



MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DA EXTENSÃO DE ÁREAS CLASSIFICADAS EM LIBERAÇÕES BIFÁSICAS

Deborah Almeida dos Anjos, deborah_almeida89@hotmail.com

Antônio Carlos Brandão de Araújo, antonio.brandao@ufcg.edu.br

Heleno Bispo da Silva Júnior, heleno.bispo@ufcg.edu.br

José Jailson Nicácio Alves, jose.jailson@ufcg.edu.br

Talles Caio Linhares de Oliveira, tallescaio@hotmail.com

Felipe Souza Lima, felipe.lima@eq.ufcg.edu.br

Adriana Barbosa da Costa, adrianabarbosaabc@yahoo.com.br

Thalita Cristine Ribeiro Lucas Fernandes, thalita_cr@hotmail.com

Francisco Josimar de Queiroz, josimar.queiroz@eq.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande

Avenida Aprígio Veloso 882 Bodocongó, 58109970, Paraíba, Campina Grande, Brasil

Resumo. Áreas classificadas podem ser definidas como locais, áreas ou espaços onde existe o perigo (ou a possibilidade) de fogo ou explosão devido à presença de gases ou vapores, líquidos, poeiras combustíveis ou fibras inflamáveis em suspensão, resultantes de liberações acidentais. Os estudos de classificação de áreas têm por finalidade básica mapear e determinar as extensões e as abrangências das áreas que podem conter misturas explosivas. Sendo assim, tendo em vista que muitos acidentes envolvem liberações bifásicas de produtos químicos perigosos para a atmosfera, sendo eles muitas vezes armazenados e transportados na forma de gases liquefeitos, este trabalho apresenta um método para determinação da extensão de áreas classificadas resultantes de liberações bifásicas, utilizando-se como estudo de caso propano armazenado na forma de gás liquefeito. Para prever essa extensão, implementou-se em Matlab® um modelo analítico para este tipo de liberação acoplado a um modelo de jatos de gases. O resultado obtido, validado com o modelo em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês Computational Fluid Dynamics), mostra que o método apresentado no presente trabalho pode ser utilizado como ferramenta para auxiliar no processo de classificação de áreas que envolvem liberações acidentais de gases liquefeitos armazenados sob pressão.

Palavras-chave: Classificação de áreas, Liberação bifásica, Propano.

1 INTRODUÇÃO

A atividade industrial frequentemente envolve o uso, processamento ou armazenamento de materiais perigosos (inflamáveis). Evidentemente, as plantas industriais associadas com estas operações necessitam ser dispostas e controladas de modo que estes materiais não se inflamem ou causem explosão. Deste modo, pode ocorrer em determinados locais a mistura de gases, vapores, poeiras, fibras inflamáveis, que associadas com o ar, em proporções adequadas, formam a atmosfera explosiva (Garside, 1995; Erthal, 2004).

A etapa inicial nesta situação compreende a avaliação do grau de risco no local. Isto é obtido através de um mapa do ambiente industrial que mostre a probabilidade de ocorrência de uma mistura explosiva nesse ambiente e em que extensão (volume de risco) essa mistura poderá acontecer. Entende-se por extensão da área classificada os limites da área de risco de presença de mistura inflamável na instalação. A magnitude desta extensão depende de diversos fatores relacionados não só com a substância inflamável em questão, mas também com fatores externos, tais como: condições de ventilação, porte e tipo do equipamento de processo, etc. A influência de cada um desses fatores irá determinar os limites de classificação de áreas (Jordão & Franco, 2002; Neto, 2010).

Alguns acidentes são causados por falhas catastróficas, cuja possibilidade de ocorrência é remota. Porém, a ocorrência de pequenos vazamentos durante a operação normal de uma unidade é mais comum e pode se tornar precursora de incidentes de elevadas proporções caso entrem em contato com uma fonte de ignição, como, por exemplo, equipamentos elétricos, uma vez que, a propensão de energia elétrica para criar faíscas, ou superfícies quentes apresenta uma possibilidade de que as atmosferas explosivas podem ser inflamadas resultando em incêndio ou explosão. Sendo assim, é necessário o desenvolvimento de novas operações a um grau em que essas explosões sejam tão raras que o risco é largamente compensado pelos benefícios dos processos em que pode ocorrer (Cruz, 2012; Mcmillan, 2000).

Nesse contexto, verifica-se a necessidade de definir a área onde será necessária a aplicação de equipamentos elétricos especiais. Sendo assim, tendo em vista que a classificação de áreas é um processo fundamental para evitar incêndios e/ou explosões em ambientes com geração e existência de atmosferas explosivas, este trabalho visa determinar a extensão da área classificada resultante de uma liberação bifásica, de forma a contribuir com o desenvolvimento de melhorias relacionadas ao processo de dispersão neste tipo de liberação, uma vez que esta muitas vezes representa uma maior ameaça devido a grande massa de ar carregada de gotículas de aerossol que pode formar.

2 CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS

Segundo Schram (1993), áreas classificadas podem ser definidas como locais, áreas ou espaços onde existe o perigo (ou a possibilidade) de fogo ou explosão devido à presença de uma atmosfera explosiva, ou seja, na existência de uma substância combustível (gás, vapor, ou pó), num determinado intervalo de concentração, com um oxidante (ar), e ainda a presença de uma fonte de energia capaz de se iniciar a reação de combustão. Para Bahadori (2013), a classificação de área é um método de analisar e classificar o meio ambiente onde a atmosfera de gás explosivo pode ocorrer.

Os estudos de classificação de áreas têm por finalidade básica mapear e determinar as extensões e as abrangências das áreas que podem conter misturas explosivas e, conseqüentemente, permitir a posterior especificação adequada de equipamentos e sistemas

para cada tipo de área classificada mapeada por estes estudos. A partir destes estudos de classificação de áreas, deve ser assegurado que a especificação e a instalação dos equipamentos atendam aos requisitos de risco da área, em conformidade com os requisitos das respectivas normas técnicas aplicáveis da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR IEC). Sendo assim, o projeto, operação ou locação dos equipamentos de processo deve assegurar que, mesmo quando operando anormalmente, a quantidade de material inflamável ou combustível liberado seja minimizada, de modo a reduzir a extensão da área classificada (Bulgarelli, 2009).

