

## MODELAGEM COMPUTACIONAL DA ENERGIA RADIANTE EMITIDA POR FLARES INDUSTRIAIS

Flávia Cunha Brasil; Kimberly Paim Abeyta; José Antônio de Carvalho Cunha

UNIFACS - Universidade Salvador. Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: flacbrasil@hotmail.com

**Resumo:** Um engenheiro químico deve estar apto a projetar sistemas de alívio de pressão para que sempre haja segurança em plantas industriais, mesmo sob condições de emergência. Neste cenário, o flare é utilizado para queima de fluidos provenientes de alterações na planta, e sempre que há grande quantidade de queima de produtos inflamáveis o potencial de calor radiante emitido é suficiente para garantir efeitos nocivos em pessoas e equipamentos próximos. Este trabalho fornece a descrição da modelagem de um sistema de flare, utilizando o software VBA no Excel, com foco na análise da radiação térmica. A metodologia de cálculo utilizada foi a descrita no API 521. O modelo descreveu de forma coesa o processo, apresentando resultados satisfatórios onde o erro foi de 0,44% quando comparado com dados reais de uma planta.

**Palavras-chave:** flare, modelagem, VBA.

### 1. INTRODUÇÃO

O flare industrial é um equipamento bastante utilizado em instalações industriais, tais como refinarias e poços de petróleo e gás, indústrias químicas e fábricas de processamento de gás natural. Essa estrutura é classificada, pelas normas ANSI (American National Standards Institute) /API (American Petroleum Institute) ISO 23251:2008 e 521:2008, como sistema de segurança final, já que permite eliminar de forma segura os gases de alívio evitando cenários de anormalidade de pressão na planta. Durante o processo, o próprio equipamento pode se tornar um perigo, uma vez que o mesmo emite uma grande quantidade de radiação térmica que pode ser prejudicial a pessoas e equipamentos que não estejam a uma distância segura da chama. De acordo com a EPA- Air Pollution Control Cost Manual (2002), o nível de radiação permitido é uma função do tempo de exposição, sendo assim, fatores como o tempo de reação e mobilidade humana devem ser considerados. O operador do flare deve estar ciente da quantidade de calor que será emitida em um episódio onde a frequência será máxima.

Em posse dos fatores que influenciam energia radiante emitida por um flare, os valores de radiação podem ser simulados em plataformas como o FLARENET (Aspen®), no entanto, tal ferramenta é de uso restrito e pouco intuitivo. Neste contexto, o objetivo do trabalho é otimizar o cálculo de radiação térmica emitida por um sistema de flare, utilizando o VBA (Visual Basics for Application) em Excel® como ferramenta, simulando computacionalmente o tamanho da chama no tip e gerando tabelas e gráficos de radiação 3D.

## 2. METODOLOGIA

Para determinar a radiação emitida por um flare é necessário conhecer as condições de processo como vazão mássica, composição da corrente, velocidade do fluido, temperatura, propriedades do fluido como calor de combustão e as condições ambientais em que o equipamento se encontra. Através de uma subrotina criada no VBA, levando em consideração a composição da corrente, calculou-se o coeficiente de expansão dos gases  $k$  com uma equação empírica polinomial que descreve o comportamento do  $C_p$  em função da temperatura de acordo com Reid *et al.* (1977). A partir desses dados, utilizou-se a Equação 1, fornecida pelo API 521, para dimensionar o diâmetro ideal do flare, e a Equação 2 para o calor total liberado (kJ/s).

$$Mach = 3,23 * 10^{-5} \left( \frac{W}{PD} \right) \left( \frac{zT}{kM_w} \right)^{0.5} \quad (1)$$

$$Q = WC \quad (2)$$

Onde  $W$  é a vazão mássica (kg/h),  $P$  a pressão na saída do flare (kPa),  $D$  o diâmetro (m),  $T$  a temperatura de operação (K),  $z$  o fator de compressibilidade que consideramos como 1 pois o fluido está a altas temperaturas e baixas pressões,  $k$  o coeficiente de expansão dos gases,  $M$  o peso molecular (g/mol) e  $C$  o calor de combustão (kJ/kg).

