

Proposta de cálculo da radiação térmica utilizando um software para seleção de equipamentos a serem resfriados no caso de incêndio em parques de armazenamento de GLP

Proposal thermal radiation calculation using software to select equipment to be cooled in case of fire in LPG storage parks

Propuesta de cálculo de radiación térmica mediante software para seleccionar equipos que se enfriarán en caso de incendio en parques de almacenamiento de GLP

Recebido: 22/02/2020 | Revisado: 02/03/2020 | Aceito: 11/03/2020 | Publicado: 19/03/2020

Rafaela Maria de Sá Telles Martins

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9399-3907>

Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil

E-mail: rsatelles29@gmail.com

Regina Ferreira Vianna

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5835-4827>

Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil

E-mail: reginafv@ufba.br

Resumo

Industrialmente, o gás liquefeito de petróleo (GLP) é armazenado em vasos esféricos ou cilíndricos, que seguem normas rigorosas na sua construção para se evitar grandes acidentes, que podem ser causados por incêndios e explosões em equipamentos vizinhos, e tem como principal propagador a transferência de calor por radiação térmica. Caso ocorra algum acidente, para que sejam evitados maiores danos, um sistema de combate a incêndio deve ser instalado. No dimensionamento destes sistemas são seguidas normas e legislações, que indicam critérios prescritivos (distâncias fixas que independem das condições do parque de armazenamento) para seleção dos equipamentos a serem resfriados em caso de incêndio. Com objetivo de se propor o cálculo do impacto da radiação térmica através de um *software* e a partir disto selecionar os equipamentos a serem resfriados em caso de incêndio em um parque de armazenamento de GLP, foi elaborado neste trabalho um estudo de caso, comparando-se o indicado nas normas brasileiras e nas internacionais e o encontrado através da simulação. Utilizou-se o método de pesquisa quantitativo, do tipo descritivo e analítico, como técnicas de aquisição de dados, pesquisa bibliográfica, análise de estudo de caso e ferramentas

computacionais, tendo-se como materiais um computador e o *software* ALOHA. Simulações para diversas condições climáticas e de enchimento da esfera foram realizadas, encontrando-se como resultados raios inferiores ao proposto nas normas brasileiras, e, portanto, menos conservativos. A simulação do raio de alcance da radiação térmica, torna a avaliação mais fidedigna com as condições as quais estão expostas as esferas de GLP, auxiliando no mais correto dimensionamento da rede de combate a incêndio. Logo, conclui-se que as normas brasileiras são mais conservadoras e obsoletas perante os avanços da Engenharia de Incêndio.

Palavras-chave: Radiação Térmica; Parque de Armazenamento de GLP; Sistema de Combate a Incêndio.

Abstract

Industrially, liquefied petroleum gas (LPG) is stored in spherical or cylindrical vessels, which follow strict standards in their construction in order to avoid major accidents, that may be caused by fires and explosions in neighboring equipment, and its main propagator is heat transfer by thermal radiation. If an accident occurs, to prevent further damage, a fire fighting system must be installed. When dimensioning these systems, standards and requirements are followed which indicate prescriptive criteria (fixed distances independent from the storage park conditions) for the selection of equipment to be cooled in case of fire. In order to propose the calculation of thermal radiation impact by using a software and subsequent selection of equipment to be cooled in case of fire in a LPG storage park, a case study was elaborated in this present paper, comparing the indicated in Brazilian and international standards and what was found through simulation. The quantitative research method, descriptive and analytical, was used as data acquisition techniques, bibliographic research, case study analysis and computational tools, using a computer and the ALOHA software as materials. Simulations for different sphere filling and climatic conditions were accomplished, with results that are lower than those proposed in Brazilian standards, and therefore less conservative. The simulation of the thermal radiation radius makes the assessment more reliable considering the conditions to which the LPG spheres are exposed, helping in the most correct dimensioning of the fire fighting network. Therefore, it is concluded that Brazilian standards are more conservative and obsolete in view of the advances in Fire Engineering.

Keywords: Thermal Radiation; LPG Storage Park; Firefighting System.

Resumen

Industrialmente, el gas licuado de petróleo (GLP) se almacena en recipientes esféricos o cilíndricos, que siguen normas estrictas en su construcción para evitar accidentes graves, que pueden ser causados por

incendios y explosiones en equipos vecinos, y su propagador principal es la transferencia de calor por radiación térmica. En caso de accidente, para evitar daños mayores, se debe instalar un sistema contra incendios. Al dimensionar estos sistemas, se siguen las normas y los requisitos, que indican criterios preceptivos (distancias fijas que no dependen de las condiciones del parque de almacenamiento) para seleccionar el equipo que se enfría en caso de incendio. Con el fin de proponer el cálculo del impacto de la radiación térmica utilizando un software y de esto seleccionar el equipo a enfriar en caso de incendio en un parque de almacenamiento de GLP, un estudio de caso fue preparado en este trabajo, comparándose lo que se indica en las normas brasileñas e internacionales y lo que se encuentra a través de la simulación. El método de investigación cuantitativa, descriptivo y analítico, se utilizó como técnicas de adquisición de datos, investigación bibliográfica, análisis de casos de estudio y herramientas computacionales, utilizando una computadora y el software ALOHA como materiales. Se realizaron simulaciones para diferentes condiciones climáticas y de llenado de esferas, con resultados que son más bajos que los propuestos en los estándares brasileños y, por lo tanto, menos conservadores. La simulación del radio de radiación térmica hace que la evaluación sea más confiable con las condiciones a las que están expuestas las esferas de GLP, ayudando en el dimensionamiento más correcto de la red contra incendios. Por lo tanto, se concluye que los estándares brasileños son más conservadores y obsoletos en vista de los avances en ingeniería contra incendios.

Palabras clave: Radiación Térmica; Parques de Almacenamiento de GLP; Sistema Contra Incêndio.

1. Introdução

O gás liquefeito de petróleo (GLP) é armazenado industrialmente em vasos de formato cilíndrico ou esférico, distribuídos nos chamados parques de armazenamento. A especificação e a construção dos cilindros e esferas, bem como as tubulações que transportam o GLP, seguem normas rígidas a fim de se evitar acidentes, como incêndios e explosões (Raj, 2005).

Segundo Fontenelle (2012) incêndios ou explosões são prováveis de ocorrer quando vapores ou líquidos são desprendidos em locais nos quais possa existir uma fonte de ignição, ou onde é introduzida uma fonte de ignição em uma área que contenha atmosfera inflamável.

A ocorrência de incêndio em uma instalação industrial contribui para degradação das propriedades mecânicas das estruturas metálicas, ocasionando perda da resistência estrutural e possível falha do equipamento, estes perigos tem como principal causador a transferência de calor por radiação térmica. Acidentes industriais representam um fator prejudicial em muitos

setores constituindo uma ameaça incessante de perda humana, danos ao equipamento e impacto ambiental, além de poder custar milhões de dólares (Chettouh et al., 2018)

Segundo a PETROBRAS, quando um incêndio ocorre em uma esfera de pressão que armazena GLP, ficando o equipamento exposto a chamas, é necessário resfriá-la de maneira que se minimize a ação do fogo e que a pressão interna não aumente a níveis perigosos, atingindo a chamada pressão de ruptura do material (como citado por Santos, 2007, p. 20); assim, um sistema de combate a incêndio deve ser instalado seguindo legislações, normas e procedimentos.

