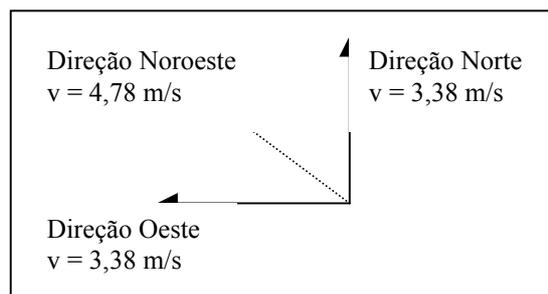


Figura. 7.70 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Nordeste.

Os ventos da direção Noroeste foram formados a partir da decomposição do vetor normal à direção Noroeste. A Figura 7.71 ilustra essa decomposição.



**Figura. 7.71 - Composição dos ventos na direção Noroeste.**

No caso de ventos na direção Noroeste as simulações apresentaram duas regiões de entrada e duas de saída. Este fato produziu um maior espalhamento da pluma. As direções para baixo, oeste e sul (Figuras 7.59, 7.63, 7.67, respectivamente) podem ser destacadas como as que apresentaram uma maior área onde a concentração do gás liberado atingiu 0,001 de fração volumar. Assim sendo, maior seria a área onde poderia haver o risco de pessoas expostas a um gás tóxico.

Nesses três cenários críticos apresentados, medidas de prevenção devem ser tomadas, para a plataforma sugerida, com o objetivo de evitar a ignição de uma mistura inflamável formada por esse gás, isto porque a área de processo está cheia de motores elétricos que podem fornecer a centelha necessária para a ignição desse gás disperso.

Os casos de vazamento sul e para baixo (Figuras 7.60 e 7.68, respectivamente) são os que apresentam uma maior concentração de gás com fração volumar acima de 10.000ppm próximo ao ponto de liberação. Estes também são cenários que devem ser considerados, devido aos riscos que estes podem apresentar nos instantes após a liberação, quando as primeiras providências ainda estão sendo ou não foram tomadas.

As linhas de corrente e os vetores (Figuras 7.69 e 7.70, respectivamente) ilustram o movimento do ar no entorno do compressor tido como o mais crítico ponto de vazamento na plataforma idealizada.

### **7.1.6. Direção Sudoeste**

As Figuras 7.72, 7.74, 7.76, 7.78, 7.80 e 7.82 ilustram as plumas formadas após os vazamentos no compressor com vento na direção sudoeste. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

Enquanto isso, as Figuras 7.73, 7.75, 7.77, 7.79, 7.81 e 7.83 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro desta e correndo de norte a sul.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidade superficial do ar para o escoamento do ar na direção sudoeste, estão nas Figuras 7.84 e 7.85.

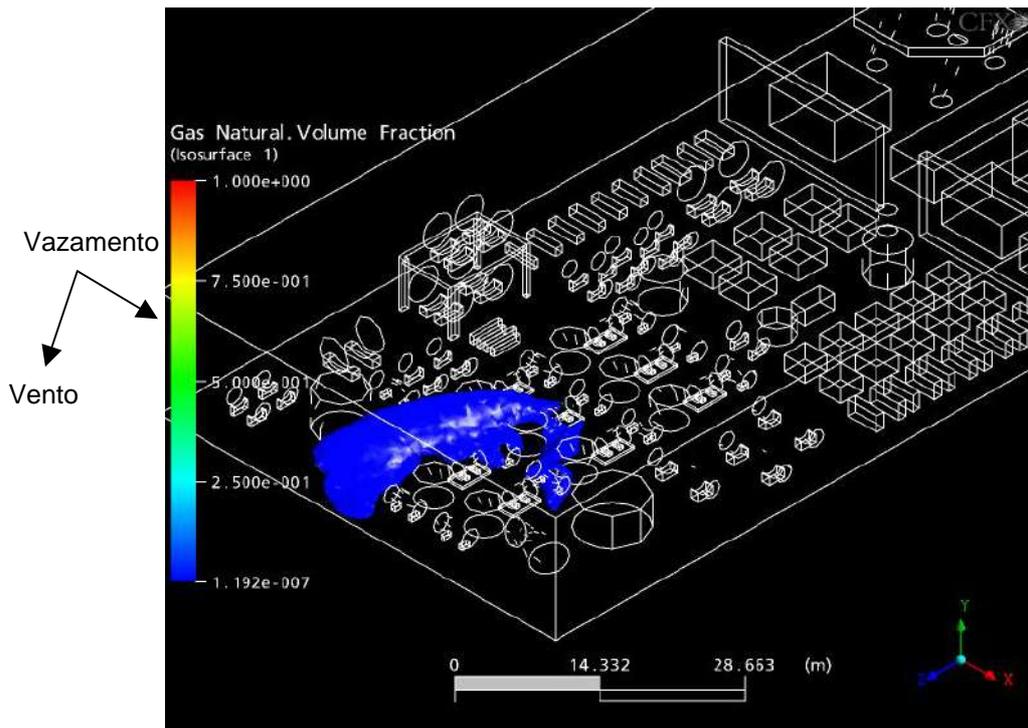


Figura. 7.72 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.

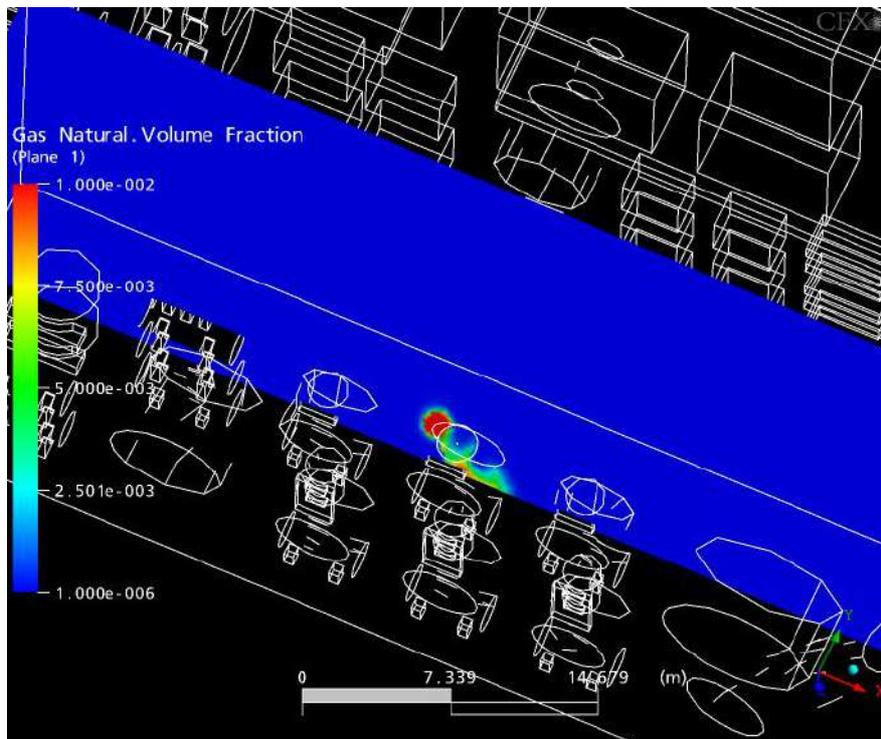


Figura. 7.73 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.

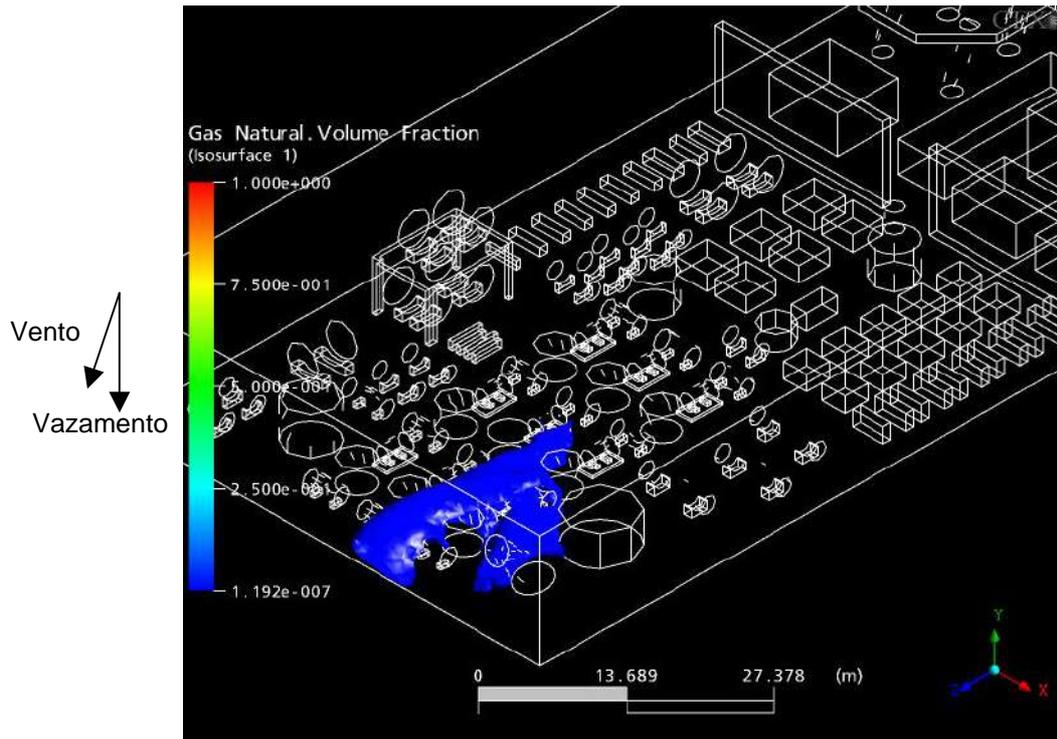


Figura. 7.74 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo.

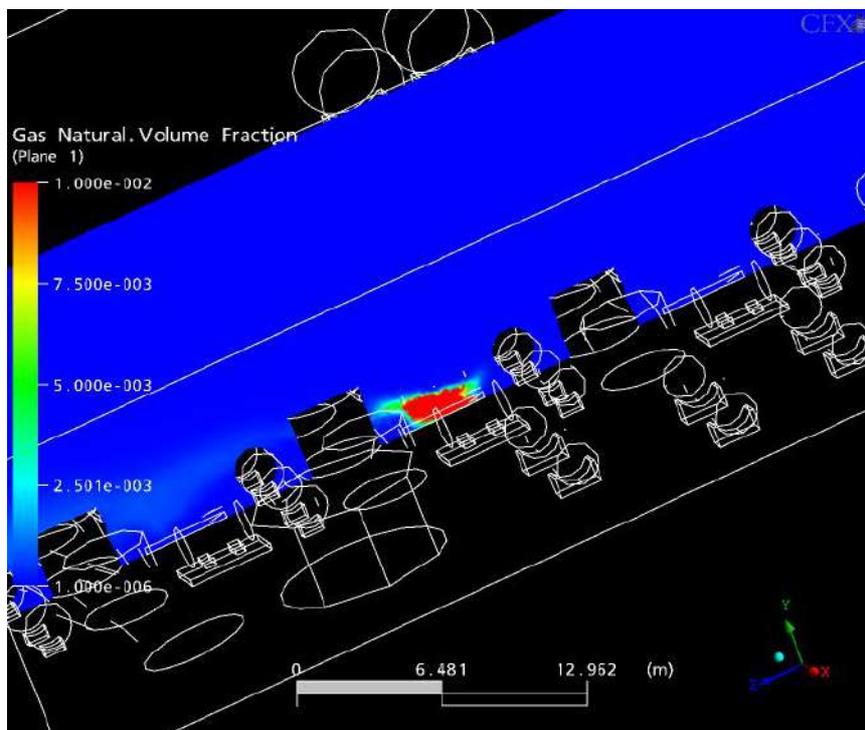


Figura. 7.75 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção baixo.

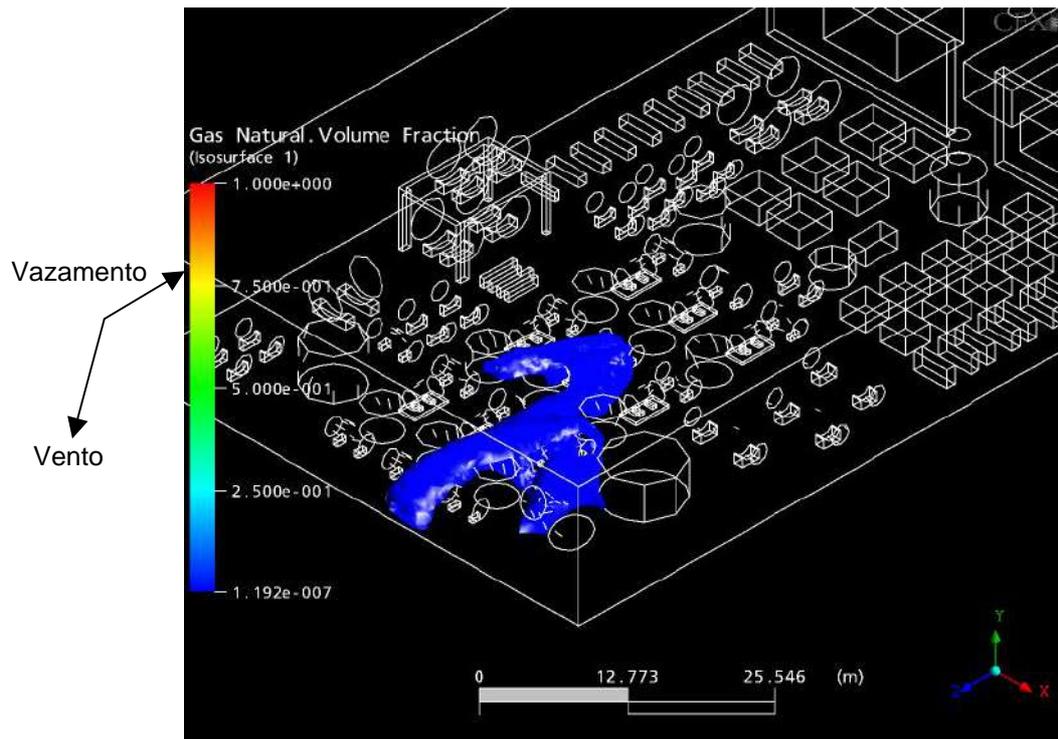


Figura. 7.76 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.

