

Modelagem de Fonte para Dispersão Atmosférica de Liberação Gasosa Confinada

César A. Leal
Sobane Brasil

Luiz Fernando S. de Oliveira
DNV-GL

Resumo

Nos casos onde uma liberação acidental de um gás ocorre num ambiente confinado tal como um prédio, a modelagem do termo fonte para dispersão na atmosfera requer um passo adicional para levar em conta a mistura do gás com o ar no seu interior. Nós apresentamos um modelo simples para a estimativa da taxa de liberação para a atmosfera de um gás sendo liberado, numa taxa constante, no interior de um ambiente confinado de volume interno conhecido, para dois casos distintos: com e sem ventilação. Em ambos os casos, dado tempo suficiente, a taxa de passagem do gás para a atmosfera iguala-se à taxa de liberação do interior do ambiente confinado. Além da intensidade da fonte como função do tempo, também apresentamos as fórmulas para cálculo da concentração de gás (v/v) sendo liberado para a atmosfera. Além do caso de liberação constante em estado estacionário, também apresentamos os resultados para os casos onde a duração da liberação acidental, numa taxa constante, ocorre somente durante um intervalo limitado de tempo. Os resultados apresentados podem ser úteis na avaliação da dispersão do gás liberado na atmosfera, com a determinação da distribuição espacial de concentração a partir do ponto de liberação.

1. INTRODUÇÃO

Em Análise de Riscos, para a estimativa de efeitos físicos de liberações acidentais de gases perigosos, o primeiro passo consiste na determinação da quantidade de gás sendo liberado para a atmosfera como função do tempo, ou seja, a fonte para a dispersão. Uma vez isto estabelecido, o passo seguinte é o uso de ferramentas computacionais adequadas para a estimativa da dispersão do gás liberado na atmosfera, com a determinação da distribuição espacial de concentração a partir do ponto de liberação. A modelagem da dispersão atmosférica de gases não será tratada aqui.

A origem do gás liberado tem uma ampla gama de possibilidades, tais como diretamente da fase gasosa de um sistema pressurizado, evaporação de poça líquida, evaporação súbita de gás liquefeito por pressurização, decomposição térmica de substâncias, produtos de combustão etc. Na literatura existem muitas fontes de informação disponíveis com a descrição de modelos para estimar a quantidade de gás liberado conforme cada uma das opções recém mencionadas, ver, por exemplo, Lees (2012) e Yellow Book (2005).

Entretanto, nos casos em que a liberação do gás perigoso acontece no interior de um ambiente confinado, antes de ir para a atmosfera, o gás passa por uma fase intermediária onde ocorre a mistura com o ar interno ao ambiente confinado.

No presente trabalho, nós discutimos somente os casos em que a liberação no interior do ambiente confinado ocorre numa taxa constante, por um intervalo de tempo limitado ou não. Nós apresentamos um modelo para esta fase intermediária e seus efeitos sobre a intensidade da fonte para a dispersão atmosférica.

2. MODIFICAÇÃO DA INTENSIDADE DA FONTE PARA LIBERAÇÕES NO INTERIOR DE AMBIENTES CONFINADOS

Inicialmente, nós apresentamos o caso sem em que não há ventilação forçada no prédio. O modelo que propomos é bastante simples, dada uma taxa G (kg/s) conhecida de liberação no interior de um prédio de volume V (m³), se considerarmos que o gás liberado sofre uma diluição instantânea no interior do mesmo e que a pressão interna permanece constante, a formulação de conservação de massa a seguir aplica-se.

$$\frac{dm}{dt} = \text{gas in} - \text{gas out} \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = G - \frac{G}{\rho \cdot V} m \quad (2)$$

Onde,

$m(t)$ = quantidade de massa de gás no interior do prédio no instante t , [kg]

ρ = densidade gás, [kg/m³]

A condição inicial é $m(0) = 0$.

