



SIMULAÇÃO EM CFD DE VAZAMENTO DE GASES PARA DETERMINAÇÃO DE ÁREAS CLASSIFICADAS

Talles Caio Linhares de Oliveira

Andrey Oliveira de Souza

Hiuquem Monteiro Lopes

Antônio Tavernard Pereira Neto

José Jailson Nicácio Alves

tallescaio@hotmail.com

andrey_pb@yahoo.com.br

hiuquem.lopes@gmail.com

tavernard@deq.ufcg.edu.br

jailson@deq.ufcg.edu.br

Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Química,
Avenida Aprígio Veloso - Campina Grande, 58109-970, Paraíba, Brasil.

Resumo. Área classificada é um espaço na qual uma atmosfera potencialmente explosiva estará presente ou na qual é provável sua ocorrência, a ponto de exigir precauções especiais para a construção, instalação e utilização de equipamentos elétricos. Geralmente, na saída do orifício de vazamento, a pressão é tal que o escoamento é subexpandido (pressão maior que a atmosférica), sendo que logo na saída ocorre uma expansão, além das ondas oblíquas, ocorre também à formação de uma onda de choque normal (disco de Mach) formando um fenômeno característico na saída do orifício conhecido como barril. Este fenômeno é verificado por fluidodinâmica computacional (CFD), e o comprimento do barril obtido comparado com o calculado a partir de uma correlação empírica, sendo os resultados obtidos muito próximos. A emissão e dispersão de 3 gases (hidrogênio, metano e etileno) para 5 diâmetros de orifício, mantidas as condições do vaso foram previstas via simulação. Os resultados obtidos via CFD foram comparados com os resultados obtidos a partir de correlações disponíveis. Pode-se verificar que os modelos analíticos utilizados para classificação de área superestimar a extensão da área classificada em relação aos resultados obtidos em CFD.

Palavras-chaves: Vazamento de gases, CFD, Áreas Classificadas, Modelagem e Simulação.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a norma regulamentadora 10, área classificada é um local com potencialidade de ocorrência de atmosfera explosiva. A ABNT NBR IEC 6007914 define atmosfera explosiva como sendo a mistura com o ar, sob condições atmosféricas, de substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor, névoa, poeira ou fibras, na qual após a ignição, a combustão se propaga através da mistura.

Nesse tipo de área, que é encontrada em inúmeras instalações, devem ser tomadas precauções especiais para a construção, montagem, instalação e utilização de equipamentos elétricos, uma vez que o aquecimento acima de certos limites e eventuais centelhamentos pode ser capaz de inflamar a atmosfera explosiva.

A previsão da emissão de gases a partir de orifícios separando ambientes a diferentes pressões pode ser realizada a partir de balanços de massa, quantidade de movimento e energia. O vazamento a partir de um reservatório é ilustrado de maneira simplificada na Fig. 1.

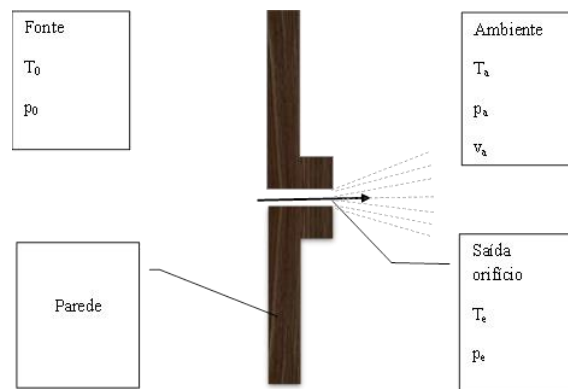


Figura 1. Esquema de vazamento para o ambiente através de um orifício.

2 TAXA DE EMISSÃO DE GASES (MODELOS UNIDIMENSIONAIS)

Para escoamento subsônico, a pressão de saída é conhecida e igual a atmosférica ($P_e = P_a$), enquanto para escoamento sônico no orifício, a velocidade é conhecida, pois o escoamento é obstruído com a velocidade (máxima) igual à do som ($M=1$). No último caso, escoamento torna-se supersônico após a saída do orifício devido à expansão do gás. As relações a seguir permitem o cálculo das condições do vazamento, em função das condições no reservatório e do ambiente externo a este, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Condições da emissão na saída do orifício em função das condições no reservatório e ambiente externo.

Regime	Subsônico	Sônico
Condição	$\frac{p_a}{p_0} > \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (1.a)	$\frac{p_e}{p_0} \leq \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (2.b)
Temperatura	$T_e = T_0 \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$ (2)	$T_e = T_0 \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)$ (7)
Pressão	$p_e = p_a$ (3)	$p_e = p_0 \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ (8)
Densidade	$\rho_e = \rho_0 \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$ (4)	$\rho_e = \rho_0 \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}$ (9)
Velocidade	$v_e = \left(\frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \frac{R}{P_M} T_a \left(\left(\frac{p_0}{p_a} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}}$ (5)	$v_e = \left(\frac{2\gamma}{(\gamma+1)} \frac{R}{W} T_0 \right)^{\frac{1}{2}}$ (10)
Vazão Mássica	$m_e = A_e \rho_e \left(\frac{2\gamma}{(\gamma-1)} \frac{R}{P_M} T_a \left(\left(\frac{p_0}{p_a} \right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}} - 1 \right) \right)^{\frac{1}{2}}$ (6)	$m_e = A_e p_0 \left(\frac{\gamma}{RT_0} \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma-1}} \right)^{\frac{1}{2}}$ (11)

Fonte: Sisson e Pitts, 1988.

