

02

Segurança de processos e prevenção de acidentes ambientais: uma introdução aos estudos de fluxos térmicos como ferramenta de gerenciamento de riscos

Process safety and environmental accident prevention: an introduction to thermal flow studies as a risk management tool

Wilson Pimenta da Silva D'Ávila

*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – Ifes.
Campus Linhares – Espírito Santo*

Leonardo Furieri Matos

*Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo – CBMES.
Aracruz – Espírito Santo*

Tântalo Almeida de Oliveira Campos

*Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras.
Vitória – Espírito Santo*

DOI: 10.47573/aya.5379.2.81.2

RESUMO

Diversas atividades produtivas podem provocar acidentes de grande abrangência geográfica, elevado número de vítimas, ou ainda, gerar severos impactos negativos sobre o meio ambiente. Dentre os possíveis cenários acidentais, os incêndios são os mais frequentes. Considerando que incêndios originados em tanques de armazenamento constituem uma das formas mais comuns destes fenômenos, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos e aprimorados. Este capítulo se propõe a apontar um caminho para os interessados no estudo de fluxos térmicos, pois tem como objetivo apresentar uma diretriz na forma de “passo a passo”. A diretriz foi elaborada a partir dos principais procedimentos descritos na literatura referenciada. Foi definido um cenário hipotético de incêndio em um tanque contendo gasolina, com 10 m de diâmetro. Devido à sua maior aplicabilidade, o modelo proposto por Mudan foi utilizado. Este modelo, seus submodelos e parâmetros de entrada foram apresentados. Como resultado, foi elaborada a seguinte diretriz: 1º Passo – Definição do modelo e submodelos; 2º Passo – Determinação do comprimento da chama; 3º Passo – Determinação da potência emissiva média na superfície da chama; 4º Passo - Determinação do fator de vista; 5º Passo – Determinação da transmissividade atmosférica; 6º Passo – Estimativa dos fluxos térmicos e medidas de gerenciamento de riscos. Os fluxos térmicos foram estimados com intervalos de 1 m a partir da borda do tanque. Foi verificado que estes estudos compõem uma importante ferramenta de gerenciamento de riscos, elevando a segurança do processo em plantas industriais e, de modo mais amplo, promovendo a prevenção de acidentes ambientais.

Palavras-chave: incêndio. combustível. modelagem. meio ambiente.

ABSTRACT

Several productive activities can cause accidents of great geographic scope, high number of victims, or even generate severe negative impacts on the environment. Among the possible accidental scenarios, fires are the most frequent. Considering that fires originating in storage tanks constitute one of the most common forms of these phenomena, mathematical models have been developed and improved. This chapter proposes to point out a way for those interested in the study of thermal fluxes, as it aims to present a guideline in the form of a “step by step”. The guideline was elaborated from the main procedures described in the referenced literature. A hypothetical fire scenario was defined in a tank containing gasoline, with a diameter of 10 m. Due to its greater applicability, the model proposed by Mudan was used. This model, its submodels and input parameters were presented. As a result, the following guideline was elaborated: 1st Step – Definition of the model and sub-models; 2nd Step – Determination of the flame length; 3rd Step – Determination of the average emissive power on the surface of the flame; 4th Step - Determination of the view factor; 5th Step – Determination of atmospheric transmissivity; 6th Step – Estimation of thermal flows and risk management measures. Thermal fluxes were estimated at 1 m intervals from the edge of the tank. It was found that these studies make up an important risk management tool, increasing process safety in industrial plants and, more broadly, promoting the prevention of environmental accidents.

Keywords: fire. fuel. modeling. environment.

INTRODUÇÃO

Acidentes ambientais: incêndios e explosões

Diversas atividades produtivas e logísticas podem, em decorrência de suas operações, provocar acidentes de grande abrangência geográfica, elevado número de vítimas, ou ainda, severos impactos negativos sobre o meio ambiente (VALLE; LAGE, 2004). Nesta perspectiva, estudos voltados para prevenção de eventos críticos são necessários a fim de promover um adequado gerenciamento de riscos.

Dentre os possíveis cenários acidentais, segundo Muñoz *et al.* (2007), os incêndios são os mais frequentes. Estes eventos apresentam grande potencial para gerar poluição térmica e química da atmosfera, bem como para afetar, direta ou indiretamente, a saúde, a segurança e o bem-estar da população circunvizinha (D'ÁVILA, 2021a), assim, os estudos sobre fluxos térmicos têm adquirido relevância (MIAO *et al.*, 2014).

O setor produtivo da economia abarca um enorme conjunto de atividades. Neste setor, para que as transformações sejam realizadas, são necessários vários recursos materiais, humanos e energéticos. Em se tratando da energia utilizada nos processos, haja vista a particularidade de cada processo, muitas plantas têm a necessidade de utilizar combustíveis líquidos como fontes de energia.

Contudo, geralmente, os combustíveis são transportados por rodovias (meio mais utilizado), ferrovias e sistema aquaviário até chegarem ao seu destino final – as plantas de processo – onde são armazenados e, posteriormente, utilizados. Em todas estas etapas, muitos riscos se fazem presentes, em especial os que se relacionam ao derramamento/vazamento de combustível líquido seguido de incêndio ou explosão.

Além disso, existem produtos químicos perigosos que também são utilizados nos processos produtivos e que, ao reagirem com outras substâncias, podem causar explosões e incêndios. Um exemplo é um vazamento de um peróxido orgânico, que ao entrar em contato com madeira poderá iniciar um processo de combustão.

Caso de fato se manifestem, os efeitos negativos dos incêndios e explosões podem vir a extrapolar os limites da planta de processo, bem como podem atingir uma série de outros sistemas, gerando uma grande quantidade de cenários acidentais (D'ÁVILA, 2021b). Quando em processamento, um incêndio é capaz de transferir calor por diversos mecanismos: através dos fluxos térmicos (irradiação); por contato direto das chamas (condução) com os materiais, ou propagação da fumaça (convecção).

Qualquer propagação de calor é perigosa, pois, dentre outras possibilidades, pode levar estruturas ao colapso (DUARTE *et al.*, 2008), ou ainda, podem provocar a ignição dos materiais nas adjacências, propagando e/ou gerando novos sinistros. Quanto aos fluxos térmicos, dependendo das suas intensidades, estes podem provocar sérios danos às pessoas, tais como lesões graves e até fatalidades.