3 MODELOS DE EMISSÃO E DISPERSÃO

Existem vários cenários específicos de liberação que, em conformidade com Hanna (2009), dependem do material armazenado uma vez que ele possui propriedades termodinâmicas, fluido mecânicas e de transporte próprias, da geometria de armazenamento e do estado termodinâmico do material. Sendo assim, as substâncias inflamáveis podem escapar dos sistemas de armazenamento de forma diferente em relação ao estado e a taxa de emissão. A Tabela 1 mostra algumas características segundo Cox et al. (1990), que determinam o tipo de cenário de vazamento que pode ser definido para a emissão e dispersão de materiais inflamáveis que escapam em uma planta (Bosch et al., 2005).

Tabela 1. Características de determinação dos cenários de liberação.

Estado	Momento	Densidade	Duração
• Gás ou vapor (fase única); • Líquido sub resfriado (não flasheia); • Líquido superaquecido (flasheia); • Gás liquefeito pressurizado (flasheia).	• Alto; • Baixo.	• Mais leve que a do ar; • Neutra; • Mais pesada que a do ar.	• Instantânea; • Finita; • Contínua.

Uma vez definido o tipo de incidente (cenário), modelos de origem são selecionados para descrever como os materiais são liberados no processo. Um modelo de dispersão é subsequentemente utilizado para descrever como o material é transportado a favor do vento e dispersado para alguns níveis de concentração (Aiche, 2000).

A relação entre os modelos de emissão e dispersão, são mostrados de maneira simplificada no diagrama da Fig. 1. Como se pode observar, após ser identificada a fase da substância no momento da liberação (gás, líquido ou fluido bifásico) e sendo ela bifásica, serão verificadas as condições de vazamento, tais como:

- Flasheamento (evaporação parcial).
- Formação de aerossol.
- Condensação de substância (chuva).
- Formação de poça.

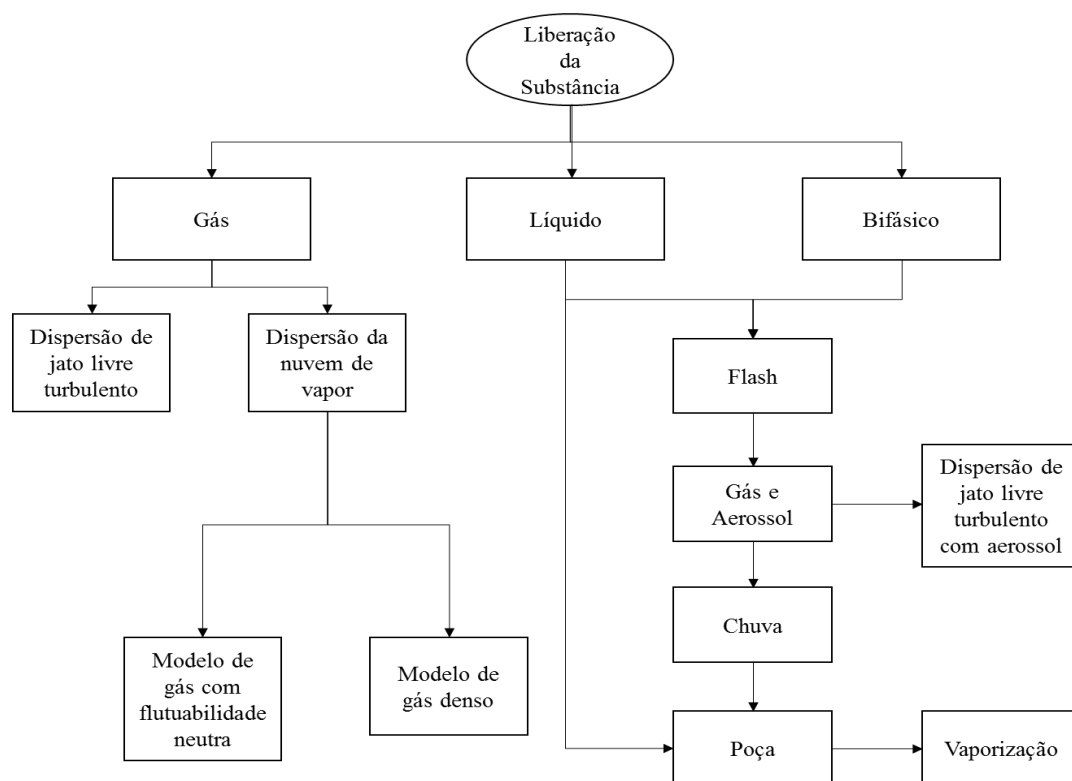


Figura 1. Modelos de emissão e dispersão para cada tipo de liberação.

Nota-se que a liberação de substâncias inflamáveis possui uma gama de possibilidades e que os modelos de origem e dispersão são altamente acoplados, com os resultados do modelo de origem sendo usados para selecionar o modelo de dispersão apropriado, uma vez que para cada tipo de modelo, diferentes dados de entrada são necessários.

4 O PROCESSO DE LIBERAÇÃO BIFÁSICA

O armazenamento de gases na sua fase liquefeita é muito comum na indústria pelo fato do espaço total requerido para o seu armazenamento ser reduzido, além de facilitar o transporte do gás. Quando um reservatório contém um gás liquefeito sob pressão e ocorre uma perda do confinamento, o líquido que escapa é submetido a uma diminuição súbita da pressão, à pressão atmosférica.

No caso de ocorrer uma pequena ruptura de um vaso causando o surgimento de uma fenda ou um furo por onde o gás liquefeito pressurizado irá fluir para fora. Parte da fase liquefeita irá evaporar-se (*flash*) até que a mistura vapor / líquido arrefeça atingindo uma temperatura abaixo do ponto de ebulição. Após o *flash*, que ocorre logo, duas situações são possíveis de se desenvolver: um jato de vapor com um spray de gotas de líquido ou um jato de líquido com bolhas de vapor. De maneira geral, o jato de vapor carregado de gotículas (*spray*) irá arrastar (*entrainment*) o ar e as gotas no jato irão evaporar devido ao calor trazido para o jato pelo ar. Uma parte dessas gotículas pode cair sobre o solo (*rainout*), em determinado tempo t , e formar uma (evaporação) poça líquida. O vapor de água no jato, presente devido a umidade relativa do ar, pode condensar. Finalmente todas as gotículas evaporam e um jato

monofásico, que ainda possa conter vapor de água condensado, permanece. Estas etapas do vazamento podem ser observadas na Fig. 2 e são descritas a seguir (Bosch et al., 2005).