Atualmente as soluções e medidas de segurança contra incêndio, tradicionais e mundialmente reconhecidas, baseiam-se em métodos prescritivos, ou seja, são exigidos cumprimentos de medidas específicas para instalações baseados em critérios pré-estabelecidos, mesmo que, muitas vezes não seja esclarecido como às metas de segurança esperadas são atingidas apenas com o cumprimento de determinado requisito (Mattedi, 2005; Tavares, 2009). Como dito por Lundin (2004) e Mattedi (2005), soluções prescritivas fazem parte da reunião de conhecimentos adquiridos após anos de tradição e experiência em construções. No entanto, uma mudança no panorama das normas prescritivas é vista em países desenvolvidos, como Inglaterra e Japão, desde a década de 70. Nestes países os estudos de risco e vulnerabilidade estão em estágio avançado da Engenharia de Incêndio, nos quais projetos do tipo performance-based design (PBD) estão cada vez mais consolidados.

No Brasil, a normalização de segurança contra incêndio foi introduzida tardiamente; registrando grande atraso e defasagem em relação a países como Estados Unidos, Canadá, Japão e França (Claret & Mattedi, 2011), não possuindo até o momento uma legislação nacional contundente sobre sistemas de proteção e combate a incêndio, seja para instalações prediais (comerciais e residências) ou instalações industriais.

Estudos acerca de sistemas de combate a incêndio industriais são menos explorados que para edificações residenciais e comerciais, visto sua complexidade, uma vez que se tratam de instalações nas quais são produzidos e armazenados grandes volumes e variedades de substâncias combustíveis, inflamáveis e até mesmo tóxicas. Tabaczinski et al. (2017) apresentam um resumo de 16 estudos sobre segurança contra incêndios no Brasil, dos quais apenas 2 referem-se a áreas industriais, sendo ambos relacionados a tanques de combustíveis. Já Rodrigues (2016) apresenta um estudo comparativo entre as regulamentações técnicas sobre Segurança Contra Incêndio e Pânico (SCIP) dos estados brasileiros, tendo como objetivo

principal a avaliação da viabilidade da elaboração de uma regulamentação técnica nacional, no entanto no estudo não são analisadas as regulamentações técnicas associadas a área industrial.

Em países como China, Índia e Equador, estudiosos como Chavéz (2015), Islam e Sultana (2017) e Lang et al. (2011) realizaram comparações entre as legislações locais e as legislações de órgãos de referência internacionais, como a National Fire Protection Association (NFPA) e American Petroleum Institute (API), e concluíram que suas normas apresentam lacunas no que tange a eficiência dos parâmetros de projeto previstos, comprovando a precariedade dos estudos de Engenharia de Incêndio em seus países.

Para indústrias de petróleo e gás as normas estabelecidas pelos governos baseiam-se geralmente em práticas da Indústria de Processo. Especificamente para instalações com GLP é comumente utilizada internacionalmente a API 2510 (2011) e API 2510A (2015), que estabelecem distâncias mínimas para espaçamentos de vasos baseado em acidentes ocorridos (Murthy & Serikova, 2016). Estas normas também indicam os métodos de proteção e combate a incêndio a serem utilizados.

Para sistemas de combate a incêndio em parques de armazenamento de GLP, são utilizadas, no Brasil, a norma N-1203 (2013) da PETROBRAS e a Instrução Técnica (IT) n° 28 de Corpos de Bombeiros Militares (CBM) brasileiros, como Goiás, Paraná e Bahia, fundamentalmente prescritivas, que divergem em alguns quesitos.

Para seleção dos equipamentos a serem resfriados em um parque de armazenamento de GLP, a API indica que seja feita a seleção a partir de uma análise do fluxo de radiação térmica gerada pelo incêndio, enquanto as normas brasileiras propõem apenas a seleção através de uma distância pré-estabelecida.

Tendo em vista que os trabalhos de pesquisa voltados para o estudo de regulamentação em sistemas de combate a incêndio no Brasil, ainda são incipientes em relação a instalações industriais, este trabalho teve como principal objetivo o estudo do impacto do fluxo de radiação térmica, com a utilização de um simulador, para várias condições meteorológicas em uma instalação de armazenamento de GLP, comparando-se o indicado nas normas brasileiras e nas normas internacionais, para seleção das esferas a serem resfriadas em caso de sinistro em uma delas. Para a análise do fluxo de radiação térmica será utilizado o simulador gratuito ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*), que é um dos quatro programas do CAMEO (*Computer Aided Management of Emergency Operations*), desenvolvido pela agência

americana *Environmental Protection Agency* – EPA. A ferramenta é um *software* de modelagem disponibilizada de forma gratuita para auxiliar profissionais na obtenção de informações importantes na área de segurança, sendo largamente utilizado em pesquisas em todo o mundo (Chettouh et al., 2018, Mišić et al., 2018; Perez, 2016; Tomasoni, 2010).

2. Revisão bibliográfica

2.1 Fluxo de radiação térmica

A energia oriunda da radiação térmica (irradiada pelo incêndio) por meio de ondas eletromagnéticas é o principal responsável pelo comprometimento da estrutura dos equipamentos e estruturas próximas ao ponto no qual iniciou-se o vazamento (Seito et al., 2008). O conhecimento do fluxo de radiação térmica em uma instalação é indispensável para um projeto conciso do sistema de combate a incêndio.

Os efeitos dos incêndios e explosões relacionados à energia térmica e a sobrepressão são largamente estudados, sendo estimados por várias instituições de pesquisa o efeito nas pessoas, estruturas e meio ambiente. Normas nacionais, como N 01 (2017) do CEPRAM, Conselho Estadual de Meio Ambiente do Estado da Bahia; e internacionais como NFPA 59A (2016), API 521 (2014), 49 CFR (2018) e EN 1473 (2016) estabelecem parâmetros sobre o fluxo de radiação térmica prejudiciais a pessoas, ambiente e estruturas (Yi, Feng e Wang, 2019).

Para o cálculo do fluxo de radiação térmica foram desenvolvidos vários modelos e equações, no modelo proposto por Carter, por exemplo, a radiação é determinada por múltiplos pontos de radiação equidistantes ao longo do eixo da chama, considerando que cada ponto está emitindo radiação independente um do outro e com o mesmo poder de radiação; já o modelo de Whazan, que é similar ao de Carter, propõem cinco pontos de origem de radiação ao longo da chama (Seito et al., 2008). Para auxiliar na complexidade dos cálculos de radiação, foram criados diversos programas computacionais que calculam o fluxo da radiação térmica (Zio & Aven, 2013), muitos deles são pagos ou são de uso exclusivo da empresa que o criou, como o PHSAT, outros são gratuitos, como o ALOHA, que, nos Estados Unidos e em muitos países do mundo, é largamente utilizada por indústrias, escolas, equipes de corpos de bombeiros, organizações ambientais, e uma gama de organizações governamentais (Mišić et al., 2018, Perez, 2016, Tomasoni et al., 2010).