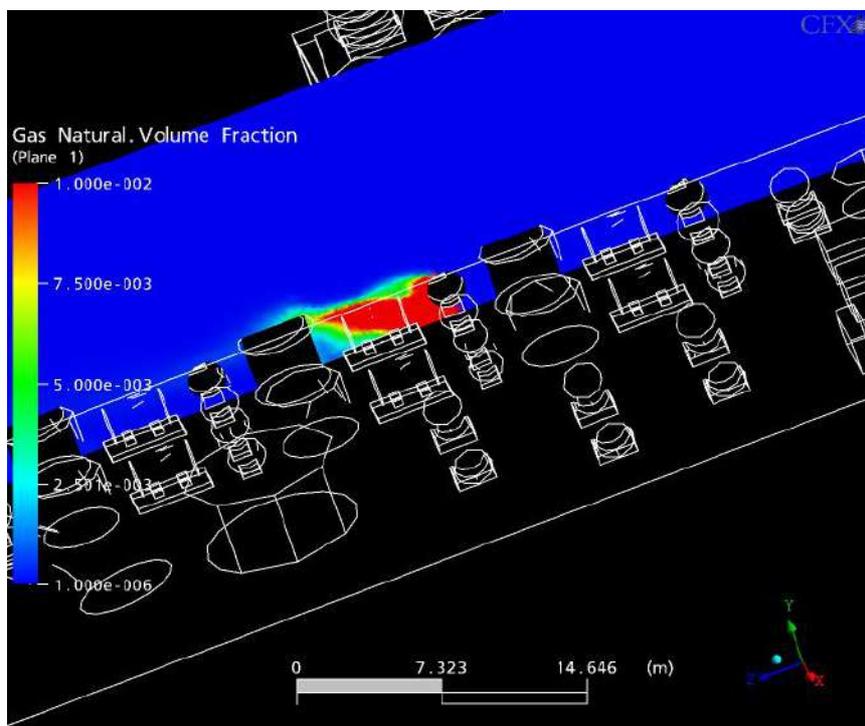


Figura. 7.77 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.

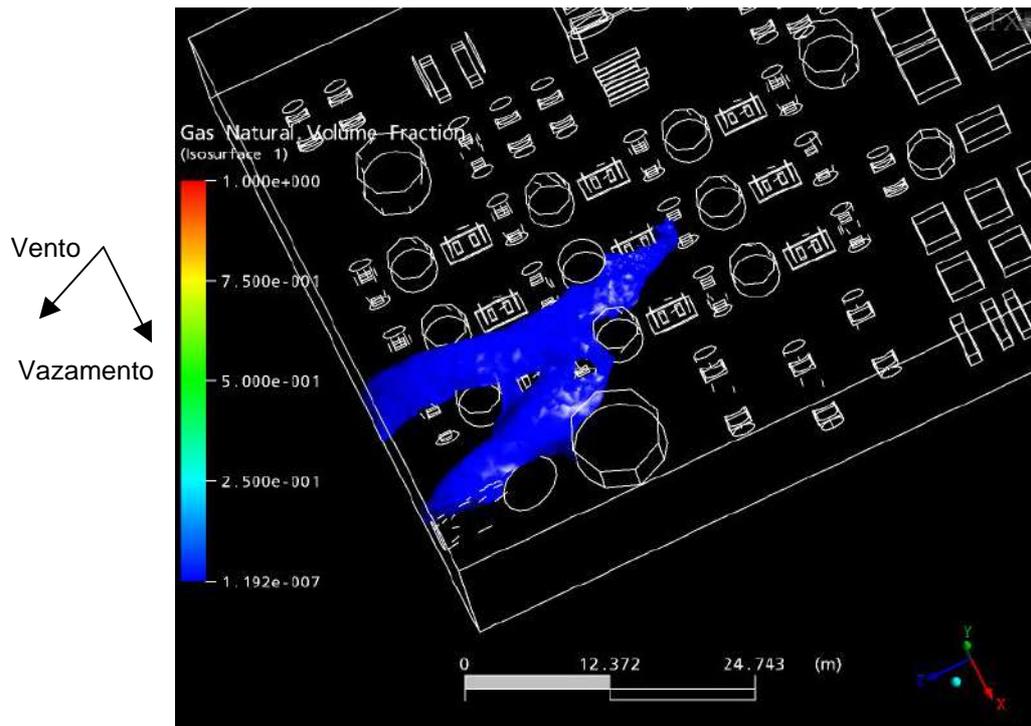


Figura. 7.78 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.

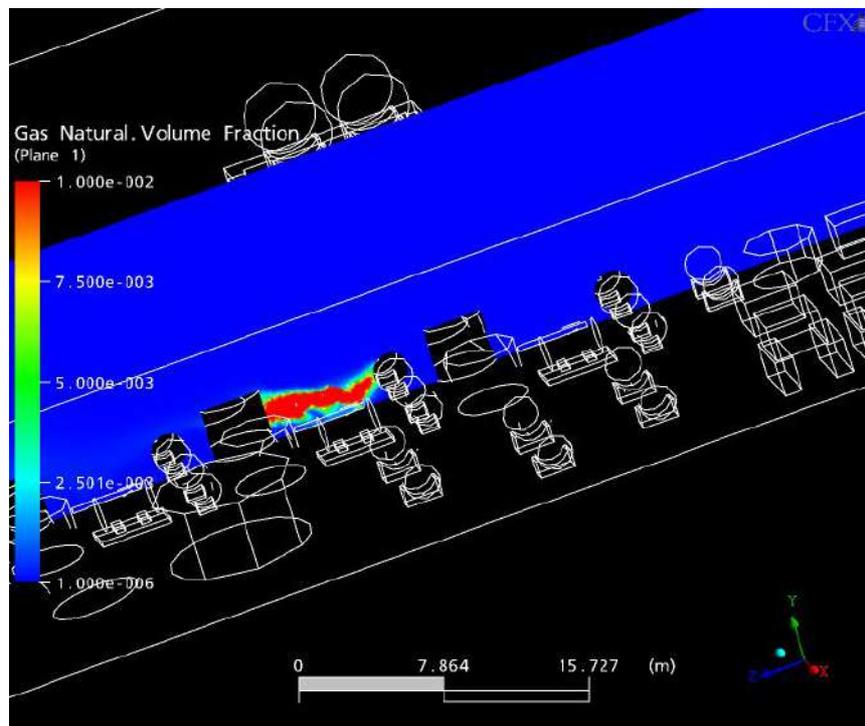


Figura. 7.79 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.