Nestes processos isentrópicos, a temperatura de estagnação e a pressão de estagnação (também chamados temperatura total e pressão total) mantem-se constantes ao longo do escoamento. Dos balanços de energia total e de energia mecânica, para processo isentrópico (adiabático e sem atrito) obtém-se as Eqs. 12 e 13.

$$T_0 = T + \frac{v^2}{2Cp} \quad (12)$$

$$p_0 = p + \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (13)$$

Mesmo que o escoamento no orifício não seja sem atrito, a temperatura de estagnação é constante, mas a pressão de estagnação não seria (De Neves, 1970).

3 DISPERSÃO DE GASES (MODELOS ANALÍTICOS)

Sendo conhecidas as condições da emissão, ou seja, subsônica, ou sônica, é possível prever a dispersão do gás no ambiente. Existem vários modelos analíticos disponíveis na literatura para previsão da dispersão de gases. Cada modelo possui restrições e faixa de aplicabilidade específica.

Estes modelos abrangem uma faixa de regime de escoamento que vai desde o laminar, passando pelo turbulento, ambos em regime subsônico, até o turbulento em regime supersônico. Alguns modelos bidimensionais disponíveis na literatura são mostrados na

Tabela 2. A maioria presume um jato cônico com uma distribuição gaussiana em torno do centro da pluma e determina, de forma semi-empírica, os parâmetros do modelo.

Tabela 2. Resumo dos modelos analíticos para previsão da pluma

Modelo	Restrições	Referência
$\frac{Y_v(x,r)}{Y_v(0,0)} = k_2 \left(\frac{d_e}{x+x_v} \right) \left(\frac{\rho_{x0}}{\rho_0} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(- \left(\frac{k_3 \cdot r}{x+x_v} \right)^2 \right) \quad (14)$ $k_2=6; k_3=5$	- Jato subsônico - Regime turbulento (Re>10 ⁴)	Long (1963) citado em Loss Prevention in the process industries (Emission and Dispersion)
$\frac{Y_v(x,r)}{Y_v(0,0)} = \frac{(b_1+b_2)/b_1}{0.32 \left((x+x_v)/d_{eq} \right) (\rho'_{ga}/\rho'_{0eq}) + 1 - \rho'_{ga}} \cdot \exp \left(-b_2 \left(\frac{r}{x+x_v} \right)^2 \right) \quad (15)$ $b_1 = 50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}^2 \quad (16)$ $b_2 = 23 + 41 \cdot \rho'_{ga} \quad (17)$ $d_{eq} = d_e \left(\frac{\rho'_{g0}}{\rho'_{0eq}} \right)^{1/2} \quad (18)$	-Jato sônico - Regime turbulento	Yellow Book (1979) citado em Loss Prevention in the process industries, (Emission and Dispersion)
$\frac{Y_v(x,r)}{Y_v(0,0)} = \left[1 - \exp \left(\frac{-1}{k' (\rho_{ga}/\rho_{eq})^{1/2} (x^*/r_{eq}) - x_c} \right) \right] \cdot \exp \left(-b_2 \left(\frac{r}{x+x_v} \right)^2 \right) \quad (19)$ $k'=0,104 \quad (20)$ $x^* = x - 2 \cdot x_b \quad (21)$ $x_b = 0,77 \cdot 10^{-3} \cdot d_e + 0,068 \cdot (d_e \cdot 10^{-3})^{1,35} \left(\frac{p_a}{p_0} \right)$	-Jato sônico - Regime turbulento - O termo de dispersão radial foi incluído neste trabalho e com os mesmos parâmetros do Yellow Book (1979)	Ewan and Moodie (1979) citado em Loss Prevention in the process industries (Emission and Dispersion)

Substituindo-se a fração do gás combustível igual ao seu limite inferior de inflamabilidade na linha central (r=0) em qualquer das equações acima, obtém-se a extensão da área classificada.

Macmilan (1998) para um jato sônico sugeriu a Eq. (22) para o cálculo da extensão da área classificada.

$$x = 2.1 \cdot 10^3 \left[m_e / (E^2 \cdot W^{1.5} \cdot T^{0.5}) \right]^{0.5} \quad (22)$$

Caso o jato seja subsônico, Macmilan (1998) indica que a Eq. (23) seja utilizada.

$$x = 10,8 \left[m_e \cdot T / (E \cdot W) \right]^{0.55} \quad (23)$$

Tommasini (2013) apresenta uma rápida análise dos procedimentos utilizados internacionalmente para classificação de área.