4.1 Região de expansão

Na região de expansão, o gás liquefeito, ao entrar em contato com o ambiente, expande a medida que sua pressão diminui. Esta, atinge um valor menor que a pressão de saturação provocando o flasheamento do produto liberado que resultará em uma fase vapor e uma fase líquida composta de gotículas com diferentes tamanhos, que estarão em equilíbrio termodinâmico. Desta forma, o spray é caracterizado como polidisperso e as gotas maiores podem depositar-se no solo.

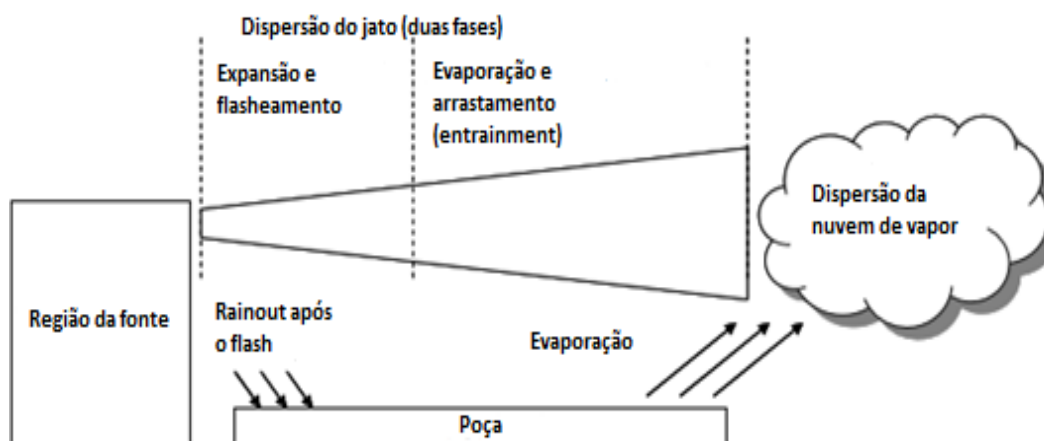


Figura 2. Vista esquemática de um vazamento bifásico (Fonte: Adaptado de Koornneef et al. (2009)).

4.2 Região de arraste

Nesta região pode haver a ocorrência de chuva ou *rainout*, onde gotículas com diâmetros maiores que um diâmetro máximo podem sair do eixo de propagação do jato e atingirem o solo. Para saber se ocorrerá a chuva, determina-se o tamanho da gota, a qual é considerada representativa de todas as outras, e o tamanho máximo abaixo do qual o fenômeno *rainout* não ocorre. As gotas remanescentes continuam arrastando o ar e evaporando, dessa forma, elas iram diminuir ao longo do jato até evaporarem completamente. O processo de *rainout* pode ajudar a reduzir as concentrações na nuvem de vapor resultante e, por outro lado, a evaporação a partir da poça aumenta a duração do perigo (Witlox et al., 2010; Ichard & Melheim, 2015).

Ainda nesta região é possível haver vapor de água condensado devido a umidade relativa do ar. A medida que as gotículas se dispersam com o jato, podem entrar em contato com o vapor de água e condensá-lo, este pode evaporar-se novamente devido a transferência de energia com o ar. Ao final da região de arraste só haverá o vapor do componente químico que foi liberado, ar seco e vapor de água (podendo haver algumas gotas de água).

5 MODELAGEM

A modelagem para vazamento bifásico foi realizada principalmente, a partir dos estudos realizados por Fausk & Epstein (1988) e das correlações apresentadas em Bosch et al. (2005) e Kukkonen (1990), baseadas no Modelo de Equilíbrio Homogêneo (MEH ou HEM-*Homogeneous Equilibrium Model*).

Dado que o modelo para liberação bifásica prevê apenas a extensão do jato bifásico utilizou-se a abordagem proposta por Long e citado em Lees (1996) para jato turbulento subsônico, uma vez que esta pode ser atribuída a nuvem de vapor resultante da evaporação das gotas. A extensão total, desde o orifício até o limite mínimo de explosividade (LEL, do inglês *Lower Explosive Limit*), é obtida somando-se ambas as distâncias. Sendo assim, fez-se uso de um código em Matlab® para liberações de gás, previamente já implementado, para obter o perfil de concentração da nuvem, bem como a extensão desde o fim da região final do jato bifásico até o LEL, acoplando o resultado ao obtido para o jato bifásico. A situação simulada consiste em uma liberação bifásica de propano líquido, cujo resultado foi comparado ao obtido em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD, do inglês *Computational Fluid Dynamics*), nas mesmas condições, cuja simulação já havia sido previamente realizada.

5.1 O jato bifásico

O jato bifásico resultante da liberação analisada possui a configuração exibida na Fig. 3. Este ocorre a partir do rompimento de uma tubulação conectada a um vaso de armazenamento. Considera-se que tal rompimento se dá à 10cm da conexão tubo/vaso, dessa forma, o modelo de equilíbrio homogêneo pode ser aplicado.

Os pontos “e”, “f” e “j” na figura referem-se as condições do jato no orifício de saída, no fim da região de expansão e após a evaporação total das gotículas, respectivamente.

A modelagem do jato bifásico é separada em quatro etapas as quais são referentes às condições do jato na região de expansão após ocorrer o flash (Etapa 1), ao diâmetro das gotas resultantes deste fenômeno (Etapa 2), o cálculo da taxa de evaporação das gotículas bem como a determinação da ocorrência de *rainout* (Etapa 3), e a determinação da concentração do jato após a evaporação de todas as gotículas (Etapa 4). Estas etapas são descritas a seguir.

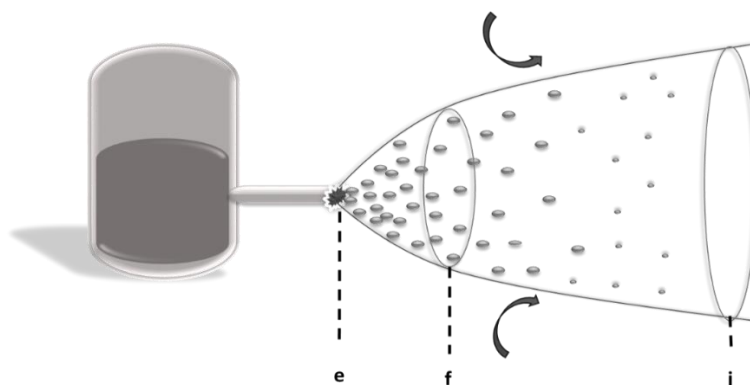


Figura 3. Esquema do jato bifásico tratado para os casos de liberação bifásica.