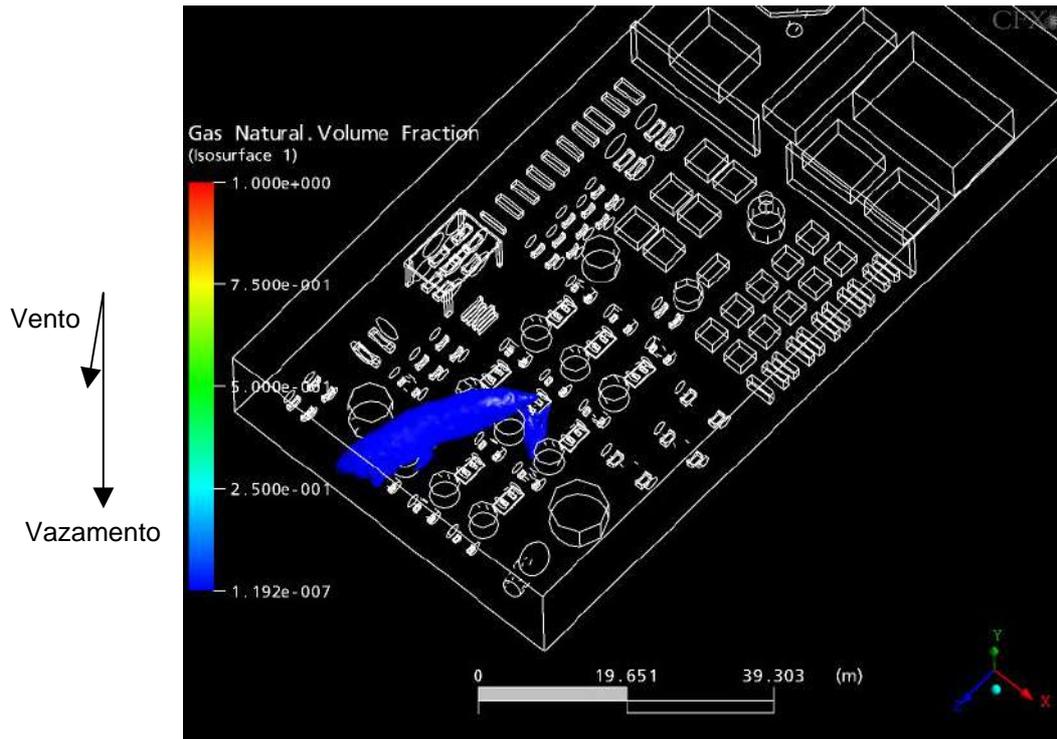


Figura. 7.80 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

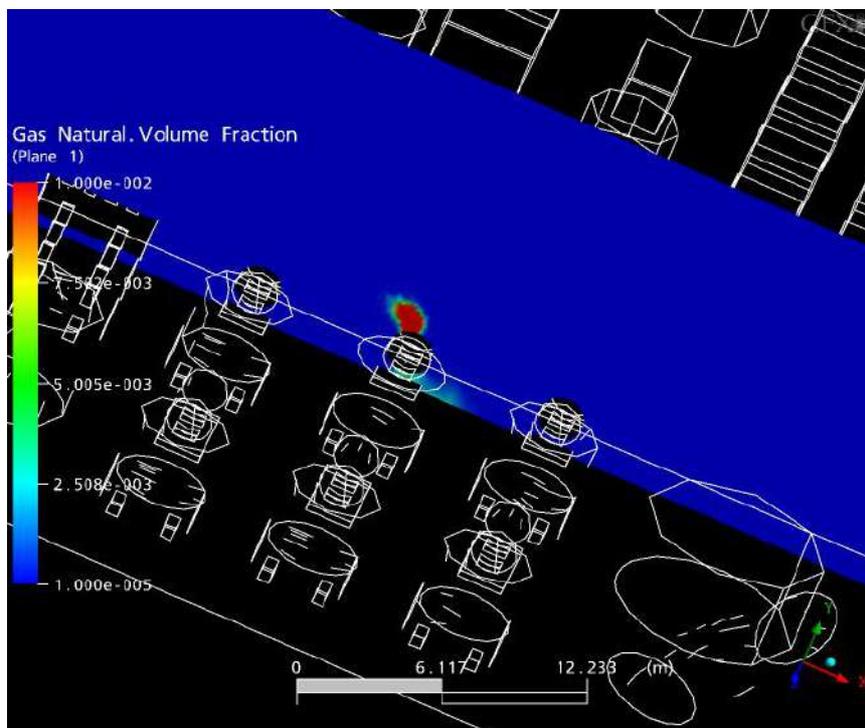


Figura. 7.81 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

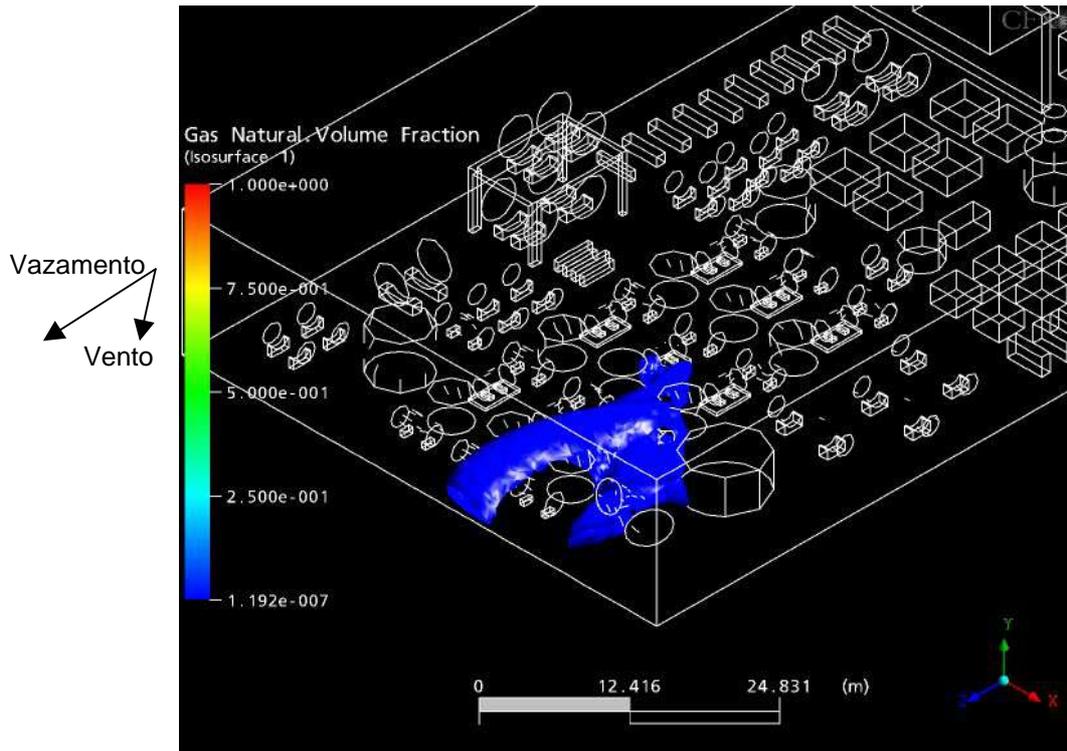


Figura. 7.82 - Pluma do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

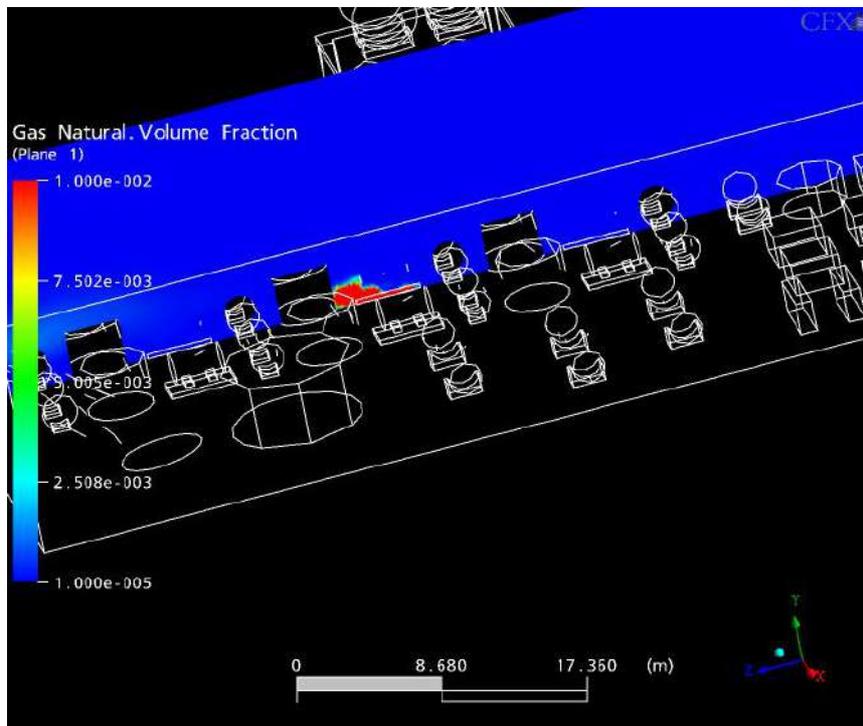


Figura. 7.83 - Plano do vazamento com vento de 6,99 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

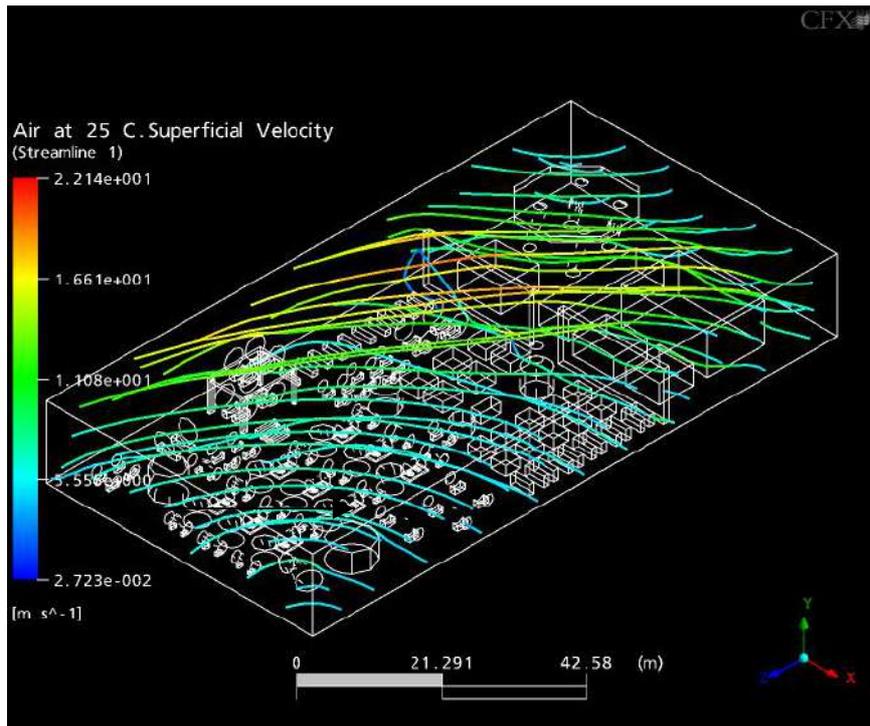


Figura. 7.84 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Sudoeste.

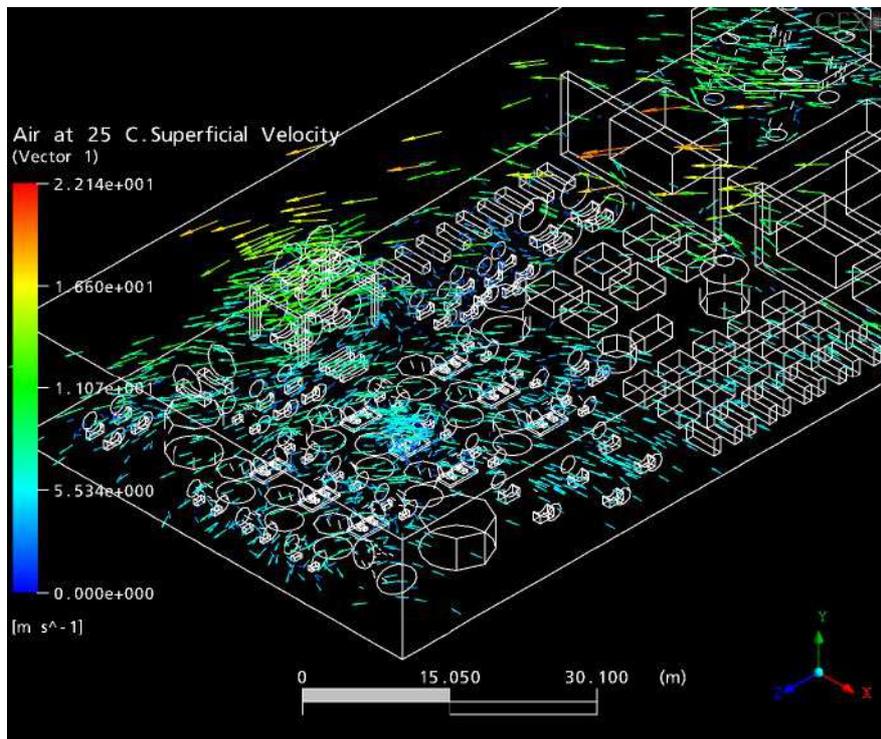


Figura. 7.85 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Sudoeste.

Como no caso dos ventos da direção Noroeste, os ventos da direção Sudoeste também foram formados a partir da decomposição do vetor normal, mas neste caso à direção Sudoeste. A Figura 7.86 ilustra essa decomposição.

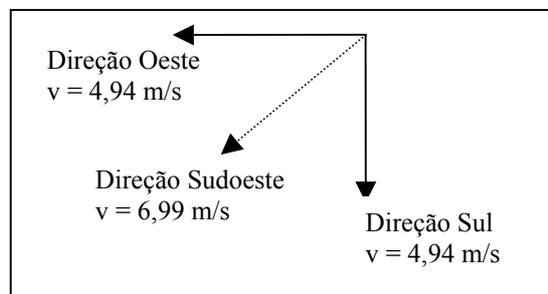


Figura. 7.86 - Composição dos ventos na direção Sudoeste.

Diferentemente do caso na direção Noroeste, os vazamentos com ventos na direção Sudoeste não apresentaram dispersão com grande área, mas sim dispersões que tenderam a sair dos limites da plataforma, o que representa menores riscos de intoxicação por formação de zonas com acúmulo de gás e também a possibilidade de formação de mistura inflamável do gás dispersado com o ar.

Mesmo com a formação de uma pequena área de concentração igual a 1.000ppm, pode-se observar, através da análise das Figuras dos planos, que próximo ao ponto de vazamento, principalmente no caso do vazamento no ponto norte (Figura 7.77), ainda existe uma área onde a concentração de gás liberado pode ser superior a 10.000ppm, o que representa um grande risco, ainda mais se for considerado que os vazamentos estão sendo propostos em um equipamento que opera dentro da área de processo onde as fontes de ignição são inúmeras e que possui áreas que possibilitam o confinamento do gás.

As Figuras 7.84 e 7.85 mostram zonas onde há turbilhonamento do ar, tornando mais intensa a dispersão do gás liberado na área de processo.

### **7.1.7. Direção Nordeste**

As Figuras 7.87, 7.89, 7.91, 7.93, 7.95 e 7.97 ilustram as plumas formadas após os vazamentos no compressor com vento na direção nordeste. Cada figura mostra o vazamento em uma das seis direções testadas (ver Figura 6.6).

Enquanto isso, as Figuras 7.88, 7.90, 7.92, 7.94, 7.96 e 7.98 mostram planos com o perfil de fração volumétrica do gás liberado. O plano foi traçado perpendicular ao piso da plataforma, no centro desta e correndo de norte a sul.

As linhas de correntes e os vetores que ilustram o perfil de velocidade superficial do ar para o escoamento do ar na direção nordeste, estão nas Figuras 7.99 e 7.100.

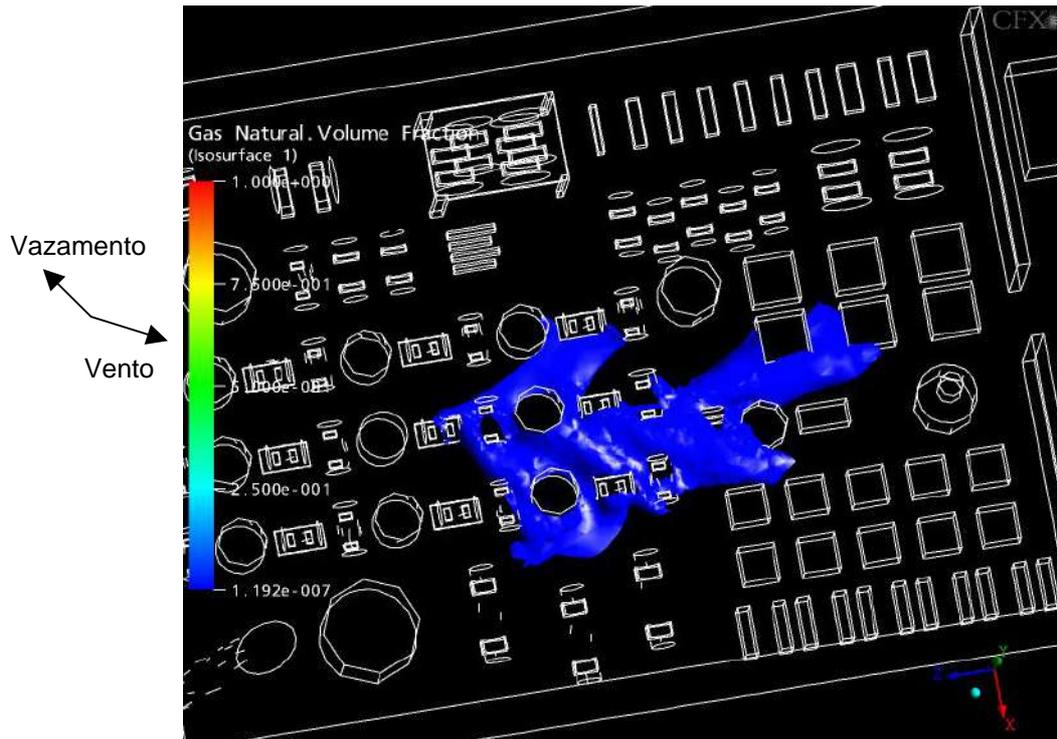


Figura. 7.87 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.