Segundo National Fire Protection Association (2002), por exemplo, fluxos de 12,5 kW m⁻² possuem energia suficiente para produzir fusão de materiais plásticos, bem como podem produzir queimaduras de primeiro grau após 10 s de exposição. Zárate, Arnaldos e Casal (2008)

apontam que fluxos térmicos de 4,7 kW m⁻² são capazes de produzir sensação de dor para exposições de 15 s a 20 s e que fluxos de 1,4 kW m⁻² são inofensivos para pessoas sem qualquer proteção.

Desse modo, este capítulo se propõe a apontar um caminho para que os interessados no estudo de fluxos térmicos possam fazer uma primeira aproximação com o tema. Embora exista uma vasta literatura sobre o assunto, este trabalho será útil, pois tem como objetivo apresentar uma diretriz na forma de “passo a passo” para estimar a radiação térmica emitida por um incêndio em tanque, bem como apresentar e discutir algumas medidas de gerenciamento dos riscos, auxiliando os profissionais de engenharia que buscam ampliar a segurança do processo, proteger o patrimônio, a vida dos trabalhadores, a circunvizinhança e os ecossistemas.

Incêndios em tanques de combustíveis

Ao longo das últimas décadas, em especial a partir da segunda metade do século XX, incêndios industriais constituíram acidentes de grande proporção com impactos ambientais negativos e bastante significativos (VALLE; LAGE, 2004). Incêndios resultam de uma reação química, iniciada por uma fonte de ignição, na qual os vapores liberados por uma substância (combustível) reagem com o oxigênio do ar atmosférico, liberando luz e calor (CETESB, 2011).

Segundo Campos e Conceição (2006), toda substância que participa dessa reação é chamada de combustível, independentemente do estado físico em que se encontra, seja sólido, líquido ou gasoso. Uma vez iniciado um incêndio, o calor liberado poderá aquecer outros materiais e levá-los à combustão; forma-se assim uma reação em cadeia que permite o fogo se propagar enquanto houver combustível disponível (SEITO, 2008).

Segundo Campos e Conceição (2006), os combustíveis, além de se apresentarem em diferentes estados físicos, apresentam diferentes mecanismos de queima. Nesse sentido, combustíveis líquidos requerem muita atenção, pois,

Diferentemente dos combustíveis sólidos que queimam em superfície, em profundidade e deixam resíduos, os combustíveis líquidos além de queimarem somente na superfície têm algumas propriedades físicas que dificultam a extinção do calor [...]. Os líquidos assumem a forma do recipiente que os contém. Se derramados, fluem pelo piso e acumulam-se nas partes mais baixas (CAMPOS; CONCEIÇÃO, 2006, p. 29).

Seja no transporte ou na planta de processo, os combustíveis líquidos são acondicionados em tanques, desse modo, existe o risco de incêndio no combustível contido no tanque, ou acidentalmente vazado/derramado. Comumente, combustíveis líquidos podem gerar dois cenários básicos de incêndio: o incêndio em nuvem e o incêndio em poça. Considerando esses dois cenários, CETESB (2011) define como:

Incêndio de nuvem: incêndio de uma nuvem de vapor onde a massa envolvida e o seu grau de confinamento não são suficientes para atingir o estado de explosão. Incêndio de poça: ocorre quando há a combustão da camada evaporada de líquido inflamável junto à base do fogo (CETESB, 2011, p.3, grifo nosso).

Nesse sentido, Souza *et al.* (2017) apontam que, na presença de uma fonte de ignição, a irradiação proveniente das chamas irá intensificar a evaporação do combustível, o que acaba por aumentar o próprio volume de vapor disponível para a queima. Quanto aos incêndios em poça, D'Ávila (2021b) aponta que este cenário pode se apresentar de diversas formas, o que requer muita atenção na elaboração dos planos de emergência envolvendo combustíveis líqui-

dos – Figura 1.

Figura 1 – Incêndio em tanque de combustível líquido



Fonte: CETESB (2016)

Estudo de impacto ambiental

Em 1981, a Política Nacional do Meio Ambiente estabeleceu, dentre outros, a avaliação de impactos ambientais e o licenciamento ambiental (BRASIL, 1981) como importantes instrumentos de proteção da sociedade e do meio ambiente. Posteriormente, o CONAMA (1986) estabeleceu os critérios básicos e diretrizes para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental, bem como, definiu como impacto ambiental:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; a qualidade dos recursos ambientais (CONAMA, 1986, p. 1, grifo nosso).

O artigo 5º da resolução 01 do CONAMA (CONAMA, 1986) estabelece que o estudo de impacto ambiental dos empreendimentos deve seguir algumas diretrizes, dentre elas, identificar e avaliar os impactos gerados nas fases de implantação e operação, bem como, também estabelece que tais estudos devem ser realizados de modo a observar uma série de técnicas que contemplam uma rotina de atividades, tais como:

Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, **previsão da magnitude** e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazo, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais (CONAMA, 1986, p. 3, grifo nosso).

Segundo a CETESB (2011, p. 3),

No Brasil, em particular no estado de São Paulo, [...] os **Estudos de Análise de Risco** passaram a ser requeridos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para determinados tipos de empreendimentos, de forma que, além dos aspectos relacionados aos impactos ambientais e à poluição crônica, também **a prevenção de acidentes maiores fosse contemplada** no processo de licenciamento (CETESB, 2011, p.3, grifo nosso).

D'Ávila (2021a) chama atenção para o fato de que

Dentre as possíveis contribuições dos **estudos de fluxos térmicos** para prevenção da poluição atmosférica na circunvizinhança de plantas com armazenamento de combustíveis líquidos, [...] duas merecem destaque: a primeira refere-se à **possibilidade de prever as possíveis alterações térmicas na atmosfera, seus efeitos sobre materiais e pessoas, o que permite traçar algumas estratégias para proteção da vizinhança**; a segunda, trata-se da possibilidade de evitar a queima acidental de combustíveis e a consequente

liberação de gases para a atmosfera (D'ÁVILA, 2021a, p. 65, grifo nosso).