A origem (0,0) nestes modelos é um ponto virtual que estaria no interior do orifício. Por isto, a solução vale apenas a partir de uma distância mínima x_v (Fig. 2), a distância do orifício a origem. Alguns modelos usam a hipótese de região totalmente desenvolvida, sendo esta verdadeira a partir de certa distância a partir do orifício. Além destes, mais recentemente Benintendi (2011) e Webber et. al. (2011) também apresentaram modelos para jatos turbulentos.

No caso de um escoamento supersônico, por exemplo, o arraste e entrada de ar no jato ocorre apenas depois do barril, o que significa que a solução é válida somente após o comprimento do barril mais a distância mínima para o escoamento ser totalmente desenvolvido, se esta for uma das hipóteses. No caso do escoamento supersônico com choque, a solução vale após o comprimento do barril (Fig. 3).

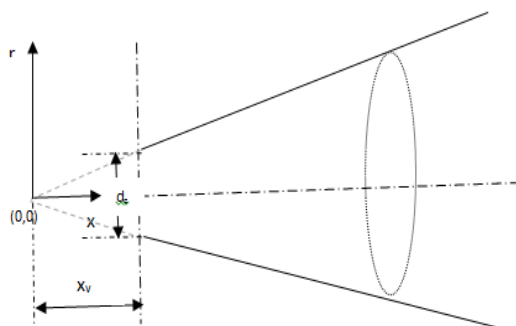


Figura 2. Jato cônico subsônico

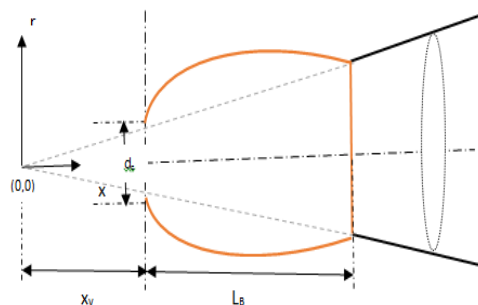


Figura 3. Jato cônico supersônico típico.

No caso de escoamento sônico no orifício, com a expansão na saída, este se torna supersônico, o que leva a formação de ondas choque, termodinamicamente favoráveis, trazendo o escoamento a condição subsônica no sentido de levar o gás as condições ambientes.

Estas ondas na saída do orifício são, em geral, oblíquas, e modelos unidimensionais já não podem ser utilizados para representar o processo a partir deste ponto. O resultado desta combinação de ondas oblíqua com expansão na saída do orifício é explicado pela Teoria de Prandtl-Meier (Ratharrishnan, 2006), podendo inclusive ocorrer uma sequência de ondas alternadas de expansão e compressão, as quais são dissipadas ao longo do escoamento.

Geralmente, na saída do orifício, a pressão é tal que o escoamento é subexpandido (pressão maior que a atmosférica), sendo que logo na saída ocorre uma expansão, além das ondas oblíquas, ocorre também a formação de uma onda de choque normal, o disco de Mach, interceptado pelas ondas oblíquas, formando o bem conhecido barril na saída do orifício, conforme ilustrado na Fig. 4.

A compreensão previa do fenômeno é fundamental para a correta definição do modelo fluidodinâmico, que deverá ser capaz de prever esta característica do escoamento supersônico na saída do orifício. Nestas ondas de choque a pressão varia bruscamente ao longo de distância da ordem de 10^{-6} m (Sisson e Pitts, 1988.). Isto requer refino e estrutura adequada da malha numérica.

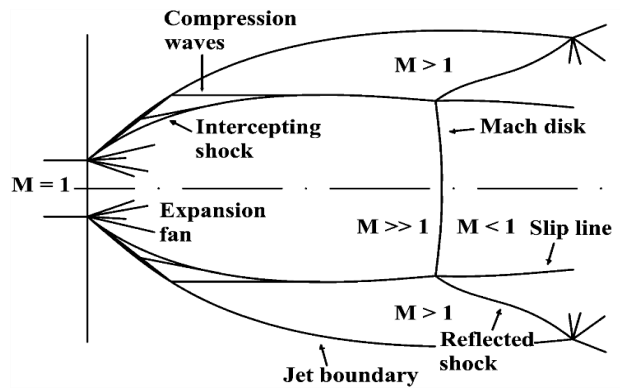


Figura 4 - Barril na saída do orifício para escoamento obstruído
Fonte: Bonelli et. al. (2013)

O comprimento do barril pode ser obtido por uma equação empírica obtida por Ashkenas e Sherman (1966), sendo esta uma função da razão da pressão no vaso (P_v) e ambiente (P_a) e do diâmetro do orifício (D), como indica a Eq. (24).

$$Z_M = 0,67D(P_v/P_a)^{1/2} \quad (24)$$

4 MODELO EM CFD

A análise com técnicas de CFD do problema significa resolver os balanços de massa, quantidade de movimento e energia no domínio delimitado por condições conhecidas.