Etapa 1

Para a determinação do comportamento do jato na região de expansão (ponto f) é necessário saber as condições nas quais o vazamento ocorre. No caso de saída através de um orifício na parede de um vaso, as condições de saída são idênticas às condições no recipiente. Em caso de saída de uma tubulação as condições de saída referem-se às condições no tubo antes da abertura de escoamento.

Nesta etapa, inicialmente é necessário determinar a densidade na saída ρ_e do orifício obtida conforme a Eq. (1). Neste caso, a densidade da fase vapor $\rho_{v,e}$ é calculada a partir da equação para gases ideais à P_e e T_e e a densidade da fase líquida $\rho_{L,e}$ pode ser obtida a partir de correlações disponíveis na literatura.

Após a saída, o fluxo sofrerá uma depressurização e o líquido vaporiza até que a mistura de duas fases esteja na temperatura de ebulição. Desta forma, deve-se determinar quanto de líquido é vaporizado. A fração de líquido vaporizado $\Phi_{m,e}$, pode ser determinada utilizando-se a Eq. (2).

$$\rho_e = \frac{1}{\left[\frac{\Phi_{m,e}}{\rho_{v,e}} + \frac{(1-\Phi_{m,e})}{\rho_{L,e}} \right]} \quad (1)$$

$$\Phi_{m,e} = C_{p_{L,e}} \left(\frac{T_e - T_b}{L_{v,e}} \right) \quad (2)$$

Onde: $C_{p_{L,e}}$ é a capacidade calorífica do líquido na saída ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); T_e e T_b são as temperaturas na saída e de bolha, respectivamente (K); $L_{v,e}$ é o calor latente de vaporização da saída (J.kg^{-1}).

Para a taxa de emissão, Bosch et al.(2005) afirma que para fluxos bifásicos as relações padrão para fluxo de líquido através de orifícios podem ser aplicadas. Contudo, assume-se que o fluido tem uma densidade em função da fração de vapor em massa, conforme a Eq. (3).

$$G = C_D \cdot A_e [2\rho_e (P - P_a)]^{1/2} \quad (3)$$

Onde: A_e é a área da seção transversal na saída (m^2); P_a é a pressão ambiente (N.m^{-2}); C_D é o coeficiente de descarga.

A velocidade de emissão obtida de acordo com a Eq. (4). A velocidade do fluido (fase líquida + fase vapor do componente) pode ser considerada igual a velocidade da fase líquida uma vez que o equilíbrio termodinâmico na saída é assumido.

$$u_e = C_D \left[\frac{2(P - P_a)}{\rho_{L,e}} \right]^{1/2} \quad (4)$$

No final da zona de expansão o jato encontra-se na pressão atmosférica. Assim, o líquido, que está em equilíbrio termodinâmico com seu vapor, está na sua temperatura de ebulição. A

partir da conservação de momento, de massa e da conservação de energia total, a velocidade do jato e a qualidade depois do *flash*, podem ser calculadas. Por fim, determina-se a densidade média do jato depois do flash (ρ_f) para então obter-se o aumento da seção transversal (A_f) e o raio (b_f) admitindo que a seção transversal do jato tem um formato circular.

Etapa 2

A fim de estimar a possibilidade de se ocorrer a chuva ou *rainout* (gotículas do jato caírem no chão e não contribuírem diretamente para a quantidade de poluente no jato), é necessário calcular o diâmetro das gotículas depois do *flash*. Em alguns casos será necessário a utilização de uma constante relacionada ao tamanho da gota (C_{ds}). Na literatura, esta constante varia entre 10 e 20, porém, neste trabalho é considerado um valor igual a 15.

O diâmetro das gotas depende da velocidade do jato, tamanho do jato, viscosidade e tensão superficial. Portanto, faz-se uso de dois números adimensionais, o número de Reynolds (Re) e o número de Weber (We). O número de Reynolds caracteriza o equilíbrio entre forças de inércia e viscosas, o número de Weber caracteriza o equilíbrio entre forças de inércia e de tensão superficial. Neste caso, o Reynolds e o número de Weber são calculados em função do raio e velocidade do jato no fim da região de expansão e da densidade da fase líquida também neste ponto.

O diâmetro foi calculado de acordo com as correlações sugeridas em Bosch et al. (2005) onde ele é obtido para uma única gota e a correlação utilizada irá depender da temperatura de liberação e dos números adimensionais já mencionados.

Etapa 3

Nesta etapa, realiza-se inicialmente uma estimativa para saber se as gotículas provenientes do flasheamento podem atingir o chão. Se este for o caso, a fração mássica total que irá cair é calculada. Assume-se que as gotículas tem o mesmo diâmetro. Desta forma, a evolução do diâmetro único devido à evaporação das gotículas é, portanto, considerada representativa de todas as gotículas.

A estimativa da gota cair no chão requer o cálculo da taxa de evaporação de gotículas individuais. A evaporação é restrita por um fluxo de calor do ar ambiente para a gota e pelo fluxo de massa da superfície da gotícula para o ar ambiente. Portanto, o problema depende da difusão de massa e convecção de calor em ar. Sendo assim, os números adimensionais relevantes são o número de Reynolds, com base na velocidade relativa da gota através do ar, o número de Schmidt (Sc) que representa a relação entre as difusões viscosa e mássica, e o número de Prandtl (Pr) que representa a relação entre as difusões viscosa e térmica.

Após, é possível obter o diâmetro crítico máximo aproximado que uma gota pode ter sem que a mesma atinja o chão, estando ela a uma altura de liberação h_s acima do solo. A chuva só ocorrerá se o tamanho da gota depois do flash for maior que a gota de tamanho máxima d_M . Se o diâmetro da gota é menor que d_M , e o Reynolds, avaliado no diâmetro e na velocidade de queda livre da gota, for menor que 4, pode-se seguir diretamente para a etapa 4.