Embora as diretrizes da CETESB (2011) sejam para o Estado de São Paulo, a experiência desta instituição no que se refere a diversos aspectos regulatórios, elaboração protocolos, dentre outros, apontam para caminhos que são considerados referências metodológicas para diversos estudos. Desse modo, os métodos e técnicas desta instituição acabam sendo extrapolados para diversas atividades, haja vista a confiabilidade que apresentam.

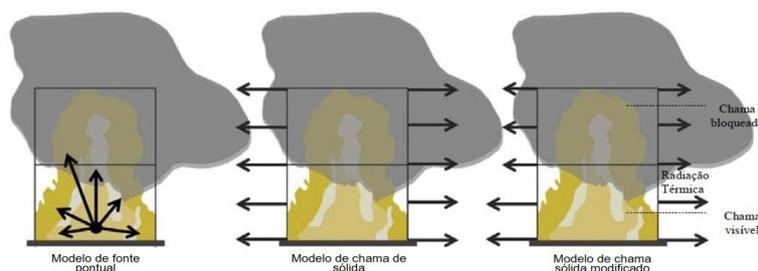
Estimativa dos efeitos físicos: fluxos térmicos

Considerando que incêndios originados em tanques de armazenamento, ou em decorrência de vazamentos, constituem uma das formas mais comuns da manifestação destes fenômenos em plantas de processo ou nas atividades de transporte, modelos matemáticos têm sido desenvolvidos e aprimorados há décadas, tal como o modelo Mudan (1984), dentre outros.

Devido à relevância do tema, várias publicações foram realizadas por diversos órgãos e institutos de pesquisa, tais como National Fire Protection Engineers (2002), Center Chemical Process Safety (2003), US Nuclear Regulatory Commission (2004), The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (2005).

Santos e Landesmann (2013, p. 3) apontam que para os incêndios em poça “os modelos semiempíricos são, atualmente, os mais indicados para prever o fluxo da radiação que incide em objetos localizados fora da chama”. Assim, segundo estes autores, três modelos têm sido utilizados para estimar os fluxos térmicos provenientes de incêndios em poça: o modelo de fonte pontual, o modelo de chama sólida (convencional) e o modelo denominado chama sólida modificado – Figura 2.

Figura 2 – Modelos para estimativa de incêndios em poça



Fonte: Santos e Landesmann (2013). Adaptado.

Segundo Braga *et al.* (2005), os processos de modelagem matemática possuem limitações. Nesse sentido, antes de escolher qual modelo utilizar, é muito importante estudá-los, buscando a compreensão das condições para as quais eles foram idealizados. Assim, Segundo National Fire Protection Association (2002), verifica-se que:

- O modelo de fonte pontual assume que toda energia do incêndio é emitida a partir de um único ponto localizado no centro da chama;
- O modelo chama sólida (convencional) assume que a chama pode ser representada por um sólido geométrico simples e a radiação é emitida através de toda a superfície deste sólido;
- O modelo de chama sólida modificado assume que uma parte da superfície do sólido

geométrico é coberta por fumaça, coexistindo duas regiões que emitem fluxos térmicos com diferentes intensidades.

Com o aprimoramento das pesquisas acadêmicas, algumas limitações dos modelos vão sendo apresentadas, requerendo dos profissionais de engenharia um constante acompanhamento sobre o tema. Nesse aspecto, The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (2005) coloca que modelo de chama pontual tende a superestimar os resultados para alvos localizados próximos da chama; Vaz Júnior (2015) coloca que o modelo de chama sólida modificado tem sido apontado como mais adequado para ser utilizado em poças de grandes dimensões.

Segundo National Fire Protection Association (2002), dentre os modelos de chama sólida convencional, o modelo proposto por Mudan e o modelo proposto por Shokri & Beyler são muito utilizados, contudo, é preciso especial atenção ao fato de que o modelo Mudan mostra-se adequado para estimar fluxos de todas as magnitudes, enquanto o modelo proposto por Shokri e Beyler não é recomendado para estimativa de fluxos inferiores a 5 kW m⁻².

Como a evolução do conhecimento em qualquer ciência é muito dinâmica, modelos mais acurados, utilizando novas tecnologias, estão sendo continuamente propostos e/ou aprimorados. Nesse sentido, os trabalhos publicados por Muñoz *et al.* (2004) e Muñoz *et al.* (2007), ao utilizarem filmagem e o registro de imagens termográficas para determinar a distribuição das chamas e a radiação emitida constituem um bom exemplo da utilização de novas tecnologias na modelagem dos incêndios.

METODOLOGIA

A diretriz apresentada neste capítulo foi elaborada a partir da verificação dos principais procedimentos descritos na literatura referenciada. Considerando que cada uma destas literaturas traz suas próprias metodologias e que cada trabalho apresenta relativa complexidade, os procedimentos rotineiros mais comuns foram organizados na forma de “passo a passo”.

Mesmo considerando que a estimativa dos efeitos físicos é parte integrante de um estudo mais abrangente (CETESB, 2011), a diretriz construída foi simplificada e restringiu-se apenas à estimativa dos efeitos físicos dos incêndios. A metodologia da CETESB (2011) não define os modelos a serem utilizados; assim, o modelo Mudan foi escolhido por mostrar-se adequado para estimar fluxos de diversas magnitudes.

O detalhamento, a forma e as limitações do modelo utilizado podem ser encontrados em diversos trabalhos, em especial em Mudan (1984) e National Fire Protection Association (2002). Para demonstrar a utilização do modelo Mudan, foi definido um cenário hipotético de incêndio em um tanque contendo gasolina, com 10 m de diâmetro, pertencente a uma planta de processo localizada em Vila Velha – ES, haja vista a existência de dados meteorológicos já utilizados por D’Ávila (2021a).

A gasolina foi escolhida para este cenário acidental, haja vista que as propriedades deste combustível são bem divulgadas através das FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos) e que aos incêndios em tanques podem ser aplicados os modelos desenvolvidos para incêndio em poça.

O modelo Mudan, os submodelos e seus parâmetros de entrada foram apresentados. Estes parâmetros foram organizados em uma tabela para serem utilizados em uma planilha cálculo e facilitar a recuperação da fonte de referência das informações. Para melhor compreender o comportamento do fluxo térmico com o aumento da distância entre a borda do tanque e o corpo receptor, foram estimados os fluxos térmicos a várias distâncias, com intervalos de 1 m.