Como indicado por Chamberlain, o ALOHA utiliza um modelo empírico de chama sólida desenvolvido pela *Shell Research* (como citado por Jones et al., 2013), nos cálculos de

radiação. A energia térmica incidente em um alvo distante é um produto da emissividade da superfície da chama, do fator de visão geométrica e da transmissividade da radiação térmica na atmosfera. Os métodos e equações utilizadas pelo programa podem ser encontrados facilmente na plataforma do CAMEO na internet, que estão disponibilizados no manual técnico.

Zio e Aven (2013) e Chettouh et al. (2018) indicaram que com o simulador é possível simular várias origens para o vazamento, como rupturas de linhas, e colapsos no teto do tanque, para se obter os resultados de conseqüências, como a concentração a uma determinada distância.

O ALOHA possui em seu banco de dados características de diversas substâncias químicas, e a partir de informações disponibilizadas pelo usuário, no momento da simulação, a respeito das condições atmosféricas e circunstâncias do evento é gerado um gráfico com regiões identificando as áreas de risco como: toxicidade, radiação térmica, inflamabilidade e sobrepressão (Perez, 2016).

Para determinar o raio de impacto da radiação térmica que causa prejuízo a equipamentos e pessoas, através do simulador ALOHA, deve-se seguir a seguinte metodologia:

- a) Seleção da localização da instalação.
- b) Seleção do tipo da edificação e da vizinhança.
- c) Seleção do produto químico (o ALOHA não trabalha com misturas).
- d) Indicação das condições climáticas (velocidade e direção do vento, nebulosidade, temperatura do ar, umidade). Para este tópico, é indicado que sejam feitas várias análises considerando possibilidades distintas de velocidade do vento, umidade e temperatura atmosférica).
- e) Seleção de como o produto encontra-se armazenado na instalação (linha, tanque, etc.).
- f) Para o caso de seleção do tanque, selecionar o formato (cilíndrico ou esférico) e indicar as dimensões.
- g) Indicar o estado físico do produto e a temperatura de armazenamento.
- h) Indicar o volume do produto no tanque.
- i) Selecionar o tipo de falha no tanque. Sendo descritas as opções:
- j) *Leaking tank, chemical is not burning as it escapes into the atmosphere* (Vazamento do tanque, o produto químico não está queimando, pois escapa para a atmosfera);
- k) *Leaking tank, chemical is burning as a jet fire* (Vazamento do tanque, o produto químico está queimando como um jato de fogo);
- l) *BLEVE, tank explodes and chemical burns in a fireball* – (BLEVE, explosão do tanque e o produto químico queimando como uma bola).

Após finalização destes passos, o programa gera um gráfico com os raios de atuação dos fluxos de radiação térmica selecionados e uma tela com todos os dados inseridos e os resultados.

O fluxo de radiação térmica gerado por um incêndio é influenciado por diversos fatores, como: o tipo de substância, o volume armazenado (em linha ou equipamento), a condição climática, dimensões do vazamento (rompimento do equipamento, rompimento de linha), fontes de ignição, entre outros (Seito et al., 2008). Para a avaliação do raio de ação do fluxo de radiação térmica devem ser utilizados os dados meteorológicos locais, sendo os principais: velocidade do vento, estabilidade atmosférica, e direção do vento (Marx & Cornwell, 2009). Estas três variáveis afetam o tamanho e a extensão das zonas de impacto, além da forma como os impactos são mapeados na área ao redor de cada ponto de liberação. Através de técnicas robustas de mapeamento de risco é demonstrado que o número de combinações entre velocidade, estabilidade e direção dos ventos, influenciam significativamente os contornos de risco (Marx & Cornwell, 2009).

No Brasil, as informações climáticas da região em estudo podem ser extraídas do endereço virtual do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), no qual existe o BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa), que é o banco de dados para apoiar as atividades de ensino e pesquisa e outras aplicações em meteorologia, hidrologia, recursos hídricos, saúde pública, meio ambiente, etc. Em alguns estudos podem também ser utilizados dados meteorológicos de cidades vizinhas, sem prejuízo na análise a ser realizada.

2.2 Projeto de sistemas de combate a incêndio

Para o projeto do sistema de combate a incêndio em uma instalação de armazenamento de produtos químicos, como terminais marítimos, plantas de processamento de gás natural, fábricas, instalações petroquímicas e parques de tanques; deve ser conhecido o fluido armazenado e quais as condições operacionais de transporte e armazenamento. O layout da instalação é um fator imprescindível, pois determinará o risco de exposição dos equipamentos vizinhos. Para cada tipo de fluido armazenado existem normas e legislações específicas, sendo papel do engenheiro a seleção da mais adequada para instalação. A partir da seleção da(s) norma(s), são extraídos os parâmetros (equações, taxas, etc.) e selecionados os itens necessários para o dimensionamento do sistema de combate a incêndio, sendo para isso utilizados simuladores ou planilhas de cálculo.

Para seleção dos equipamentos a serem protegidos por sistema de resfriamento, em um parque de armazenamento de GLP, é proposto na norma N-1203 (2013) da PETROBRAS e a na Instrução Técnica (IT) nº 28 de Corpos de Bombeiros Militares (CBM), que sejam resfriadas as esferas que estiverem distantes em até 30 m (costado a costado) de outra esfera ou vaso em

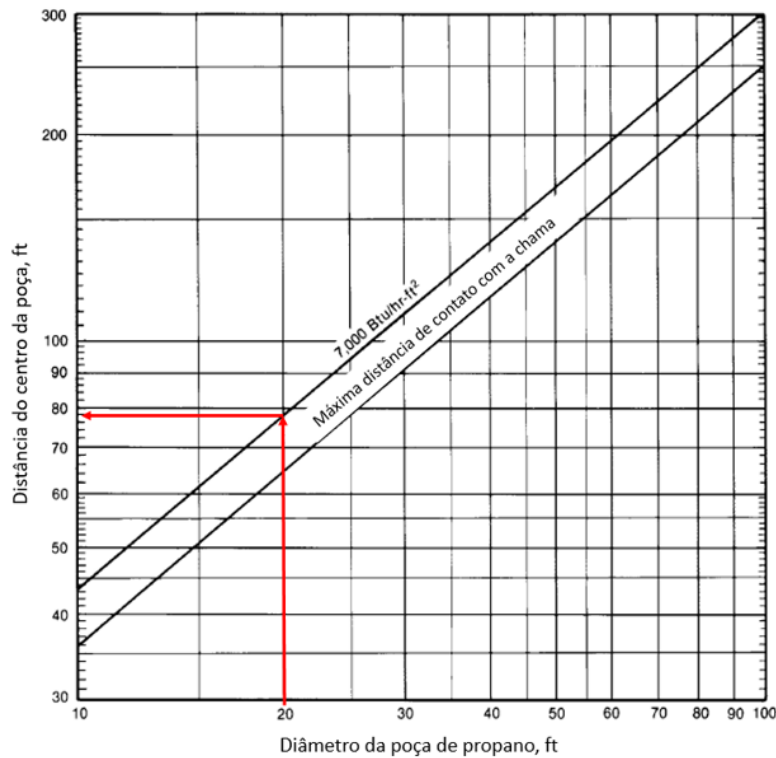
chamas. Já a API 2510A (2015) propõem que seja elaborada uma análise de risco da instalação, para que possam ser previstos os casos críticos de incêndio, bem como no caso de uma esfera ou vaso em chamas quais vasos adjacentes devem ser resfriados, sendo indicado que os vasos que recebam mais de 7000 btu/h.ft² (22 kW/m²) devam ser resfriados para evitar o superaquecimento e fragilidade do metal.