A solução para esta equação diferencial ordinária é dada na Equação 3, obtida pela aplicação da solução geral que pode ser encontrada em Kreider et al (1966).

$$m(t) = \rho \cdot V(1 - e^{-\frac{G}{\rho \cdot V}t}) \quad (3)$$

A intensidade da fonte $S(t)$, em kg/s, é dada pelo segundo termo do lado direito da Equação 2.

$$S(t) = G(1 - e^{-\frac{G}{\rho \cdot V}t}) \quad (4)$$

De acordo com a Equação 4, no instante inicial ($t=0$) a intensidade da fonte é nula e para $t \rightarrow \infty$, $S=G$, conforme esperado.

Quanto maior for a relação G/V , mais rapidamente a taxa de liberação atinge o seu valor assintótico, conforme pode ser visto na Figura 1. Na figura recém mencionada, a razão G/V para $S1(t)$ é cinco vezes maior do que para $S2(t)$ e vinte cinco vezes maior do que em $S3(t)$.

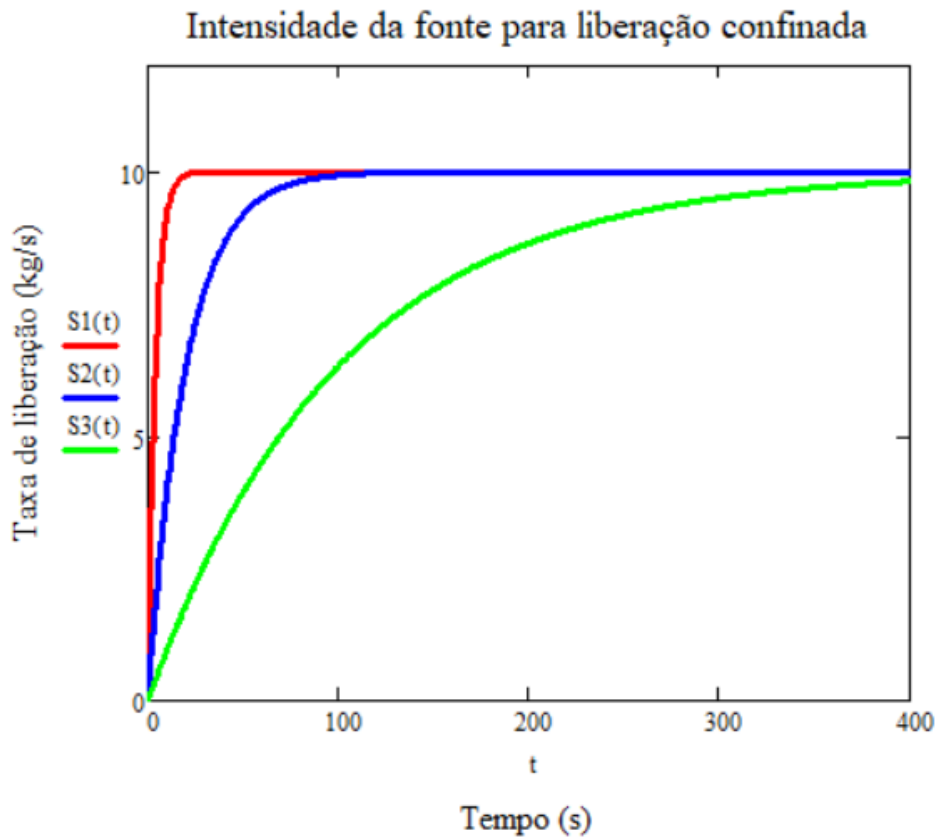


Figura 1- Intensidade da fonte versus tempo para três valores da razão G/V

A concentração (v/v) do gás liberado é dada pela expressão mostrada na Equação 5.

$$C(t) = (1 - e^{-\frac{G}{\rho \cdot V}t}) \quad (5)$$

Se a duração da liberação for limitada a um intervalo de tempo T , a intensidade da fonte também seria limitada ao mesmo intervalo de tempo e seu valor não seria mais G e sim o valor mostrado na Equação 6 e se manteria nula após o tempo T .