Considerando os impactos dos fluxos térmicos sobre estruturas e pessoas, apresentados no item 1.1 – Acidentes ambientais: incêndios e explosões – foram escolhidas as linhas de isofluxo em que os fluxos térmicos apresentam intensidades de 12,5 kW m⁻², 4,7 kW m⁻² e 1,4 kW m⁻². Estas linhas de isofluxo, também conhecidas como linhas de isorisco, foram representadas esquematicamente em duas figuras para facilitar a compreensão do tema, bem como facilitar a discussão dos resultados.

RESULTADOS

1º Passo – Definição do modelo e submodelos

Como descrito anteriormente, a escolha do modelo a ser utilizado precisa ser feita com muita cautela, tendo em vista as condições de aplicação, as limitações dos modelos, dentre outros aspectos. Nesse exemplo, conforme descrito na metodologia deste trabalho, optou-se pelo uso do modelo Mudan, descrito através da Equação 1.

$$q'' = Eav.Fw.\tau a \quad (1)$$

Onde: q'' (kW m⁻²) é o fluxo térmico que atinge um objeto, Eav (kW m⁻²) é a potência emissiva média na superfície da chama, Fw (adimensional) é o fator de vista e τa (adimensional) é a transmissividade atmosférica.

Uma vez escolhido o modelo, torna-se necessário identificar cautelosamente todos os submodelos e os parâmetros de entrada a serem utilizados para, em seguida, fazer a inserção de cada um deles numa planilha de cálculo. Assim, recomenda-se organizá-los em uma tabela para facilitar sua utilização. A Tabela 1 constitui um exemplo desta organização. Os demais modelos e submodelos utilizados serão apresentados a partir do 2º passo.

Tabela 1 – Organização de dados de entrada do modelo Mudan

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor	Fonte
Velocidade do vento	uw	m s ⁻¹	0,9	Mudan (1984)
Taxa de queima (Gasolina)	m"	kg m ⁻² s ⁻¹	0,055	The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (2005)
Diâmetro do tanque	D	m	10,0	Cenário hipotético
Área do tanque	A	m ²	78,5	Cenário hipotético
Raio do tanque	R	m	5,0	Cenário hipotético
Fração de calor irradiado	η	—	0,21	McGrattan, Baum e Hamins (2000); Muñoz et al. (2007).
Calor liberado na combustão (Gasolina)	ΔH_c	kJ kg ⁻¹	43700	U.S. Nuclear Regulatory Commission (2004)
Densidade do ar ambiente	ρ_a	kg m ⁻³	1,225	Agência Nacional de Aviação Civil (2020)
Densidade de vapor (Gasolina)	ρ_v	—	4,288	Petrobras (2020)

Umidade relativa	U	%	82,6	INMET (2020)
Pressão de vapor da H2O	Pvs	Pa	3169	Boçon (2018)

Fonte: Dados de pesquisa organizado pelos autores

2º Passo - Determinação do comprimento da chama

Considerando que cenário do acidente se desenvolve em um ambiente aberto, a velocidade do vento (uw) atua sobre a chama e altera o seu comprimento (H). Contudo, no modelo Mudan, a velocidade do vento não é diretamente utilizada na determinação do comprimento da chama (H). Nesse aspecto, primeiro é necessário determinar a velocidade adimensional dos ventos (u^*). A relação entre u^* e uw encontra-se descrita através das Equações 2 e 3 (MUDAN,1984).

$$u^* = \frac{uw}{\left(\frac{gm''D}{\rho v}\right)^{1/3}} \quad (2)$$

Onde: u^* é a velocidade adimensional dos ventos, uw ($m s^{-1}$) é velocidade do vento, g ($m s^{-2}$) é a aceleração da gravidade, m'' ($kg m^{-2} s^{-1}$) é a taxa de queima do combustível, D (m) é o diâmetro do tanque e ρv ($kg m^{-3}$) é a densidade de vapor do líquido.

$$\frac{H}{D} = 0.55 \cdot \left(\frac{m''}{\rho \alpha \sqrt{gD}}\right)^{0.67} u^{*-0.21} \quad (3)$$

Onde: H (m) é comprimento da chama, m'' ($kg m^{-2} s^{-1}$) é a taxa de queima do combustível, $\rho \alpha$ ($kg m^{-3}$) é a densidade do ar ambiente, g ($m s^{-2}$) é a aceleração da gravidade, D (m) é o diâmetro do tanque e u^* é velocidade adimensional dos ventos.

A velocidade do vento (uw) foi definida em $0.9 m s^{-1}$, pois resulta em uma velocidade adimensional dos ventos (u^*) menor do que 1, condição esta que, conforme descrito por Mudan (1984), permite que a posição da chama seja assumida como vertical. Esta opção facilita a utilização do modelo Mudan, pois simplifica a metodologia de cálculo para obtenção do fator de vista (F_w), que está descrita no 4º passo.

A taxa de queima (m'') da gasolina foi obtida em U.S. Nuclear Regulatory Commission (2004); a densidade do ar ambiente ($\rho \alpha$) foi admitida como sendo a Atmosfera Padrão Internacional, definida pela Agência Nacional de Aviação Civil (2020). A densidade de vapor (ρv) da gasolina foi obtida através de Petrobras (2020), sendo esta densidade 3 a 4 vezes a densidade do ar, portanto, foi considerada como 3,5 vezes a densidade do ar ambiente. Estes parâmetros de entrada também estão registrados na Tabela 1.

3º Passo - Determinação da potência emissiva média na superfície da chama

Durante um incêndio um tanque, apenas parte da energia térmica gerada na combustão é transmitida ao corpo receptor por irradiação, bem como esta fração de calor irradiado (η) depende da geometria da chama (Mudan, 1984). Considerando que poucos trabalhos têm sido desenvolvidos para determinar experimentalmente a fração de calor irradiado, dois modelos foram utilizados para determinação deste parâmetro, sendo eles o modelo proposto por McGrattan, Baum e Hamins (2000) e o modelo proposto por Muñoz *et al.* (2007), descritos respectivamente através das equações 4 e 5.

$$\eta = 0.35 e^{-0.05D} \quad (4)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama. D (m) é o diâmetro do tanque.

$$\eta = 0,436 \cdot D^{-0,58}, \forall D > 5 \text{ m} \quad (5)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama, D (m) é o diâmetro do tanque.

