



Modelagem Matemática de Incêndio em Poça Aplicada em Evento Real

Beatriz do Rego Barros de Lucena Washington

José Rodrigues Torraca Neto

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Agosto de 2015

Modelagem Matemática de Incêndio em Poça Aplicada em Evento Real

***Beatriz do Rego Barros de Lucena Washington
José Rodrigues Torraca Neto***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Amaro Gomes Barreto Júnior, D.Sc.

Armando Lucas Cherem da Cunha, D.Sc.

Marlon de Souza Gama, Eng. Químico

Orientado por:

Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Julho de 2015

Ficha Catalográfica

Washington, Beatriz R. B. L.

Torraca Neto, José Rodrigues

Modelagem matemática de incêndio em poça aplicada em evento real/Beatriz R. B. L. Washington, José Rodrigues Torraca Neto. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2015.

xiii, 80 p.; il.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2015.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior

1. Incêndio em poça. 2. Simulação de acidentes. 3. Modelagem matemática 4. Projeto Final (Graduação - UFRJ/EQ). 5. Carlos André Vaz Júnior. I. Modelagem matemática de incêndio em poça aplicada em evento real.

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos.

(Beatriz R B L Washington)

Dedico este trabalho à minha mãe e meus avós, meus eternos educadores.

(José Rodrigues Torraca Neto)

“A tríplice função da ciência é saber para prever, a fim de prover.”

Auguste Comte

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que sempre me deram apoio e conselhos; aos meus irmãos, que me fazem buscar ser um exemplo para eles; aos meus amigos queridos, que sempre me incentivaram e me fazem rir; à todos os professores que me ajudaram a trilhar este caminho.

Beatriz R B L Washington

A Deus, à minha mãe, Lia Beatriz, aos meu avós, Solange e José, aos demais familiares, aos amigos, aos queridos colegas do laboratório ATOMS, a todos os professores e à minha namorada Izabel, por todo suporte, atenção e compreensão ofertados na realização deste trabalho.

José Rodrigues Torraca Neto

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

MODELAGEM MATEMÁTICA DE INCÊNDIO EM POÇA APLICADA EM EVENTO REAL

Beatriz do Rego Barros de Lucena Washington

José Rodrigues Torraca Neto

Agosto, 2015

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Júnior, D.Sc.

A história das indústrias química e petroquímica contam com casos recorrentes de grandes incêndios que se iniciaram em poças de líquidos inflamáveis e combustíveis. Para o pleno funcionamento de uma planta industrial que opera com grandes quantidades de líquidos inflamáveis é imprescindível a aplicação de medidas de segurança preventivas e de combate a incêndio, de forma a reduzir ao mínimo o risco ao qual está submetida tanto a planta quanto a comunidade ao seu redor. Este projeto apresenta uma modelagem matemática para incêndios em poça, visando determinar fatores como o calor irradiado por incêndios deste tipo, o calor incidido sobre alvos e a distância de separação aceitável adotada para pessoas e estruturas nessas circunstâncias. Aplica-se ao estudo de caso do incêndio ocorrido em maio de 2013 na empresa Petrogold, baseando-se unicamente em informações públicas. O projeto apresenta a modelagem do caso citado avaliando-se diferentes cenários com três tipos de líquidos inflamáveis e combustíveis (gasolina, álcool etílico e diesel), analisando suas consequências e comparando os três combustíveis armazenados.

ÍNDICE

1.	Introdução.....	1
1.1.	Histórico Mundial	1
1.2.	Incêndios em plantas químicas	2
2.	Princípios teóricos de incêndio	6
2.1.	Processo de combustão	6
2.2.	Combustível.....	7
2.3.	Ponto de fulgor (<i>Flash Point</i>).....	7
2.4.	Ponto de Combustão (<i>Fire Point</i>)	8
2.5.	Ponto de Auto Ignição	8
2.6.	Comburente.....	8
2.7.	Calor.....	8
2.7.1.	Condução.....	9
2.7.2.	Convecção	9
2.7.3.	Radiação.....	9
2.8.	Transferência de Calor em Incêndios.....	11
3.	Tanques de armazenamento.....	12
3.1.	Quanto à função	13
3.2.	Quanto ao formato.....	13
3.3.	Quanto ao Tipo de Teto.....	14
3.4.	Teto flutuante externo (<i>External Floating Roof</i>)	16
3.5.	Teto flutuante interno (<i>Internal Floting Roof</i>)	16
3.6.	Quanto a Localização	17
3.7.	Diques e Bacias de contenção	19
3.8.	Recursos de controle e segurança.....	20

3.8.1.	Pintura.....	21
3.8.2.	Respiro aberto (open vent)	21
3.8.3.	Válvula de Pressão e Vácuo	22
3.8.4.	Sistema de Medição.....	23
3.8.5.	Câmaras e Aplicadores de Espuma Contra Incêndio.....	23
3.8.6.	Aterramento Elétrico	25
4.	Modelagem matemática de incêndios em poça.....	26
4.1.	Incêndio em Poça.....	26
4.2.	Incêndio em Jato	26
4.3.	Fireball.....	27
4.4.	Modelagem matemática de incêndio em poça	28
4.5.	Modelo de Chama Sólida	28
4.6.	Determinação da Distância de Separação Aceitável (DSA)	39
5.	Estudo de Caso: Evento Acidental na Empresa Petrogold S.A.	44
5.1.	A empresa	44
5.2.	O incêndio	45
5.3.	Propriedades físico-químicas dos combustíveis armazenados	48
5.4.	Estudo de caso do evento acidental – empresa Petrogold.....	50
5.5.	Cenários simulados	50
5.6.	Cálculos.....	51
5.7.	Resultados.....	62
6.	Conclusão.....	69
	Referências Bibliográficas	71
	ANEXO I.....	77
	ANEXO II.....	78

ANEXO III.....	79
ANEXO IV.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Formação do BLEVE (a) Fogo sob a esfera de armazenamento; (b) Aumento de pressão no reservatório de fluido; (c) Ruptura da estrutura de armazenamento e liberação do gás e do líquido pressurizado (BLEVE); (d) Formação de uma bola de fogo.....	3
Figura 2 - Incendio na Petrogold, em Caxias.....	5
Figura 3 - Tetraedro do fogo.....	7
Figura 4 - Pátio de tanques em Hong Kong à noite.....	13
Figura 5 - Tanques esféricos.....	14
Figura 6 - Tanque de teto fixo.....	15
Figura 7 - Tanque de teto flutuante externo.....	17
Figura 8 - Tanque de teto flutuante interno.....	17
Figura 9 - Tanque Subterrâneo.....	19
Figura 10 - Representação gráfica de um dique de contenção.....	20
Figura 11 - Representação esquemática de uma bacia de contenção.....	20
Figura 12 - Exemplo de um respiro (vent) em um tanque.....	22
Figura 13 - Exemplo de uma PVRV.....	23
Figura 14 - Exemplo de uma câmara de espuma.....	24
Figura 15 - Exemplo de incêndio em poça.....	26
Figura 16 - Exemplo de jet-fire no evento acidental em Caxias.....	27
Figura 17 - Exemplo de fireball no evento acidental em Caxias.....	27
Figura 18 - Diagrama esquemático de um grande fogo de combustível líquido.....	30
Figura 19 - Fração radiada χ_r como função do diâmetro D do fogo para heptano (*), óleo cru (○) e querosene (+). A linha contínua é a curva ajustada para $\chi_r = 0,35 \exp(-kD)$, onde $k = 0,05 \text{ 7}$	31
Figura 20 - Diagrama esquemático de modelos de radiação térmica.....	32

Figura 21 - Poder emissivo em função do diâmetro do fogo para um pool fire de gasolina.....	33
Figura 22 - Altura da chama em função do diâmetro do fogo para incêndio em poça.	33
Figura 23 - Fluxo de energia radiativa, $H \cdot E_f$, em função do diâmetro da chama para um incêndio em poça.	35
Figura 24 - Fator de forma geométrico no formato de chama cilíndrica para alvo vertical e horizontal no nível do solo.	36
Figura 25 - Representação para o fator de forma de dois cilindros para um alvo acima do solo.	37
Figura 26 - Modelo de chama sólida em um incêndio em tanque.....	38
Figura 27 - Diagrama esquemático mostrando como um cilindro ou placa vertical pode ser usado para simplificar o cálculo do fator de forma.	40
Figura 28 - Distância de separação aceitável (DSA) para incêndios aproximadamente cilíndricos proveniente de derramamento de líquidos perigosos, em metros..	41
Figura 29 - Distância de separação aceitável (DSA) para incêndios aproximadamente cilíndricos proveniente de derramamento de líquidos perigosos, em pés.	42
Figura 30 - Vista aérea do terreno após o acidente.	45
Figura 31 - Incêndio no dique da transportadora Petrogold.....	46
Figura 32 - Incêndio no dique.	46
Figura 33 - Muro destruído durante o evento acidental.....	47
Figura 34 - Danos sofridos por estruturas próximas ao tanque.	47
Figura 35 - Foto do incêndio da perspectiva dos moradores da vizinhança, na área de contenção delimitada pelo corpo de bombeiros.	48
Figura 36 – Parque de tancagem da Petrogold após o incêndio ter sido extinguido.....	48
Figura 37 - Vista aérea do terreno com destaque para o tanque onde se iniciou o incêndio.....	51

Figura 38 - Localização do alvo real em relação à Petrogold.	52
Figura 39 - DSA - Distância de Separação Aceitável para o cenário 1 para um tanque de gasolina.	54
Figura 40 - Estimativa da distância entre alvo e tanque.....	54
Figura 41 - Representação esquemática simplificada da área do dique.....	56
Figura 42 - Distância de Separação Aceitável para o cenário 2.	57
Figura 43 - Estimativa da distância entre alvo e dique.....	58
Figura 44 - Estimativa da altura do muro.	59
Figura 45 - Desenho esquemático do cenário 4.	62
Figura 46 - DSA - Distância de Separação Aceitável para os cenários 2 e 4. .	66
Figura 47 - Estimativa da altura da chama de um incêndio em tanque.....	67
Figura 48 - Estimativa da altura da chama, com ação do vento.	68
Figura 49 – Estimativa da altura da chama.....	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Dados de taxa de queima, calor de combustão, taxa de liberação de calor e Distância de Separação Aceitável para alguns líquidos.	42
Tabela 2 - Descrição dos tanques da Petrogold.	44
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas da gasolina, diesel, AEAC e AEHC..	49
Tabela 4 – Propriedades dos combustíveis líquidos relacionadas a sua queima	49
Tabela 5 - Cálculo de S/D por interpolação.	61
Tabela 6 – Parâmetros necessários para resolução de cada cenário.	63
Tabela 7 - Resultados obtidos em cada cenário proposto.	63
Tabela 8- Análise do fator de forma.	65
Tabela 9- Distância de separação aceitável para pessoas (P) e estruturas (E).	65
Tabela 10 - Resultados obtidos de S/D e distância segura para o cenário 4...	66

1. Introdução

1.1.Histórico Mundial

A indústria química mundial sofreu durante anos com elevadas taxas de acidentes, muitos deles fatais. O número de acidentes crescia com a evolução da produção e consumo de substâncias químicas. O aumento da demanda por novos produtos e novos materiais, especialmente a partir da 2ª Guerra Mundial, acompanhado pela mudança do uso do carvão pelo petróleo nas indústrias de base, levou ao desenvolvimento e expansão do complexo químico industrial.

A natureza altamente competitiva deste setor industrial, juntamente com o crescimento da economia em escala mundial, e o rápido avanço da tecnologia, possibilitaram o aumento das dimensões das plantas industriais e da complexidade dos processos produtivos, com operação em fluxo contínuo e interligações entre plantas. Nos anos 60, uma planta industrial para craquear nafta e produzir 50000 ton/ano de etileno era considerada de grande porte. Dos anos 80 em diante, plantas para produção de etileno ultrapassaram a escala de 1 milhão de toneladas. O transporte e armazenamento não ficaram para trás e seguiram o mesmo ritmo, crescendo cerca de 1200% de 1950 à 1990 [Freitas, Porte & Gomez, 1995].

O crescimento das atividades de produção, armazenamento e transporte de substâncias químicas provocou um aumento no número de pessoas expostas aos riscos operacionais. Um número cada vez maior de trabalhadores passou a atuar no setor. Simultaneamente com o crescimento da capacidade instalada, cresceu também a severidade dos potenciais acidentes, fazendo com que um maior número de pessoas externas ao processo pudessem ser afetadas. Além disso, avanços tecnológicos resultaram em mudanças nos processos visando elevar a produção. Essas modificações muitas vezes estavam relacionadas com o aumento de pressão e temperatura, as quais se tornaram ainda mais críticas, tendo como consequência um aumento na energia armazenada nos processos e da severidade de possíveis cenários acidentais.