Uma análise sobre radiação térmica foi realizada por Ramsden e Abusaieda (2017), baseado no Código do Modelo de Prática de Segurança IP, Parte 19, o qual sugere que, caso seja calculado o fluxo de calor por radiação e este for superior a 8 kW/m² em um tanque adjacente; deve existir água de resfriamento disponível (por sistemas móveis, por exemplo), e que se o fluxo de radiação for superior a 32 kW/m² deve ser instalado sistema fixo de resfriamento com ação imediata. O TNO *Green Book* (1992) indica que, para superfícies, metálicas a intensidade crítica do fluxo de radiação térmica é igual a 25 kW/m², o que conduz a deformações nos elementos estruturais.

Para o caso de incêndio em poça a API 2510 A (2015) propõe, de forma conservativa, a utilização da Figura 1, na qual, através da identificação do diâmetro da poça de propano encontra-se a distância entre o centro da poça e os equipamentos que precisam ser resfriados por estarem submetidos a um fluxo de radiação térmica igual ou superior a 22 kW/m². Como exemplo, tem-se que, caso o diâmetro da poça de propano seja de 20 pés (6,1 m), a distância entre o equipamento e o centro da poça na qual torna-se necessário o resfriamento do equipamento é de 78 pés (23,8 m). Para este caso, os 30 m indicado pelas normas brasileiras é mais conservativo.

O emprego da Figura 1 possui algumas restrições, podendo causar distorções, uma vez que foi elaborado considerando, calor radiante de um incêndio de poça de propano exposto a um vento de 20 milhas/h (8,94 m/s) soprando diretamente sob o vaso. Estas considerações são mais conservativas, uma vez que assumem o vento soprando diretamente ao vaso e são utilizados dados do propano (produto que produz chamas de fogo mais radiante que fogos de outros hidrocarbonetos mais pesados), a utilização do propano como composto representativo do GLP também é indicado pela CETESB (2011).

Figura1. Fluxo de radiação térmica de incêndio em poça



Fonte: Adaptado, API 2510 A (2015)

A utilização do fluxo de radiação igual a 22 kW/m^2 , proposto pela API 2510 A (2015), para seleção dos equipamentos a serem protegidos por sistema de resfriamento, mostra-se mais conservativo que o indicado por Ramsden e Abusaieda (2017), porém está em consonância com o determinado por normas e códigos como NFPA 59A (2016), API 521 (2014), 49 CFR (2018) e EN 1473 (2016), TNO *Green Book* (1992), como citado por Yi et al. (2019), nos quais são indicados o fluxo de radiação térmica danoso a superfícies metálicas. Assim, este dado mostra-se satisfatório para seleção dos equipamentos a serem resfriados em um parque de armazenamento.

3. Metodologia da pesquisa e materiais

No desenvolvimento desse trabalho utilizou-se método de pesquisa quantitativo, do tipo descritivo e analítico. Como técnicas de aquisição de dados, pesquisa bibliográfica, análise de estudo de caso e ferramentas computacionais, a saber: simulador ALOHA para análise da radiação térmica e posterior seleção dos equipamentos a serem resfriados.

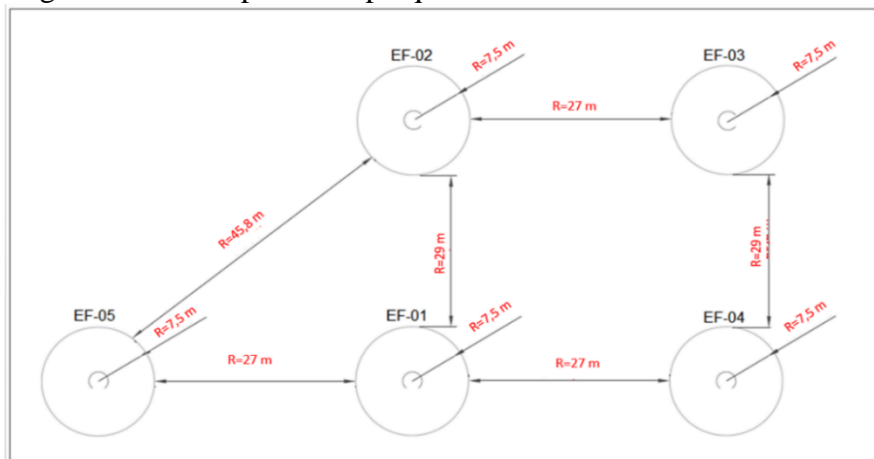
Os materiais necessários para a condução do trabalho foram um computador pessoal do tipo *notebook*, com processador intel CORE i5 2.20 GHz 2201 Mhz com 4GB de RAM, além do *software* ALOHA.

4. Estudo de caso: parque de armazenamento de esferas de GLP

Neste tópico é apresentado o estudo de caso, referente a um parque de esferas de armazenamento de GLP hipotético, a ser instalado em um novo terminal, na região do Polo Petroquímico de Camaçari na Bahia, região de grande desenvolvimento industrial do Brasil, com a finalidade de estabelecer quais equipamentos deverão ser resfriados em caso de incêndio em uma das esferas, considerando-se o raio de ação do fluxo de radiação térmica de 22 kW/m^2 , conforme proposto na API 2510 A (2015) e a distância de 30 m (costado a costado) estabelecida nas normas brasileiras.

O armazenamento em esferas é justificado economicamente quando são armazenados grandes volumes de GLP, assim, normalmente em refinarias ou terminais de abastecimento são construídos parques de armazenamento com algumas esferas. Neste estudo o parque é composto por 5 esferas (EF-01, EF-02, EF-03, EF-04 e EF-05), com 15m de diâmetro, cuja disposição em vista superior pode ser observada na Figura 2.

Figura 2. Vista superior do parque de armazenamento das esferas de GLP



A utilização de um parque com 5 esferas possibilita que sejam feitas análises contundentes sobe a luz das normas, uma vez que o impacto proposto pelo incêndio é nas esferas vizinhas, tornando-se assim um núcleo básico satisfatório para a análise que será elaborada.