Assim, o valor da fração de calor irradiado (η) utilizado neste estudo corresponde à média dos resultados obtidos através das equações 4 e 5. Na sequência, a Equação 6 foi utilizada para determinação da potência emissiva média na superfície da chama (E_{av}). Para mais detalhes sobre os parâmetros η , m'' e ΔH_c , consulte Mudan (1984).

$$E_{av} = \left(\frac{\eta \cdot m'' \cdot \Delta H_c}{(1+4H/D)} \right) \quad (6)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama, m'' ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a taxa de queima, ΔH_c (kJ kg^{-1}) é o calor de combustão, H (m) é o comprimento da chama e D (m) é o diâmetro do tanque.

4º Passo - Determinação do fator de vista

O fator de vista (F_w) corresponde a razão entre o fluxo térmico recebido por um objeto e o emitido pela fonte. Este fator é dependente das dimensões da chama e da posição do corpo receptor em relação à fonte térmica (LABOVSKÁ; LABOVSKÝ, 2016). Assim, para cada ponto localizado a uma certa distância (X) a partir do centro do tanque, o fator de vista poderá ser obtido através da equação (7).

É importante notar que a equação 7 é um submodelo utilizado na Equação 1, bem como, a própria equação 7 irá requerer parâmetros de entrada que são descritos através de outros submodelos. Desse modo, as equações 7, 8, 9, 10 e 11, foram utilizadas conforme procedimento descrito em The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (2005), para determinar o fator de vista (F_w). No referido documento, tem-se algumas tabelas que facilitam a obtenção do fator de vista, no entanto, as tabelas citadas não contemplam todas as necessidades de projeto.

$$F_w = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (7)$$

Onde: F_w (adimensional) é o fator de vista, F_h (adimensional) é o fator de vista horizontal e F_v (adimensional) é o fator de vista vertical.

$$A = (Xr + 1)^2 + Hr^2 \quad (8)$$

Onde: A (adimensional) é parâmetro das equações 10 e 11 Hr (adimensional) é a razão entre o comprimento da chama e o raio do tanque (H/R), Xr (adimensional) é a relação entre a distância do alvo e o raio do tanque (X/R).

$$B = (Xr - 1)^2 + Hr^2 \quad (9)$$

Onde: B (adimensional) é parâmetro das equações 10 e 11, Xr (adimensional) é a razão entre a distância do alvo e o raio do tanque (X/R).

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left[\arctan \sqrt{\frac{Xr+1}{Xr-1}} - \left(\frac{Xr^2-1+Hr^2}{\sqrt{A+B}} \right) \arctan \sqrt{\frac{(Xr-1)A}{(Xr+1)B}} \right] \quad (10)$$

Onde: F_h (adimensional) é o fator de vista horizontal, X_r (adimensional) é a razão entre a distância do alvo e o raio do tanque (X/R). A e B (adimensionais) são parâmetros de entrada dos modelos descritos nas equações 10 e 11.

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{X_r} \arctan \left(\frac{Hr}{\sqrt{X_r^2 - 1}} \right) + \left(\frac{Hr(A - 2X_r)}{X_r \sqrt{AB}} \right) \arctan \sqrt{\frac{(X_r - 1)A}{(X_r + 1)B}} - \frac{Hr}{X_r} \arctan \sqrt{\frac{X_r - 1}{X_r + 1}} \right] \quad (11)$$

Onde: F_v (adimensional) é o fator de vista vertical, X_r (adimensional) é a razão entre a distância do alvo e o raio do tanque (X/R), H_r (adimensional) é a razão entre o comprimento da chama e o raio do tanque (H/R), A e B (adimensionais) são parâmetros de entrada dos modelos descritos nas equações 10 e 11.

5º Passo – Determinação da transmissividade atmosférica

A transmissividade atmosférica (τ_a) indica quanto da energia emitida pela fonte de calor chega ao corpo receptor, após parte desta energia ter sido absorvida principalmente pelo vapor de água e pelo gás carbônico presente na atmosfera (LABOVSKÁ; LABOVSKÝ, 2016). Seu valor é dependente do valor da pressão parcial do vapor da água (P_w) e da distância em que o corpo receptor encontra-se do corpo emissor da radiação térmica. Assim, a determinação da transmissividade atmosférica pode ser obtida através das equações 12 e 13, descritas em National Fire Protection Association (2002).

$$\tau_a = 2.02 (P_w \cdot X)^{-0.09} \quad (12)$$

Onde: τ_a (adimensional) é a transmissividade atmosférica, P_w (Pa) é a pressão parcial de vapor da água e X (m) é a distância entre a borda do tanque e o corpo receptor.

$$P_w = U \cdot P_{vs} \quad (13)$$

Onde: P_w (Pa) é a pressão parcial de vapor da água, U (%) é a umidade relativa do ar (%) e P_{vs} (Pa) é pressão de vapor de água saturado.

Para utilização da equação 13, a umidade relativa do ar (U) é um dos parâmetros de entrada. Assim, neste exemplo, U foi obtida através de dados meteorológicos da estação Vila Velha (Instituto Nacional de Meteorologia, 2020) e a pressão de vapor saturado (P_{vs}) foi obtida de Bóçon (2018).

6º Passo – Estimativa dos fluxos térmicos e medidas de gerenciamento de riscos

Conforme descrito na metodologia deste trabalho, os fluxos térmicos foram estimados para distâncias X_1 , X_2 , X_3 até X_{17} , localizadas, respectivamente, a 1 m, 2 m, 3 m, até 17 m a partir da borda do tanque. Através da análise da Figura 3, é possível verificar as distâncias aproximadas em que são gerados os fluxos térmicos de $12,5 \text{ kW m}^{-2}$, $4,7 \text{ kW m}^{-2}$, $1,4 \text{ kW m}^{-2}$, escolhidos para compor didaticamente esta diretriz.