É possível determinar a evolução do diâmetro da gota em relação ao tempo a partir da equação diferencial apresentada na Eq. (5).

$$\frac{d}{dt} d_d = -\frac{k_B}{d_d} \left(1 + 0,28 \text{Re}_d^{1/2} \text{Sc}^{1/3} \right) \quad (5)$$

Onde:

$$k_B = -\frac{4\mu_i DP_a}{\rho_{L,f} RT_a} \ln \left(1 - \frac{P_s(T_d)}{P_a} \right) \quad (6)$$

μ_i é o peso molecular do componente i ; $L_{v,d}$ (J.kg^{-1}) é o calor latente de vaporização da gota à T_d ; D é o coeficiente de difusão ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$); $P_s(T_d)$ é a pressão de saturação do componente à temperatura da gota; $\rho_{L,f}$ é a densidade do líquido depois do *flash* (kg.m^{-3}); R é a constante dos gases ideais ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

Etapa 4

A concentração no jato (c_j), Eq.7, correspondente à quantidade de ar que será arrastada para o jato a fim de evaporar todos os aerossóis tem que ser calculada de forma iterativa a partir do balanço de entalpia, uma vez que a temperatura do jato após a evaporação total de todas as gotículas (ponto j) também é desconhecida. Desta forma, a variação total na entalpia devido à mudança de temperatura, evaporação de aerossol ou condensação da humidade ambiente, precisa ser zero.

$$c_j = \frac{P_v(T_j).T_a}{P_a.T_j} \quad (7)$$

Onde T_j é a temperatura do jato no ponto j e $P_v(T_j)$ é a pressão de vapor à T_j .

Esta concentração é necessária nos cálculos da dispersão da nuvem de vapor resultante que representa a região monofásica após o ponto j , bem como a velocidade e o diâmetro do jato neste ponto. Estes são obtidos a partir da conservação de momento e massa, levando em consideração a presença de ar seco e vapor de água no caso da velocidade.

5.2 Determinação do comprimento do jato

É possível prever a extensão do jato bifásico, representada por “z” na Fig. 4, avaliando-se em que distância as gotas irão evaporar-se completamente. Assumindo que a componente axial da velocidade da gota é igual a mesma componente da velocidade média do jato, a distância percorrida pela gota pode ser determinada a partir da Eq. (8).

$$dX = u_{med} dt \quad (8)$$

A Equação (8) é integrada do tempo inicial 0 ao momento em que a gota evapora completamente, e a velocidade média do jato diminui conforme a distância aumenta. Esta velocidade obtida a partir da correlação semi-empírica utilizada para determinar a velocidade máxima das gotas (componente axial), utilizada em Kukkonen (1990) e obtida por Hinze & Zijnen (1949) através de experimentos conduzidos isotermicamente para jatos turbulentos monofásicos. A equação pode ser aplicada ao jato bifásico a partir da região final de expansão (ponto f).

X é admitida como sendo a distância axial a partir do ponto “f” (X_x) mais a distância referente a origem virtual (X_0) e C_u assume um valor igual a 6,39 na referência citada. Uma estimativa para esta origem é obtida a partir da Eq. (9).

$$X_0 = \frac{5d_f}{2} \quad (9)$$

Onde d_f é o diâmetro no fim da região de expansão.

A velocidade média do jato é considerada como sendo metade da velocidade do fluxo axial do jato (velocidade máxima), com base nos resultados experimentais para as distribuições de jatos turbulentos em Hinze & Zijnen citados em Kukkonen (1990).

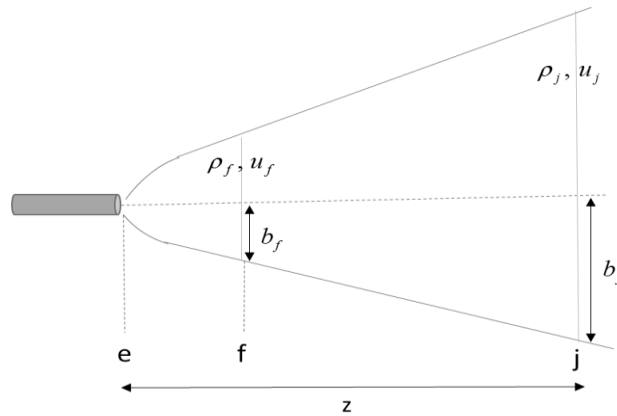


Figura 4. Esquema de localização das propriedades do jato bifásico.

5.3 Extensão da nuvem de vapor

A evaporação das gotas resultará na formação de uma nuvem de vapor que formará uma atmosfera explosiva. Neste caso, as condições iniciais da nuvem serão as mesmas do ponto “j” tais como: a concentração do componente (c_j), a densidade do jato (ρ_j), a temperatura (T_j) e a velocidade (u_j). A nuvem irá se dispersar como um jato subsônico turbulento, dessa forma, a extensão do ponto “j” até o LEL, foi determinada a partir da correlação de Long (1963) citado em Lees (1996) para jato subsônico em regime turbulento conforme a Eq. (10).

$$\frac{C_{med}(r, X)}{C_c(X)} = k_2 \left(\frac{2b_j}{X + X_v} \right) \left(\frac{\rho_a}{\rho_j} \right)^{1/2} \cdot e^{\left(-\left(\frac{k_3 r}{X + X_v} \right)^2 \right)} \quad (10)$$

Onde: $k_2 = 6$, $k_3 = 5$ e X_v = distância até a origem virtual aqui admitida como sendo igual a extensão do jato bifásico.

Para determinar a extensão da nuvem, substitui-se a fração do gás combustível pelo seu limite inferior de inflamabilidade na linha central ($r = 0$).

5.4 Determinação do perfil de concentração

O perfil de concentração do componente em relação ao ar seco, foi obtido a partir das correlações para jatos turbulentos livres uma vez que o comportamento do jato dos pontos f à j pode ser considerado o mesmo. Sendo assim, com base no trabalho de Chen & Rodi (1980), a correlação utilizada para obtê-lo é apresentada na Eq. (11).

$$\frac{c_c(X)}{c_f} = C'_c \cdot \frac{b_f}{X} \quad (11)$$

Onde c_c é a concentração na linha central do jato e depende somente da distância e C'_c é uma constante empírica. O valor para esta constante depende da densidade do vapor no jato, se ela for diferente da densidade do ar é necessário incluir um termo de correção na equação acima. Neste termo surge a constante C_c descrita em alguns trabalhos como constante de decaimento, podendo variar ao longo de uma gama de valores dependendo de fatores incluindo perfis de velocidade iniciais, formas de bocal e quantidade de arrasto de fluxo próximo a saída do jato, para jatos turbulentos circulares.