Para avaliação do raio de ação do fluxo de radiação térmica de 22 kW/m² será utilizado o software ALOHA versão 5.4.7, em substituição a utilização da Figura 1, proposta na API 2510 A (2015), uma vez que o uso desta figura é restrito a incêndio de poça e condição climática única, não sendo utilizados dados reais do local analisado.

Os dados meteorológicos necessários para a análise da radiação térmica foram extraídos do banco de dados do INMET, utilizando-se as informações da cidade de Salvador, pois não existem dados da cidade de Camaçari. Esta analogia mostra-se satisfatória, uma vez que se tratam de cidades próximas e que estão localizadas na costa da Baía de Todos os Santos, possuindo pouca ou nenhuma divergência no que tange as condições meteorológicas. Os dados coletados compreendem o período entre 01/01/2014 a 31/05/2019 e estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1. Condições atmosféricas de Salvador: período entre 01/01/2014 e 01/06/2019 extraídos do INMET

Condição climática	Dado
Temperatura ambiente média mais baixa (°C)	19,7
Temperatura ambiente média mais alta (°C)	32,8
Temperatura ambiente média (°C)	25,5
Umidade relativa do ar média mais baixa (%)	65,5
Umidade relativa do ar média mais alta (%)	99,5
Umidade relativa do ar média (%)	82,2
Velocidade do vento média mais alta (m/s)	7,1
Velocidade do vento média (m/s)	0,82
Direção predominante do vento	Este (E)

Para a análise do efeito da radiação térmica na planta foi considerado o incêndio de propano, substância representativa neste tipo de análise para o GLP, conforme indicado pela CETESB (2011). O incêndio terá como causa o vazamento da válvula da linha de drenagem de 2” que se encontra na parte inferior da esfera EF-01, este incidente foi selecionado, uma vez que foi o causador do grande acidente em Feyzen, na França (Kletz, 2013).

Pesquisas apontam que variações nas condições climáticas da instalação e nível de enchimento dos equipamentos impactam no fluxo de radiação térmica (Fontenelle, 2012; Marx & Cornwell, 2009; Atkinson et al., 2017; Seito et al., 2008; Raj, 2005). Assim são propostas simulações com cenários distintos para: temperatura ambiente, umidade e velocidade do vento, bem como enchimento da esfera, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2. Cenários climáticos e de enchimento das esferas para o parque de armazenamento de GLP

Cenário	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Velocidade do vento (m/s)	Enchimento da esfera com GLP (%)
1	19,7	65,5	1	20
2	19,7	65,5	1	80
3	19,7	65,5	7,1	20
4	19,7	65,5	7,1	80
5	19,7	99,5	1	20
6	19,7	99,5	1	80
7	19,7	99,5	7,1	20
8	19,7	99,5	7,1	80
9	32,8	65,5	1	20
10	32,8	65,5	1	80
11	32,8	65,5	7,1	20
12	32,8	65,5	7,1	80
13	32,8	99,5	1	20
14	32,8	99,5	1	80
15	32,8	99,5	7,1	20
16	32,8	99,5	7,1	80

5. Resultados e discussões

Com a utilização do ALOHA foi possível simular os 16 cenários propostos com diferentes condições climáticas e de enchimento da esfera, obtendo-se o maior raio de ação para o fluxo de radiação térmica igual a 22 kW/m² nos cenários 11, 12 e 16, cujo raio encontrado foi de 22 m, conforme indicado nas Figuras 3, 4, e 5. Todos os resultados do simulador referentes aos 16 cenários simulados encontram-se na Tabela 3.