$$S_{max} = S(T) = G(1 - e^{-\frac{G}{\rho \cdot V}T}) \quad (6)$$

Vamos agora analisar o caso onde o prédio possui ventilação. Se ventilação acontece numa dada taxa, tal como R (m^3/s), assumindo as mesmas premissas usadas no caso onde não havia ventilação, ou seja a Equação 1, o balanço de massa deve ser escrito conforme mostrado a seguir.

$$\frac{dm}{dt} = G - (R + \frac{G}{\rho}) \cdot \frac{m}{V} \quad (7)$$

Cuja solução toma a forma mostrada na Equação 8.

$$m(t) = \frac{G \cdot V}{(R + \frac{G}{\rho})} (1 - e^{-(R + \frac{G}{\rho})\frac{t}{V}}) \quad (8)$$

A partir da Equação 8, obtém-se a intensidade da fonte tomando o produto da taxa de volumétrica de exaustão de gás $R+G/\rho$ pela concentração média de gás m/V , conforme expresso na Equação 9.

$$S(t) = G(1 - e^{-(R + \frac{G}{\rho})\frac{t}{V}}) \quad (9)$$

A adição da ventilação provoca uma aceleração na taxa de liberação de gás para a atmosfera, ou seja, um aumento na taxa de crescimento da intensidade da fonte para dispersão na atmosfera, conforme mostrado na Figura 2.

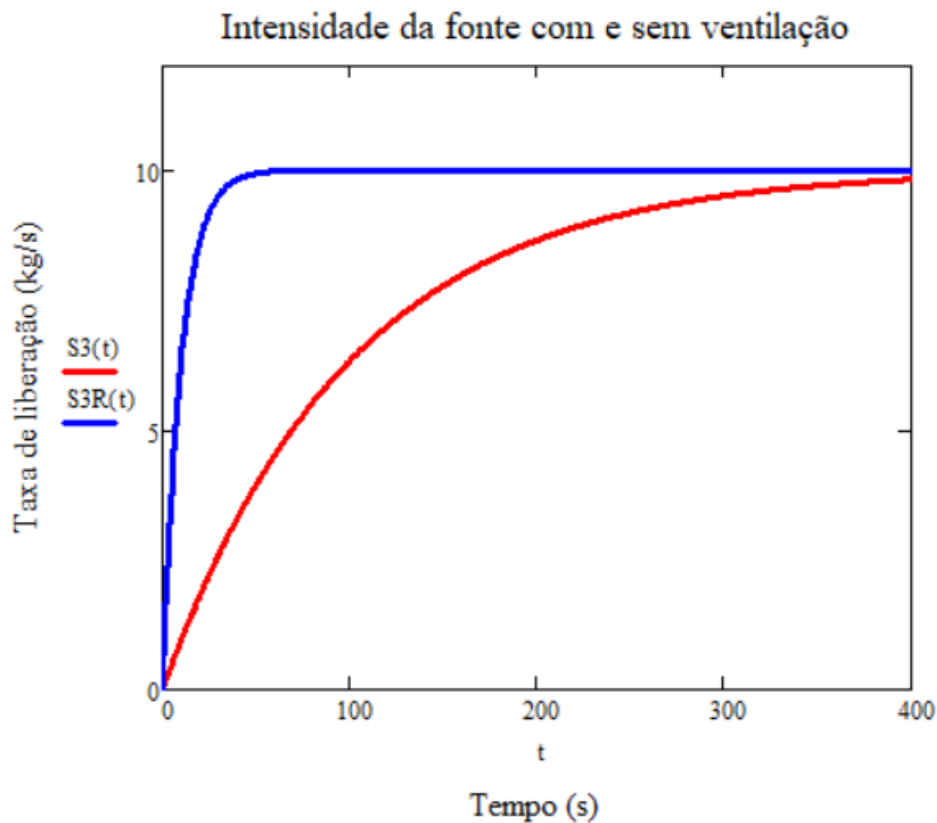


Figura 2- Intensidade da fonte com (azul) e sem (vermelho) ventilação

O resultado que aparece na Figura 2 pode, à primeira vista, parecer contra intuitivo, a adição de ar na forma de ventilação faz com que a curva de crescimento da taxa de exaustão tenha um gradiente mais acentuado do o caso sem ventilação anteriormente analisado. Para compreender este comportamento, é necessário ter em conta que com a adição do fluxo de ar da ventilação há um aumento do arraste de gás que está sendo liberado no interior do prédio, mas a concentração do gás deixando o prédio será inferior à do caso sem ventilação.