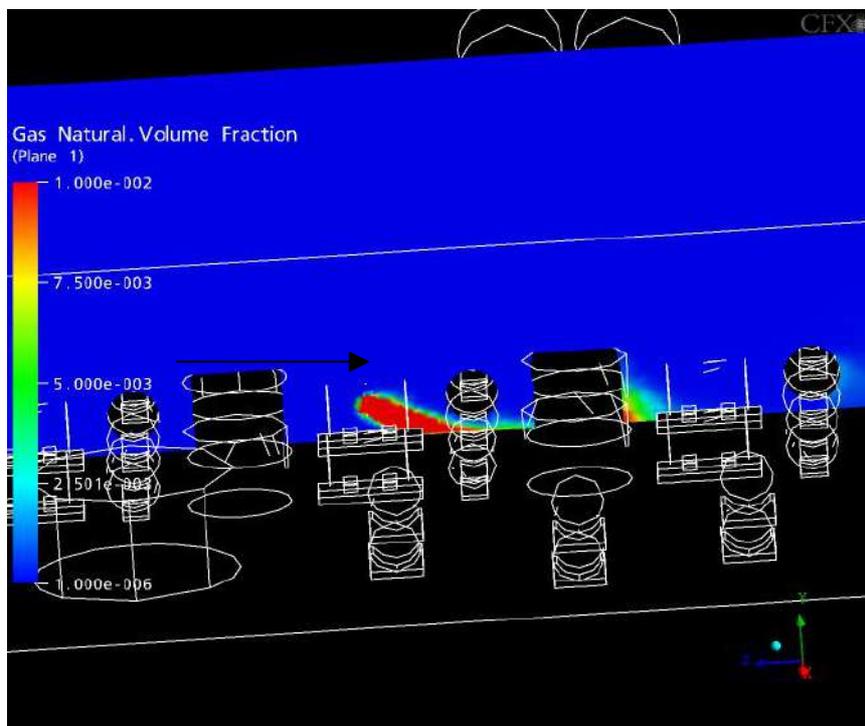


Figura. 7.88 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste.

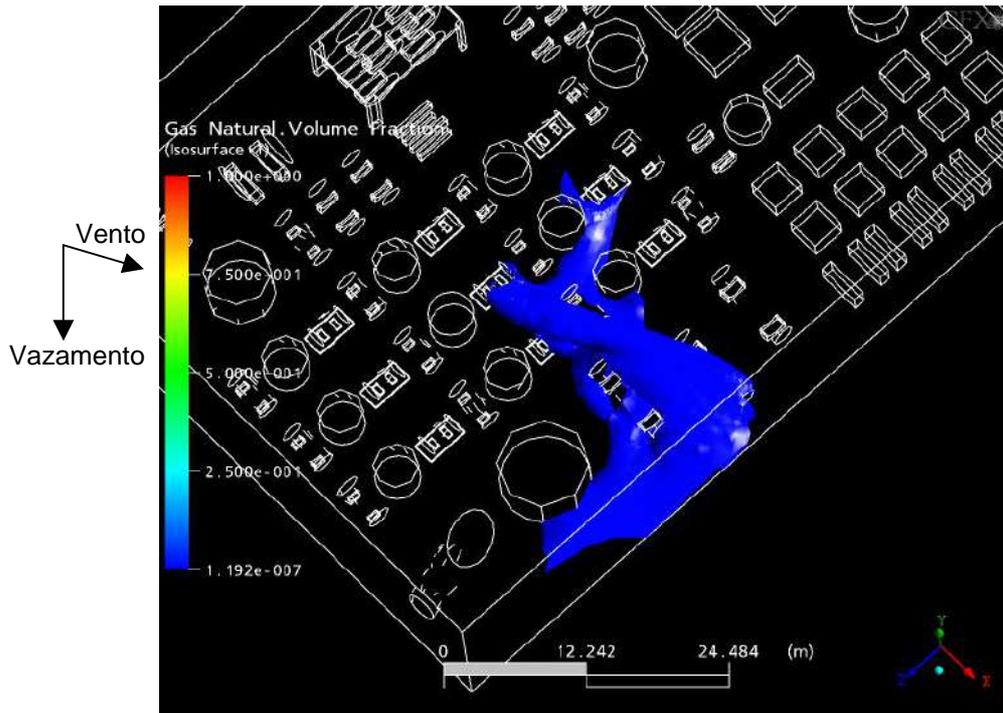


Figura. 7.89 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo.

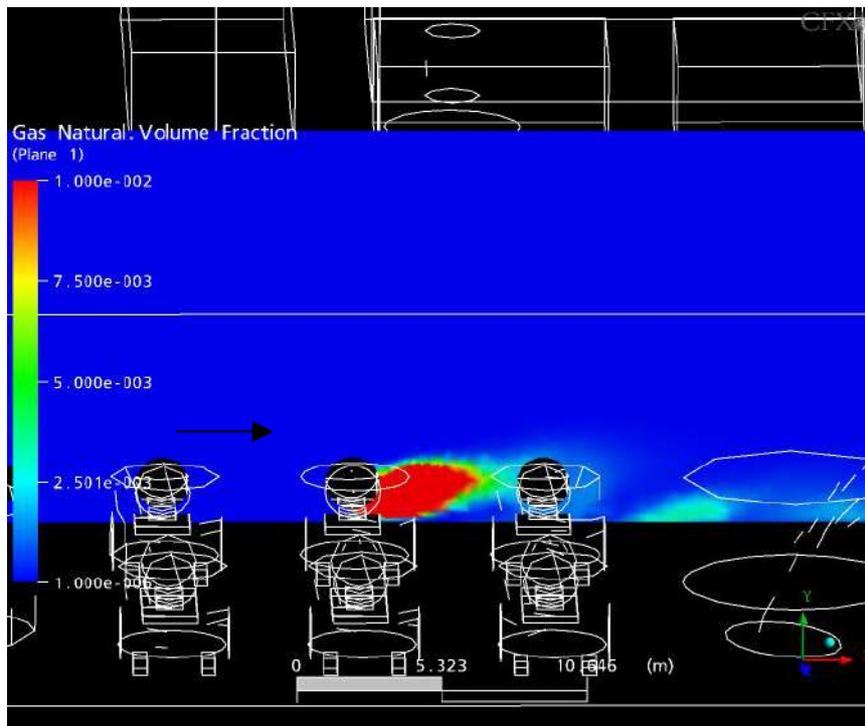


Figura. 7.90 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo.

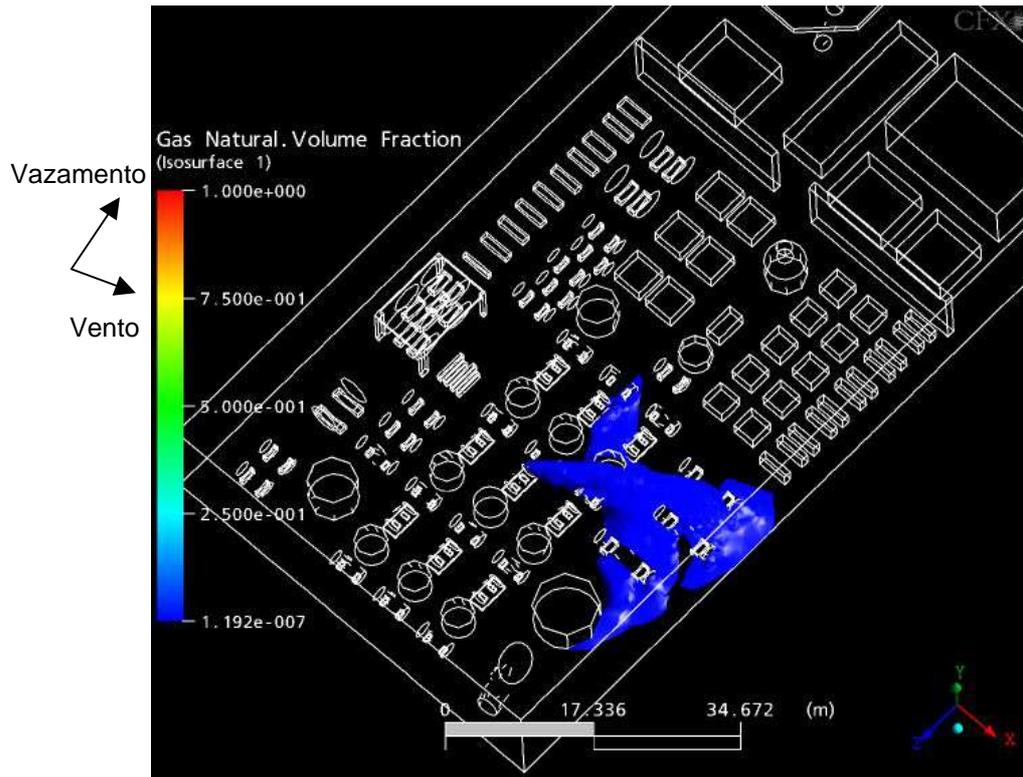


Figura. 7.91 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.

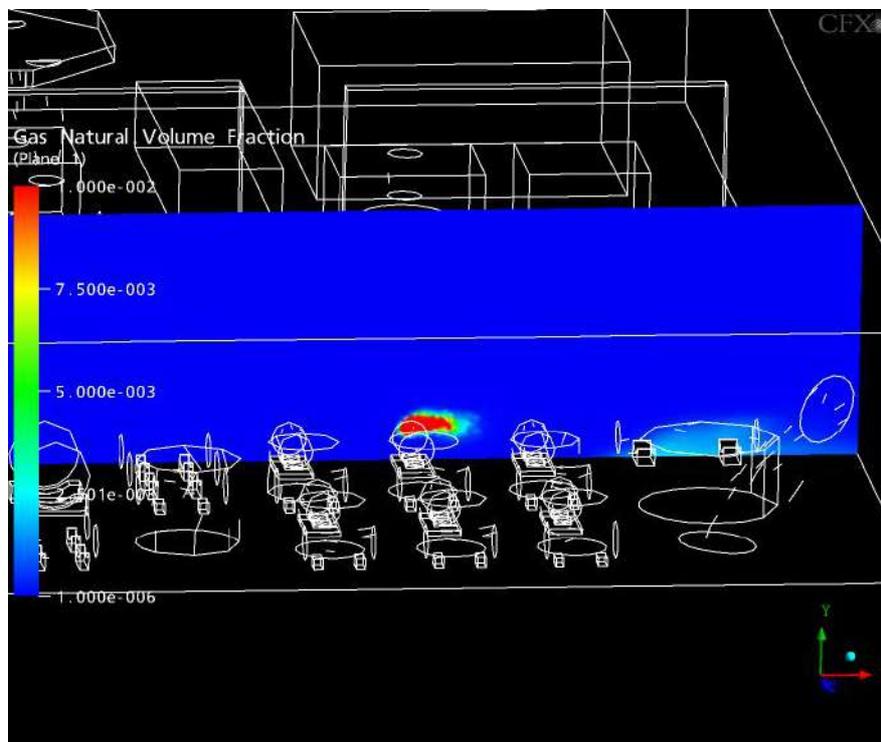


Figura. 7.92 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte.

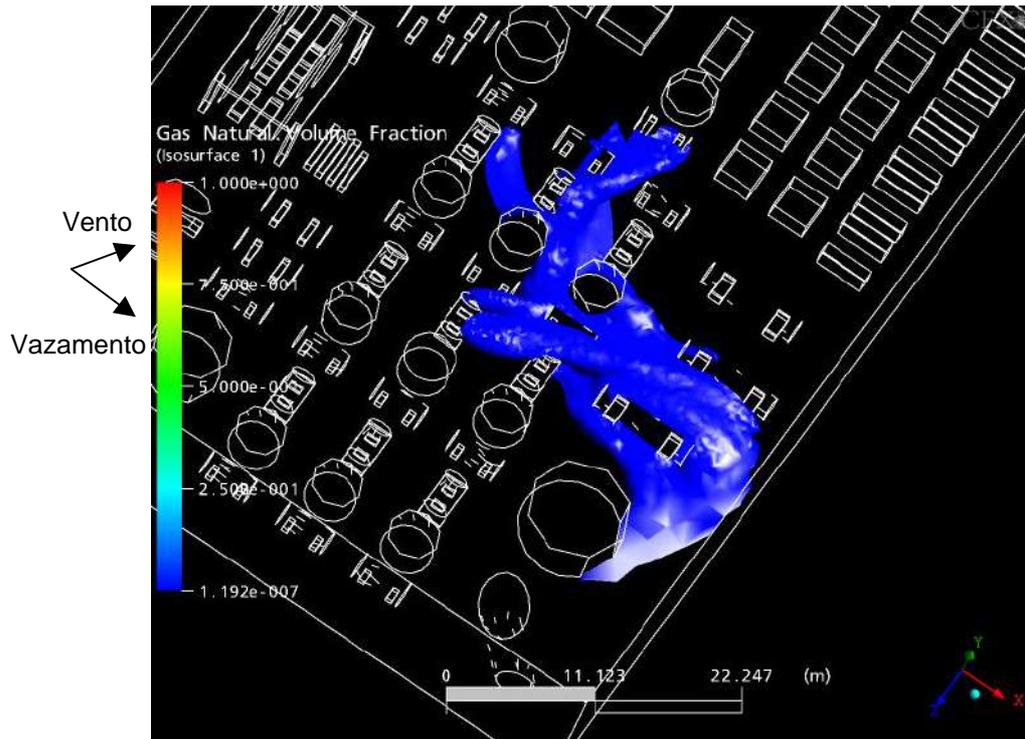


Figura. 7.93 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.