Figura 3. Gráfico do simulador - Cenário 11

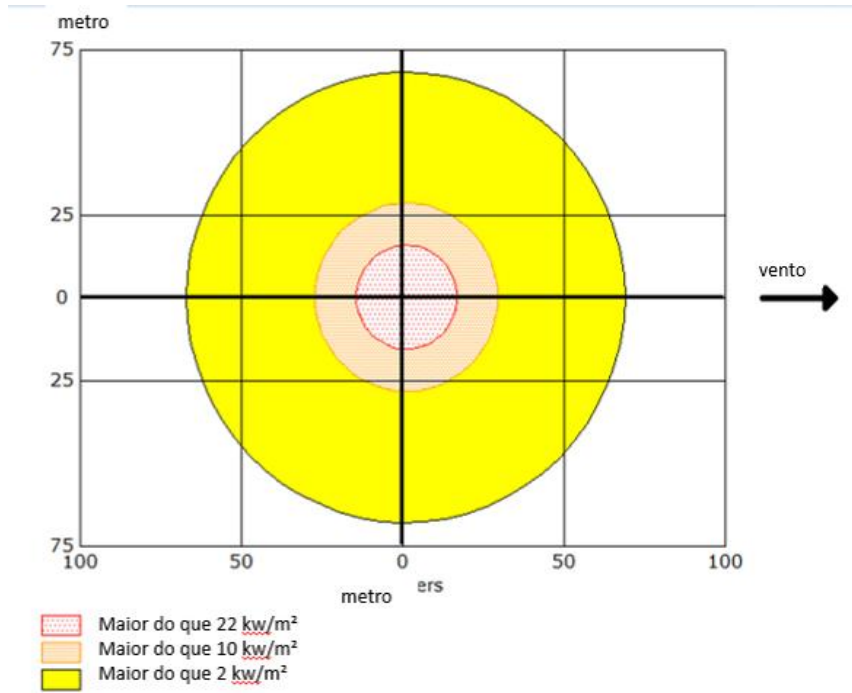


Figura 4. Gráfico do simulador - Cenário 12

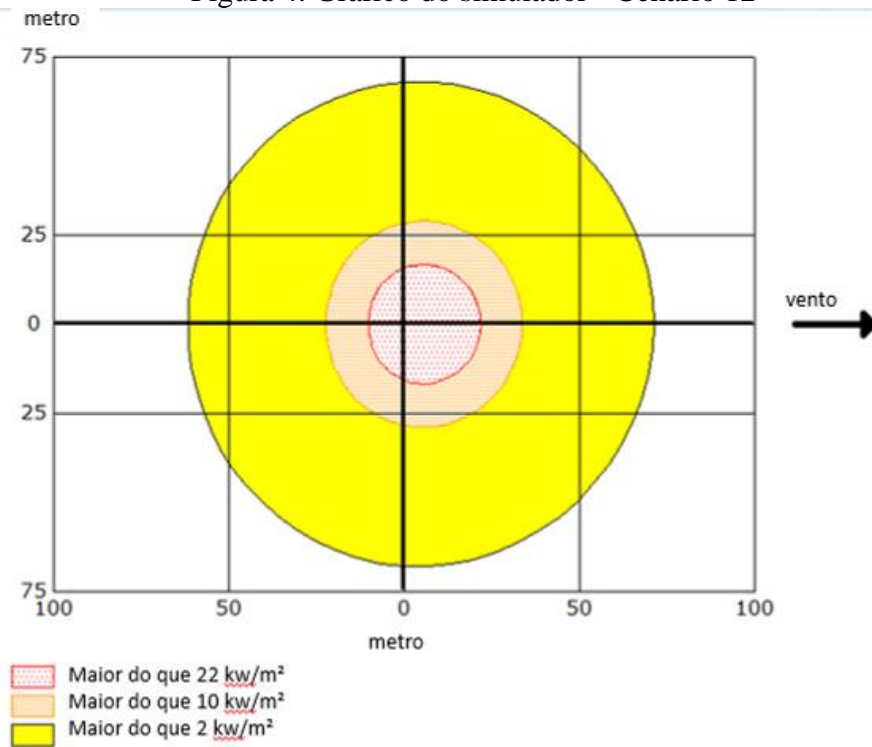


Figura 5. Gráfico do simulador - Cenário 16

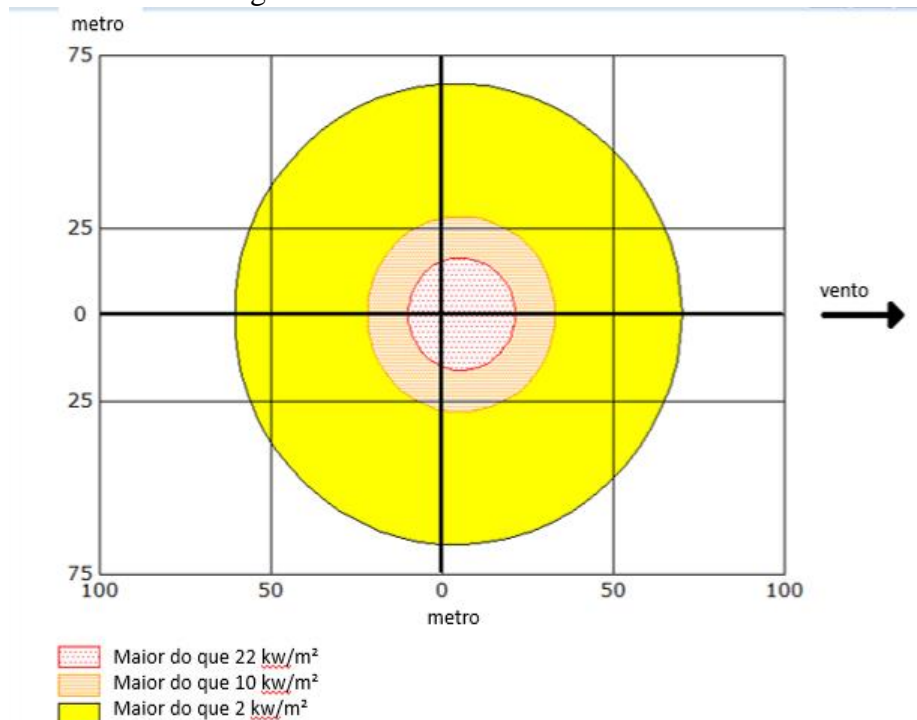


Tabela 3. Resultado do raio de ação do fluxo de radiação térmica para os cenários climáticos e de enchimento da esfera

Cenário	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Velocidade do vento (m/s)	Enchimento da esfera com GLP (%)	Raio de ação (m) para o fluxo radiação térmica de 22 kW/m^2
1	19,7	65	1	20	16
2	19,7	65	1	80	16
3	19,7	65	7,1	20	21
4	19,7	65	7,1	80	21
5	19,7	99	1	20	15
6	19,7	99	1	80	15
7	19,7	99	7,1	20	20
8	19,7	99	7,1	80	20
9	32,8	65	1	20	17
10	32,8	65	1	80	17
11	32,8	65	7,1	20	22
12	32,8	65	7,1	80	22
13	32,8	99	1	20	17
14	32,8	99	1	80	17
15	32,8	99	7,1	20	21
16	32,8	99	7,1	80	22

Observando-se a Tabela 3, pode-se notar que para o caso proposto de vazamento na válvula da linha de drenagem de 2" de uma das esferas com 15 m de diâmetro, no qual o vazamento se encontra na parte inferior da mesma, a variação no grau de enchimento (20% e 80%) não causa impacto no raio de ação dos fluxos de radiação térmica para a maioria dos casos observados, menos para os casos 15 e 16 nos quais o raio encontrado foi 21 m e 22 m respectivamente, o que demonstra que para situações com maior temperatura, umidade do ar e velocidade do vento o enchimento do equipamento impacta no raio de ação do fluxo de radiação térmica.

A variação da velocidade do vento (1 m/s e 7,1 m/s) impacta no raio de ação do fluxo de radiação térmica de 22 kW/m², para todos os casos analisados, demonstrando que maiores velocidades acarretam um maior raio de ação. A variação de umidade (65% e 99%) também causa impacto, mais de forma menos significativa que a variação da velocidade do vento, podendo ser percebido que quanto maior a umidade menor o raio de ação. Já as diferentes temperaturas ambientais (19,7 °C e 32,8 °C) analisadas, também impactam no raio, porém de forma menos preponderante que a variação da velocidade do vento, sendo demonstrado que quanto maior a temperatura maior o raio.

O maior raio encontrado para o fluxo de radiação térmica de 22 kW/m², que foi de 22 m (os cenários 11, 12, 16), é o raio que deve ser utilizado para seleção das esferas a serem protegidas em caso de incêndio em uma das esferas do parque de armazenamento em estudo. Nota-se que o raio encontrado é inferior aos 30 m propostos pelas IT n° 28 do CBMBA e pela N-1203 (2013) da PETROBRAS.

Para o *layout* da instalação em estudo, pode-se verificar que a menor distância entre as esferas, costado a costado, é de 27 m, assim para a seleção dos equipamentos a serem resfriados conforme a API 2510A (2015), deve ser considerado apenas a esfera em chamas, conforme indicado na Figura 6; enquanto que para as normas brasileiras, o pior caso seria o incêndio na esfera EF-01 e resfriamento das esferas EF-02, EF-04 e EF-05, conforme representado na Figura 7.