O método de cálculo do comprimento da chama  $L$  descrito no API 521 considera a velocidade de vento como zero, utilizando uma correção posterior para a sua distorção. Por meio da regressão linear, obteve-se uma equação referente ao gráfico do API 521 mostrado na Figura 1. O mesmo processo foi feito com o gráfico referente à distorção da chama apresentado na Figura 2, que fornece a distância do tip (topo) do flare ao centro da chama nas coordenadas  $X$  e  $Y$ . Os dados da Figura 2 estão em função de  $U_{\infty}/U_j$ , razão entre a velocidade do vento e a velocidade de saída no tip do flare.

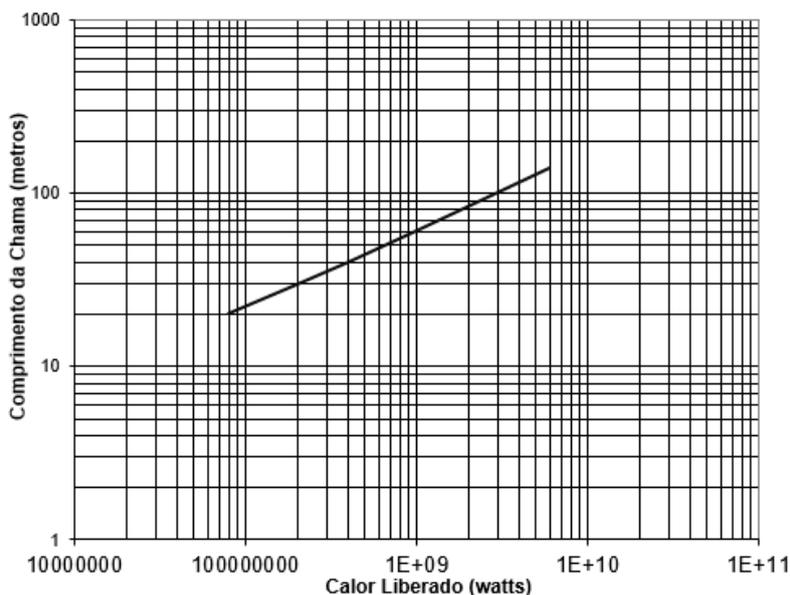


Figura 1 – Gráfico de comprimento da chama x calor liberado.

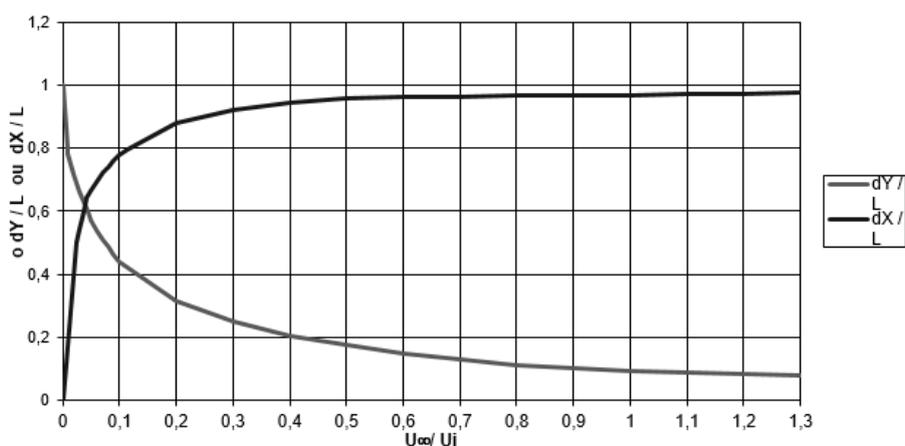


Figura 2 - Gráfico da razão das velocidades x a distância ao centro da chama.

Estudos empíricos realizados por Stoll e Green (1958) forneceram dados do impacto causado pela radiação térmica na pele humana. A Tabela 1 indica a radiação máxima recomendada para cada cenário na região circunvizinha do flare.