Dado que no final da região de expansão não há influência do ar ambiente, este ponto será constituído apenas do componente que é liberado. Sendo assim, como forma de avaliar o melhor valor da constante de decaimento para os casos estudados, a distribuição radial da concentração é considerada uniforme, ou seja, a concentração máxima em “f” é igual a concentração média no mesmo ponto. Sendo assim, a constante foi determinada conforme a Eq.(12).

$$C_c = \frac{\frac{X}{b_f}}{\sqrt{\frac{\rho_a}{\rho_{f,v}}}} \quad (12)$$

O perfil a partir do ponto j foi determinado a partir da correlação de Long (1963) citado em Lees (1996) para jato subsônico em regime turbulento.

5.5 Cenário de liberação

O caso para a liberação de propano foi baseado em uma simulação em CFD realizada no Laboratório de Experimentação Numérica de Processos (LENP) da Universidade Federal de Campina Grande. Os dados de entrada são resumidos na Tabela 2 e o LEL utilizado foi de 2,2% de volume do componente em ar.

Tabela 2. Dados de entrada para liberação de Propano.

Símbolo	Definição	Valor	Unidade
D_e	Diâmetro do orifício	1,39	mm
h_s	Altura da fonte	0,5	m
T_e	Temperatura na saída	231,15	K
T_s	Temperatura de armazenamento	321	K
T_a	Temperatura ambiente	298,15	K
P_e	Pressão na saída	101325	N.m ⁻²
P_a	Pressão ambiente	101325	N.m ⁻²
P_0	Pressão de armazenamento	20,638	bar
RH	Umidade relativa	73%	-

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 estão resumidos os resultados mais relevantes obtidos para o caso estudado. Neste caso, a fração mássica de vapor obtida na saída é de aproximadamente 67,48% e a velocidade é de 61,75 m.s⁻¹, para um coeficiente de descarga (C_D) de 0.65.

Tabela 3. Resumo dos resultados para liberação de propano.

Etapa	Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
Condições no jato depois do flash	u_f	Velocidade do fluido	61,75	m.s ⁻¹
	$\Phi_{m,f}$	Fração mássica de vapor	0,675	-
	ρ_f	Densidade média	3,44	kg.m ⁻³
	A_f	Área da seção transversal	20,89	10 ⁻⁶ m ²
	b_f	Raio do jato	0,003	m
Diâmetro das gotas	d_d	Diâmetro da gota	43,00	µm
<i>Rainout</i>	u_d	Velocidade de queda livre da gota	0,030	m.s ⁻¹
	T_d	Temperatura da gota	194,3	K
	d_M	Diâmetro máximo	180,6	µm
	Re_d	Número de Reynolds em d_d	0,07	-
Condições após a evaporação das gotículas	T_j	Temperatura do jato após a evaporação das gotas	211,68	K
	c_j	Concentração do jato após a evaporação das gotas	0,55	-
	ρ_j	Densidade do jato após a evaporação das gotas	3,08	kg.m ⁻³
	u_j	Velocidade do jato em j	27,95	m.s ⁻¹
	A_j	Área da seção transversal do jato	51,48	µm
	b_j	Raio do jato	0,004	m

Na etapa 1, após a evaporação o jato mantém a mesma velocidade, uma vez que a pressão na saída do orifício de vazamento é igual a ambiente, e atinge uma abertura de 0,006 m de

diâmetro neste ponto (ponto f). Na etapa 2, obteve-se gotas uniformes de tamanho igual a 43 μm . Como pode ser observado, ao comparar-se esse diâmetro com o diâmetro máximo verifica-se que $d_d < d_M$, e o número de Reynolds avaliado no diâmetro da gota, apresenta um valor (0,07) inferior a faixa de validade ($Re_d < 4$), sendo assim o fenômeno denominado de chuva (*rainout*) não irá ocorrer.

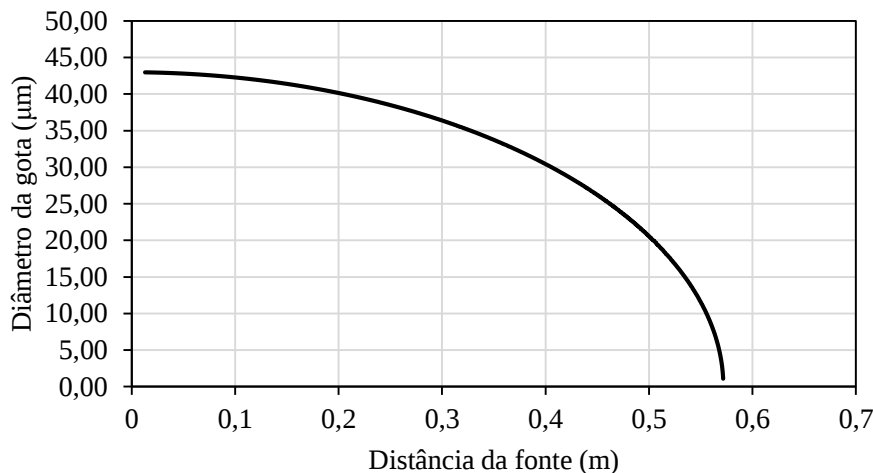


Figura 5. Evolução do diâmetro das gotas em função da distância horizontal percorrida.

A Figura 5 acima mostra o alcance da gota a partir da região final de flasheamento. Como pode ser observado, a gota desaparece a uma distância de aproximadamente 0,57 m da fonte após cerca de 0,18 segundos do início de sua queda (Fig. 6).

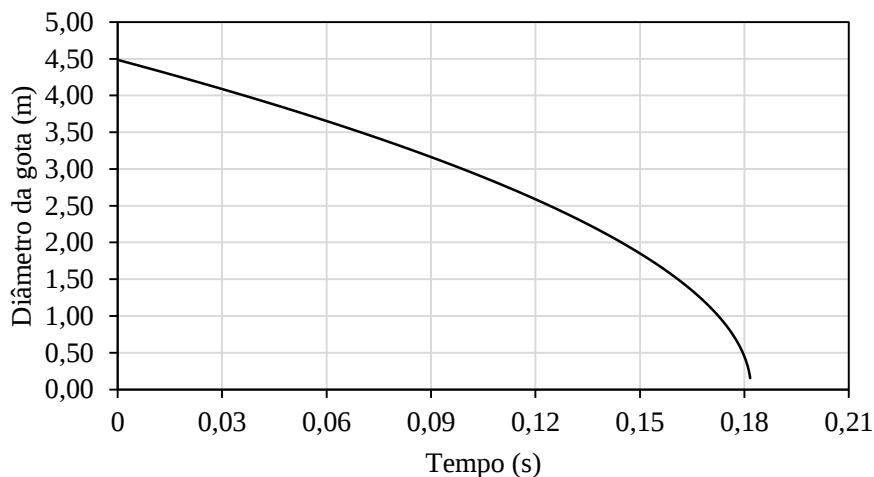


Figura 6. Evolução do diâmetro das gotas em função do tempo.