Diversos acidentes marcaram a história da indústria química mundial. A explosão de um reator de produção de caprolactama em Flixborough, na Inglaterra, em 1974, tornou-se um marco na questão da avaliação de riscos e prevenção de perdas. Apenas dois anos depois ocorreu, em Seveso na Itália, outro grande acidente com reator químico, gerando um profundo impacto na Europa [CETESB, 2014].

Outros grandes acidentes que podem ser citados foram os de Bhopal (Índia, 1984), Cidade do México (México, 1984), Sandoz (Suíça, 1986) e Chernobyl, (Ucrânia, 1986). Eles se caracterizam por extrapolar as divisas das fábricas, se projetando a posteriori, com efeitos de médio e longo prazo nas populações e no meio ambiente [CETESB, 2014].

Embora trágicos, as análises feitas a partir dos acidentes ocorridos contribuíram de forma significativa para que as autoridades governamentais, indústrias e a comunidade civil buscassem mecanismos visando a prevenção de novos acidentes.

Técnicas e métodos desenvolvidos inicialmente para as indústrias aeronáutica, bélica e nuclear foram adaptados para a indústria química. Estes passaram então a ser amplamente utilizados para avaliações de riscos presentes em atividades industriais nas áreas de petróleo, química e petroquímica e para preservação de recursos humanos e materiais de produção. Além disso, foram criadas diretrizes e legislações ambientais mais restritivas, que também contribuíram para o avanço de medidas de gerenciamento de riscos ao meio ambiente.

1.2. Incêndios em plantas químicas

Dentre os inúmeros cenários acidentais possíveis em plantas químicas é possível destacar a ocorrência de incêndios. Os principais perigos nesse tipo de acidente são as grandes emissões de calor e fumaça tóxica. Diversas substâncias inflamáveis e combustíveis são armazenadas em grandes tanques. Estes compostos possuem elevado calor de combustão e potencial de geração de

fuligem quando queimados descontroladamente. O fluxo de energia radiante gerado por um incêndio em tanque de combustível pode ser suficiente para ameaçar tanto a integridade estrutural das construções ao redor, quanto seus funcionários e muitas vezes a população vizinha a planta [SOUSA, 2013].

Em 1972, no estado do Rio de Janeiro, ocorreu o maior acidente já registrado na Refinaria de Duque de Caxias (REDUC), causando a morte de 42 trabalhadores e deixando mais 40 hospitalizados [Zona de Risco, 2014]. O acidente ocorreu durante uma drenagem da água acumulada em uma esfera de GLP (gás liquefeito de petróleo). Naquela época existia apenas uma válvula de dreno na parte inferior da esfera. Após a drenagem da água a válvula não foi fechada no tempo adequado, permitindo o vazamento do GLP. A válvula congelou devido à saída de produto, e não pôde mais ser fechada, conforme artigo publicado pela Revista Geográfica da América Central (2011). Uma nuvem de GLP foi formada e, ao encontrar uma fonte de ignição, se incendiou. O ponto de vazamento de GLP deu origem a um incêndio em jato (*jet-fire*). Este incêndio durou horas, aquecendo continuamente a esfera, até levar a ocorrência de uma explosão conhecida como BLEVE, como mostrado na Figura 1. Essa explosão e as que se seguiram causaram a destruição de todo o parque de esferas da refinaria [Revista Geográfica da América Central, 2011].

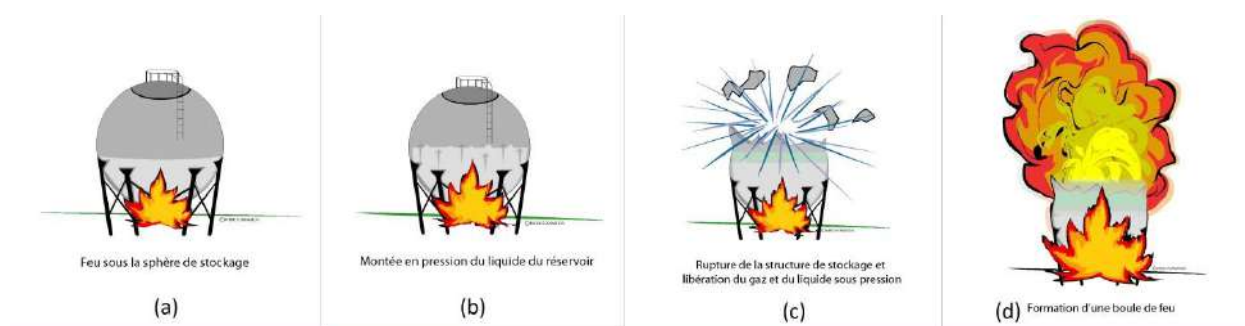


Figura 1 - Formação do BLEVE (a) Fogo sob a esfera de armazenamento; (b) Aumento de pressão no reservatório de fluido; (c) Ruptura da estrutura de armazenamento e liberação do gás e do líquido pressurizado (BLEVE); (d) Formação de uma bola de fogo.

[Fonte: GEXAS Solutions D'Entreprises, 2015]

Quatro décadas após o acidente da REDUC, Duque de Caxias foi novamente palco para outro acidente industrial de grande porte, desta vez na

empresa Petrogold. A Petrogold é uma empresa de armazenamento de combustíveis líquidos, tais como gasolina, álcool e diesel [ANP, 2009]. As investigações das causas deste acidente no parque da tancagem da Petrogold foram realizadas pela Polícia Civil, porém o relatório final não está facilmente disponível para consulta pública. As razões exatas que levaram ao incêndio não são conhecidas. Segundo o especialista em gerenciamento de risco Moacyr Duarte, o acidente foi durante o carregamento de um caminhão tanque [Globo News, 2013]. Uma possível falha nos sistemas de aterramento e de carga do caminhão teria impedido o correto descarregamento da eletricidade estática acumulada. O acúmulo da eletricidade estática teria dado origem a uma centelha durante a transferência do combustível. A centelha teria causado a ignição do combustível, gerando todo o incêndio [Globo News, 2013].

Independente das causas do acidente, suas consequências foram claras: várias construções residenciais vizinhas foram afetadas, todos os tanques foram fortemente danificados ou destruídos e o evento levou à desativação total do parque de tanques da empresa.

Imagens de satélite revelam que os tanques situavam-se em uma área residencial. Um evento como este, com as proporções que alcançou, cria questionamentos quanto ao planejamento urbano, e onde alocar empresas de armazenamento de grandes volumes de combustíveis e outras substâncias perigosas (Figura 2).

A modelagem do cenário acidental real a partir do registro fotográfico e em vídeo feito por diferentes empresas jornalísticas, permite estimar a quantidade de calor irradiado a partir de um incêndio como este, permitindo compreender sua severidade. Realizar esta modelagem baseada em registros jornalísticos do dia do evento é o objetivo deste estudo. O evento real porém é altamente complexo e dinâmico – as chamas formadas não são estáticas. Por motivos de simplificação serão avaliadas exclusivamente as consequências relacionadas ao incêndio em poça, não sendo consideradas as influências dos jatos de fogo e bolas de fogo formadas durante o evento. Aplicando modelos matemáticos adequados torna-se

possível estimar a radiação térmica a que estavam sujeitas as pessoas e construções próximas ao parque de tancagem.



Figura 2 - Incendio na Petrogold, em Caxias.

[Fonte: Agência O Globo, 2013]

2. Princípios teóricos de incêndio

Incêndios industriais têm grandes impactos para instalações, trabalhadores e população externa, devido a grande quantidade de calor e fuligem liberados, ao risco de explosões e aos danos provocados durante o processo de combate. O simples transtorno gerado durante um incêndio já é fator de relevante prejuízo tanto para a própria empresa quanto para terceiros externos a planta [JOSÉ, 2004].

A integridade de prédios e instalações, bem como a segurança dos combatentes do incêndio e trabalhadores da planta, são afetadas especialmente pela grande quantidade de radiação térmica liberada. Em certos casos, esta ameaça pode se estender para além da planta, atingindo indústrias vizinhas e demais edificações próximas. Deste modo, torna-se necessária uma avaliação da radiação térmica emitida, e a determinação de uma distância considerada aceitável e segura [JOSÉ, 2004].

Para entender melhor os incêndios industriais, apresentam-se alguns dos princípios elementares do fogo.

2.1. Processo de combustão

O processo de combustão é uma reação química que envolve um combustível e um comburente (oxigênio), liberando energia na forma de calor e luz. A Figura 3 mostra os quatro elementos essenciais no processo de combustão, onde o combustível sofre oxidação em presença do ar, liberando calor [JOSÉ, 2004].

A combustão pode ser completa ou incompleta:

- Combustão Completa: Ocorre na presença de excesso de ar, transformando todo o combustível em CO_2 e H_2O .
- Combustão Incompleta: Neste processo o combustível não sofre oxidação completa. Ocorre liberação de compostos intermediários como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), ou outras substâncias dependendo do

combustível que está queimando. A combustão incompleta está associada a limitações na quantidade de oxigênio no meio. Ocorre grande formação de fumaça escura e presença de material particulado [JOSÉ, 2004].

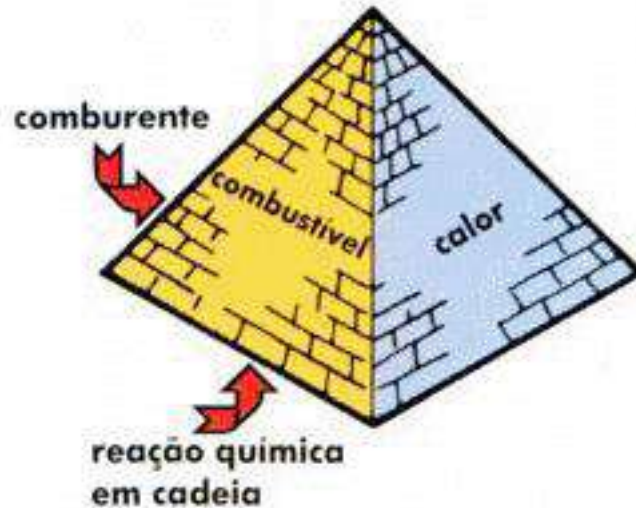


Figura 3 - Tetraedro do fogo.

[Fonte: Manual de Fundamentos PMESP, 2006].

2.2. Combustível

Pode ser sólido, como carvão, madeira e papel; líquido como gasolina, etanol e óleo cru; ou gasoso como metano e etano. Em geral o combustível é definido como uma substância que além de queimar, mantém a combustão e a propagação do fogo [CEETEPS, 2008].

Cada material combustível apresenta características próprias, que os tornam mais ou menos possíveis de sofrerem ignição. Algumas destas características são o Ponto de Fulgor, Ponto de Combustão e Ponto de Auto Ignição.

2.3. Ponto de fulgor (*Flash Point*)

De acordo com a definição da Norma NB – 98 – Armazenamento e Manuseio de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas:

“Ponto de fulgor de um líquido é a menor temperatura na qual a substância libera uma quantidade de vapor suficiente para formar uma mistura inflamável com o ar, perto da superfície do líquido ou dentro do recipiente usado.”

Destaca-se porém que nesta temperatura a queima não se sustenta, ocorrendo apenas um rápido flash.

2.4.Ponto de Combustão (*Fire Point*)

Corresponde a temperatura mínima em que os vapores desprendidos entram em combustão e continuam a queimar (queima sustentada). Em geral essa temperatura é poucos graus maior que a temperatura de fulgor [CEETEPS, 2008].

2.5.Ponto de Auto Ignição

É a temperatura suficiente para que a mistura inflamável entre em combustão espontaneamente [CEETEPS, 2008]. Em geral são bastante elevadas, sendo difícil de ocorrerem em condições normais de armazenamento.

2.6.Comburente

O comburente, juntamente com o combustível, participa da reação de combustão. O comburente natural encontrado no ar atmosférico, e comum em praticamente todos os incêndios acidentais, é o oxigênio [CEETEPS, 2008]. A redução na concentração de oxigênio a valores menores que 10% ou 8% do volume normalmente impede a ocorrência de combustão. O valor mínimo de oxigênio para existência de fogo denomina-se Concentração Limite de Oxigênio (LOC) [CEETEPS, 2008].

2.7.Calor

O calor é transmitido entre as chamas e objetos ou pessoas próximos. A transmissão ocorre através dos processos de condução, convecção ou radiação. O calor liberado durante um incêndio é uma das maiores ameaças à vida e à integridade das construções próximas.