Figura 3 – Intensidade dos fluxos térmicos emitidos por um tanque em chamas

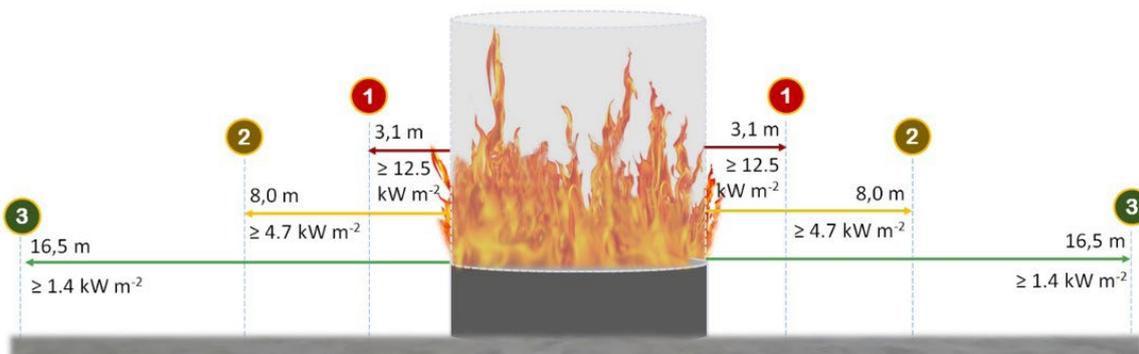


Fonte: Organizado pelos autores

Mas, mesmo com a possibilidade de verificação das distâncias aproximadas em que ocorrem os fluxos térmicos de interesse, é importante determinar com maior precisão os limites em que se manifestam tais fluxos. Neste sentido, os resultados da modelagem mostraram que as linhas de isofluxo de 3.1 m, 8.0 m e 16.5 m, correspondem respectivamente aos fluxos térmicos com intensidade de 12,5 kW m⁻², 4,7 kW m⁻² e 1,4 kW m⁻².

Cabe aqui reforçar que a escolha das linhas de isofluxo de interesse para a análise é dependente dos objetivos dos estudos a serem realizados. Para este trabalho didático, com vistas a facilitar a compreensão dos resultados, a Figura 4 ilustra as distâncias das linhas de isofluxo de 12,5 kW m⁻², 4,7 kW m⁻² e 1,4 kW m⁻² obtidas a partir da borda do tanque em chamas.

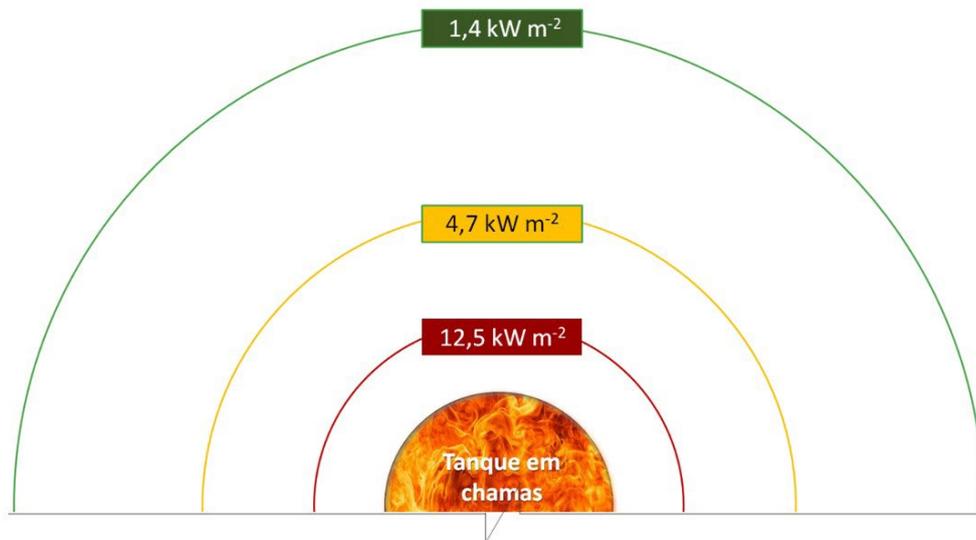
Figura 4 – Distâncias alcançadas pelas linhas de isofluxo a partir de um incêndio em tanque



Fonte: Organizado pelos autores

Após a estimativa dos fluxos térmicos de interesse, as linhas de isofluxo devem ser grafadas ao redor do tanque, para que se possa perceber, em planta baixa, as áreas abrangidas por estes fluxos. Assim, para sistemas circulares, tal como utilizado nesta orientação didática, as linhas de isofluxo devem acompanhar o formato geométrico das bordas do equipamento, ou seja, devem ser circulares – Figura 5.

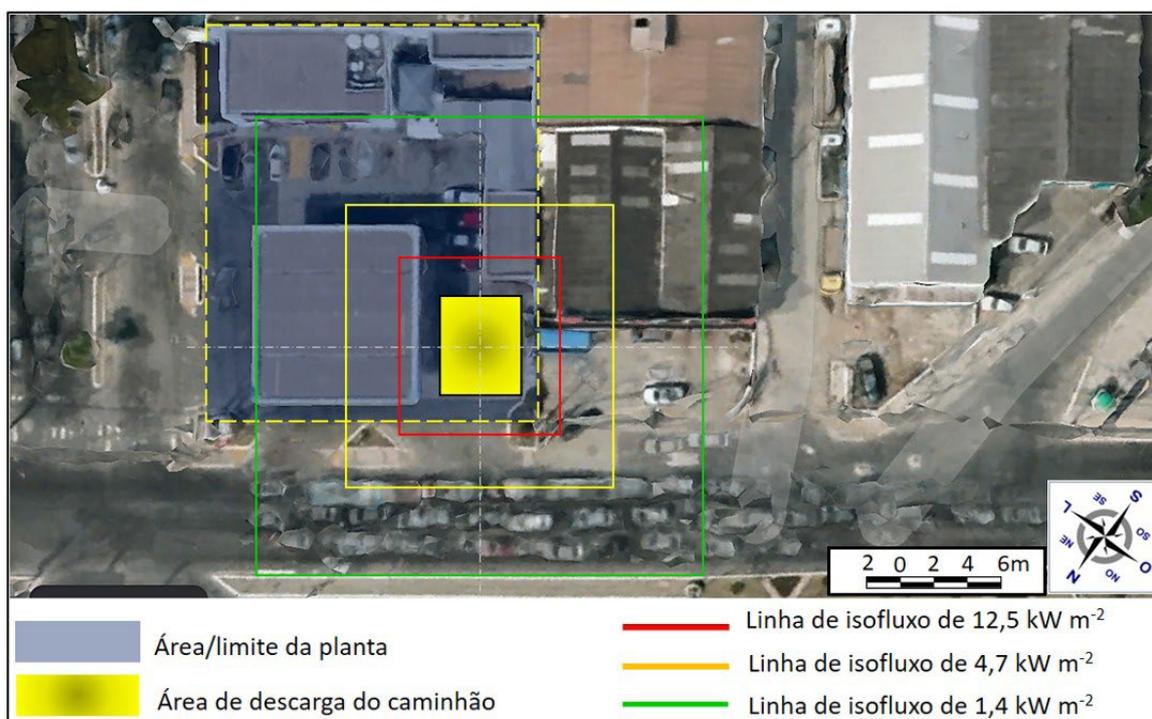
Figura 5 – Linhas de isofluxo traçadas em torno do costado do tanque em chamas