Figura 6. Representação das esferas a serem resfriadas em caso de sinistro na EF-01, conforme indicado na API-2510A (2015)

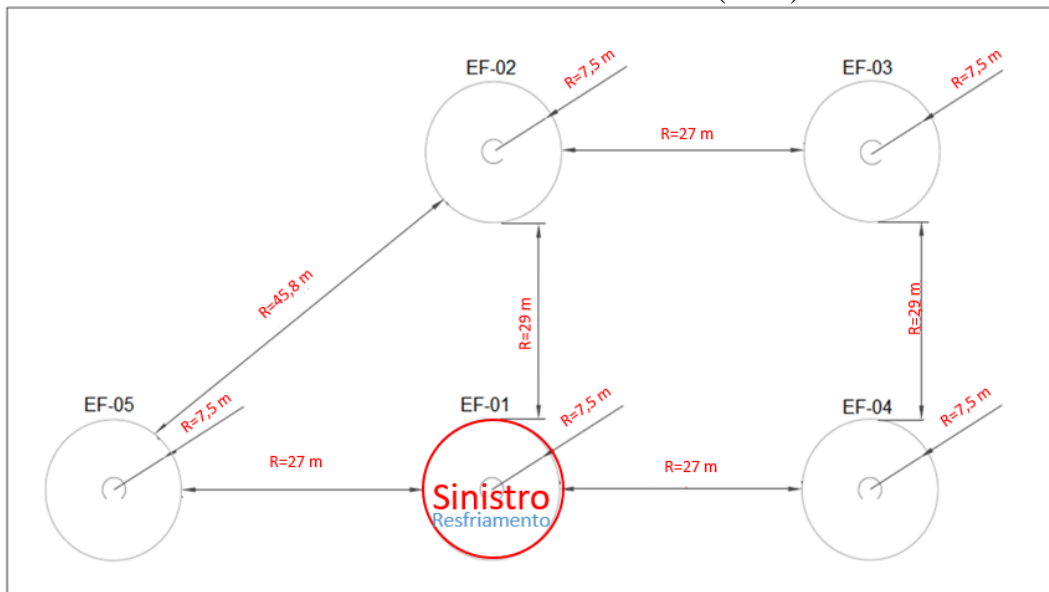
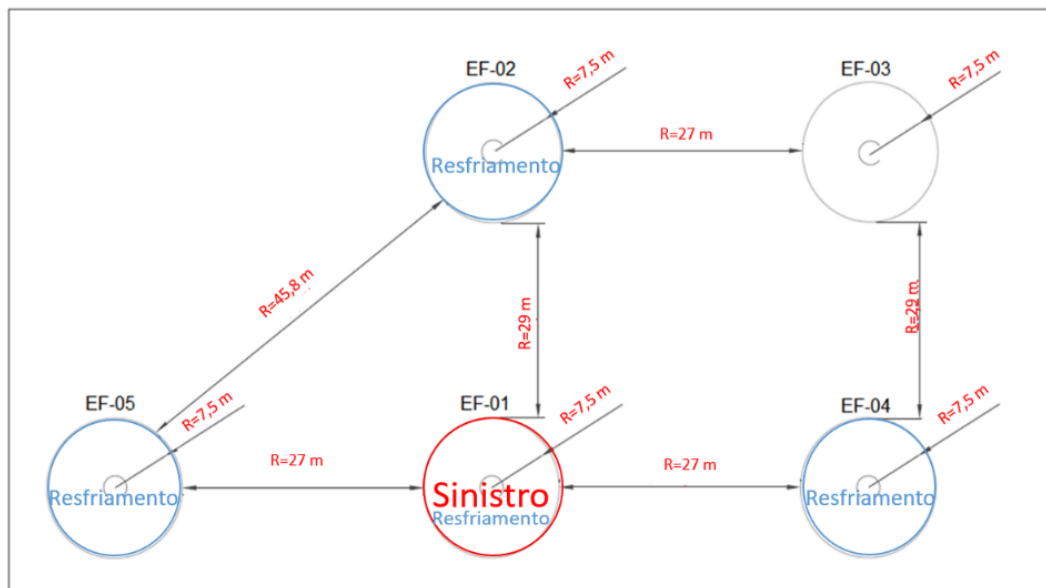


Figura 7. Representação das esferas a serem resfriadas em caso de sinistro na EF-01, conforme indicado na IT n° 28 do CBMBA (2017) e na N-1203 (2013) da PETROBRAS



6. Conclusão

No estudo realizado foi feita avaliação de um parque hipotético de armazenamento de esferas de GLP, com o objetivo de se estabelecer quais equipamentos devem ser resfriados em caso de incêndio em uma das esferas, considerando-se o raio de ação do fluxo de radiação térmica de 7.000 btu/h.ft² (22 kW/m²), conforme proposto na API 2510 A (2015), utilizando-se

para isso o simulador ALOHA, comparando-se ao estabelecido nas normas brasileiras (distância de 30 m entre costados).

Para avaliação do raio de ação da radiação de 22 kW/m², foram analisados 16 cenários. Nestes cenários foram consideradas as condições climáticas (umidade, velocidade do vento e temperatura ambiente) do local em estudo e duas formas de enchimento da esfera, para que fosse coberto o maior número de possibilidades, a fim de se encontrar o pior cenário, ou seja, maior raio de ação do fluxo de radiação térmica. O dado que se mostrou mais significativo foi a velocidade do vento, sendo encontrados raios maiores para o fluxo de radiação térmica de 22 kW/m², quando foram utilizadas velocidades elevadas de vento. Como resultado desta análise o maior raio encontrado foi de 22 m, para os cenários 11, 12 e 16.

Assim, para instalação estudada, foi encontrado conforme a norma internacional API 2510A (2015) a necessidade de resfriamento apenas da esfera em chamas, já pelo critério estabelecido pela norma brasileira N-1203 (2013) da PETROBRAS e a IT n° 43 (2017) do CBM da Bahia (semelhante a de outros Corpos de Bombeiros brasileiros) foi encontrado como pior cenário o incêndio na esfera EF-01 e resfriamento desta e das esferas EF-02, EF-04 e EF-05.

O estudo apresentado demonstra que as normas brasileiras são mais conservadoras e obsoletas perante os avanços da Engenharia de Incêndio, causando maior custo na implantação do sistema de combate a incêndio, sem necessariamente tornar a instalação mais protegida e segura do que a dimensionada considerando-se os riscos reais de exposição. Enquanto que a norma internacional, ao propor a avaliação do impacto do raio de ação do fluxo de radiação térmica, é mais realista, tornando o projeto mais fidedigno e com proteção suficiente, sem sub ou super dimensionamento.

Um ponto que poderia ser revisto na API, é a indicação da utilização da Figura 1 na determinação do raio de ação da radiação térmica de 22 kW/m², para incêndio em poça sem chama direta. Uma vez que esta Figura 1 foi elaborada considerando a queima de propano e vento de 8,9 m/s, e não outras condições climáticas que impactam na radiação térmica, bem como outros tipos de incêndio. Portanto, o objetivo principal desde estudo foi alcançado, uma vez que a proposta de utilização do software para o cálculo da radiação térmica e posterior seleção dos equipamentos a serem resfriados em caso de incêndio em parques de armazenamento de GLP, torna o projeto do sistema de combate a incêndio mais realista.

Corroborar-se então o dito por Murthy e Serikova (2015), de que os desafios de implantação de instalações são peculiares a cada projeto; e os padrões de engenharia, as práticas recomendadas e os requisitos legislados destinam-se, por vezes, a atender aos requisitos mínimos, que não devem ser tomados como um valor absoluto.

Uma limitação deste estudo é o fato do software ALOHA possuir em seu banco de dados apenas substâncias puras, portando a simulação foi realizada considerando apenas o propano (substância com maior poder calorífico) e não a mistura de propano e butano. Um outro limitante do trabalho é de que o mesmo se ateve apenas ao cenário de vazamento na válvula de drenagem (caso da catástrofe de Feyzen), devendo ser realizado em situações futuras um estudo mais completo (para cada parque de armazenamento), que contemple as diversas possibilidades de acidentes, propostas em estudos de risco, como APR (Análise Preliminar de Risco) ou HAZOP (em inglês, Hazard and Operability Study, ou Estudo de Perigos e Operabilidade).