2.7.1. Condução

A condução ocorre devido às interações entre partículas, onde há uma transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas. É a principal forma de transferência de calor em sólidos [INCROPERA, 2005].

A taxa de condução de calor será influenciada por vários fatores, como por exemplo: espessura do material, diferentes formatos de superfície, coeficiente de condutividade térmica, etc.

2.7.2. Convecção

Este modo de transferência de calor envolve a combinação da condução e o movimento do fluido, já que ocorre devido ao contato da superfície sólida com um líquido ou gás adjacente que está em movimento [CENGEL & CHAJAR, 2012]. Esta transferência é mantida por dois fatores: o movimento molecular aleatório e o movimento global do fluido no interior da camada limite. [INCROPERA, 2005].

Calcula-se a taxa de transferência de calor pela equação (1) [INCROPERA, 2005].

$$q'' = \frac{q}{A} = h(T_s - T_\infty) \quad (1)$$

onde: q = Taxa de transferência de calor (W);

A = Área da superfície em contato (m^2);

q'' = Fluxo de calor por convecção por unidade de área (W/m^2);

T_s = Temperatura da superfície (K);

T_∞ = Temperatura do fluido (K);

h = Coeficiente de transferência de calor ($W/(m^2K)$).

2.7.3. Radiação

Conhecido também como calor radiante, não é preciso o contato físico entre os corpos para que haja a transferência de calor. Na radiação a

transferência de calor ocorre mesmo no vácuo, sendo necessária apenas a existência de gradiente de temperatura [MORISHITA, 2004].

Em um incêndio, o objeto em chamas produz grande quantidade de calor, e parte deste é emitido na forma de radiação. A intensidade de calor emitida durante um incêndio industrial pode ser suficiente para atingir centenas de metros, podendo causar enormes danos à natureza e à sociedade, além de propiciar o início de outros incêndios (propagação).

Para calcular a taxa de radiação deve-se primeiro calcular o fluxo térmico emitido pela superfície com (2) [INCROPERA, 2005]:

$$E = \varepsilon\sigma T_S^4 \quad (2)$$

onde: ε = Emissividade;

σ = Constante de Stefan-Boltzman;

T_S = Temperatura da superfície da chama (K).

A Taxa Líquida de transferência de calor irradiado da superfície de uma chama, expressa por unidade de área, é explicitada pela equação (3) [INCROPERA, 2005]:

$$q'' = \frac{q}{A} = \varepsilon\sigma(T_S^4 - T_{viz}^4) \quad (3)$$

A expressão anterior é a diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido a absorção da radiação.

A taxa total de transferência de calor saindo da superfície de uma chama é dada pela equação (4) [INCROPERA, 2005]:

$$q = q_{conv} + q_{rad} = hA(T_S + T_{\infty}) + \varepsilon A\sigma(T_S^4 - T_{viz}^4) \quad (4)$$

2.8. Transferência de Calor em Incêndios

Em todos os incêndios estão envolvidos os três modos conhecidos de transferência de calor. Dependendo do estágio de desenvolvimento do incêndio e do local onde ocorre, um modo pode ter maior relevância do que outro na análise do evento acidental.

De forma geral, porém, é a radiação o principal meio de transferência de calor que promove risco as pessoas próximas ao evento acidental.

3. Tanques de armazenamento

Um tanque de armazenamento ou armazenagem é uma unidade operacional destinada a armazenar líquidos e/ou gases industriais [SIQUEIRA, 2010]. Os tanques ou reservatórios podem armazenar fluidos à pressão atmosférica, ou à pressões positivas (acima da pressão atmosférica). Industrialmente, especialmente no setor petroquímico, grande parte dos tanques são construídos com base nos requisitos definidos pelo código americano API 650 - Welded Tanks for Oil Storage. Os tanques possuem diversas dimensões, com seu diâmetro variando em geral de 2 metros a 50 metros ou mais [LINDENBERG, 2008]. Por exigência normativa e legal, em torno dos tanques de líquidos inflamáveis ou combustíveis deve sempre haver um dique e/ou bacia de contenção com a finalidade de conter os possíveis derramamentos em caso de ruptura do vaso [ABNT NBR 7505-1,2003].

Um parque ou pátio de tanques (Figura 4) é classificado em três tipos de acordo com sua capacidade de armazenamento [ABNT NBR 7505-1,2003]:

- Pequeno : com capacidade igual ou inferior a 10.000 m³;
- Médio : com capacidade entre 10.000 e 40.000 m³;
- Grande : possui capacidade maior do que 40.000 m³.

No caso considerado, a Petrogold tinha um parque com capacidade de 2.048 m³ (Anexo III), logo era um parque de capacidade de armazenamento considerado pequeno.

Em um parque de tanques podem existir diferentes tipos de tanques, que por sua vez são classificados de acordo com seu formato, função, tipo de teto, localização e utilização [SIQUEIRA, 2010].



Figura 4 - Pátio de tanques em Hong Kong à noite.

[Fonte: Shutterstock.com]

3.1. Quanto à função

- Tanques de Recebimento: Estoque de produtos intermediários, que serão usados como insumo no processo.
- Tanques de Resíduo: Armazenamento de produtos fora de especificação ou provenientes de operações indevidas, aguardando reprocessamento.
- Tanques de Mistura: Usados para obtenção de misturas de produtos, ou produtos e aditivos, visando adequação de especificações.
- Tanques de Armazenamento: Estoque de matérias-primas e produtos acabados. Este é o caso do parque de tancagem da empresa Petrogold.

3.2. Quanto ao formato

Cilíndricos: formato alongado e arredondado podendo ser dispostos na horizontal ou na vertical. Tanques cilíndricos horizontais são empregados quando o consumo do fluido é baixo. Tanques cilíndricos verticais (Figura 5), são escolhidos quando o parque exige reservatórios maiores e com movimentação de grandes vazões [SIQUEIRA, 2010].

- Esféricos: Usados para armazenar gás ou gás liquefeito. A sua geometria reduz a formação de pontos de tensão, típicos de estruturas com quinas. A Figura 5 exemplifica tanques esféricos. Deste modo, tanques esféricos suportam pressões mais elevadas –

sendo adequados ao armazenamento de gases sobre elevadas pressões. Foi este tipo de tanque que explodiu no acidente na REDUC em 1972.

No caso analisado do projeto, a empresa Petrogold armazenava combustíveis líquidos em tanques cilíndricos verticais.



Figura 5 - Tanques esféricos.

[Fonte: EESC/USP, 2002]

3.3. Quanto ao Tipo de Teto

- Fixo (*Fixed Roof*): São os mais simples de construir e difundidos na indústria. A Figura 6 ilustra este tipo de teto. Estes tanques são formados por um corpo cilíndrico chamado de costado, com cobertura ligada à parte superior. O teto é construído junto à estrutura do costado e sua posição não varia. O teto pode ser cônico, curvo, plano, esferoidal ou semi-esferoidal [SIQUEIRA, 2010]. Como existe um espaço entre o nível do líquido e o teto, há formação de vapor de combustível neste espaço. Estes tanques necessitam de suspiros para a ventilação durante o carregamento e

descarregamento de produto [MARTINS, 2004]. Normalmente são empregados para estocar derivados de petróleo mais pesados e com pouca perda por evaporação, tais como: gasóleo, óleo diesel, resíduo de vácuo entre outros. O parque de tançagem da empresa Petrogold era composto por tanques de teto fixo plano.

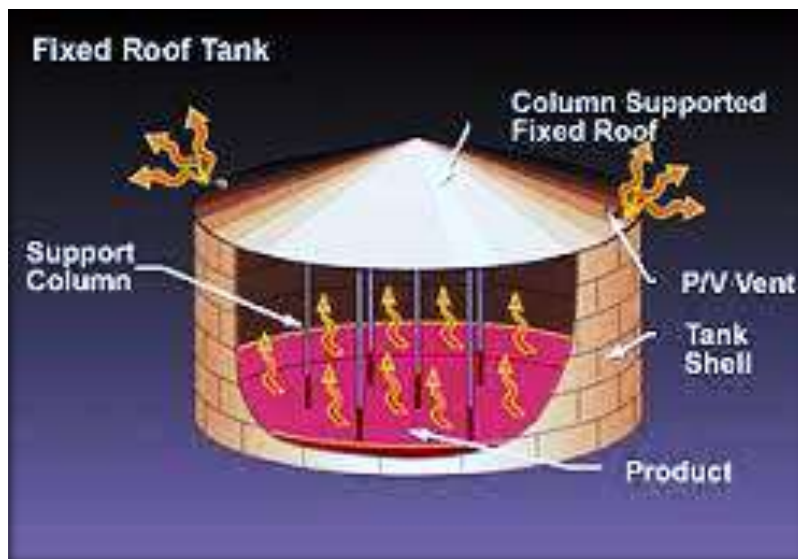


Figura 6 - Tanque de teto fixo.

[Fonte: Chevron, 1999]

- Móvel (*Lifting Roof*): O teto desloca-se externamente ao costado de acordo com a pressão exercida pelo vapor. É necessária a existência de dispositivos de segurança que evitem acidentes provocados por uma possível sobre-pressão. Para se evitar as perdas com a evaporação, usa-se um sistema de selagem entre o teto e a parede do tanque [SIQUEIRA, 2010].
- Flutuante: Neste tipo de tanque o teto é suportado pela superfície do líquido armazenado. A cobertura movimenta-se de acordo com o esvaziamento ou enchimento. O espaço entre o nível do líquido e o teto é bem reduzido, fazendo com que a formação de vapor seja pequena. Estes tanques devem possuir um sistema de selagem, visto que o seu teto flutuante move-se internamente em relação ao costado [SIQUEIRA, 2010]. Normalmente são usados para produtos mais voláteis como: gasolina, nafta, solventes, entre outros.

Existem dois tipos de teto flutuante:

3.4. Teto flutuante externo (External Floating Roof)

O tanque de teto flutuante é composto de uma parede cilíndrica, com um teto móvel que pode se movimentar de acordo com o nível do conteúdo do tanque (Figura 7). A perda por evaporação é minimizada pela redução do espaço entre o teto e o nível do líquido, evitando a formação de uma atmosfera inflamável. Para promover a cobertura completa da superfície do tanque, selos têm que ser adicionados ao redor do teto, deslizando sobre a parede e garantindo a movimentação. Estes selos porém não permitem a total vedação do teto, permitindo pequenos vazamentos. Sistemas de vedação adicionais são utilizados entre o teto e o costado do tanque para minimizar estas perdas evaporativas e são de grande importância no projeto. Uma desvantagem na utilização de tetos flutuantes externos é exposição ao vento. A influência do vento cria um diferencial de pressão, promovendo a retirada de vapor debaixo do teto flutuante [MARTINS, 2004]. Apesar das perdas, estas são bem menores quando comparadas aos tanques de teto fixo.

3.5. Teto flutuante interno (Internal Floating Roof)

Este tipo de tanque possui um teto flutuante interno, dispondo ainda de um teto fixo instalado na parte superior (Figura 8). Foi criado com o objetivo de diminuir as perdas que ocorrem em tetos flutuantes externos, principalmente pela ação do vento. O teto fixo não cria uma barreira ao vapor, mas impede a ação do vento. O teto fixo que forma a cobertura pode ser suportado por colunas verticais dentro do tanque. O teto fixo também pode ser autosuportado, ou seja, sem coluna interna de sustentação. Desta forma reduzindo a perda por evaporação por falhas em emendas e conexões, combinando as vantagens de ambos os tetos. O mais comum é o teto de alumínio autosuportado em forma de domo [MARTINS, 2004].

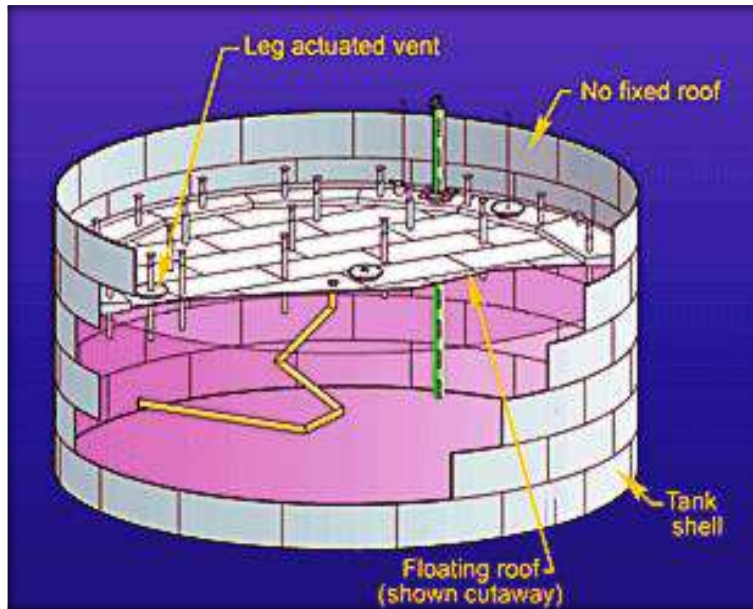


Figura 7 - Tanque de teto flutuante externo.