Tabela 1 - Radiação máxima recomendada.

Intensidade da radiação (kW/m <sup>2</sup> )	Condição
15,77	Em áreas onde os operadores não são susceptíveis de desempenhar funções e onde barreira de calor radiante está disponível.
9,46	Em qualquer local ao qual as pessoas tenham acesso ; A exposição deve ser limitada a alguns segundos, suficiente para escapar apenas.
6,31	Áreas onde ações de emergência com duração de até 1 min podem ser exigidas por pessoal sem escudo, mas com roupas apropriadas.
4,73	Áreas onde ações de emergência com duração de vários minutos podem ser exigidas pelo pessoal sem escudo, mas com roupas apropriadas.
1,58	Em qualquer local onde pessoas com roupas apropriadas podem ser continuamente expostas.

Uma vez determinado o nível de radiação máxima permitida é possível calcular o comprimento da torre e a distância ideal da torre do flare aos pontos de exposição. Uma abordagem comum para determinar a radiação da chama a um ponto de interesse é considerar a chama

ter um único epicentro radiante, método de Brzustowski e Sommer (1973), e usar a seguinte equação empírica de Hajek e Ludwig. Segundo Guigard *et al* (2000), este método não é apropriado para o cálculo da radiação a distâncias muito curtas do flare. A Equação 3 pode ser usada para flares subsônicos e sônicos, desde que a fração de calor radiado correta seja usada.

$$D = \sqrt{\frac{FQ\tau}{4\pi K}} \quad (3)$$

Onde D é a distância mínima recomendada (m), F a fração de calor radiado, Q o calor liberado (kW), K a radiação máxima permitida e  $\tau$  é a fração da intensidade de calor transmitida que é calculada através da Equação 4, onde r é a umidade relativa do ar. De acordo com Brzustowski e Sommer (1973), tal equação é válida para a maioria dos compostos, com exceção de H<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S que queimam com pouca ou nenhuma radiação.

$$\tau = 0,79 \left(\frac{100}{r}\right)^{\frac{1}{16}} \left(\frac{30,5}{D}\right)^{\frac{1}{16}} \quad (4)$$

Para calcular a radiação recebida em determinado ponto, isolou-se o K da Equação 3 e foi utilizada a distância do ponto central da chama ao ponto de interesse, gerando uma tabela e gráfico 3D com o calor radiante nas proximidades do flare nas coordenadas x e y.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem permite calcular o grau de radiação emitida ao longo do flare e ao nível do solo, gerando tabelas e um gráfico 3D que permitem melhor visualização do cenário. Inicialmente, as condições de um exemplo citado no API 521 foram utilizadas como teste e os resultados obtidos foram semelhantes. A fim de verificar a confiabilidade do programa desenvolvido para além de valores teóricos, foram obtidos valores de um flare real em atividade em uma planta petroquímica. O flare em estudo possui 100 metros de altura e os gases entram com a vazão de 40000 Kg/h, os outros dados estão expostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados de entrada

Peso molecular (g/mol)	50
Temperatura (C°)	97,9
Calor de combustão (KJ/Kg)	46145,75
Fração de calor	0,313
Velocidade do vento (m/s)	10
Diâmetro do tip (m)	1,78

Em posse dos dados de entrada a simulação gerou o gráfico exposto na Figura 1, que mostra o comportamento da radiação em função da distância, sendo que o flare está localizado em  $x = 180\text{m}$  e  $y = 140\text{m}$ .