Os balanços de massa, quantidade de movimento e energia podem ser expresso de uma forma generalizada, para um sistema cartesiano, a título de ilustração, como (Maliska, 1995) é descrito pela Eq.(25).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z \phi) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] = S_\phi \quad (25)$$

Tabela 3. Variáveis e parâmetros do modelo fluidodinâmico.

Equação de conservação	ϕ	Γ	S_ϕ
Massa Global	1	0	0
Quantidade de movimento (direção η)	v_η	μ	$-\frac{\partial P}{\partial \eta} + \rho g_\eta$
Energia	T	$\frac{K}{c_p}$	$\frac{\mu}{c_p} \Phi + F_e$
Massa do componente i	Y_i	ρD_{iM}	R_i

Fonte: Maliska (1995)

O modelo de turbulência utilizado nesse trabalho foi o Shear Stress Transport (SST) proposto por Menter (1994) é um modelo do tipo RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) e utiliza o equacionamento de dois outros modelos, k- ϵ e o k- ω . Na região externa do escoamento se usa a formulação do robusto modelo k- ϵ , e onde esse se mostra pouco eficiente, na região próxima à parede, utilizam-se as equações de transporte do modelo k- ω .

4 RESULTADOS

4.1 Geometria e Malha

A Figura 5 mostra o domínio utilizado na simulação do vazamento de um reservatório para o ambiente através de um orifício. O desenho não está em escala, mas as dimensões reais do domínio estão indicadas. A malha numérica da Fig.(6) mostra o domínio em escala (3m x 1 m, com um elemento de 4 graus de profundidade).

As condições de pressão e temperatura são conhecidas no reservatório e no ambiente.

As condições de contorno do domínio (Fig. 5) são: (1) condição de contorno de entrada com temperatura e pressão do vaso. (2) condição de contorno de parede sem deslizamento. (3) condição de contorno aberta com temperatura e pressão ambiente (1 atm e 30 °C). Em (4) e nas laterais do domínio existe uma condição de simetria.

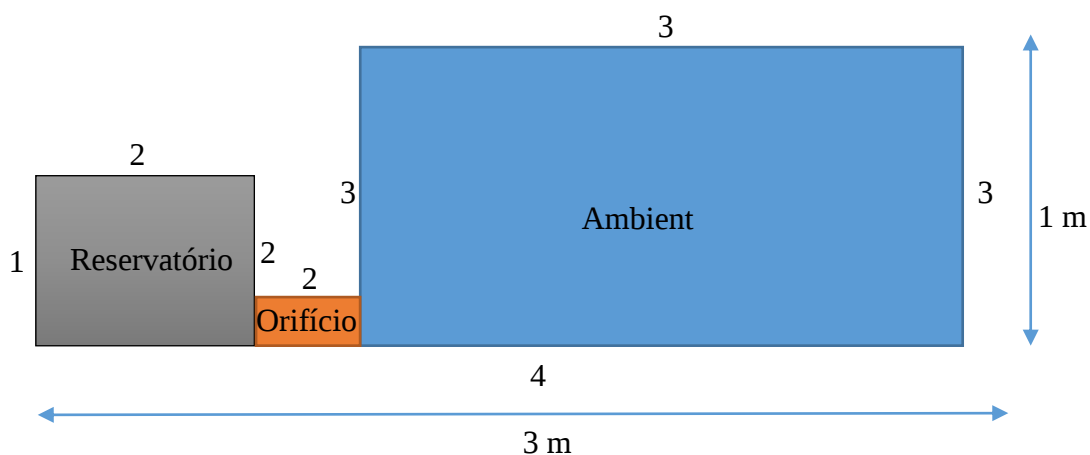


Figura 5. Representação do domínio utilizado na simulação

A malha numérica possui 23550 elementos sendo mostrada na Fig. 6. Devido aos elevados gradientes das variáveis na região do orifício, inclusive próximos a descontinuidades nas ondas de choque que se formam originando o barril, a malha precisa ser bastante refinada para captura dos fenômenos nesta região. Longe, devido a dispersão, os gradientes são menos acentuados e uma malha menos refinada pode ser utilizada.