[Fonte: Chevron, 1999]

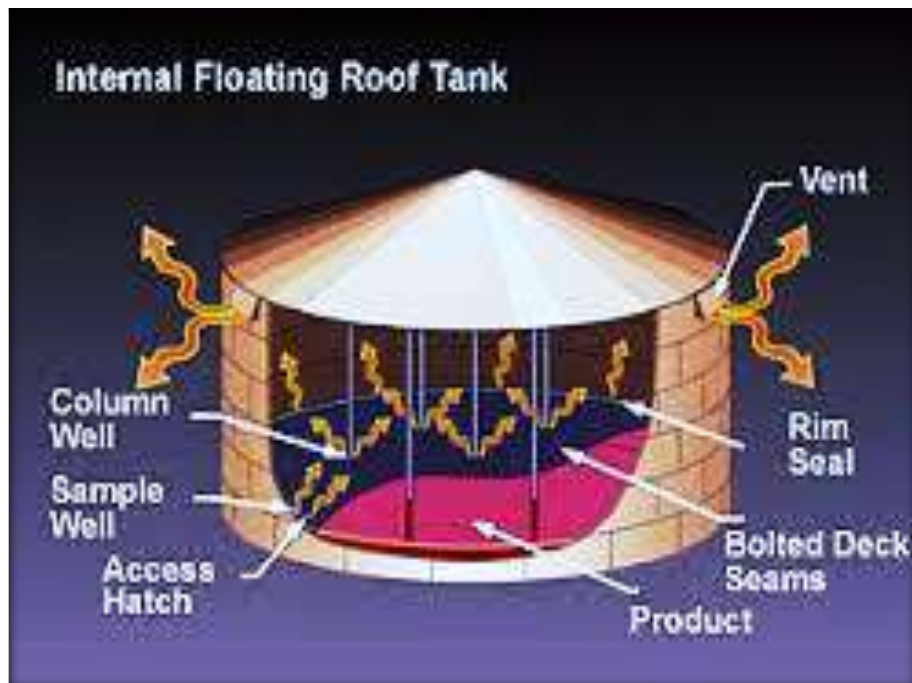


Figura 8 - Tanque de teto flutuante interno.

[Fonte: Chevron, 1999]

3.6.Quanto a Localização

- Aéreos: Situam-se acima do solo. Normalmente são usados quando se armazenam grandes quantidades de fluido e trabalha-se com

altas vazões (Figura 4). Para aplicações de pequeno porte usam-se os tanques aéreos horizontais [SIQUEIRA, 2010].

- Subterrâneos: São mais seguros e recomendados para o armazenamento de combustíveis e substâncias perigosas em um ambiente frequentado por pessoas, como postos de gasolina urbanos. Fabricados em aço-carbono, o maior problema enfrentado por parques com esse tipo de tanque é a corrosão [SIQUEIRA, 2010]. Tais tanques devem ser fortemente protegidos contra corrosão e ruptura, pois seu contato direto com o solo pode propiciar a contaminação de lençóis freáticos. Os tanques são geralmente construídos com parede dupla e um sensor especial instalado no espaço entre as paredes. Esse espaço tem pressão negativa em condições operacionais normais. O sensor é acionado pela alteração da pressão interna provocada pela entrada de ar ou da água do lençol freático devido à perda de vedação da parede externa, ou ainda pela saída do produto por falta de isolamento da parede interna [SIQUEIRA, 2010]. Esse tipo de tanque subterrâneo é em geral construído com dois materiais diferentes, sendo a parede interna baseada em aço-carbono, e a parede externa com uma resina termofixa resistente à corrosão [SIQUEIRA, 2010]. Alguns modelos de tanques possuem as duas paredes fabricadas com essa resina. Conforme mencionado, essa arquitetura de tanques é comumente empregada em postos de gasolina (Figura 9).

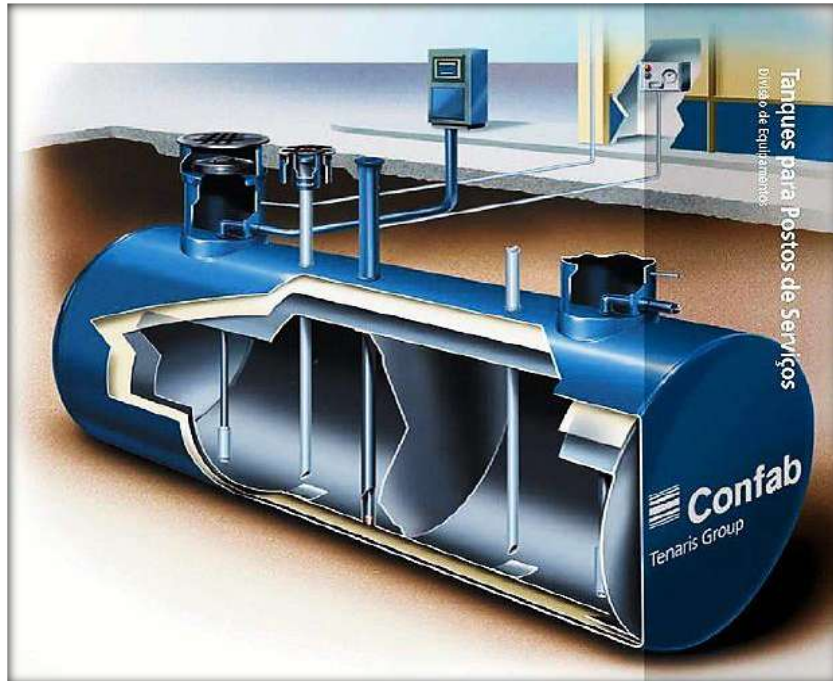


Figura 9 - Tanque Subterrâneo.

[Fonte: Confab - Tenaris Group]

3.7. Diques e Bacias de contenção

Um dique é basicamente uma contenção física ao redor do tanque ou do parque de tanques (Figura 10), limitando uma região que denomina-se bacia de contenção. Os diques podem ser de terra, paredes de concreto, ou outro material aplicável compatível com o tipo de produto armazenado nos tanques. Os diques de terra tem baixo custo, no entanto, possuem elevado custo de manutenção por causa da erosão. Os diques de concreto, apesar de serem mais caros, possuem menores custos de manutenção. Por norma e exigência legal, todos os tanques destinados a armazenar produto líquido inflamável, combustível ou tóxico devem ser dotados de diques. As principais finalidades de um dique são:

- a) Conter um possível vazamento em caso de rompimento do tanque ou tubulação de interligação, falha de operação ou outro tipo de vazamento ocasional.
- b) Limitar um possível incêndio em poça a uma pequena área.

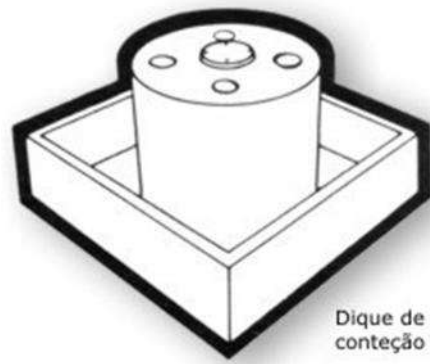


Figura 10 - Representação gráfica de um dique de contenção.

[Fonte: Alpina termoplásticos, 2010].

As bacias de contenção devem possuir um sistema de drenagem próprio, constituído por drenos (Figura 11). Os drenos devem ser limpos e desobstruídos continuamente, para eliminar possíveis riscos de transbordamento em caso de lançamento de água durante incêndios.

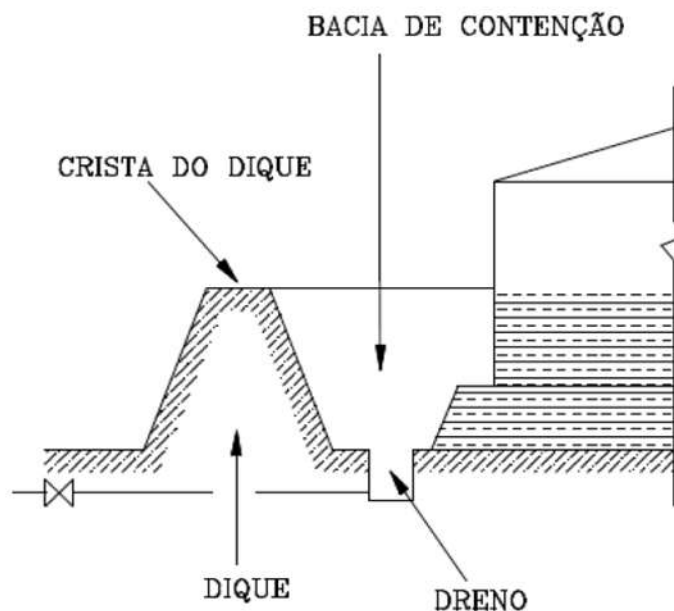


Figura 11 - Representação esquemática de uma bacia de contenção.

[Fonte: BOMBEIROS SP, 2004].

3.8. Recursos de controle e segurança

A instalação de equipamentos de proteção em parques de tanques é extremamente importante, visto que existem riscos envolvidos no armazenamento, carregamento e descarregamento de líquidos inflamáveis. Logo, parques

modernos contam com diversos sistemas de proteção para evitar incêndios e explosões, garantindo a integridade das plantas assim como a segurança dos trabalhadores e populações vizinhas à instalação. O controle do manuseio, armazenamento e segurança do tanque é feito com um sistema de instrumentos que monitoram o nível, a pressão interna, a temperatura e, em alguns casos, a composição do fluido. Para auxiliar esse controle e garantir a segurança, são instalados alguns acessórios aos tanques:

3.8.1. Pintura

Em geral, os tanques de armazenamento são pintados externamente com uma tinta primária que inibe a corrosão, e o acabamento é feito com tinta de esmalte acrílico. Os seus interiores não precisam de proteção, salvo as estruturas de suporte e chapas no teto, onde aplica-se uma proteção primária e com acabamento em tinta de esmalte acrílico branco. Os tanques verticais têm os seus corrimãos e proteções pintadas com tinta amarela (cor de referência para este tipo de equipamento) de esmalte acrílico.

O aço no ambiente industrial está sujeito a diversos tipos de corrosão, como a corrosão atmosférica, a corrosão em contato com o fluido armazenado, água acumulada no fundo, etc. Portanto, os tanques são sempre revestidos externa e internamente com pintura ou películas protetoras adequadas.

3.8.2. Respiro aberto (open vent)

Os respiros, ou *vents*, basicamente são aberturas na cobertura dos tanques para ventilação (Figura 12). Alguns tanques pequenos de teto fixo possuem uma conexão no teto aberta para a atmosfera, e essa abertura pode ser feita diretamente ou através de uma válvula.

Durante o abastecimento do tanque, conforme o nível do líquido aumenta, os vapores são forçados a sair pelo “vent” evitando o aumento da pressão interna do equipamento. Por outro lado, durante o esvaziamento, conforme o líquido é retirado, o ar permeia para dentro do tanque através do “vent” evitando a criação de vácuo interno.

Esses respiros são normalmente usados quando o produto armazenado tiver ponto de fulgor igual ou superior a 37,8 °C.