Durante a realização deste trabalho foi possível identificar alguns outros estudos complementares que podem ser abordados em pesquisas futuras, a saber:

- Análise comparativa de normas nacionais e internacionais acerca de sistemas de proteção e combate a incêndio considerando outros produtos químicos;
- Estudo de uniformização dos códigos brasileiros sobre sistema e proteção e combate a incêndio em instalações industriais, propondo utilização de códigos baseados em desempenho;
- Análises experimentais e computacionais através de simulações com dinâmica de fluídos computacional (CFD), que possam comprovar as taxas e vazões de água propostas para resfriamento das esferas.

Referências

ALOHA. (2014). *US Environmental Protection Agency, National oceanic and atmospheric administration*, Version 5.4.7.

American Petroleum Institute. (2011). *API 2510: Design and Construction of LPG Installations*. Washington : API, 2011.

American Petroleum Institute. (2015). *API 2510A: Fire-Protection Considerations for the Design and Operation of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Storage Facilities*. Washington.

Atkinson, G., Cowpe, E; Halliday, J.; & Painter, D., (2017), *A review of very large vapour cloud explosions: Cloud formation and explosion severity*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2017.03.021>

CEPRAM, N. T. (2017). *NORMA TÉCNICA NT 01: Análise e Gerenciamento de Risco Acidentais para Substâncias Perigosas*. Bahia.

CETESB, N. T. (2011). P4–261: *Risco de Acidentes de Origem Tecnológica – Método para decisão e termos de referência*. São Paulo.

Chavéz, S. R. M. (2015), *Evaluación del nivel de riesgo y propuesta de un sistema contra incendios para tanques de almacenamiento de gas licuado de petróleo para minimizar el riesgo de incendio y explosión*, Trabajo de Grado (Magister en Seguridad y Salud Ocupacional), Universidad Internacional SEK, Quito.

Chettouh, S; Rachida, H.; & Mourad, C. (2018), *Contribution of the lessons learned from oil refining accidents to the industrial risks assessment*, Management of Environmental Quality: An International Journal, 29(4), p. 643-665. doi: 10.1108/MEQ-07-2017-0067

Claret, A. M.; & Mattedi, D. L. (2011), *Estudo da prescritividade das normas técnicas brasileiras*. Revista Escola de Minas, 64(3), p. 265-271, Ouro Preto, Minas Gerais.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DA BAHIA. Instrução Técnica nº28/2017: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Bahia, 36p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DE GOIÁS. Norma Técnica nº28/2014: Gás liquefeito de petróleo (GLP) – PARTE 1 - Manipulação, utilização e central de GLP. Publicado no BGE nº 205/2014, Goiânia, 27p.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ESTADO DO PARANÁ. Norma de Procedimento Técnico nº28/2014: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Paraná, 42 p.

Fontenelle, F. M. A. (2012), *Análise térmica em estruturas de tanques de armazenamento De etanol em situação de incêndio*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Islam, K.; & Sultana, S. (2017), *Industry Best Practice Risk based design for LPG Facility: Gap in Bangladesh practice*. Journal of Chemical Engineering, IEB, 30(1), p. 8-11.

Jones, R.; Lehr, W., Simecek-Beatty, D., & Reynolds, R. M. (2013), *ALOHA (Area Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4*. Technical Documentation, Seattle-USA.

Lundin, Johan. (2004), *A simple model to determine the need for design review*. In: 5th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, Luxembourg.

Marx, J. D.; & Cornwell, J. B. (2009), *The importance of weather variations in a quantitative risk analysis*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 22, p. 803-808.

Mattedi, D. L. (2005), *Uma contribuição ao Estudo do Processo de Projeto de Segurança Contra Incêndio Baseado em Desempenho*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais.

Murthy, M., & Serikova, N., (2016), *Selection of failure frequency and its impact on risk assessment e A case study from plot plan optimisation*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2016.05.001>

Mišić, N.; Zigar, D.; Božilov, A.; & Pešić, D. (2018), *Calculation of thermal radiation level during a pool fire caused by leakage of kerosene from tanker wagon at railway crossings*. Safety Engineering Series, Vol XIII, Nº 1, P. 29-36.

PARANÁ (Estado). Norma de Procedimento Técnico NPT 028/2012: Manipulação, armazenamento, comercialização e utilização de gás liquefeito de petróleo (GLP). Corpo de Bombeiros Militar do Paraná.

Perez, R. C. (2016), *Emergências Tecnológicas*. 2. Ed., por Rubens Perez, Sorocaba, p. 354.

PETROBRAS, 2013. N-1203: Projeto de sistemas fixos de proteção contra incêndio em instalações industriais terrestres. Dez. 2013 (Rev F).

Raj, P. K., (2005). *Exposure of a liquefied gas container to an external fire*. Journal of Hazardous Materials, p. 37-49.

Ramsden, N.; & Abusaieda, K. (2017), *A study of water cooling using different water application techniques to protect storage tankwalls against thermal radiation*. Process Safety and Environmental Protection, 109, p. 577–598.

Rodrigues, E. E. C. (2016), *“Sistema de Gestão da Segurança contra Incêndio e Pânico nas Edificações: Fundamentação para um Regulamentação Nacional”*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Santos, E. F. (2007), *Identificação de hipóteses e cenários de acidentes ampliados em uma unidade de engarrafamento de gás liquefeito de petróleo através de APP*, Monografia de

conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia e Segurança do Trabalho). Universidade de Pernambuco, Recife, p. 64.

Seito, A. I. et al. (Ed. 2008). *“A Segurança contra incêndio no Brasil”*. São Paulo: Projeto Editora.

Tabaczinski, R.; Côrrea, C.; Santos, M. M. L.; Pires, T. A. C.; & Silva, J. J. R. (2017) *Aplicação do software fire dynamics simulator (FDS) no estudo da segurança contra incêndios (SCI) no Brasil*. Revista Flammae, 7 (3), p. 87-116.

TNO - The Netherlands Organization of Applied Scientific Research (1992). *Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting releases of hazardous materials "Green Book"*. 3ª ed. The Hague.

Tomasoni, A. M., Galbolino, E.; Rovatii, M; & Sacile, R. (2010), *Risk evaluation of real-time accident scenarios in the transport of hazardous material on road*, Management of Environmental Quality: An International Journal, Vol. 21 No. 5, pp. 695-711.

Yi, H.; Feng, Y.; & Wang, Q. (2019), *Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 61, p.262-274.

Zio, E., & Aven, T. (2013), *Industrial disasters: extreme events, extremely rare. Some reflections on the treatment of uncertainties in the assessment of the associated risks*, Process Safety and Environmental Protection, 91 (1), p. 31-45.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rafaela Maria de Sá Telles Martins – 60%

Regina Ferreira Vianna – 40%