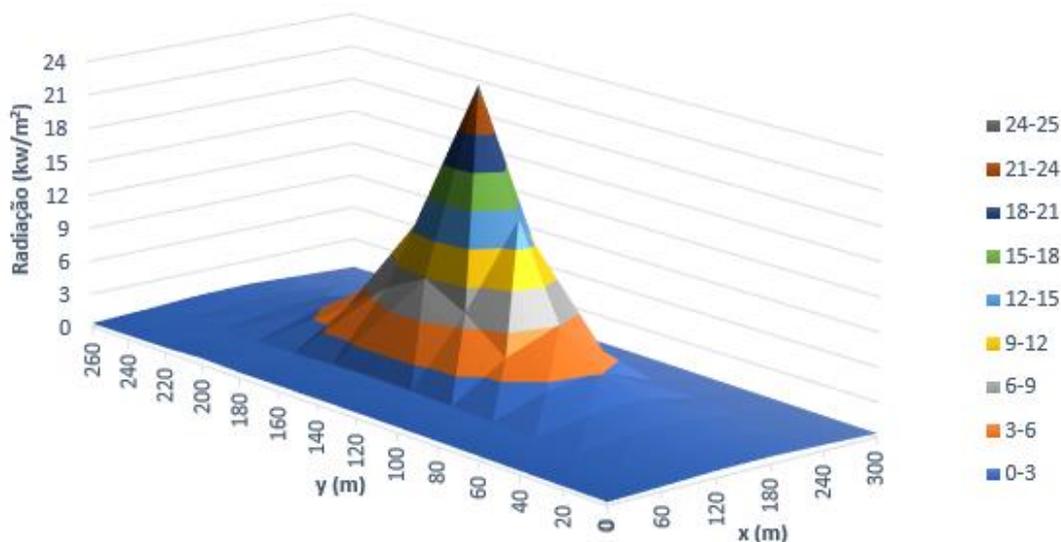


Figura 1 – Gráfico de radiação no solo.

Com os mesmos dados da Tabela 1, uma análise de radiação na cota  $z = 63\text{m}$ , ou seja, a  $37\text{m}$  do tip do flare, foi feita para determinar se seria seguro trabalhar neste ponto sem danos ao operador. O valor real de radiação informado foi de  $7,038\text{ kW/h}$ , muito próximo do valor encontrado na modelagem proposta, que foi de  $7,007\text{ kW/h}$ . Baseado nos estudos de Buettner (1957), com essa quantidade de radiação o ser humano

poderia permanecer durante 8,9 segundos nessa altura sem sentir dor, mas é importante frisar que os experimentos de Buettner não levam em consideração o uso de equipamentos de proteção pessoal padrões, como macacão, gorro, luvas e capacete e que esses iriam amenizar a exposição térmica.

## 4. CONCLUSÃO

O trabalho apresentado descreve um algoritmo de modelagem e simulação de flares industriais. O modelo matemático é bastante prático e segue rigorosamente os cálculos e métodos propostos no API RP-521, sendo que o maior erro encontrado foi de 6,94%. No caso da comparação feita com a análise de radiação em uma planta petroquímica o erro foi de 0,44%, que é um valor satisfatório. Os erros associados podem ser referentes à possíveis considerações e ao emprego de equações geradas a partir de regressões lineares, já que valores obtidos visualmente não são os mesmos que os previstos pelas equações.

## 5. REFERÊNCIAS

- American Petroleum Institute. API RP 521 Pressure-relieving and Depressuring Systems: 5th edition. 2007
- BUETTNER, J. K. J., Heat Transfer and Safe Exposure Time for Man in Extreme Thermal Environment, Paper 57-SA-20, ASME, New York, 1957
- BRZUSTOWSKI, T. A. e SOMMER E. C., Predicting radiant heat from flares. *American Petroleum Institute*. Washington, D.C, 1973.
- EPA – United States Environmental Protection Agency. Air pollution control cost manual - Sixth Edition, EPA/452/B-02-001, 2002.
- GUIGARD, S. E., KINDZIERSKI, W. B., HARPER, N. Heat Radiation from Flares. 2000
- REID, R.C., PRAUSNITZ, J.M., SHERWOOD, T.K., "The Properties of Gases and Liquids", 3rd Ed, 1977.
- STOLL A. M., GREEN L. C., The production of burns by thermal radiation of medium intensity. *American Society of Mechanical Engineers*, New York, 1958.