Figura. 7.94 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste.

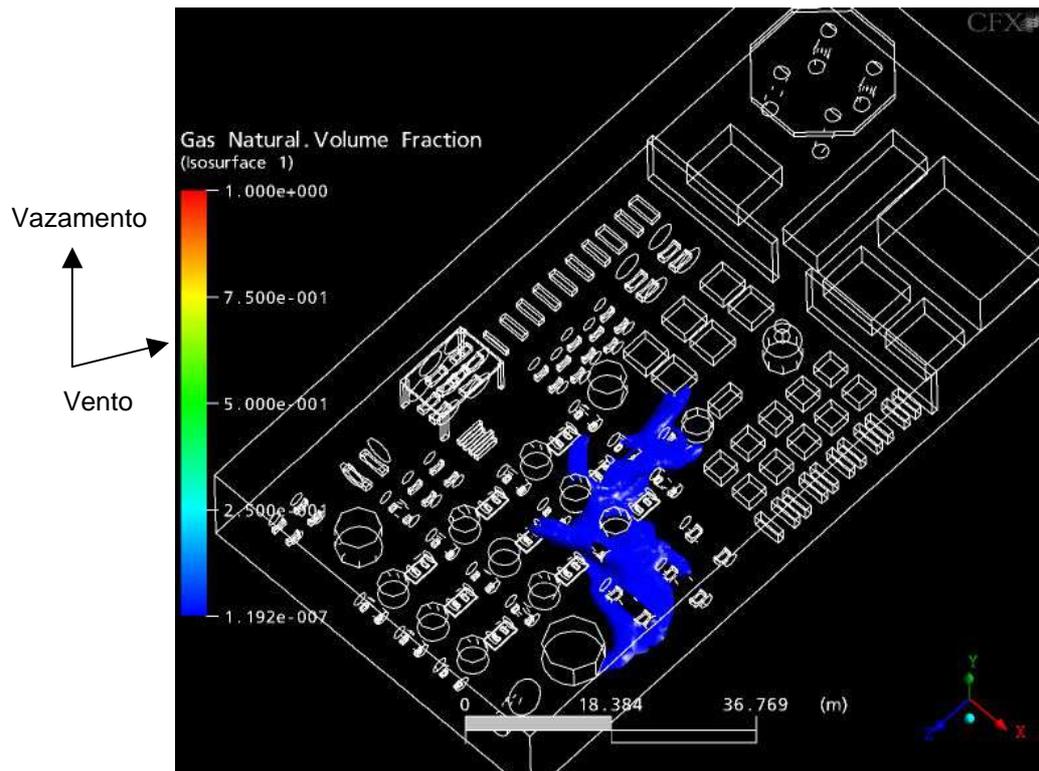


Figura. 7.95 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

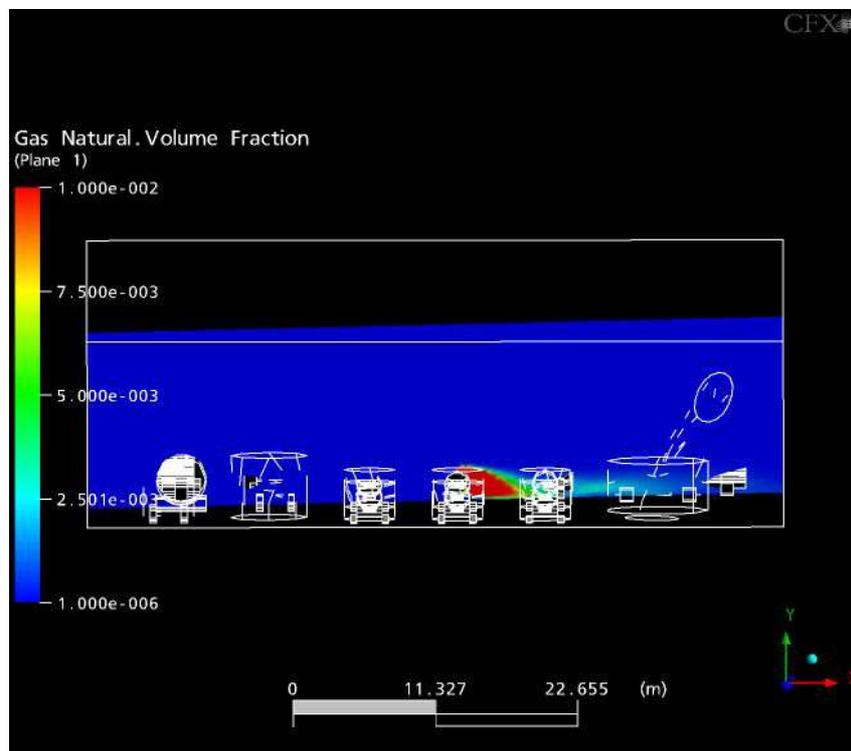


Figura. 7.96 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima.

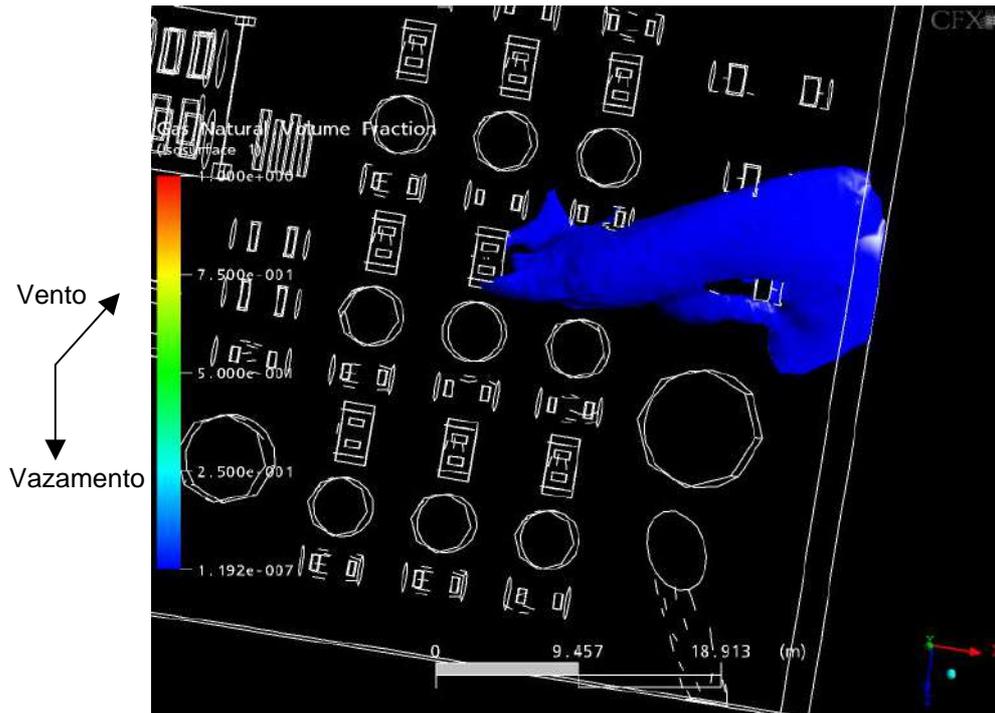


Figura. 7.97 - Pluma do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

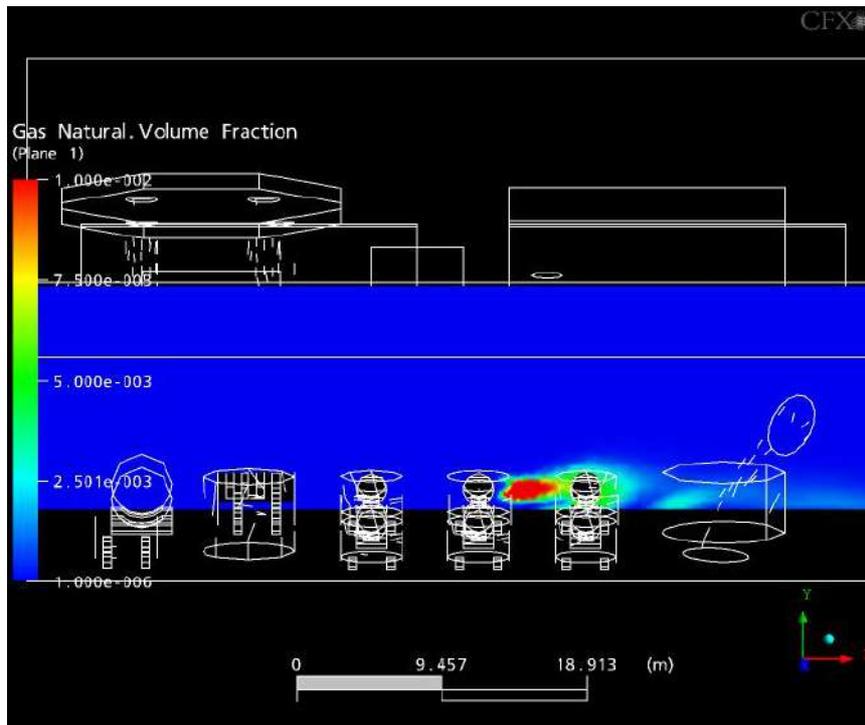


Figura. 7.98 - Plano do vazamento com vento de 8,22 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul.

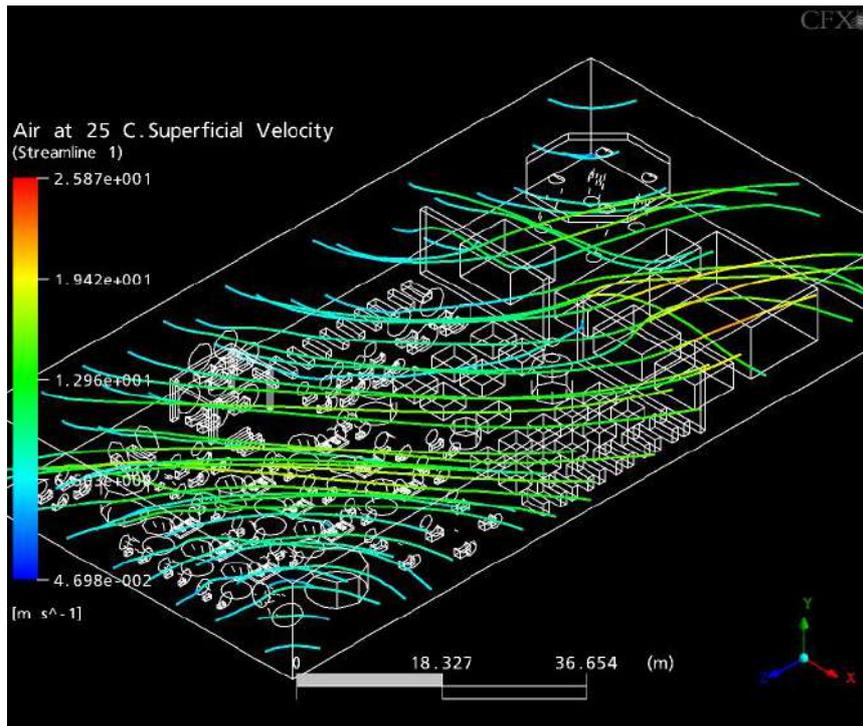


Figura. 7.99 – Linhas de corrente da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Nordeste.

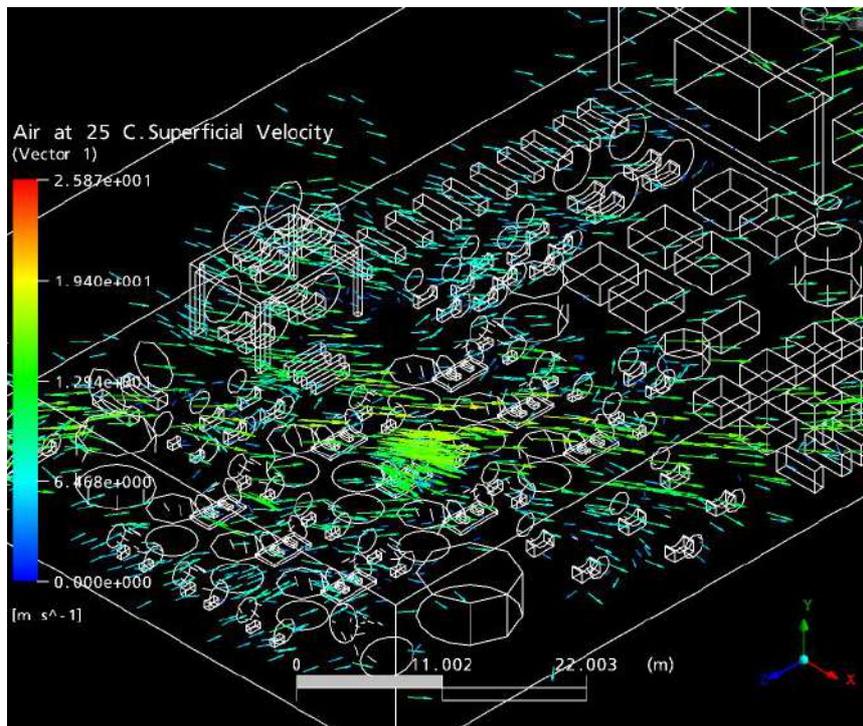


Figura. 7.100 – Vetores da velocidade superficial do ar no escoamento na direção Nordeste.