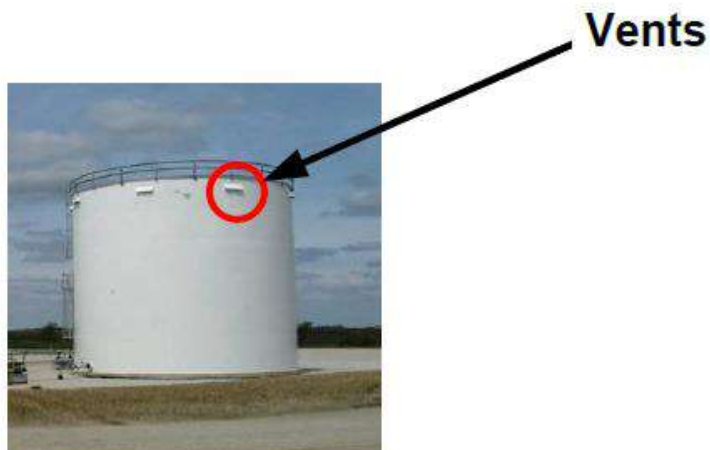


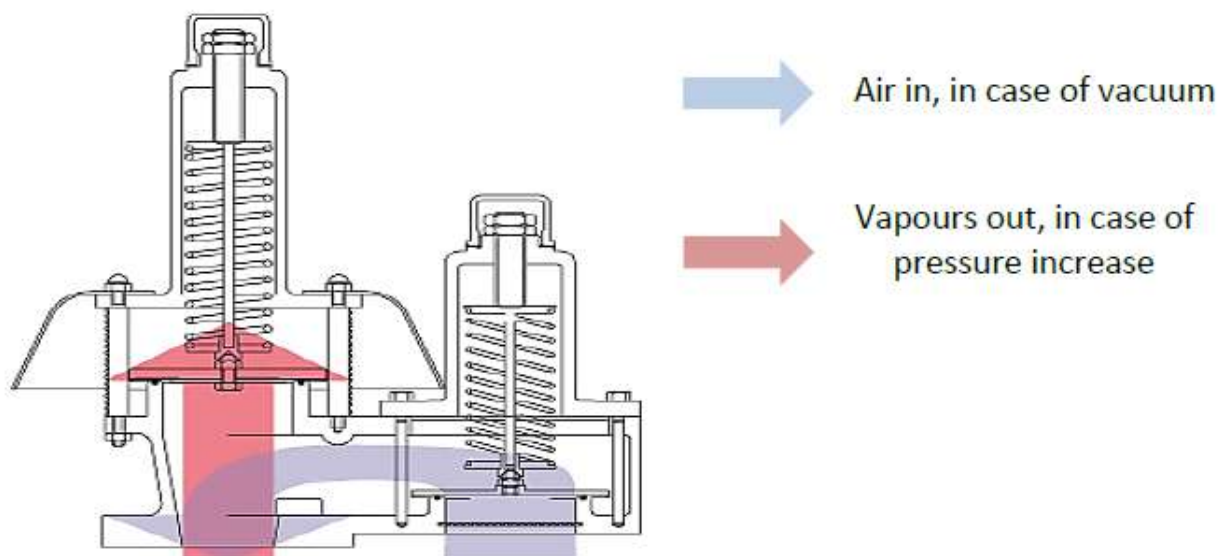
Figura 12 - Exemplo de um respiro (vent) em um tanque.

[Fonte: Adaptado de MANSOUR, 2012].

3.8.3. Válvula de Pressão e Vácuo (Pressure/Vacuum Relief Valve – PVRV)

As válvulas de pressão e vácuo, ou PVRV's, são usadas, ao invés do "vent", quando o produto armazenado apresenta ponto de fulgor inferior a 37,8 °C. Seu uso é obrigatório em tanques de teto fixo. As válvulas funcionam conjuntamente, a pressão e vácuo (Figura 13). Quando a pressão excede o valor pré-ajustado, a exaustão abre eliminando o excesso de pressão. Ao atingir a pressão ajustada, a porta de exaustão fecha. Em situações de pressão negativa, a exaustão abre permitindo a entrada de ar atmosférico ou gás inerte. A injeção de gás inerte evita a entrada de oxigênio no interior do equipamento, consequentemente evitando a formação de uma mistura inflamável.

Figura 13 - Exemplo de uma PVRV.



[Fonte: MANSOUR, 2012].

3.8.4. Sistema de Medição

Em tanques para armazenamento de líquidos o sistema de medição de nível pode contar com uma bóia que flutua com o nível do produto, ao longo de dois fios que servem como guia. O centro da bóia é ligado a uma trena, que, após passar por uma série de roldanas, apresenta a leitura direta em um visor externo. A medição do nível de grandes tanques deve ser feita com precisão, pois um erro de milímetros pode representar uma diferença bastante significativa no volume transferido [SIQUEIRA, 2010].

3.8.5. Câmaras e Aplicadores de Espuma Contra Incêndio

De acordo com a norma ABNT NBR 7505-7, é obrigatória a instalação de sistemas de espuma contra incêndio para a proteção de todas as áreas onde seja possível o derrame ou o vazamento de líquidos combustíveis ou inflamáveis. Todos os parâmetros relacionados aos sistemas de espuma são regidos pela ABNT NBR 12615.

As espumas utilizadas atualmente são geradas através da introdução de ar, por ação mecânica, em soluções preparadas a partir de LGE (Líquido Gerador de

Espuma) [FIGUEREDO, 1998]. Os primeiros LGE's utilizados eram do tipo protéico, que apresentavam baixa estabilidade no estoque, e por isso vem sendo substituídos pelos flúor-protéicos, contendo surfactantes fluorados que melhoram a fluidez da espuma e a resistência à temperatura [FIGUEREDO, 1998]. Existem ainda os LGE's sintético-fluorados que são melhores em estabilidade de estoque, fluidez na superfície do líquido em chamas e ainda possibilitam o uso de água do mar na mistura, em caso de necessidade.

Para tanques com teto fixo, a proteção pode ser feita por câmaras de espuma, instaladas no costado do equipamento (Figura 14). O equipamento denominado proporcionador regula a proporção adequada da mistura de ar mais o LGE. O descarregamento ocorre contra um defletor que direciona a espuma contra a parede interna do tanque, reduzindo a agitação da superfície do líquido e a submersão da espuma.

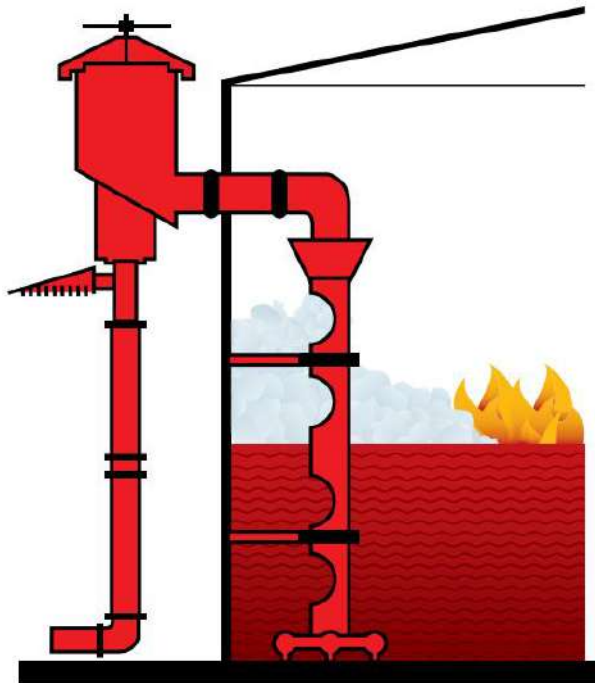


Figura 14 - Exemplo de uma câmara de espuma.

[Fonte: Argus Engenharia, 2014].

3.8.6. Aterramento Elétrico

Os tanques de armazenamento devem ser aterrados para escoamento de correntes eletrostáticas, pois no processo de descarga do produto no interior do tanque, podem ocorrer descargas eletrostáticas suficientes para servirem de fonte de ignição dos vapores inflamáveis presentes no interior do tanque.

4. Modelagem matemática de incêndios em poça

Há basicamente três tipos de incêndio envolvendo líquidos e vapores: incêndio em poça (*pool fire*), incêndio em jato (*jet fire*) e bola de fogo (*fire ball*). Para a prevenção e o combate ao incêndio industrial é muito importante compreender o seu comportamento, e utilizar as correlações apropriadas que descrevam suas características principais, tal como modelos matemáticos para estimar a radiação térmica emitida pela chama.

4.1. Incêndio em Poça

Conforme ocorre o vazamento de líquidos há a possibilidade de formação de poças. Simultaneamente, existe evaporação de parte do produto. Quando este material é inflamável ou combustível, pode ocorrer a formação de uma nuvem de vapor próxima à superfície da poça. Esta pode eventualmente entrar em ignição na presença de uma fonte de ignição, dando origem a um incêndio em poça (Figura 15). [CCPS, 2008].



Figura 15 - Exemplo de incêndio em poça.

[Fonte: HazardEx, 2013].

4.2. Incêndio em Jato

Este tipo de incêndio ocorre em vazamentos de combustíveis líquidos ou gasosos armazenados sob pressão. Durante a liberação existe a formação de um jato. Ao sofrer ignição, este jato forma um “incêndio em jato”, como mostra a Figura 16 [CCPS, 2008].



Figura 16 - Exemplo de jet-fire no evento acidental em Caxias.

[Fonte: Foto por Yasuyoshi Chiba/AFP, 2013].

4.3.Fireball

Eventos de “fireball” ou “bola de fogo” podem ocorrer por variados motivos. Observam-se bolas de fogo em virtude de explosões de tanques de armazenamento, por exemplo. Casos de BLEVE envolvendo líquidos combustíveis também tendem a formar bolas de fogo. São formadas ainda a partir da explosão de nuvens inflamáveis. Bolas de fogo também podem ocorrer durante incêndios em tanques armazenando combustíveis líquidos, como no caso do evento acidental aqui estudado (Figura 17).



Figura 17 - Exemplo de fireball no evento acidental em Caxias.

[Fonte: Reuters/Veja, 2013].

O desenvolvimento de uma bola de fogo se dá através de esferas crescentes, progredindo fortemente na direção vertical, mas com pequena

duração. Este tipo de evento é bastante perigoso devido à alta quantidade de radiação térmica liberada pelas enormes bolas de fogo geradas.

4.4. Modelagem matemática de incêndio em poça

O incêndio que atingiu o parque de tancagem da empresa Petrogold gerou os três tipos de fenômenos: *jet-fire*, *fireball* e *pool fire*. O estudo aqui desenvolvido porém limita-se a avaliar o incêndio em poça (*pool fire*).

Uma das modelagens matemáticas usadas para descrever incêndios em poça foi desenvolvida pelo NIST – National Institute of Standards and Technology, especificamente pelos pesquisadores Kevin McGrattan, Howard Baum e Anthony Hamins. No ano de 2000 foi publicado o documento “Thermal Radiation from Large Pool Fires” [NIST, 2000].

4.5. Modelo de Chama Sólida

Para estimar a quantidade de calor que atinge a vizinhança durante um grande incêndio em poça é preciso entender como essa radiação é liberada. Ou seja, entender a geometria das chamas que liberam o calor. Na prática essa geometria é bastante complexa e dinâmica, variando em função de inúmeros fatores ambientais imprevisíveis. Em incêndios em poça uma propriedade bastante estudada e que produz estimativas razoavelmente exatas é a altura média da chama. Assim, um método simples para estimar a radiação gerada a partir de um grande incêndio em poça é o chamado “modelo de chama sólida”. Neste modelo, a chama é idealizada como um cilindro vertical sólido, que emite radiação igualmente por toda a sua lateral. Esse modelo é bastante simples, requerendo apenas estimativas do diâmetro e altura do cilindro.

No modelo de chama sólida, o fluxo de radiação térmica \dot{q}'' emitido pelo incêndio em poça e que atinge um objeto próximo é dado pela equação (5) [FLEURY, 2010].

$$\dot{q}'' = F\tau\varepsilon_f E_f \quad (5)$$

Onde F é o fator de forma geométrico (chamado também de fator de configuração) que define a fração de energia radiada pela chama que é interceptada pelo objeto receptor (ou “alvo”); τ é a transmissividade atmosférica, adotada como um para o pior caso (máxima transmissividade); ε_f é a emissividade efetiva da chama, geralmente expressa como $1 - e^{-\kappa D}$, onde κ é um coeficiente atenuante e D é o diâmetro da poça; E_f é o poder emissivo total da chama, em geral função do combustível. Para poças maiores que alguns metros em diâmetro o valor da emissividade efetiva da chama ε_f calculado pela equação é aproximadamente um. O que precisa ser estimado é o fator de forma F e o poder emissivo da chama E_f , abordados nos próximos itens.

A medição do poder emissivo de grandes chamas é difícil e sujeita a incertezas. Métodos computacionais ultrapassados, incluindo as diretrizes de 1975 do HUD (*Department of Housing and Urban Development* dos Estados Unidos), consideravam o fator de forma e o poder emissivo de forma independente. Isso, para alguns cenários de incêndio, levava à estimativas de radiação emissiva da poça muito maior do que o total de energia da mesma. O que faltava nessas análises era a contabilização total da energia. Esse problema foi solucionado nas últimas décadas. Atualmente é reconhecido que a taxa total de calor emitido (HRR) é a melhor forma de estimar o potencial de causar danos. Além disso, o HRR da poça é mais fácil de estimar do que sua temperatura ou tamanho, pois ele é proporcional à taxa de consumo de combustível, uma quantidade relativamente fácil de medir.