Fonte: Organizado pelos autores

Havendo contornos geometricamente diferentes, tais como locais onde a área de queima adquire outras formas, é adequado, quando possível, realizar a representação gráfica obedecendo aos contornos desta área. Assim, por exemplo, D'Ávila (2021a), ao realizar a estimativa de fluxos térmicos para um incêndio em poça decorrente do derramamento de combustível líquido em um posto revendedor de combustível, representou as linhas de isofluxo de forma retangular, seguindo os contornos da área de descarregamento de combustível líquido, delimitadas por cauletas metálicas, conforme demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Linhas de isofluxo térmico 12,5 kW m⁻², 4,7 kW m⁻² e 1,2 kW m⁻²



Fonte: D'Ávila (2021)

Retornando a este trabalho didático, tem-se que as figuras 4 e 5 representam esquematicamente o alcance das linhas de isofluxo, contudo, torna-se importante observar que em

projetos reais, fatores de segurança (FS) deverão ser aplicados. Nesse aspecto, por exemplo, National Fire Protection Association (2002) recomenda uso de $FS = 2$, para projetos utilizando o modelo Mudan, ou seja, as distâncias encontradas para cada linha de isofluxo precisariam ser duplicadas.

Ao utilizar os modelos matemáticos e realizar diversas simulações, será possível perceber que os cenários de incêndios em tanques são dinâmicos, sofrendo alterações à medida que mudam-se os parâmetros de entrada, por exemplo, tipo de substância armazenada, dados atmosféricos, etc. Nesse sentido, Alvarenga e Almeida (2014, p. 206) esclarecem que “não existe um critério único para definição da área de influência do empreendimento”, ou seja, a área de influência direta – onde ocorre os impactos diretos do evento analisado – pode adquirir diferentes contornos.

A determinação da intensidade dos fluxos térmicos, bem como sua localização/abrangência na planta de processo, conforme apresentado anteriormente, são medidas fundamentais para que, ainda na fase de projeto, os tanques possam ser melhor posicionados, considerando a redução de riscos para pessoas, estruturas e outros equipamentos, tais como outros tanques.

Não havendo possibilidade de realocação da posição dos tanques dentro da planta, por exemplo, torna-se possível considerar um redimensionamento das estruturas que poderão estar sujeitas aos efeitos térmicos da radiação. Contudo, não havendo opção por redimensionar estruturas, talvez a criação de barreiras capazes de reter parte do fluxo térmico podem ser uma solução de engenharia igualmente interessante.

A utilização de materiais construtivos com maior tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), instalação de sistemas de proteção/resfriamento dos objetos e estruturas mais vulneráveis, dentre outras possibilidades, estão no escopo das soluções de engenharia apresentados para gerenciar os riscos inerentes aos perigos de incêndio nas unidades de processo. Nesse sentido, Campos e Conceição (2006, p. 26) alertam para o fato de que:

A capacidade dos elementos construtivos de suportar a ação do incêndio denomina-se resistência ao fogo e refere-se ao tempo durante o qual conservam suas características funcionais de vedação e/ou estabilidade estrutural. O correto dimensionamento da resistência ao fogo dos elementos estruturais proporciona uma fuga segura aos ocupantes da edificação, garante um tempo mínimo de ação para as equipes de socorro e minimiza danos à própria edificação, à vizinhança, à infraestrutura pública e ao meio ambiente (CAMPOS; CONCEIÇÃO, 2006, p. 26, grifo nosso).

Nesse mesmo sentido, D’Ávila (2021a, p. 69) complementa que:

a preparação para o atendimento à emergência, seja ela ambiental ou ocupacional, é outro aspecto que se fortalece quando se dispõe de estudos de fluxos térmicos provenientes dos incêndios. A representação gráfica do posicionamento das linhas de isofluxo, [...], permite definir com mais clareza as estratégias de combate ao incêndio, reconhecer os níveis de proteção requeridos dos equipamentos de proteção individual e a localização dos equipamentos de extinção do fogo (D’ÁVILA, 2021a, p.69, grifo nosso)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diretriz apresentada nesse capítulo – “passo a passo” – é apenas uma metodologia resumida e generalista, não se propondo a definir um limite exato de segurança ou insegurança, pois o tema é complexo e existem muitas limitações. O entendimento dos autores deste capítulo

é que, devido à complexidade diversas vezes evidenciadas, os projetos nesta área devem ser realizados por profissionais de engenharia que sejam especialistas e experientes na área de segurança contra incêndio e pânico, devidamente registrados e habilitados para tal finalidade junto aos seus conselhos de classe – CREAs.

Mesmo para profissionais especialistas e experientes, face à abrangência e complexidade do tema, antes de se realizar qualquer projeto, é imprescindível que os diversos manuais, normas, leis e regulamentos, inclusive os não citados neste capítulo sejam consultados, pois, como dito no texto, assim como qualquer ciência, a segurança de processo, a segurança contra incêndio e os estudos voltados para a prevenção de acidentes ambientais estão em plena evolução. Ainda assim, apesar das limitações aqui colocadas, admite-se que este trabalho tem elevado potencial para contribuir com aqueles que desejam iniciar sua aprendizagem sobre o tema aqui discutido, bem como contribuir no avanço das pesquisas acadêmicas, que, de modo direto ou indireto, também é um dos objetivos deste trabalho.