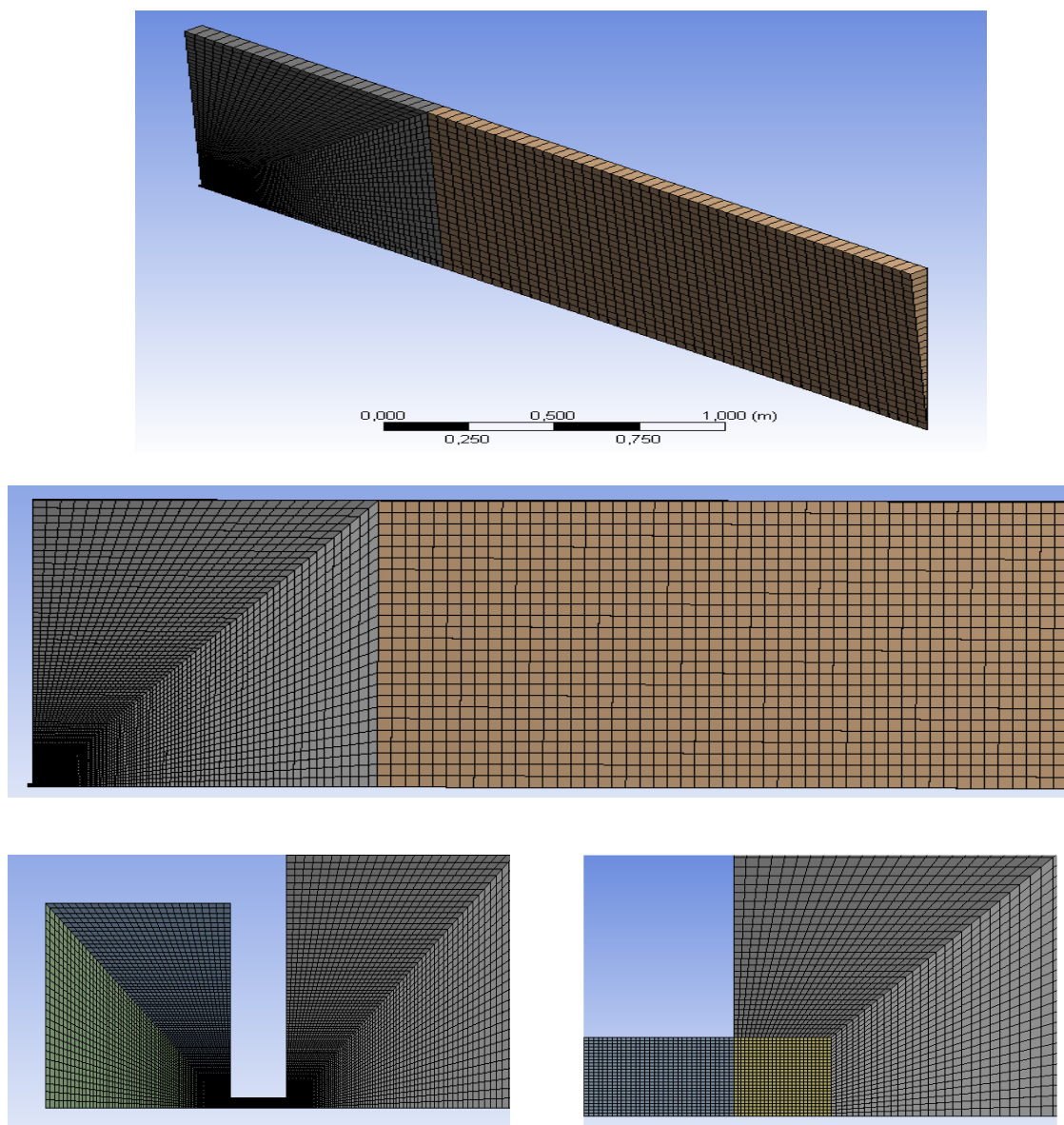


Figura 6. Malha numérica com destaque no orifício

O primeiro ponto a ser observado, sabendo-se por meio de resultados do modelo unidimensional que o escoamento seria obstruído (sônico no orifício), foi verificar a formação do barril de zona de descarga do gás. A Fig. 7 mostra o resultado para o vazamento de metano com pressão de 100 bar no reservatório.

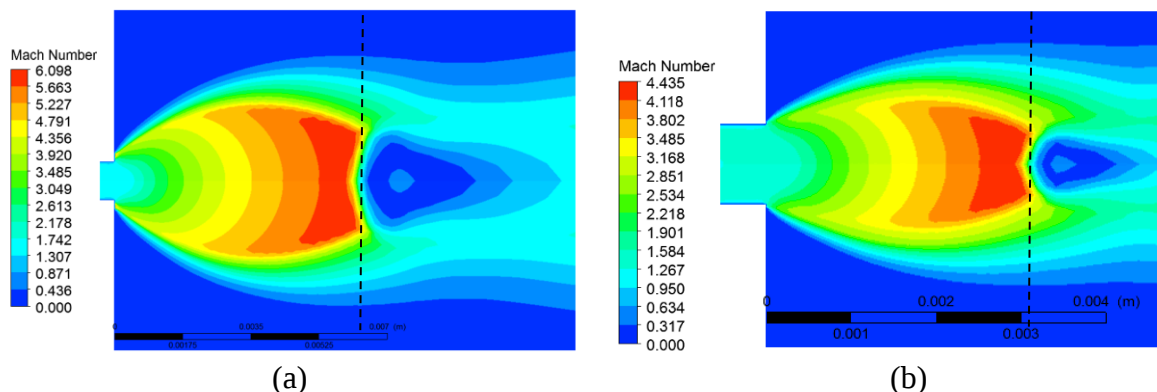


Figura 2. (a) Barril de metano a $P_v = 100\text{bar}$. (b) Barril de metano a $P_v = 20\text{bar}$.