Os pesquisadores do NIST realizaram mais de 100 experimentos de grande escala com uma variedade de combustíveis líquidos e gasosos, e observaram que uma das medidas mais confiáveis é a taxa mássica de queima, através do qual é possível estimar a taxa total de calor emitido. Uma fração do HRR total do fogo é emitida na forma de radiação térmica. Para poças de até aproximadamente quatro metros de diâmetro, a razão da taxa de energia radiada para a vizinhança sobre o HRR total do fogo, χ_r , se encontra entre 0,30 e 0,40. Este valor decresce com o aumento do diâmetro da poça, devido à fumaça. Isso ocorre porque boa parte da

radiação térmica de um incêndio em poça é emitida da “parede” luminosa de chamas, próxima a sua base. As chamas acima dessa parede luminosa são obstruídas pela fuligem formada devido a combustão incompleta (Figura 18).

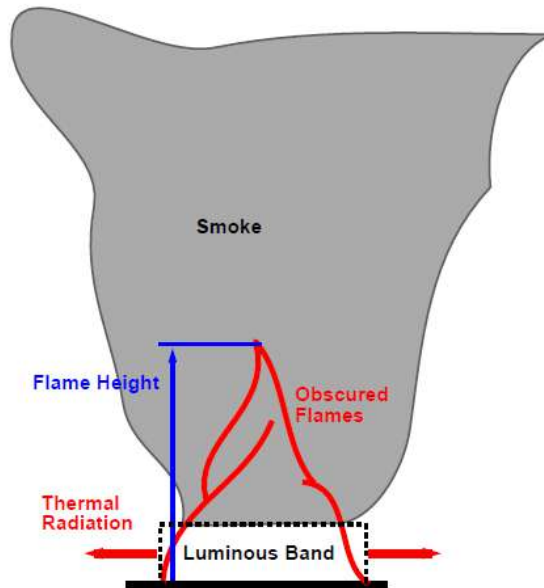


Figura 18 - Diagrama esquemático de um grande fogo de combustível líquido.
[Fonte: NIST, 2000].

A imagem idealizada da poça usada na maioria das análises de radiação térmica é aquela onde assume-se que o fogo possui forma cilíndrica com uma altura H e diâmetro D com um HRR total \dot{Q} , ou seja, o modelo de chama sólida. De forma mais geral, pode-se assumir que o fogo tem uma forma arbitrária de perímetro P . A energia radiada da poça pode ser expressa por (6):

$$\chi_r \dot{Q} = P H E_f \quad (6)$$

Onde χ_r decresce com o aumento do diâmetro D da poça de acordo com a relação (7):

$$\chi_r = \chi_{r \max} e^{-kD} \quad (7)$$

onde $\chi_{r \max} = 0,35$ e $k = 0,05 \text{ m}^{-1}$. Esses valores recomendados pelo NIST são baseados em dados experimentais envolvendo diferentes líquidos combustíveis. A Figura 19 exhibe esses dados, assim como a curva ajustada. O

HRR total da poça, \dot{Q} , pode ser expresso como o produto da taxa total de calor emitido por unidade de área \dot{q}''_f e a área A da base do poça (8):

$$\dot{Q} = \dot{q}''_f A \quad (8)$$

Para um dado combustível, a taxa total de calor emitido por unidade de área \dot{q}''_f é relativamente constante, pois a taxa mássica de queima do combustível por unidade de área é relativamente constante.

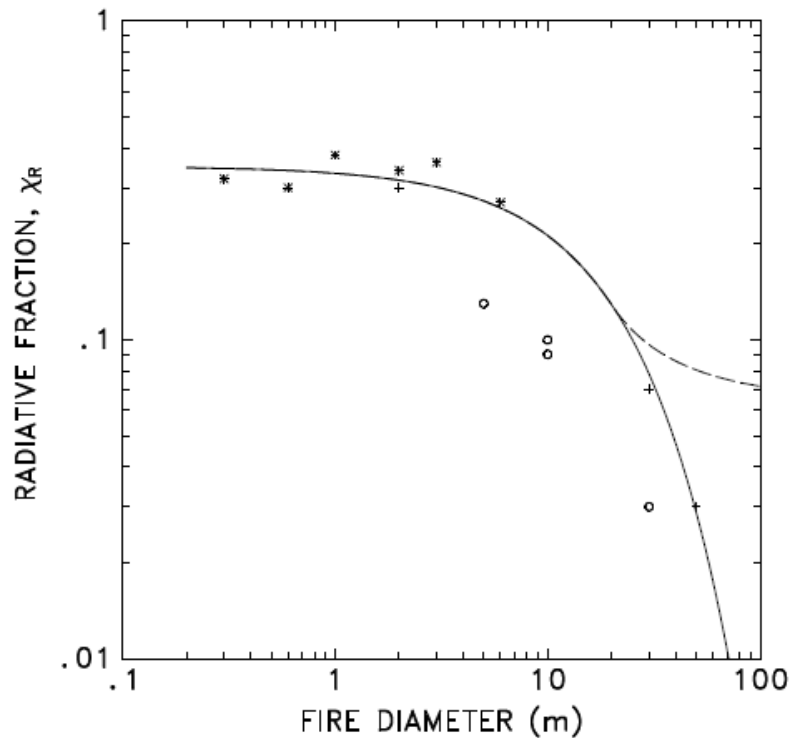


Figura 19 - Fração radiada χ_r como função do diâmetro D do fogo para heptano (*), óleo cru (o) e querosene (+). A linha contínua é a curva ajustada para $\chi_r = 0,35 \exp(-kD)$, onde $k = 0,05$ (7).

[Fonte: NIST, 2000].

Os dois parâmetros restantes de (6) são o poder emissivo E_f e a altura H do cilindro idealizado. Os valores reportados de poder emissivo de líquidos inflamáveis variam bastante de fonte para fonte. Essa variação tem relação com a definição da altura do cilindro idealizado que representa a poça. Quando visto de uma certa distância, a poça aparenta ser fumacenta, com ocasionais explosões de chama luminosa saindo da fumaça. A altura da chama é definida como sendo a extensão vertical da região de combustão, como pode ser visto na Figura 18, e

pode ser interpretado como a altura máxima acima do solo na qual essas explosões luminosas podem ser vistas. Pegando uma chama cilíndrica idealizada, com altura igual a altura da chama do fogo real (Figura 18, Figura 20), em média cerca de 20% da área superficial do fogo cilíndrico é composto de chamas visíveis e 80% composto de fumaça. A maior parte das chamas visíveis estão localizadas na base do fogo, ainda que periodicamente algumas chamas luminosas emergem através da pluma de fumaça mais acima.

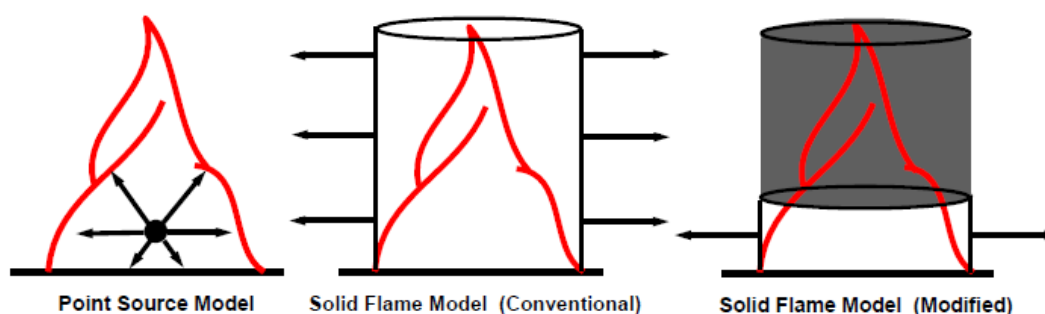


Figura 20 - Diagrama esquemático de modelos de radiação térmica.

[Fonte: NIST, 2000].

a) Determinação do poder emissivo da chama (E_F) e sua altura (H)

Os valores reportados de poder emissivo são em sua maioria valores médios para todo o comprimento da chama, e serão significativamente menores que o poder emissivo das chamas luminosas. Se este poder emissivo médio relativamente baixo for aplicado à área superficial do cilindro idealizado, cuja altura é equivalente à altura da chama do fogo real, então a estimativa do fluxo de radiação térmica a distâncias maiores do que alguns diâmetros de poças será mais preciso. Entretanto, em distâncias mais próximas, a estimativa do fluxo de radiação térmica será tipicamente subestimada, pois assume-se que a energia radiada está distribuída por toda a altura do fogo, ao invés de estar concentrada próxima à sua base na realidade, como mostra a Figura 18.

Por exemplo, para poças com diâmetros maiores que 30 metros, o poder emissivo médio reportado por muitos pesquisadores é menor que $31,5 \text{ kW/m}^2$, que é o valor limite usado pelo HUD para determinar a Distância de Separação Aceitável (DSA) para prédios e estruturas. As Figuras 21 e 22 mostram

correlações empíricas do poder emissivo E_f , e da altura da chama H , para dois dos métodos mais utilizados para prever a radiação térmica de grandes poças, comparados com a correlação usada pelo NIST. Tanto o método de Shokri e Beyler e o método de Mudan e Croce usam uma média do poder emissivo ao longo da altura da chama da poça. Ambas as correlações se encontram abaixo de $31,5 \text{ kW/m}^2$ para poças com diâmetro maior que 30 metros (ver Figura 21).

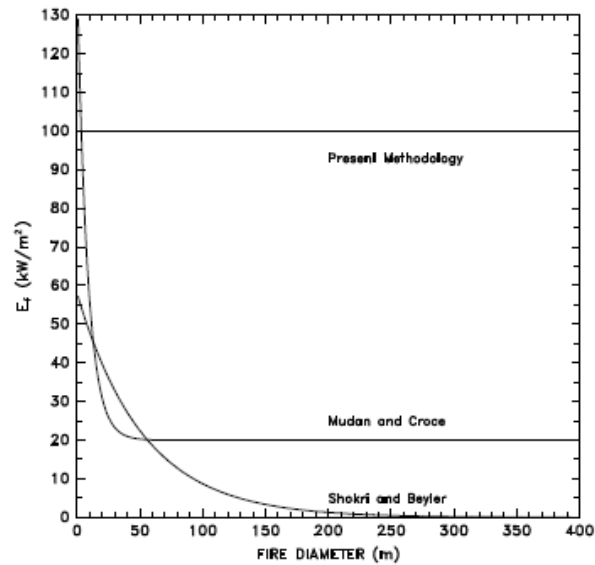


Figura 21 - Poder emissivo em função do diâmetro do fogo para um pool fire de gasolina.
[Fonte: NIST, 2000].

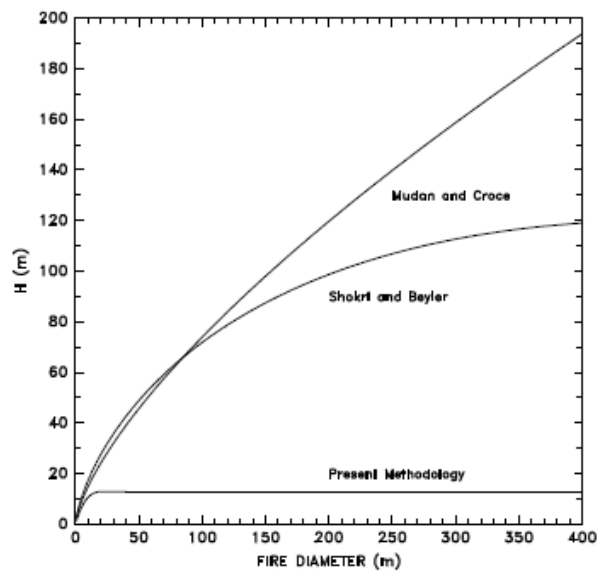


Figura 22 - Altura da chama em função do diâmetro do fogo para incêndio em poça.
[Fonte: NIST, 2000].