Assim, conforme apresentado e discutido, foi verificado que os estudos dos fluxos térmicos compõem uma importante ferramenta de gerenciamento de riscos ocupacionais e ambientais, elevando a segurança do processo em plantas industriais e, de modo mais amplo, promovendo a prevenção de acidentes ambientais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). International Standard Atmosphere, 2020. Disponível em: <<https://www2.anac.gov.br/anacpedia/sig/tr1105.htm>>. Acesso em 20/08/2020.

ALVARENGA, M.I.N.; ALMEIDA, M.R.R. Avaliação de impactos ambientais. Sustentabilidade e engenharia. In: HORTA NOGUEIRA, L. A.; CAPAZ, R. S. Ciências ambientais para engenharia. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 193-220.

BOÇÓN, F. T. Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entrada de temperaturas, 2018. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC037/Prof_Bocon/Tabelas_Vapor/Saturacao_temperatura.pdf>. Acesso em: 12/03/2020.

BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J.G.L., MIERZWA, J.C., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N.; EIGER, S. Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável, 2 ed. São Paulo: Pearson, 2005.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, 02 set. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CAMPOS, A.T.; CONCEIÇÃO, A.L.S. Manual de segurança contra incêndio e pânico. Proteção passiva. Brasília, 2006. Disponível em: <https://www.cbm.df.gov.br/downloads/edocman/legislacoes/manuaisoperacionais/MANUAL_DE_SEGURANA_CONTRA_INCENDIO_E_PANICO_PROTECAO%20PASSIVA.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2021.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities. New York, New York, United States, 2003.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência, 2011. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.261-Risco-de-Acidente-de-Origem-Tecnológica-Método-para-decisão-e-termos-de-referência.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2022.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Incêndio em tanque de etanol no município de Paraíso, 2016. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2016/09/13/incendio-em-tanque-de-etanol-no-municipio-de-paraiso/>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução Nº 001: critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, 1986. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acesso em: 10 jan. 2022.

D'ÁVILA, W. P.S. A contribuição dos estudos de fluxos térmicos como ferramenta para prevenção da poluição atmosférica na circunvizinhança de plantas com armazenamento de combustíveis líquidos. Meio Ambiente (Brasil), v.3, n.2. p. 056-074, 2021a.

D'ÁVILA, W.P.S. Prevenção de acidentes ambientais: um levantamento dos cenários emergenciais gerados por vazamento de combustível líquido, com vistas à elaboração de planos de atendimento à emergência ambiental em rodovias. In: 18ª Mostra de Pós-Graduação, Santo Amaro, 2021b. Anais.. Disponível em: <<https://unisa-site-cdn.s3.amazonaws.com/uploads/2021/12/AnaisIC.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2022.

DUARTE, D.; SILVA, J. J. R.; PIRES, T. A.C.; OLIVEIRA, M. M. Gerenciamento dos riscos de incêndio. In: SEITO, A. I. *et al.* (Coord.). A Segurança Contra Incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008, cap. 25, p. 379-409.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Série histórica da estação meteorológica de Vila Velha (ES) no período de 01/10/2019 a 30/09/2020. 2020. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/GraficosDiarios/A634>>. Acesso em 10/10/2020.

LABOVSKÁ, Z.; LABOVSKÝ, J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires. Acta Chimica Slovaca. v.9, n. 2, p. 169- 179, 2016.

MCGRATTAN, K.B.; BAUM, H.R.; HAMINS A. Thermal Radiation from Large Pool Fires. 2000. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6546.pdf>>. Acesso em 15/08/2020.

MIAO, Z.; WHENHUA, S.; JI, W.; ZHEN, C. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. Procedia Engineering, 2014, 84: 565-577.

MUDAN, K.S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. Progress in Energy and Combustion Science, v. 10, n.1, p. 59-80, 1984.

MUÑOZ, M., ARNALDOS, J. CASAL, J.; PLANAS, E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. Combustion and Flame n.139, p. 263–277, 2004.

MUÑOZ, M., PLANAS, E., FERRERO, F. & CASAL, J. (2007). Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires. Journal of Hazardous Materials, n. 144, p. 725–729, 2007.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. Handbook of Fire Protection Engineering. Quincy, Massachusetts, United States, 2002.

PETROBRAS. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ - Gasolina. 2020. Disponível em: <<https://www.br.com.br/wcm/connect/24d79401-33bb-4e0d-ad03-cd8344b9b483/fispq-comb-gaso-auto-gasolina-comum-c.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IEZXg34>>. Acesso em 15/11/2020.

SANTOS, F.S.; LANDESMANN, A. Aplicação de modelo numérico para análise de estruturas de tanques de armazenamento de combustíveis em concreto armado expostas a incêndio. In: XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2013, Pirenópolis. Anais... Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/sitecilamce2013/cd/PDFS/CILAMCE2013-0378.PDF>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SEITO, A.I. Fundamentos de fogo e incêndio. In: SEITO, A.I. *et al.* (Coord.). A Segurança Contra Incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008, cap. 4, p. 35-54.

SOUZA, K. S. F.; RODRIGUES, A.J.S.; ROCHA, M.F.B.; SALES, R. O. S.; FARIAS, D. O. Análise quantitativa e qualitativa dos riscos de uma refinaria de petróleo. Ponta Grossa. Revista Gestão Industrial. v. 13, n. 2, p. 107-125, jun./ago. 2017.

THE NETHERLANDS ORGANIZATION OF APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH. Methods for the calculation of physical effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases) – Yellow Book. 2 ed. Den Haag, Nederland, 2005.

U.S. Nuclear Regulatory Commission. Fire Dynamics Tools (FDTs): Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. Washington, DC, United States, 2004.

VALLE, C.E., LAGE, H. Meio ambiente, acidentes, lições, soluções. São Paulo: Senac, 2004.

VAZ JÚNIOR, C. A. 2015. Modelagem de incêndio em poça. Disponível em: <<http://www.eq.ufrj.br/docentes/cavazjunior/pooli.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

ZÁRATE, L.; ARNALDOS, J.; CASAL, J. Establishing safety distances for wildland fires. Fire Safety Journal, n. 43, p. 565–575, 2008.