O comprimento do barril obtido via CFD foi comparado com o calculado a partir da Eq. (24) como mostrado na Tabela 4. Os valores obtidos nas simulações apresentam valores bem próximos dos obtidos pela correlação proposto por Ashkenas e Sherman (1966).

Tabela 4. Variáveis e parâmetros do modelo fluidodinâmico.

	20 bar	100 bar
Correlação empírica Ashkenas e Sherman (1966)	3,084 mm	6,4 mm
CFD	3,0 mm	6,7 mm
Erro	2,93 %	4,48 %

A emissão e dispersão de 3 gases (hidrogênio, metano e etileno) para 5 diâmetros de orifício, mantidas as condições do vaso foram previstas via simulação. Os resultados de CFD foram comparados com os resultados obtidos a partir de correlações disponíveis. Extensões das plumas até o limite inferior de inflamabilidade para um diâmetro de vazamento de 1 mm obtidas pelas correlações e CFD são ilustradas nas Figs. 8 a 11.

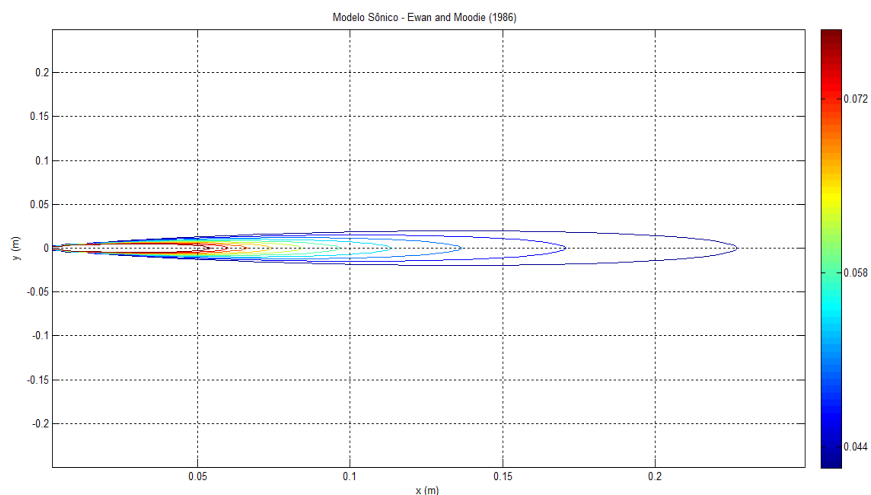


Figura 8. Jato modelo sônico para gás metano para $d = 1$ mm (Ewan & Moodie ,1986)

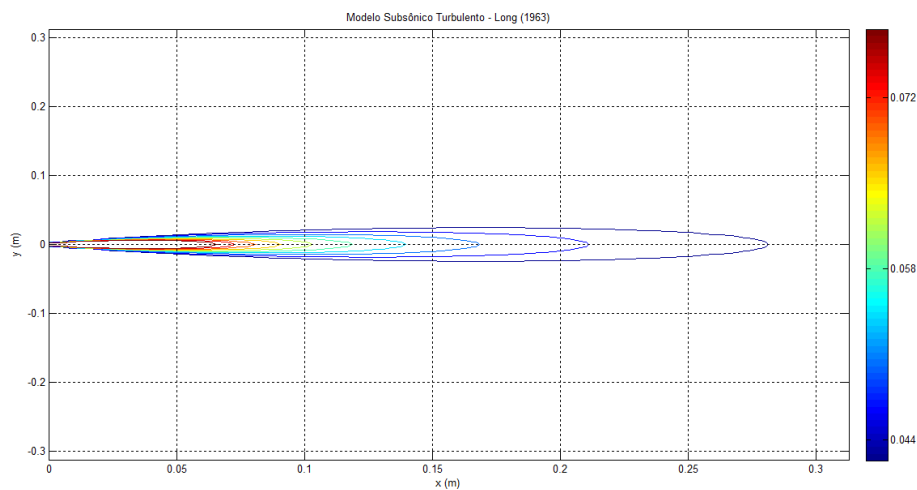


Figura 9. Jato modelo subsônico para gás metano para $d = 1$ mm (Long, 1963).

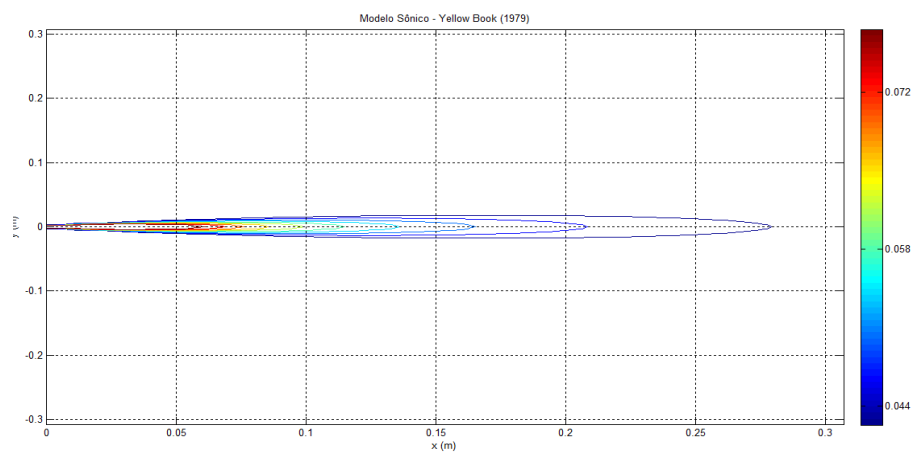


Figura 10. Jato modelo sônico para gás metano para $d = 1$ mm (Yellow Book, 1963).