Para simplificar, o NIST adota um poder emissivo constante e igual a 100 kW/m². A altura da zona luminosa H pode ser calculada por (9). Para simplificar a análise, assume-se a área da poça como circular ($P = \pi D$ e $\dot{Q} = \pi(D/2)^2 \dot{q}''_f$). Substituindo as expressões para χ_r e \dot{Q} em (6), encontra-se a expressão para a altura H:

$$H = \frac{\chi_{r \max} e^{-kD} D \dot{q}''_f}{4 E_f} \quad (9)$$

H é apresentado como função de D na Figura 22. Na figura H atinge um valor máximo em D=20 m. Devido à escassez de dados sobre χ_r e \dot{Q} para grandes poças, assume-se que para poças com diâmetros maiores que 20 metros, a altura da zona de chama luminosa permanece em seu valor máximo. O valor máximo de H é calculado substituindo D=20 m, $\chi_{r \max} = 0,35$, $k=0,05 \text{ m}^{-1}$ e $E_f=100 \text{ kW/m}^2$ em (10):

$$H_{\max} = \frac{0,35 e^{-1} 20 \dot{q}''_f}{4 \cdot 100} = 6,4 \times 10^{-3} \dot{q}''_f \quad (10)$$

onde H_{\max} é em metros e \dot{q}''_f em kW/m². Diversas poças formadas em eventos acidentais reais em indústrias têm diâmetros maiores que 20 metros. Nesses casos, necessita-se apenas de uma estimativa da taxa total de calor emitido por unidade de área para obter a altura da zona de chama luminosa. Esses valores encontram-se na Tabela 1. Para poças com diâmetros menores que 20 metros, (9) pode ser usada para obter o valor de H.

A Figura 23 compara o produto de E_f e H pelas três metodologias. Para incêndios cujos diâmetros se encontram entre 1 e 50 metros, as três metodologias encontram valores semelhantes de $H \cdot E_f$, com a presente metodologia sendo a mais conservativa. Acima de 50 metros, os métodos divergem. Segundo NIST isso ocorre porque os experimentos nas quais as correlações foram baseadas não incluíam poças com diâmetro acima de 50 metros. As diretrizes do HUD, entretanto, devem contabilizar potenciais poças com diâmetros de centenas de metros. A presente metodologia assume então que acima de aproximadamente 20 metros, o fluxo de energia radiada por comprimento de perímetro do fogo, $H \cdot E_f$,

permanece relativamente constante, permitindo assim que sejam feitas previsões para fluxo de radiação térmica de grandes poças pouco estudadas experimentalmente.

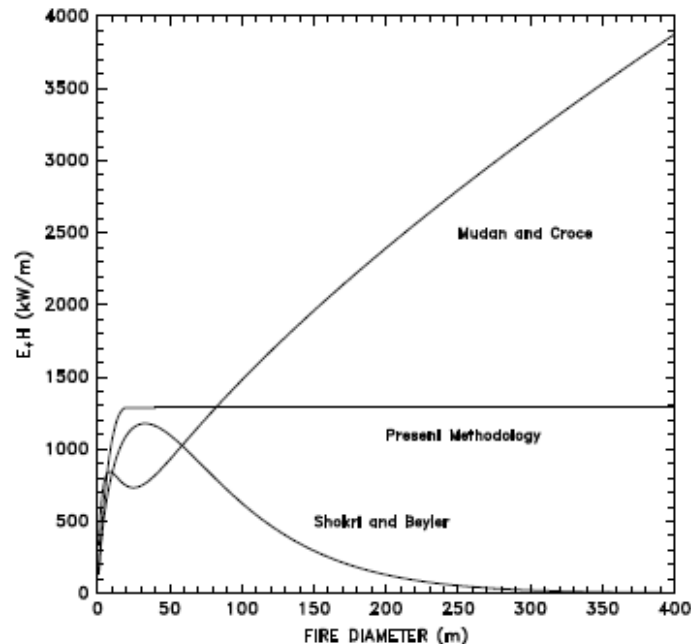


Figura 23 - Fluxo de energia radiativa, $H \cdot E_f$, em função do diâmetro da chama para um incêndio em poça.

[Fonte: NIST, 2000].

b) Determinação do fator de forma (F)

Resta então determinar o fator de forma F para poder calcular o fluxo de radiação térmica em um alvo. Este fator leva em consideração a relação geométrica entre a chama emissora de radiação e o alvo receptor desta radiação. A quantidade de energia emitida por uma superfície e que atinge um alvo infinitesimal é dada por (11):

$$\dot{q}'' = F_{12} E_f \quad (11)$$

Onde \dot{q}'' é o fluxo de calor radiante em kW/m², F_{12} é o fator de forma, também chamado de fator de configuração e E_f é o poder emissivo da chama (100

kW/m², recomendado pelo NIST). O fator de forma varia de 0 a 1, onde 1 é quando toda a radiação emitida é recebida pelo alvo.

Por motivos de simplificação, é normal que o formato da chama seja aproximado para um cilindro ou retângulo. Esta simplificação é considerada aceitável mesmo que um formato padrão e estável não reproduza a verdadeira geometria observada.

O modelo de chama sólida sempre adota a chama como um cilindro reto e o alvo como um ponto infinitesimal, como pode ser visto na Figura 24. O método de Shokri & Beyler apresenta as equações (12) e (13) para calcular os fatores de forma para alvos verticais e horizontais [FLEURY, 2010].

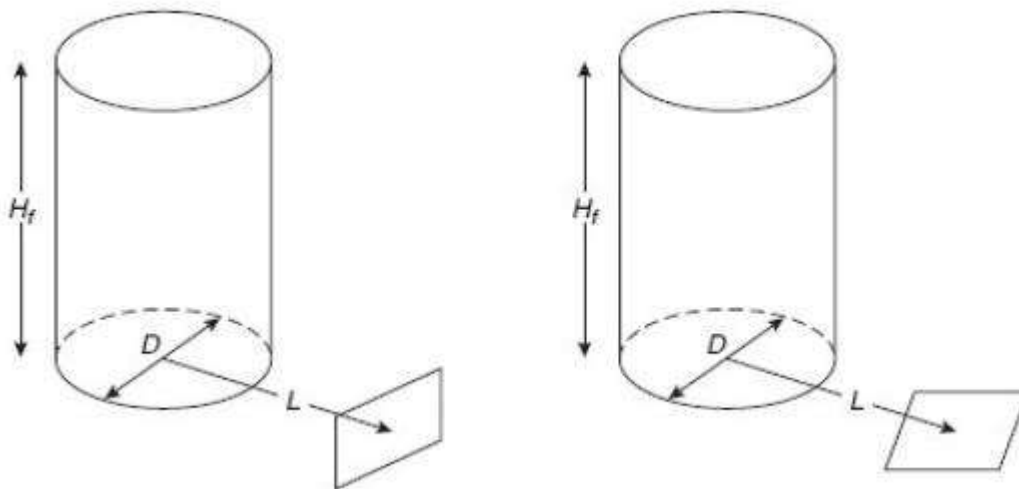


Figura 24 - Fator de forma geométrico no formato de chama cilíndrica para alvo vertical e horizontal no nível do solo.

[Fonte: FLEURY, 2010].

$$F_{12,H} = \frac{B - \frac{1}{S}}{\pi * \sqrt{B^2 - 1}} * \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(B + 1) * (S - 1)}}{\sqrt{(B - 1) * (S + 1)}} \right) - \frac{A - \frac{1}{S}}{\pi * \sqrt{A^2 - 1}} * \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(A + 1) * (S - 1)}}{\sqrt{(A - 1) * (S + 1)}} \right) \quad (12)$$

$$F_{12,V} = \frac{1}{\pi * S} * \tan^{-1} \left(\frac{h}{\sqrt{S^2 - 1}} \right) - \frac{h}{\pi * S} * \tan^{-1} \sqrt{\frac{S - 1}{S + 1}} + \frac{A * h}{\pi * S * (\sqrt{A^2 - 1})} * \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{(A + 1) * (S - 1)}}{\sqrt{(A - 1) * (S + 1)}} \right) \quad (13)$$

Onde:

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S}, \quad B = \frac{1 + S^2}{2S}, \quad S = \frac{2L}{D} \quad \text{e} \quad h = \frac{2H}{D}$$

Para alvos verticais posicionados acima da altura da base do cilindro, emprega-se a propriedade aditiva do fator de forma. Ou seja, são considerados dois cilindros – um abaixo e um acima do alvo, e soma-se os fatores de configuração de cada um deles ($F_{12,V1} + F_{12,V2}$).

$$F_{12,V} = F_{12,V1} + F_{12,V2} \quad (14)$$

Já para alvos horizontais que se encontram acima da altura do solo, considera-se que este recebe radiação de apenas um dos dois cilindros. Assume-se também que o alvo recebe radiação em apenas uma das faces, superior ou inferior, como pode ser visto na Figura 25.

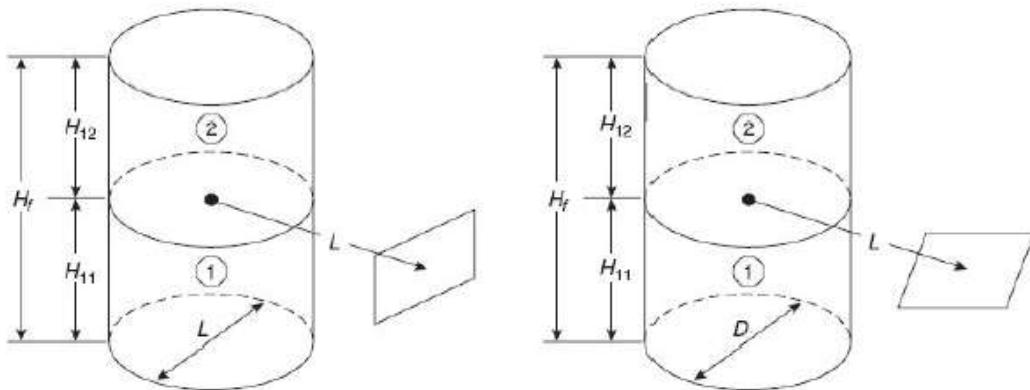


Figura 25 - Representação para o fator de forma de dois cilindros para um alvo acima do solo.

[Fonte: FLEURY, 2010].

Especificamente para incêndios em tanques, três casos de fator de forma devem ser levados avaliados, conforme mostra a Figura 26 [Crocker & Napier, 1986].

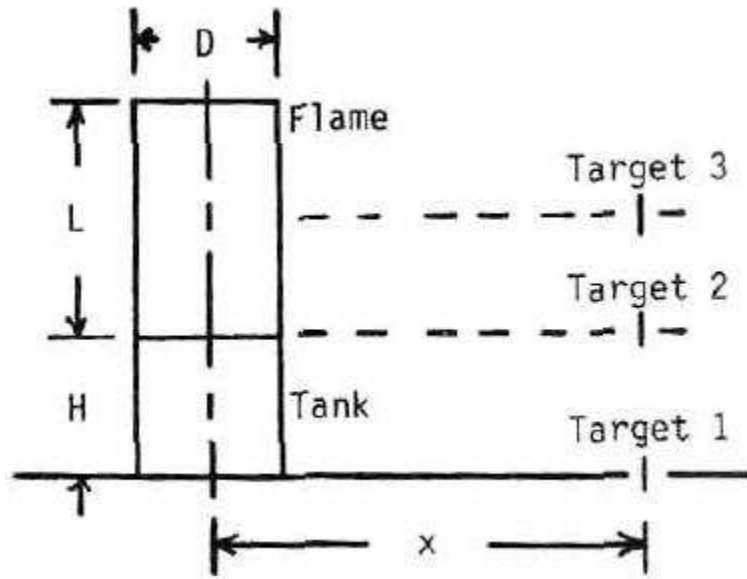


Figura 26 - Modelo de chama sólida em um incêndio em tanque.

Fonte: Crocker & Napier, 1986].

Para tanques de armazenamento, se os tanques adjacentes tem a mesma altura, a intensidade máxima de radiação é recebida no “Target 2” (Figura 26).

Para alvos localizados em altura superior a do tanque em chamas, a intensidade máxima é no “Target 3” (Figura 26). É calculada em frente ao ponto médio da chama.

Por fim, quando considera-se a radiação incidente em pessoas, normalmente no nível do solo, ocorre o caso do “Target 1” (Figura 26).

No sistema tanque-chama, a radiação emitida pelas paredes do tanque pode ser ignorada de forma que \dot{q}'' é dado pela equação (15).

$$\dot{q}'' = [F(x, L + H) - F(x, H)] * E_f \quad (15)$$

Um modo de simplificar o cálculo do fator de forma é assumindo que a chama é uma parede vertical de altura H, emitindo energia radiativa a uma taxa E_f [NIST, 2000].

A presença de uma barreira física natural ou feita pelo homem pode ser incorporada nos cálculos do fator de forma. A metodologia NIST apresentada

anteriormente foi pensada para ser conservativa, porém não é conservativa no cálculo da proteção gerada por uma barreira de proteção. Na modelagem da NIST a saída de energia radiativa é assumida como estando concentrada perto da base e não distribuída ao longo de toda a altura do fogo. Logo a eficiência do bloqueio de uma barreira térmica localizada próxima ao solo é exagerada.