Como mencionado, a região bifásica se estenderá até o ponto em que essas gotas evaporam completamente sendo assim, uma vez que o modelo admite gotas de tamanho uniforme, a extensão do jato bifásico é também igual a 0,57 m.

Da análise em CFD as gotas possuem uma distribuição de tamanhos, o que de fato acontece na realidade, porém, dado que o modelo utilizado determina o tamanho de uma única gota, obteve-se a evolução de uma gota de mesmo tamanho na simulação em CFD, para

fins de comparação, conforme mostra a Fig. 7. Verifica-se que para a gota de mesmo tamanho a evolução possui comportamento semelhante indicando uma satisfatória previsão do modelo.

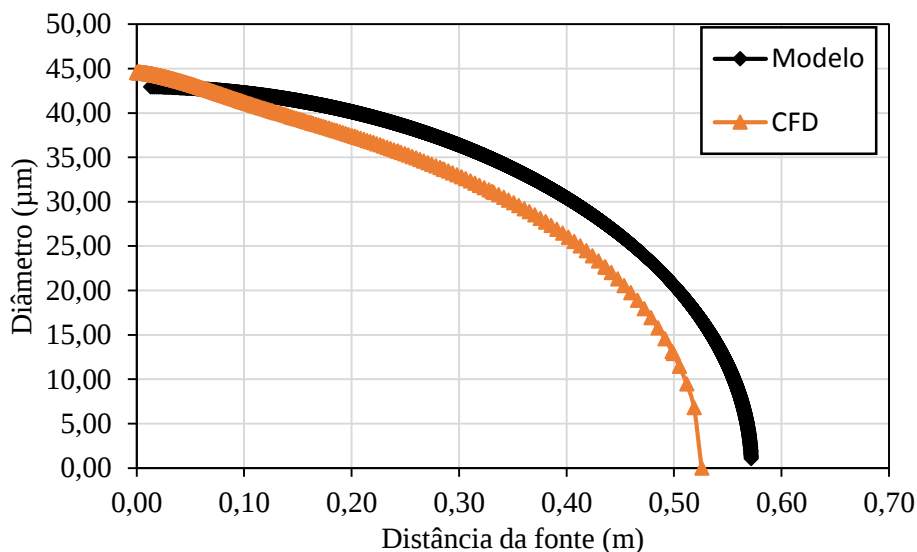


Figura 7. Comparação do alcance da gota, obtido pelo modelo utilizado, com o CFD.

A extensão total obtida a partir do modelo até o LEL foi de aproximadamente 1,3 m como pode ser observado na Fig. 8 na qual se tem o perfil de concentração do componente ao longo de toda a área classificada.

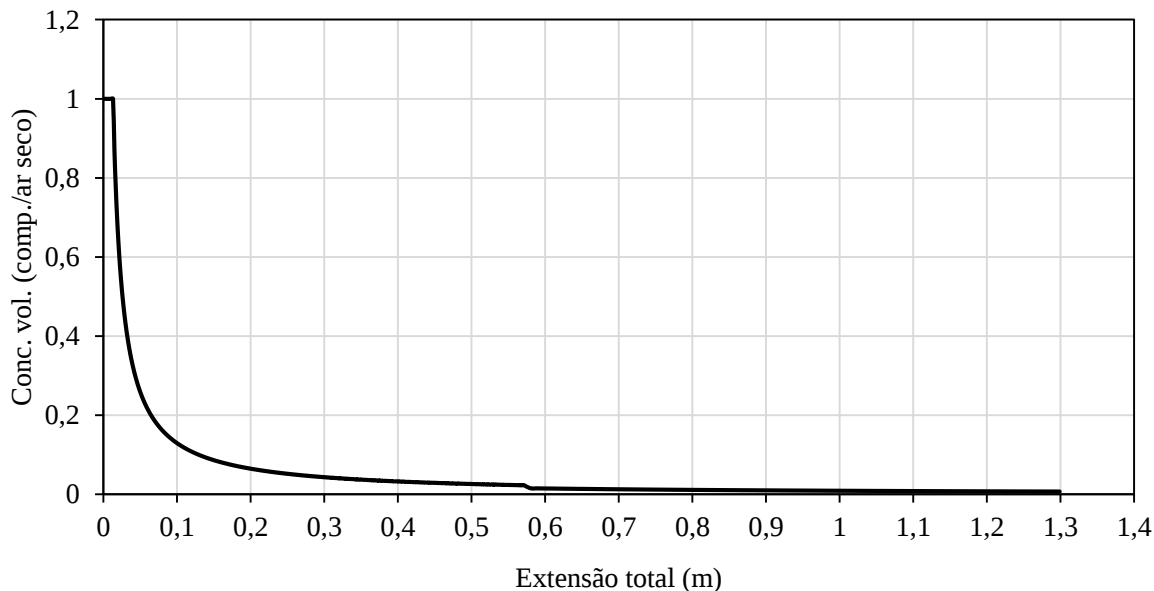


Figura 8. Perfil de concentração do propano ao longo de toda área classificada.

A região de concentração constante corresponde a região de flasheamento onde admite-se que o ar ambiente não irá influenciar no processo. Dessa forma, apenas o componente químico estará presente.

Na Figura 9 o perfil de concentração do componente é comparado ao obtido em CFD. Observa-se que o modelo utilizado neste trabalho apresenta resultados bastante aceitáveis.