O valor assintótico da concentração (v/v) do gás deixando o prédio é igual à razão entre a corrente de gás sendo liberada pela soma deste mesmo valor mais a vazão de ar correspondente à ventilação.

Caso a liberação seja limitada a um intervalo de tempo T, o valor máximo da concentração de gás seria dado pela expressão na Equação 10.

$$S_{max} = S(T) = G(1 - e^{-(R+\frac{G}{\rho})\frac{T}{V}}) \quad (10)$$

Além disto, para tempos superiores a T, a intensidade da fonte seria dada pela Equação 11.

$$S(t) = G \left(1 - e^{-(R+\frac{G}{\rho})\frac{T}{V}} \right) \cdot e^{-\frac{R}{V}t} \quad (11)$$

Da mesma forma feita anteriormente, vamos encontrar uma expressão para a concentração do gás saindo do prédio. Esta concentração é o resultado da divisão da vazão volumétrica da corrente gasosa dividida pela soma desta mesma corrente com de ar correspondente à ventilação, conforme apresentado na Equação 12.

$$C(t) = \frac{\frac{G}{\rho}}{(R + \frac{G}{\rho})} (1 - e^{-(R+\frac{G}{\rho})\frac{t}{V}}) \quad (12)$$

Portanto, o valor assintótico ou o valor máximo da concentração (v/v) do gás sendo liberado para a atmosfera é simplesmente a razão entra a vazão (G/ρ) de gás sendo liberado no interior do prédio pela soma desta mesma vazão mais a vazão correspondente à ventilação (R).

$$C_{max} = \frac{\frac{G}{\rho}}{\frac{G}{\rho} + R} \quad (13)$$

Na Figura 3, mostramos o efeito da ventilação sobre a concentração de gás deixando o ambiente confinado, onde se observa que a ventilação faz com que haja uma redução na concentração do gás sendo liberado na atmosfera. A curva em azul na Figura 3 corresponde ao caso onde se tem ventilação presente, enquanto que a curva em vermelho é para o caso sem ventilação. No exemplo, são iguais os valores escolhidos para vazão volumétrica da ventilação de ar e vazão volumétrica da fonte, resultando em uma concentração de gás para o caso onde se tem a ventilação presente igual a 50% do valor onde não se tem ventilação forçada.

Uma das maneiras práticas de se usar os resultados até aqui apresentados é, por exemplo, no estabelecimento de distâncias virtuais de fontes tendo em conta que o gás sendo liberado já é liberado com alguma diluição.

Assim, por exemplo, se o modelo sendo usado for o Gaussiano que é aplicável a gases neutros, ou seja, de densidade igual a do ar, e se o interesse for o a estimativa da distribuição espacial da concentração de gás, para um caso onde há ventilação, basta calcular a que distância a concentração de gás na linha central da nuvem de gás cai para o valor de concentração calculada pela Equação 13. Uma vez obtido este valor da distância para que o valor da concentração atinja o valor da concentração de interesse, o mesmo seria a chamada distância virtual para a fonte.