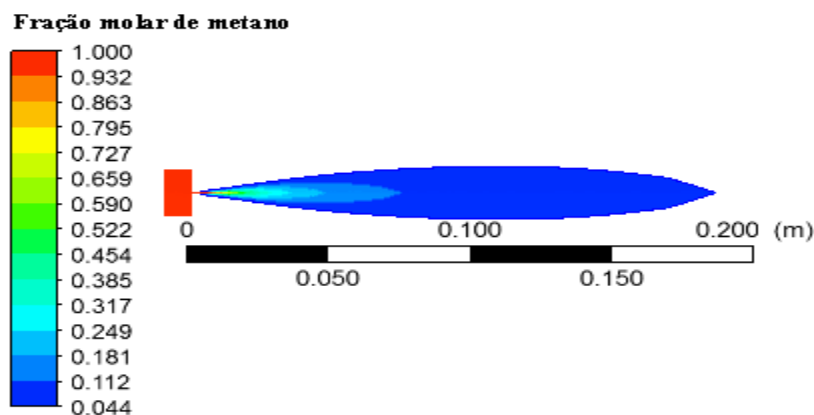


Figura 11. Jato modelo sônico para gás metano para $d = 1$ mm (CFD).

A Tabela 4 mostra o resumo dos resultados obtidos das extensões das áreas classificadas obtidas pelas correlações e via CFD. Na maior parte dos resultados mostrados na Tabela 4, os modelos analíticos superestimam a extensão da área classificada quando comparados com os resultados de CFD.

Dentre os modelos testados, o de Ewan e Moodie (1979) é o que melhor estima a extensão da pluma, quando comparado ao modelo em CFD, na pressão utilizada e para os 3 gases testados com erro médio de aproximado de 21 %, como mostrado na Tabela 6.

O Modelo Long (1993) como esperado apresenta o maior erro em relação ao CFD devido ser aplicado quando o escoamento está abaixo da velocidade do som na saída orifício de vazamento e para as condições testadas o escoamento é sônico em todos os casos da Tabela 4.

Para altas pressões o modelo Ewan e Moodie (1979) como nas simulações em baixas pressões foi o que mais se aproximou dos resultados de CFD como mostrado na Tabela 7.

Tabela 5. Extensão da pluma do gás para diferentes diâmetros de orifício de vazamento e gases.

Diâmetro (mm)	Macmilan (1998) (sônico) (m)	Long (1963) (Sub-Sônico) (m)	Ewan and Moodie (1979) (sônico) (m)	Yellow book (1979) (sônico) (m)	CFD (m)
Hidrogênio a 30 °C e 4 bar					
0,10	0,0875	0,087	0,069	0,078	0,070
0,25	0,2188	0,217	0,173	0,1949	0,179
1,00	0,8752	0,867	0,693	0,779	0,607
1,25	1,0940	1,083	0,866	0,973	0,896
2,50	2,1879	2,166	1,731	1,948	1,435
Metano a 30 °C e 4 bar					
0,10	0,0281	0,028	0,023	0,028	0,018
0,25	0,0703	0,071	0,057	0,070	0,045
1,00	0,2813	0,284	0,227	0,279	0,179
1,25	0,3516	0,356	0,254	0,3488	0,223
2,50	0,7032	0,711	0,567	0,697	0,447
Etileno a 30 °C e 4 bar					
0,10	0,0347	0,0357	0,0286	0,0377	0,023
0,25	0,0866	0,0893	0,0714	0,0943	0,054
1,00	0,3465	0,3572	0,2856	0,3771	0,217
1,25	0,4331	0,4464	0,3569	0,4713	0,271
2,50	0,8663	0,8929	0,7135	0,9423	0,543

Tabela 6. Erro médio dos modelos analíticos em relação aos resultados de CFD mostrados na Tabela 5.

	Macmilan (1998) (sônico) (m)	Long (1963) (Sub-Sônico) (m)	Ewan and Moodie (1979) (sônico) (m)	Yellow book (1979) (sônico) (m)
Erro médio	49,39 %	51,01 %	21,08 %	48,81 %

Tabela 7. Extensão da pluma em metros no limite inferior de inflamabilidade do metano em elevadas pressões para diferentes temperaturas.