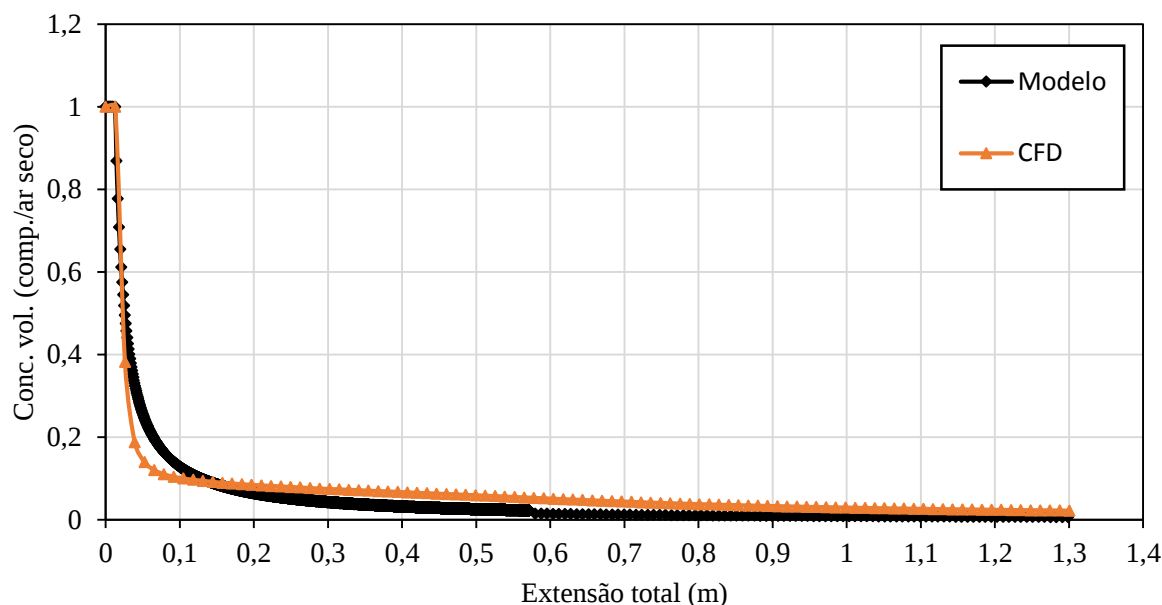


Figura 9. Comparação do perfil de concentração do componente liberado ao longo da área classificada, com o CFD.

7 CONCLUSÃO

O fenômeno de liberação bifásica possui uma considerável complexidade e a maioria das correlações existentes na literatura para modelagem do jato são empíricas. Porém, esta modelagem se faz necessária afim de prever a extensão da área de risco e antes de se utilizar modelos de jatos para dispersão de nuvens de vapor, visto que para estes é necessário descrever a expansão inicial da liberação pressurizada.

Diante dos resultados obtidos, observou-se que o modelo utilizado para prever a extensão da área classificada para o propano como componente da liberação, apresentou um resultado satisfatório quando comparado ao obtido em CFD, apresentando ambos aproximadamente 1,3 m de extensão. Portanto, o modelo apresentado no presente trabalho pode ser utilizado como ferramenta para auxiliar no processo de classificação de áreas que envolvem liberações acidentais de gases liquefeitos armazenados sob pressão.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ e ao Laboratório de Experimentação Numérica (LENP) da Universidade Federal de Campina Grande.

REFERÊNCIAS

American Institute of Chemical Engineers (Aiche), 2000. *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis*. New York. Wiley-Interscience: 2 ed.

- Bahadori, A., 2013. *Hazardous Area Classification in Petroleum and Chemical Plants: A Guide to Mitigating Risk*. New York. CRC Press.
- Bosch, C.J.H., Weterings, R.A.P.M., Duijm, N.J., Bakku, E.A., Mercx, W.P.M., Berg, A.C. Van Den, Engelhard, W.F.J.M., Doorman, J.C.A.M., & Wees, R.M.M., 2005. *Methods for the calculation of physical effects: due to releases of hazardous materials (liquids and gases)*. Yellow Book. 3.ed.
- Bulgarelli, R., 2009. Instalações Elétricas e de Instrumentação para Áreas Classificadas. Requisitos para automação de projetos e para estudos de classificação de áreas. *Revista o Setor Elétrico*.
- Chen, C.J., & Rodi, W., 1980. *Vertical turbulent buoyant jets*, Pergamon Press, Oxford.
- Cox, A.W., Lees, F.P., & Ang, M.L., 1990. *Classification of Hazardous Locations*, IChemE, Rugby, UK.
- Cruz, S.R.A., 2012. *Análise Comparativa das Metodologias Utilizadas para Classificação de Áreas Potencialmente Explosivas em Unidades de Refino de Petróleo*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, p. 136.
- Erthal, L., 2004. *Atmosferas Potencialmente Explosivas: Um estudo de caso como contribuição para a classificação de áreas na atividade da indústria do Petróleo, Química e Petroquímica*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro, p. 120
- Fauske, H.K., & Epstein, M., 1988. *Source term considerations in connection with vapour cloud modelling*. J Loss Prev Proc Ind.
- Garside, R., 1995. *Electrical apparatus and hazardous areas*. Aylesbury, Buckinghamshire, UK: Hexagon Technology Limited, 2 ed.rev.
- Hanna, S., Britter, R., Leung, J., & Weil, J., 2009. Toxic Industrial Chemical (TIC) Source Emissions Model Improvements for Pressurized Liquefied Gases. *Journal Paper Source Models*.
- Ichard, M., Hansen, O., & Melheim, J., 2015. *Modelling of Flashing Releases Around Buildings*. p. 10.
- Jordão, D. M., & Franco, L. R., 2002. *Prevenção Contra Explosões e Outros Riscos*. Curitiba: PETROBRAS : UnicenP.
- Koornneef, J., Spruijtb, M., Molag, M., Ramirez, A., Faaij, A., & Turkenburga, W., 2009. Uncertainties in risk assessment of CO₂ pipelines. *Science Direct. Energy Procedia*, p. 1587-1594.
- Kukkonen, J., 1990. *Modelling source terms for the atmospheric dispersion of hazardous substances*, Commentationes Physico-Mathematicae 115/1990, Finnish Society of Sciences and Letters, Helsinki.
- Lees, F.P., 1996. *Loss Prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control*, Second Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford.

- Mcmillan, A., 1998. *Electrical Installations in Hazardous Areas*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Neto, F. A. O., 2010. *Instalações Elétricas em Atmosferas Potencialmente Explosivas: Noções Básicas*. Mossoró, Rio Grande do Norte.
- Schram, P. J., & Earley, M. W., 1993. *Electrical Installations in Hazardous Locations*. 3^a edition. USA, Massachusetts, Quincy: USA National Fire Protection Association.
- Witlox, H. W.M., Harper, M., Oke, A., Bowen, P., Kay, P., Jamois, D., & Proust, C., 2010. *Two-Phase Jet Releases and Droplet Dispersion: Scaled and Large-Scale Experiments, Droplet-Size Correlation Development and Model Validation*. 16th Conference on Air Pollution Meteorology. Atlanta.
- .