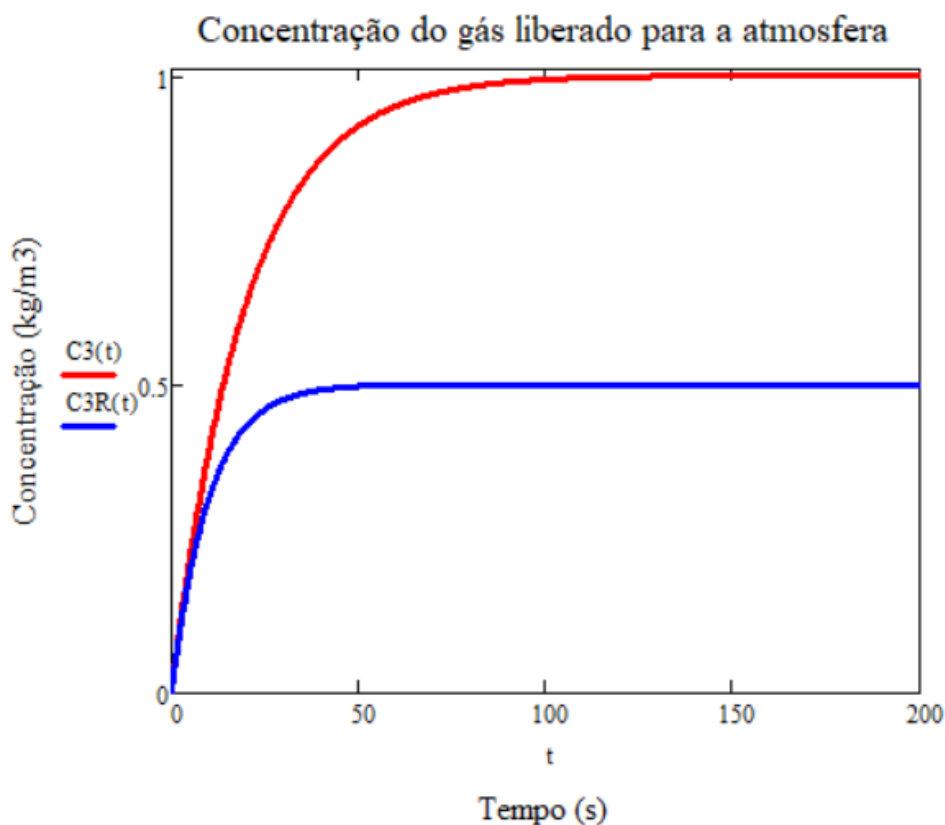


Figura 3- Variação da concentração de gás liberado para a atmosfera com (azul) e sem ventilação (vermelho)

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, desenvolvemos formulas que permitem estimar tanto a taxa como a concentração com que um gás sai de um ambiente confinado, tal como um prédio de volume conhecido, a partir de uma liberação constante no seu interior. As formulações são para dois casos de interesse prático, com e sem ventilação forçada. Foram analisados os casos de liberação numa taxa constante em regime estacionário bem como por um tempo limitado. A principal simplificação foi considerar que o gás ao ser liberado no interior do ambiente confinado dilui-se instantaneamente em todo o volume. Dado tempo suficiente, a taxa de liberação do gás para fora do prédio iguala-se à taxa de liberação no seu interior, tanto com como sem a presença de ventilação forçada conforme seria esperado da lei da conservação da massa.

O prédio tem como efeito um retardo na taxa de liberação de gás sendo liberado no seu interior. Quanto maior for a relação G/V, mais rapidamente a taxa de liberação para o exterior do prédio atinge o valor da taxa de liberação interna.

Conforme é de se esperar, a ventilação forçada, quando presente, provoca uma diluição do gás no interior do prédio e reduz a concentração do gás que sai para a atmosfera.

Quando há ventilação no prédio, o gás passa para a atmosfera com um grau maior de diluição quando comparado com o caso onde não se tem ventilação. A concentração máxima, no caso de ausência de ventilação, é 1 v/v, ou seja, gás puro. No caso de haver ventilação, a concentração máxima tende para o quociente entre o valor da taxa volumétrica de liberação de gás no interior do prédio pela soma deste mesmo valor acrescido da vazão volumétrica de ar de ventilação.

Referências

1. LEES, F.P. *Loss Prevention in the Process Industries Loss Prevention in the Process Industries – Hazard Identification, Assessment, and Control*, Butterworth-Heinemann, USA (2012).
2. YELLOW BOOK, CPR 14E, *Methods for the Calculation of Physical Effects due to Releases of Hazardous Materials (Liquid and Gases)*, TNO, Holanda (2005)
3. KREIDER D.L., Kuller R.G., Ostberg D.R. e Perkins F.W. *An Introduction to Linear Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., USA (1966)