Os ventos da direção nordeste também foram formados a partir da decomposição do vetor normal à direção nordeste. A Figura 7.101 ilustra essa decomposição.

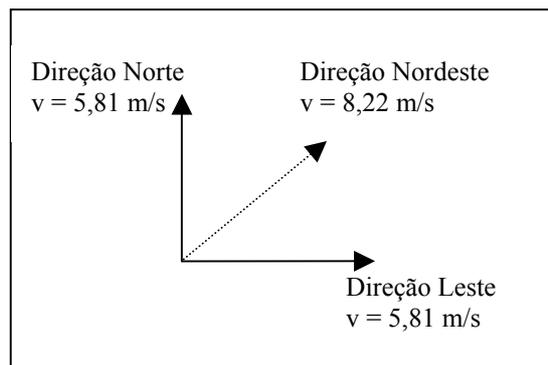


Figura. 7.101 - Composição dos ventos na direção nordeste

Podem ser apontados como os casos críticos, nos vazamentos com ventos na direção Nordeste, os vazamentos nas direções leste e oeste (Figuras 7.93 e 7.87, respectivamente). Isto porque estes vazamentos apresentaram uma maior área de gás disperso, o que implica em uma maior área de exposição.

As Figuras dos planos dos vazamentos para baixo e oeste (Figuras 7.90 e 7.88, respectivamente) foram as que mostraram uma maior quantidade de gás com fração volumar superior a 10.000ppm. Também se deve considerar a proximidade, dessas áreas de fração volumar elevada, do solo, onde estarão expostos os trabalhadores.

Nas Figuras 7.99 e 7.100 é possível perceber o comportamento da velocidade superficial do ar que entra no volume de controle.

## 7.2. Localização dos Detectores

O método para definir a quantidade e o posicionamento dos detectores em uma área aberta de uma plataforma de petróleo *offshore* deve tentar equilibrar as duas situações abaixo:

- aumentar a quantidade de detectores aumenta a segurança de toda a planta, desde que a localização destes detectores seja adequada. Isto minimiza a possibilidade de ocorrência de perdas humanas e prejuízos à instalação;

- aumentar a quantidade de detectores resulta em aumento de custo na operação e na manutenção da planta, originado por *shut downs* causados por falsa detecção, troca de peças, calibração entre outros.

Devem ser avaliados alguns cenários de vazamento para que possa ser feita uma análise de custo benefício. Após concluída a análise de custo benefício, a possibilidade de detecção dos cenários mais favoráveis deve ser verificada. A posição final dos detectores será uma função da distribuição de concentração do gás para cada cenário de vazamento.

A capacidade de detecção dos detectores de gases inflamáveis está baseada no LFL (Limite Inferior de Flamabilidade - *Lower Flammability Limit*). O LFL do CH<sub>4</sub> está próximo de 5,3% e o intervalo de detecção deve estar entre 0,5% e 20%, o que representa 0,265% e 1,06%<sup>[23]</sup>.

Os detectores de gases tóxicos devem detectar no mínimo 0,5ppm, sendo que as plumas geradas neste estudo consideraram esta concentração de H<sub>2</sub>S no gás liberado.

Como, para o presente trabalho, não está disponível os valores necessários para que a análise de custo benefício fosse feita, a localização dos detectores, para a plataforma idealizada, será feita de forma qualitativa, utilizando os resultados das simulações realizadas.

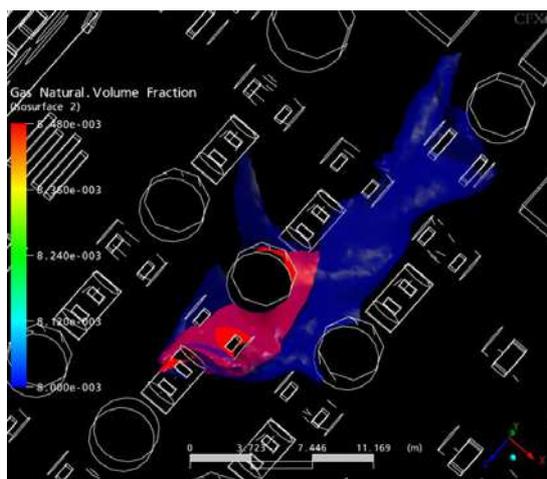
### **7.2.1. Análise das Plumias**

Na presente análise serão discutidas as plumas dos vazamentos considerando o caso mais provável (ventos na direção Nordeste) e o pior caso, isto é, vento mais lento (ventos na direção Noroeste), segundo os dados listados na Tabela 6.1.

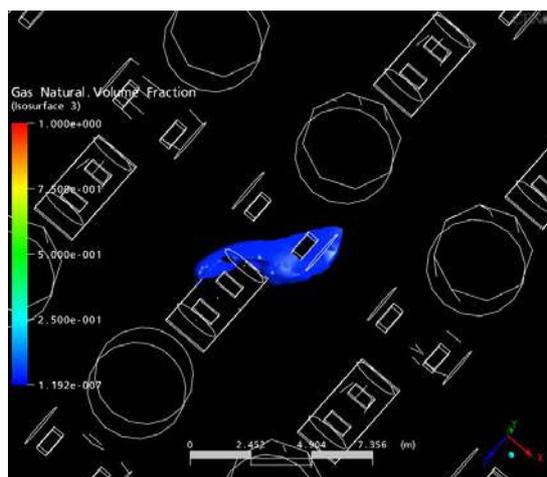
As Figuras 7.102, 7.104, 7.106, 7.108, 7.110 e 7.112 ilustram o intervalo de 0,265% a 1,06% de gás (os limites em que os detectores de gases inflamáveis devem acionar o alarme), para os vazamentos com ventos de 8,22 m/s na direção nordeste, e as Figuras 7.114, 7.116, 7.118, 7.120, 7.122 e 7.124, para os vazamentos com ventos de 4,78 m/s

na direção noroeste. A pluma vermelha se refere ao maior valor do intervalo (1,06% de gás) e a pluma azul, ao menor valor (0,265% de gás).

As Figuras 7.103, 7.105, 7.107, 7.109, 7.111 e 7.113 mostram as plumas de concentração de 5ppm de H<sub>2</sub>S dos vazamentos com ventos de 8,22 m/s na direção nordeste, e as Figuras 7.115, 7.117, 7.119, 7.121, 7.123 e 7.125, para os vazamentos com ventos de 4,78 m/s na direção noroeste.



**Figura 7.102 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção oeste. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



**Figura 7.103 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção oeste. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**

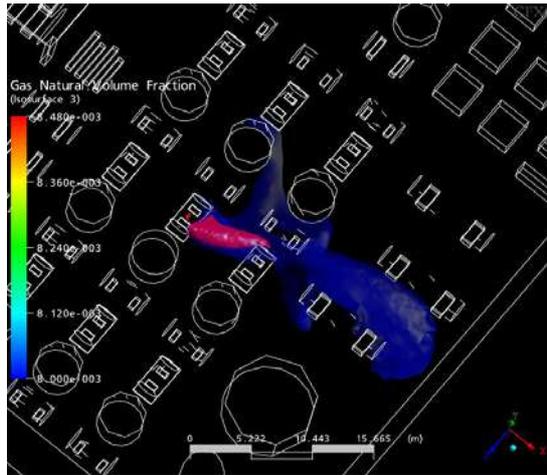


Figura 7.104 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção para baixo. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

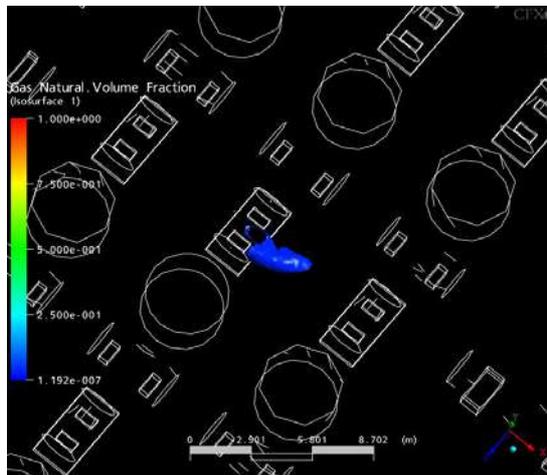


Figura 7.105 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção para baixo. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.

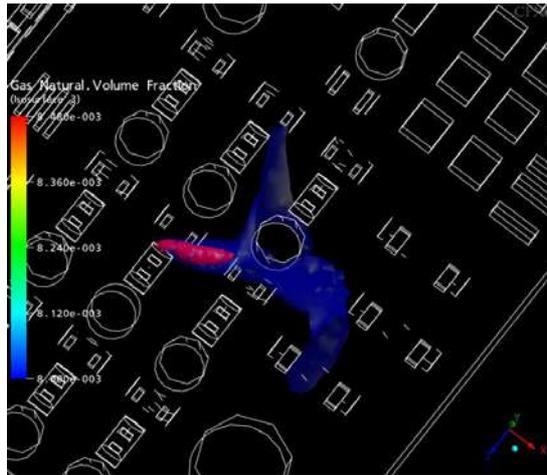


Figura 7.106 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção norte. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

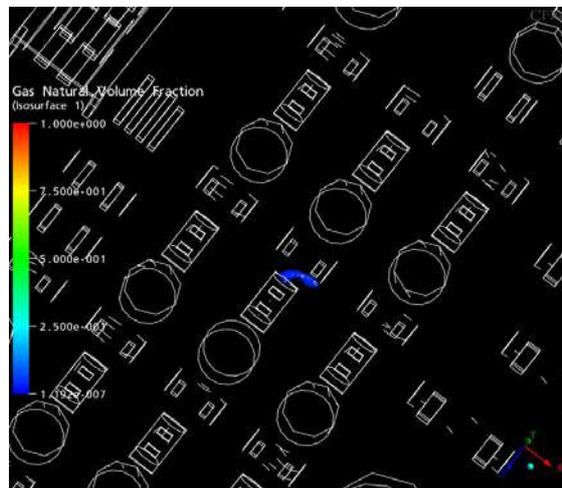


Figura 7.107 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção sul. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.

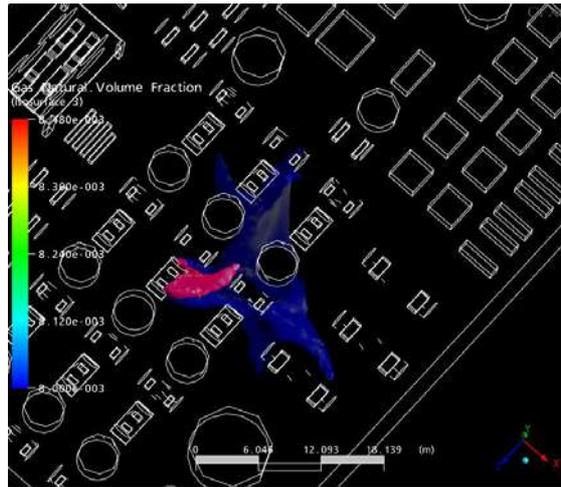


Figura 7.108 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção leste. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

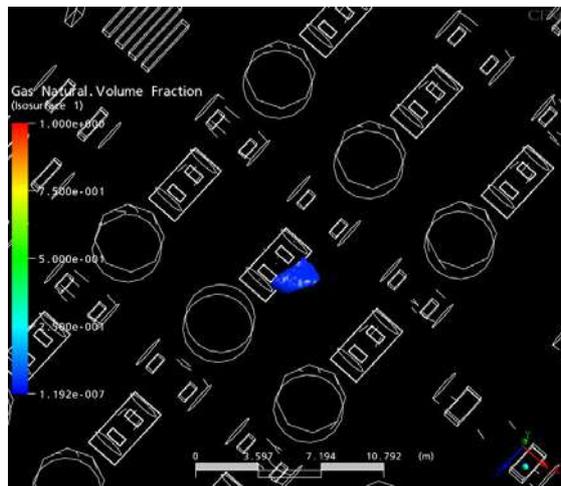


Figura 7.109 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção leste. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.