Diâmetro (mm)	Macmilan (1998) (sônico) (m)	Long (1963) (Sub-Sônico) (m)	Ewan and Moodie (1979) (sônico) (m)	Yellow book (1979) (sônico) (m)	CFX (m)
Metano a 50 °C e 100 bar					
1,00	1,199	1,374	1,094	1,273	0,895
Metano a 30 °C e 20 bar					
1,00	0,554	0,633	0,508	0,628	0,358

CONCLUSÕES

Dentre os modelos testados a correlação proposta por Ewan e Moodie (1979) foi a que obteve resultados mais próximos do CFD, sendo esta a correlação de maior precisão dentre os modelos sônicos.

O modelo subsônico apresentou resultados mais distantes de todos como esperado, já que todos os casos recaem em escoamento sônico. Portanto as correlações analíticas devem ser cuidadosamente aplicadas, pois pode acarretar em erros na estimativa da área classificada.

Existe um campo para otimização destes modelos analíticos em relação à precisão na previsão da extensão da área classificada.

O uso de fluidodinâmica computacional é uma importante ferramenta na determinação de áreas classificadas, podendo ser usada para estimativa direta da extensão de áreas classificadas como também na validação dos resultados de modelos analíticos.

Os resultados em CFD podem ser usados para ajuste das correlações a fim de se obter resultados mais precisos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR IEC 60079-14:2009, 2011 : Atmosferas explosivas Parte 14 :Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas.

Ashkenas, H., & Sherman, F. S. (1966). Rarefied gas dynamics. In J. H. De Leeuw (Ed.), "Applications", AIAA Journal, vol. 30, pp. 1657-1659.

Benintendi, R., 2010. Turbulent jet modelling for hazardous area classification, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol.23, Issue 2, , pp. 373-378.

Benintendi, R., 2011. Laminar Jet Modelling for Hazardous Area Classification, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 24, pp. 123-130.

Bonelli, F.; Viggiano, A.; Magi, 2013. V. A Numerical Analysis of Hydrogen Underexpanded Jets Under Real Gas Assumption. Journal of Fluids Engineering, v. 135, n. 12, pp. 121101.

De Nevers, N., 1970. Fluid Mechanics, Addison-Wesley Publising, Massachusetts USA.

Macmillan, A., 1998. Electrical Installations in Hazardous Area, Elsevier Science, LTD.

Maliska, C.R., 1995. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, LTC, Rio de Janeiro.

Mannan, Sam .2011. Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 2. ,3º Edição. Elsevier.

Menter, F.R., 1994, "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Proc. 4th int. symp. rarefied gas dynamics, vol. II ,New York: Academic Press, pp. 84-105.
Rathakishnan, E., 2006. Gas dynamics, Prentice-Hall, 5ª Ed.

Segurança em instalações segurança em instalações em eletricidade, NR 10. Ministério do trabalho e emprego (disponível: <http://portal.mte.gov.br/legislacao/normas-regulamentadoras-1.htm>)

Sissom, L. E.; Pitts, D. R. 1988. Fenômenos de Transporte. Guanabara Dois, Rio de Janeiro.

Tommasini, R., 2013. The classification of hazardous areas where explosive gas atmospheres may be present, Safety Science, Vol.58, 2013, pp. 53-58.

Webber, D.M., Ivings, M.J., and Santon, R.C., 2011. Ventilation Theory and Dispersion Modelling Applied to Hazardous Area Classification, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 24, pp. 612–621.

NOMENCLATURA

Alfabeto latim

A_e - Área do orifício. (m^2)
 C - Velocidade do som (m/s)
 C_p - Calor específico a pressão constante. (J/molK)
 C_v - Calor específico a volume constante. (J/molK)
 d_e - Diâmetro do orifício. (m)
 E - Limite inferior de inflamabilidade.
 M - Número de Mach. (-)
 m_e - vazão mássica na saída do orifício. (Kg/s)
 p - Pressão. (N/m²)
 P_M - Peso Molecular. (kg/kmol)
 R - Constante universal dos gases. (J/(molK))
 r - Coordenada radial. (m)
 Re - Número de Reynolds. (-)
 r_e - Raio do orifício. (m)
 T - Temperatura. (K)
 V - Velocidade. (m/s)
 v_e - Velocidade de descarga pelo orifício. (m/s)
 W - Massa molar. (kg/kmol)
 x - Coordenada axial. (m)
 x_v - Distância da origem virtual. (m)
 x_c - Parâmetro do modelo.
 Y_m - Fração mássica do gás. (-)
 Y_v - Fração volumétrica do gás. (-)
 Z_M - comprimento do barril. (-)

Alfabeto Grego

μ - Viscosidade. (Kg/ms)
 γ - C_p/C_v (Coeficiente de Poisson).(-)
 η - variável genérica.(-)
 ρ - Massa específica. (Kg/m³)

Subscritos

0 - Condição de estagnação.
1 e 2 - pontos do escoamento.
a – ambiente.
ar - ar atmosférico.
e - saída do orifício.
eq- equivalente.
ga – gás.
v - vaso.

AGRADECIMENTOS

A Petrobras e a CAPES pelo apoio durante a realização deste trabalho.