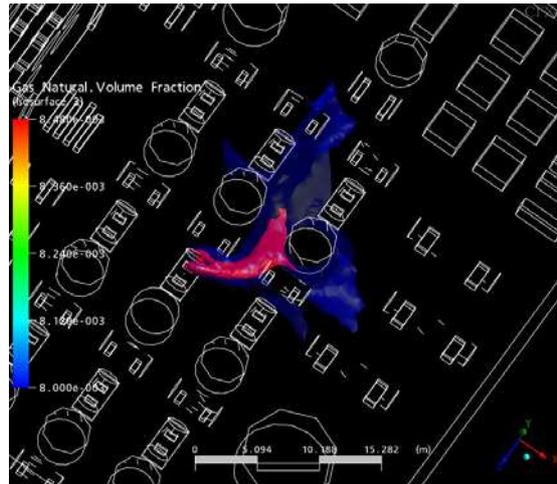


Figura 7.110 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção para cima. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

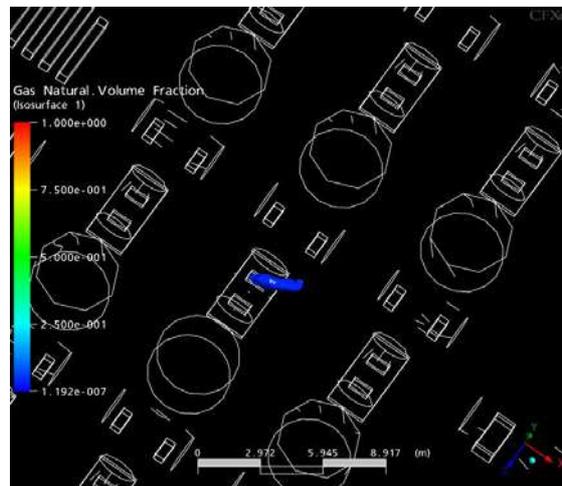


Figura 7.111 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção para cima. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.

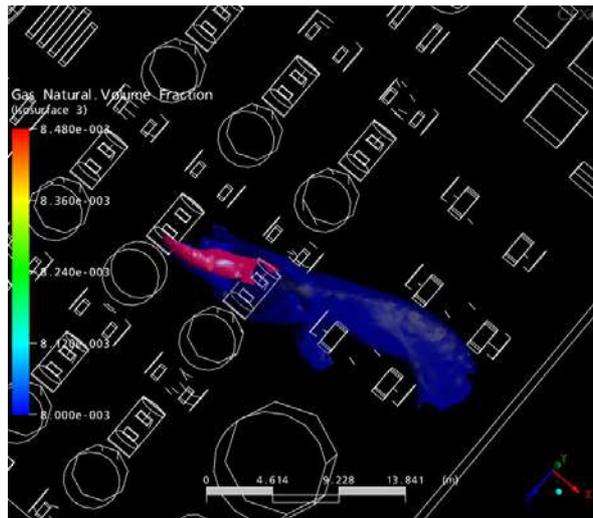


Figura 7.112 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção sul. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

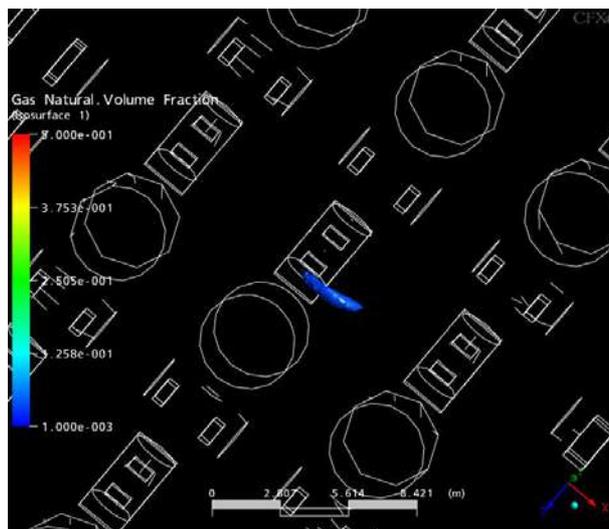
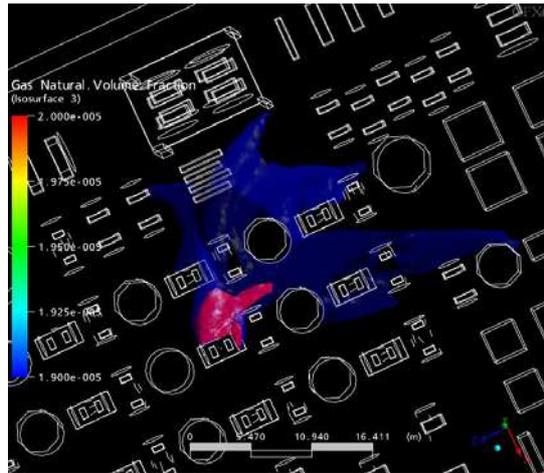
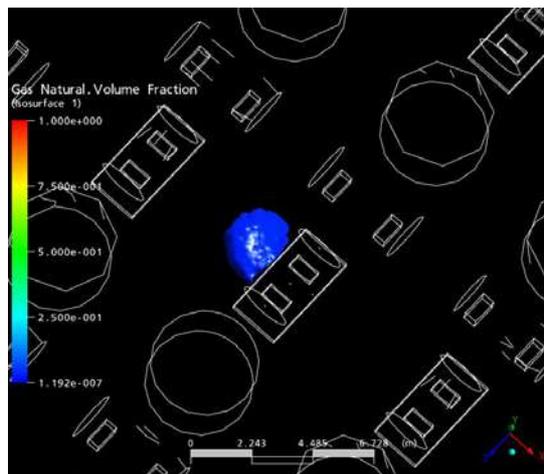


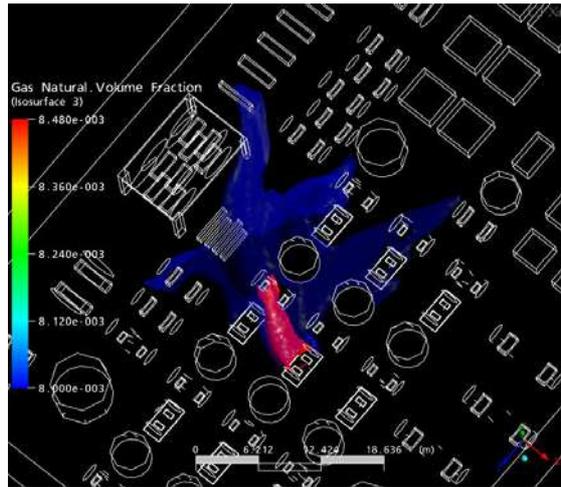
Figura 7.113 – Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 8,22 m/s na direção nordeste e vazamento na direção sul. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.



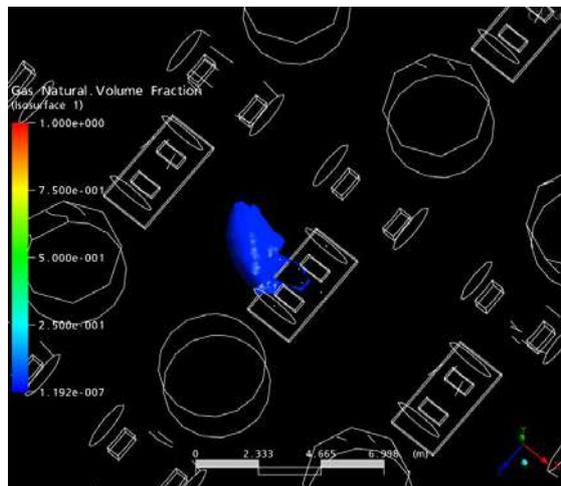
**Figura 7.114 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



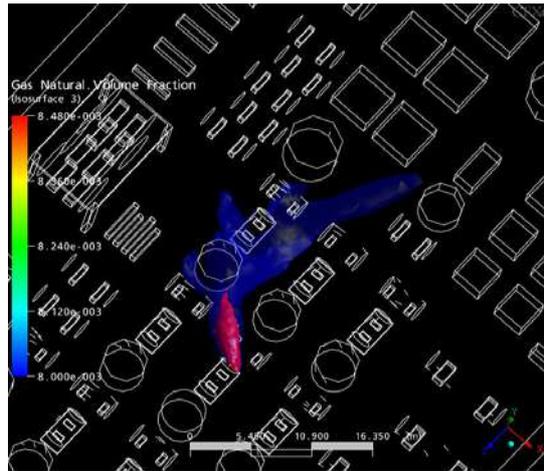
**Figura 7.115 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção oeste. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**



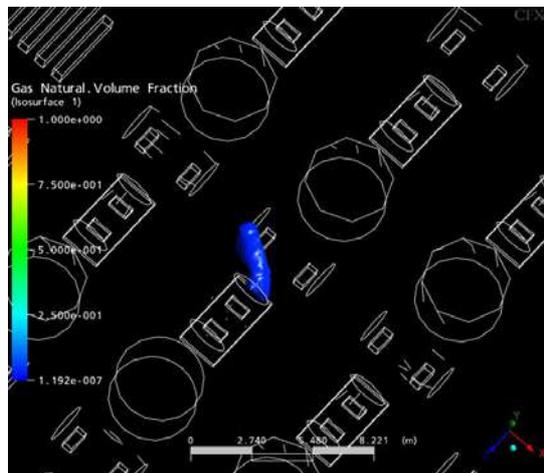
**Figura 7.116 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para baixo. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



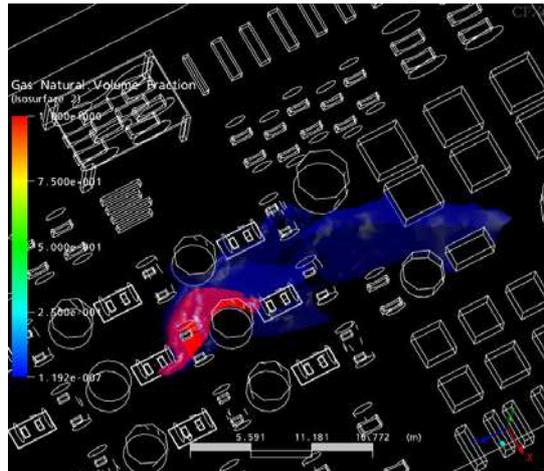
**Figura 7.117 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**



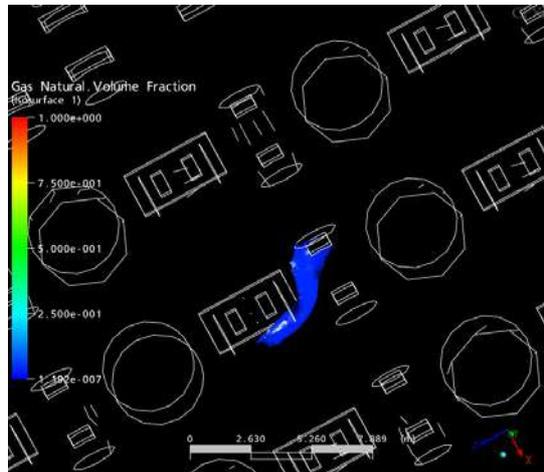
**Figura 7.118 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



**Figura 7.119 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção norte. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**



**Figura 7.120 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



**Figura 7.121 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção leste. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**

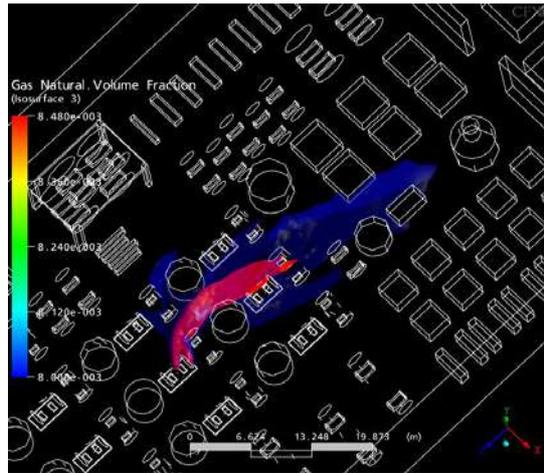


Figura 7.122 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.

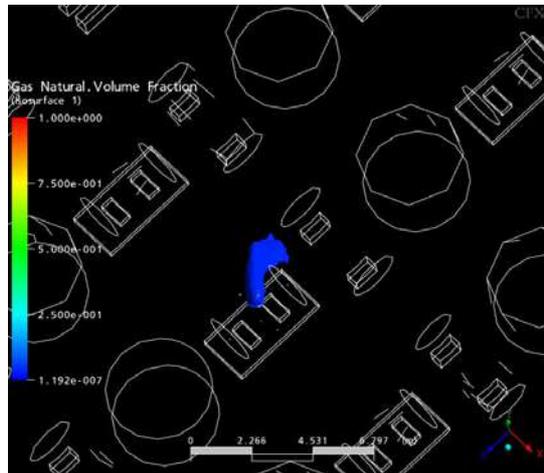
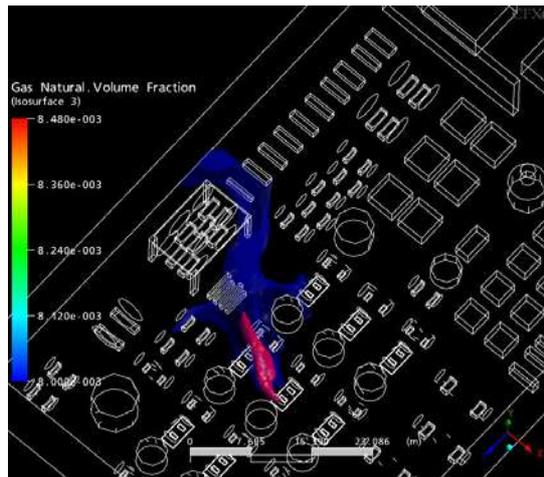
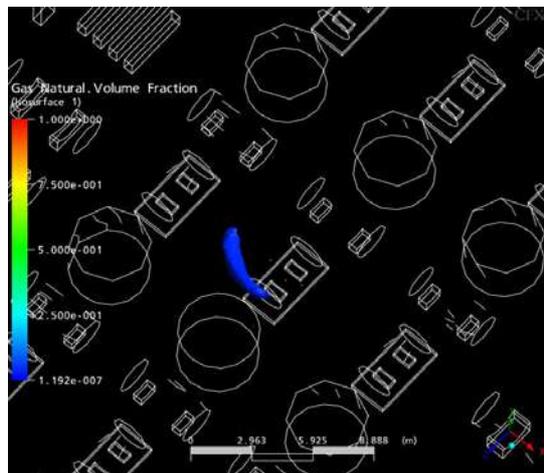


Figura 7.123 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção para cima. A pluma representa uma superfície onde a concentração de  $H_2S$  é igual a 5ppm.



**Figura 7.124 – Limites de detecção para gás inflamável – Vento de 4,48 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul. As plumas vermelha e azul representam frações volumétricas de gás iguais a 1,06% e 0,265%, respectivamente.**



**Figura 7.125 - Mínima detecção de gás tóxico – Vento de 4,78 m/s na direção noroeste e vazamento na direção sul. A pluma representa uma superfície onde a concentração de H<sub>2</sub>S é igual a 5ppm.**

A análise das plumas com fração volumar do gás entre 0,5% e 20% do LEL do gás metano tem como objetivo delimitar a área onde o gás liberado estará dentro de uma faixa de ignição.

Assim sendo, tanto no entorno do compressor em si, como nos equipamentos que circundam os possíveis locais de vazamento apresentados no presente trabalho, será necessária a colocação de detectores, com o objetivo de sinalizar um possível vazamento de gás inflamável.

O interessante deste estudo é que fazendo uma superposição das plumas, geradas com o vento na direção nordeste, é possível perceber que um detector posicionado para atender um vazamento no ponto oeste (Figura 7.102) também atenderá parte do vazamento nos pontos para baixo, norte, leste e para cima (Figuras 7.104, 7.106, 7.108, e 7.110, respectivamente). E que os detectores usados para detectar um vazamento na direção para baixo (Figura 7.104) também seriam capazes de captar os vazamentos nos pontos oeste, leste e sul (Figuras 7.102, 7.108 e 7.112).

A superposição das plumas, geradas com vento na direção noroeste, sinaliza que os detectores usados para o vazamento na direção oeste (Figura 7.114) também podem ser usados para sinalizar os vazamentos ocorridos nas direções para baixo e sul (Figuras 7.114 e 7.124, respectivamente) e que os detectores usados para o vazamento na direção norte (Figura 7.118) podem ser usados na detecção dos vazamentos nas direções leste e para cima (Figuras 7.120 e 7.122).

Esta possibilidade do uso de um detector, posicionado para atender um determinado vazamento, em outro faz com que a malha de detectores fique mais leve, ou seja, torna a malha menos custosa tanto no sentido de compra dos detectores, quanto na necessidade de calibração, troca de peças e até mesmo na troca do detector.

Já os detectores usados na detecção de  $H_2S$  devem ser posicionados próximos aos equipamentos onde sua liberação pode acontecer. Como a composição inicial do gás liberado tem no máximo 15 ppm de  $H_2S$ , podemos concluir que sua inalação pode gerar, no máximo, irritação nos olhos. Assim sendo, uma detecção próxima ao local de vazamento pode acabar com o problema.

## 8. Conclusões

Foi idealizada uma geometria, próxima da real, de uma plataforma *offshore* para que fosse possível visualizar o comportamento da nuvem de um gás proveniente de um vazamento em uma determinada área da plataforma. Com base nas estatísticas de vazamentos do HSE (*Health & Safe Executive*), a área mais provável foi escolhida como sendo a dos compressores de gás. Selecionou-se, então, para estudo, o compressor que se apresentava em posição mais crítica dentro da área. Neste compressor foram simuladas seis situações de vazamentos, para cada uma das oito direções de vento simuladas.

A partir dos resultados obtidos das simulações usando CFD, foi possível calcular o comportamento das plumas, para cada direção de vento, e ficaram evidentes quais seriam os piores casos, ou seja, aqueles que ofereceriam maiores riscos aos trabalhadores da plataforma e também ao patrimônio lá presente.

Os casos mais críticos seriam aqueles onde as plumas ficassem mais dispersas, aumentando assim a área que estaria exposta aos riscos inerentes a este vazamento, a tabela 8.1 resume quais vazamentos foram apontados como os mais críticos para cada direção de vento simulada.

**Tabela 8.1 – Vazamentos críticos para cada direção simulada.**

<b>Direção do Vento</b>	<b>Vazamentos Críticos (nº da Figura)</b>
Norte	Leste (7.43)
Sul	Para baixo (7.11) e sul (7.9)
Leste	Para baixo (7.19), leste (7.25) e oeste (7.23)
Oeste	Oeste (7.31) e para baixo (7.33)
Nordeste	Leste (7.87), para baixo (7.89) e oeste (7.93)
Sudoeste	Para baixo (7.74) e oeste (7.78)
Noroeste	Para baixo (7.63) e sul (7.67)

A partir dos dados da Tabela 8.1, pode-se concluir que os vazamentos na direção para baixo do compressor foram os que apresentaram as plumas críticas, com maior área afetada, possivelmente devido ao menor fluxo de ar próximo ao piso da plataforma,

ocasionado pela presença de obstáculos, e a perda de quantidade de movimento do escoamento devido ao choque do jato de gás com o piso da plataforma.

As Figuras contendo as linhas de corrente e os vetores representando a velocidade superficial do ar serviram para mostrar o movimento do ar dentro do volume de controle adotado. Com base nestas figuras, é possível compreender-se, com facilidade, a dispersão do gás do vazamento.

Com a análise das velocidades dos ventos e suas probabilidade de ocorrência, a partir dos dados da Tabela 6.1, ficou caracterizado que a pior situação seria o vento na direção noroeste, enquanto que o caso mais provável é o vento na direção nordeste.

O vento na direção noroeste é o pior caso porque sua velocidade média de 4,78 m/s é a mais baixa registrada. Este foi considerado como o pior caso porque quanto menor for a velocidade do vento mais difícil será a dispersão do gás liberado, favorecendo o seu acúmulo e possível confinamento, gerando zonas onde este gás pode sofrer ignição por uma centelha gerada na zona de processo, ou então estar confinado em uma concentração que seja tóxica para os trabalhadores.

Como a maior probabilidade de ocorrência de vento é na direção noroeste (33,38%), a plataforma deve estar preparada para os efeitos causados por ventos nesta direção.

Com os detalhes destes dois possíveis cenários foram geradas as plumas para o estudo de detectores de gases inflamáveis, com foco no gás metano, e de detectores de gases tóxicos, com ênfase no H<sub>2</sub>S.

As plumas, com a faixa estabelecida para detecção de metano, mostraram que se deve proteger as áreas que estão no entorno dos pontos de vazamento, mas também foi possível perceber que é possível minimizar a quantidade de detectores, pois um conjunto de detectores posicionado para um determinado cenário pode servir para cobrir vazamentos de outros cenários.

Para a localização dos detectores de H<sub>2</sub>S, concluiu-se que estes devem ser localizados próximos aos locais de possíveis vazamentos.

## 9. Sugestões

Para a complementação do presente trabalho, sugere-se que se obtenham maiores detalhes de uma plataforma de petróleo com objetivo de que a geometria utilizada esteja o mais próximo possível da realidade, fazendo com que os resultados das simulações gerem cenários mais confiáveis.

É necessário, também, que se tenham disponíveis dados para que a análise de custo-benefício possa ser realizada, gerando assim uma malha de detectores próxima da que deve ser implementada na plataforma. Além disso, deve ser realizado um estudo da probabilidade de cada cenário estudado ocorrer.

É necessário que outras fontes de vazamento sejam estudadas. O presente trabalho analisou os vazamentos em um compressor, mas em uma plataforma *offshore* existem outras fontes de vazamento que devem ser estudadas com mais detalhes, tais como turbinas e vasos de pressão<sup>[7]</sup>.

**Referências Bibliográficas**

- [1] **Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N.**, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- [2] **Brodkey, R.S. and Hershey, H.C.**, *Transport Phenomena: An Unified Approach*, 195-263, Mc Graw-Hill Book Company, 1988.
- [3] **Fahien, F.W.**, *Fundamentals of Ttransport Phenomena*, 193-250, Mc Graw-Hill Book Company, 1983.
- [4] **CFX-10.0, Manual**, ANSYS Technology, 2005.
- [5] **Neto, A.S.**, *Fundamentos da Turbulência nos Fluidos*, Em: Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), *Turbulência*, Ediouro Gráfica e Editora S.A., Volume 1, Rio de Janeiro, 2002.
- [6] **Neto, A.S.**, *Simulações de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos*, Em: Freire, A.P.S., Menut, P.P.M., e Su, J. (eds.), *Turbulência*, Ediouro Gráfica e Editora S.A., Volume 1, Rio de Janeiro, 2002.
- [7] **Health & Safety Executive**, *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics And Analysis*, Hid Statistics Report, 2002.
- [8] **Health & Safety Executive**, *Offshore Hydrocarbon Releases Statistics And Analysis*, Hid Statistics Report, 2001.
- [9] **Kelsey, A., Hemingway, M.A., Walsh, P.T. and Connolly, S.**, *Evaluation Of Flammable Gas Detector Networks Based On Experimental Simulations Of Offshore, High Pressure Gas Releases*, Institution of Chemical Engineers, Vol 80, Part B, March 2002.
- [10] **Kelsey, A., Ivings, M.J., Hemingway, M.A. and Walsh, P.T.**, *Sensitivity Studies Of Offshore Gas Detector Networks Based On Experimental Simulations Of High*

*Pressure Gas Releases*, Institution of Chemical Engineers, Process Safety And Environmental Protection, 83(B5): 1–8, Part B, March 2005.

- [11] **Strom, O. and Bakke, J.R.**, *Gas Detector Location*, GexCon AS, Norway.
- [12] **Berg, J.T., Bakke, J.R., Fearnley, P. and Brewerton, R.B.**, *A CFD Layout Sensitivity Study To Identify Optimum Safe Design Of A FPSO*, 2000 Offshore Technology Conference, OTC Paper Number 12159, Houston, Texas.
- [13] **Talberg, O., Hansen, O.R., Bakke, J.R. and Wingerden, K. Van**, *Application Of A CFD - Based Probabilistic Explosion Risk Assessment To A Gas-Handling Plant*, GexCon AS, Bergen, Norway.
- [14] **Osenbroch, J., Hjertager, B.H. and Solberg, T.**, *Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Gas Dispersion in Offshore Modules*, Aalborg University Esbjerg, Niels Bohrs Vej 8, DK-6700, Denmark.
- [15] **Hansen, O., et al**, *Dispersion Of Fuel In Offshore Modules: Comparison Of Predictions Using FLACS And Full Scale Experiments*, GexCon AS, Bergen, Norway.
- [16] **Talberg, O., Strøm, O. and Bakke, J.R.**, *Explosion Risk Reduction Using CFD*, GexCon AS, Bergen, Norway.
- [17] **Popat, N.R., et al**, *Investigations to Improve and Assess the Accuracy of Computational Fluid Dynamic Based Explosion Models*, Journal of Hazardous Materials 45 (1996) 1-25.
- [19] **Kim, W.K. and Salvesen, H.C.**, *A Study for Prevention of Unconfined Vapor cloud Explosion from Spilled LNG Confined in Dike*, Seoul National University and GexCon.
- [20] **Bakke, J.R. and Hansen, O.R.**, *Probabilistic Analysis Of Gas Explosion Loads*, GexCon AS, Norway.

- [21] **Talberg, O., Hansen, O.R. and Bakke, J.R.**, *Recent Advances In CFD-Based Probabilistic Explosion Risk Assessment*, GexCon AS, Norway.
- [22] **Rigas, F.**, *Validation Of Turbulence Models In Heavy Gas Dispersion Over Obstacles*, Journal of Hazardous Materials A108 (2004) 9–20.
- [23] **Louvar, J.F. and Crowl, D.A.**, *Chemical Process Safety: Fundamentals and Application*, 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, Inc., 2002.
- [24] *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 2<sup>nd</sup> Edition, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, New York, 2000.

**Referências Eletrônicas**

[25] <http://www.clickmacae.com.br/?sec=109&pag=pagina&cod=263>, acessado em 16/01/2006, às 11:07.

[26] <http://www.terra.com.br/brasil/2001/03/15/021.htm>, acessado em 16/01/2006, às 11:09.

[27] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_sulfide](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_sulfide), acessado em 07/02/2006, às 14:30.

[28] <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/hidrodinamica/turbulencia/turbulencia.html>, acessado em 17/01/2006, às 10:27.

[29] <http://paginas.fe.up.pt/~fpinho/pdfs/MFAMFTurbull.pdf>, acessado em 17/01/2006, às 10:35.