Para remediar essa situação a NIST sugere que, ao avaliar a influência de uma barreira de proteção, o poder emissivo da chama seja reduzido pela metade, ou seja, de 100 kW/m² para 50 kW/m². A altura da zona luminosa, conforme (9), irá dobrar como um resultado de um menor poder emissivo.

4.6. Determinação da Distância de Separação Aceitável (DSA)

Existem dois critérios para o cálculo da distância segura: um para estruturas e um para pessoas. A distância segura para estruturas é a distância onde o alvo é atingido por fluxo de radiação térmica inferior a 31,5 kW/m². Para pessoas, o limite é o fluxo de 1,4 kW/m² [NIST, 2000].

Adotando o procedimento NIST para determinação da distância segura, os cálculos podem ser fortemente simplificados, conforme detalhado no próximo item.

a) Cálculo simplificado

Segundo a NIST, o cálculo simplificado para determinação de distâncias seguras pode ser empregado nos casos em que o combustível é líquido na temperatura e pressão ambiente. Exige-se ainda que a poça possa ser aproximada como circular e que não existam barreiras ou obstruções a serem consideradas. Caso essas condições sejam atendidas, gráficos simplificados podem ser consultados.

Os valores de DSA apresentados neste gráfico se baseiam na hipótese que o perímetro do fogo é circular. Se este não é o caso, um diâmetro equivalente deve ser calculado. Se a razão entre a maior e a menor dimensão da poça é inferior a 2,5, então pode-se expressar o diâmetro equivalente como sendo dado pela equação (16).

$$D = \sqrt{4A/\pi} \quad (16)$$

Caso contrário, uma combinação de círculos ou placas planas podem ser usadas como substitutas para a forma real da poça. Um diagrama esquemático pode ser visto na Figura 27. A região de formato irregular indica a área da poça. Ao invés de calcular o fator de forma para o fogo real, um cilindro circular de igual altura pode ser desenhado de forma que obscureça completamente a “visão” que o alvo tem do incêndio.

Se for avaliado mais de um alvo, o cilindro que representa a chama tem de ser redesenhado para cada local, a menos que o cilindro seja desenhado de modo que o fogo real seja completamente circunscrito ao cilindro original. O NIST alerta que se a região do incêndio é alongada, desenhar apenas um cilindro pode produzir um resultado muito conservador.

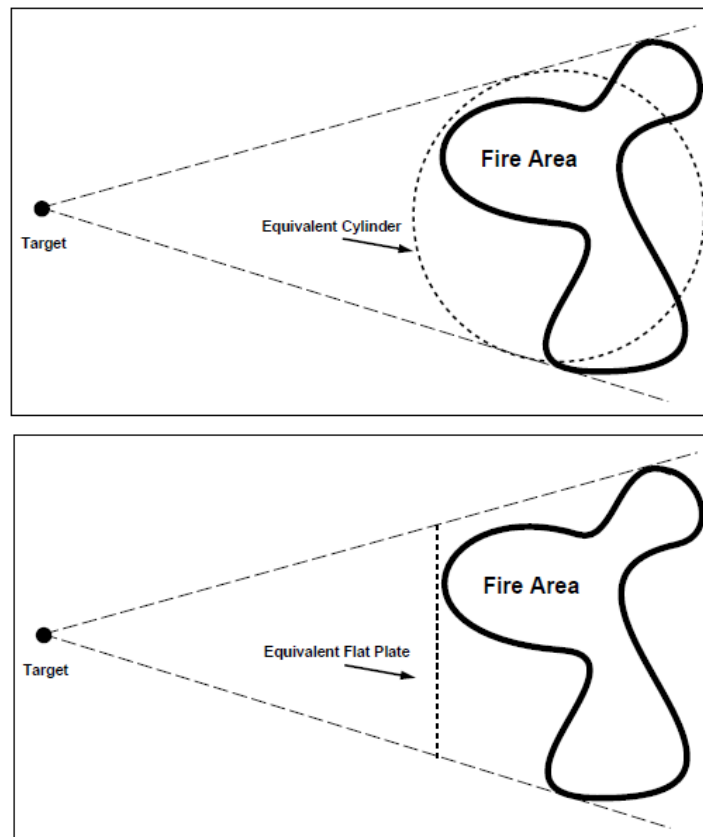


Figura 27 - Diagrama esquemático mostrando como um cilindro ou placa vertical pode ser usado para simplificar o cálculo do fator de forma.

[Fonte: NIST, 2000]

Uma vez que o diâmetro equivalente é determinado, a distância segura para pessoas e/ou estruturas pode ser obtida pela Figura 28. Destaca-se que a distância segura é definida a partir da borda da poça, e não de seu centro.

O gráfico da Figura 28 apresenta dois conjuntos de curvas para taxas de liberação de calor por unidade de área de queima. As curvas do conjunto inferior, identificadas como “structures”, servem para estimar as distâncias seguras para estruturas (com fluxo radiativo máximo de 31,5 kW/m²). Por outro lado, o conjunto de curvas na parte superior do gráfico, identificado como “people”, aplica-se a determinação da distância segura para pessoas (fluxo radiativo máximo de 1,4 kW/m²). Os valores associados a cada curva são as taxas de liberação de calor por área de queima \dot{q}''_f (kW/m²) de determinado combustível. Estes valores para vários combustíveis estão listados na tabela do Anexo I.

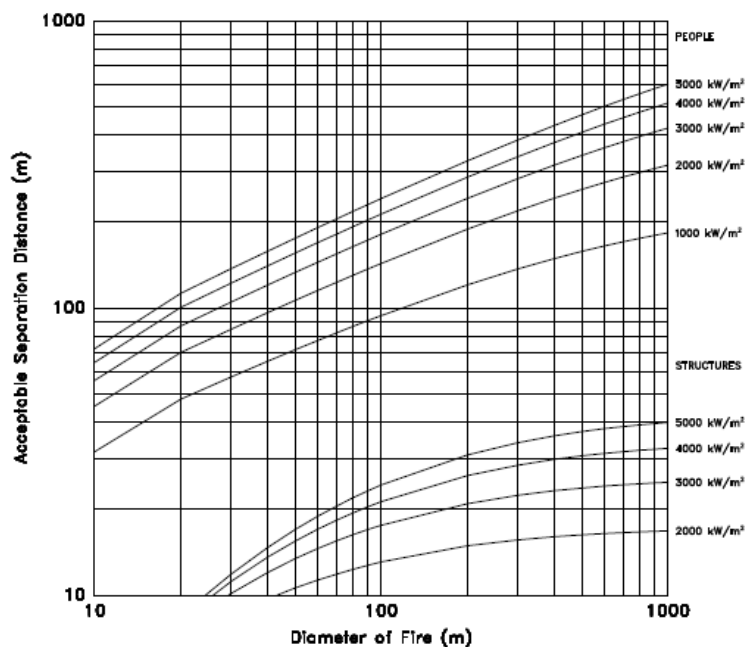


Figura 28 - Distância de separação aceitável (DSA) para incêndios aproximadamente cilíndricos proveniente de derramamento de líquidos perigosos, em metros.

[Fonte: NIST, 2000].

Uma característica interessante deste método é que cada combustível apresenta uma distância de segurança máxima, na qual a radiação nunca ultrapassará o limite seguro, independentemente do tamanho da poça de incêndio.

Este valor máximo pode ser obtido via gráfico extrapolando-se as curvas das Figuras 28 e 29 para valores elevados de diâmetro de poça. A Tabela 1 apresenta estes valores limites para diferentes combustíveis, na coluna “DSA”. A tabela completa pode ser vista no Anexo I.

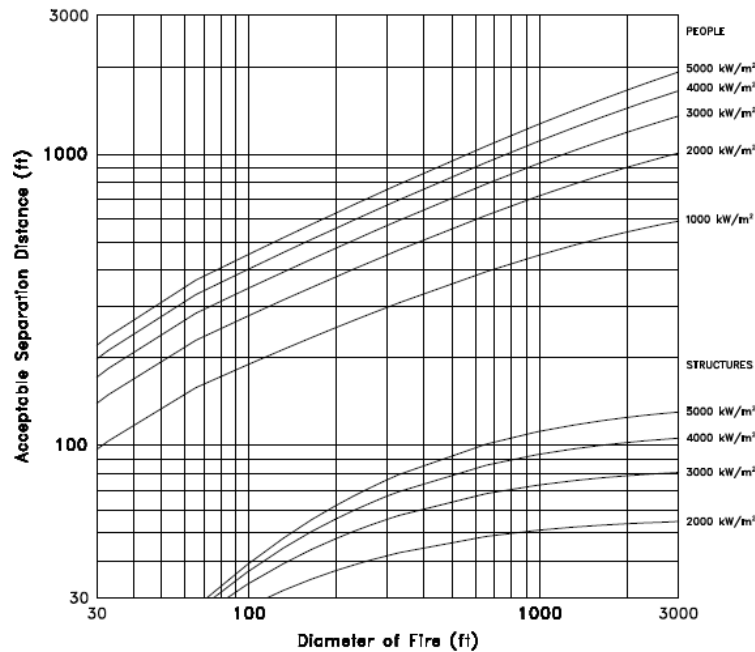


Figura 29 - Distância de separação aceitável (DSA) para incêndios aproximadamente cilíndricos proveniente de derramamento de líquidos perigosos, em pés.

[Fonte: NIST, 2000].

Tabela 1 - Dados de taxa de queima, calor de combustão, taxa de liberação de calor e Distância de Separação Aceitável para alguns líquidos.

Líquido	Taxa de queima, m'' (kg/m ² /s)	Calor de combustão (kJ/kg)	HRR por unidade de área, \dot{q}''_f (kW/m ²)	DSA	
				Pessoas (m)	Estruturas (m)
Ciclohexano	0,122	43500	5300	45	1200
Diesel	0,035	39700	1400	12	320
Acetato de etila	0,064	23400	1500	15	340
Acrilato de etila	0,089	25700	2300	20	530
Álcool etílico	0,015	26800	400	10	90
Etil Benzeno	0,121	40900	4900	40	1100
Éster etílico	0,094	33800	3200	30	730
Gasolina	0,055	43700	2400	20	550
Hexano	0,074	44700	3300	30	750

[Fonte: adaptado de NIST, 2000].

b) Cálculo detalhado

Para os casos onde o método simplificado não é apropriado, o método de cálculo detalhado deve ser usado. Isso ocorre principalmente se obstruções físicas como barreiras térmicas estão sendo consideradas, ou se a poça não é circular e a aproximação por diâmetro equivalente não é adequada.

Conforme obtido anteriormente, neste caso o fluxo de radiação térmica é dado por:

$$\dot{q}'' = F E_f .$$

O poder emissivo E_f incêndios em poça com barreira é 50 kW/m², conforme recomendado pelo NIST e discutido anteriormente. O fator de forma F pode ser calculado conforme descrito anteriormente.

É possível calcular a distância de separação aceitável pela tabela do Anexo II. Para o modelo de chama sólida, entra-se com o valor do fator de forma e H/D (altura da chama dividida pelo diâmetro do cilindro) e tem-se o valor da distância da borda da chama até um elemento, dividido pelo diâmetro do cilindro. Dessa forma, ao multiplicar S/D pelo diâmetro da chama, obtém-se a distância segura.

Vale ressaltar que, segundo as diretrizes do HUD, o limite para o fluxo de radiação térmica para pessoas é de 1,4 kW/m² e para estruturas é de 31,5 kW/m², o que implica que, para satisfazer este padrão, o fator de forma deve ser menor que 0,014 e 0,315 respectivamente para casos sem barreira, e menor que 0,028 para pessoas num cenário que apresente barreira térmica [NIST, 2000].

5. Estudo de Caso: Evento Acidental na Empresa Petrogold S.A.

5.1.A empresa

A Petrogold é uma empresa voltada para o armazenamento e distribuição de combustíveis líquidos. Iniciou suas atividades em 1999, no estado de São Paulo, e em 2010 mudou sua sede para a Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro. Atua atualmente nos estados de São Paulo e Goiás [Mello, 2013].

Atualmente (junho de 2015), o site da empresa não se encontra disponível.

A ANP concedeu autorização à Petrogold em abril de 2009 para o funcionamento da base de distribuição de Duque de Caxias, conforme Anexo III. O documento lista os tipos de combustíveis líquidos com o qual a empresa poderia operar, e descreve cada um dos tanques de seu terminal. Com capacidade total de 2048 m³, a empresa estava autorizada a operar com gasolina, álcool combustível (AEAC: Álcool etílico anidro combustível e AEHC: Álcool etílico hidratado combustível), biodiesel e mistura óleo diesel/biodiesel, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Descrição dos tanques da Petrogold.

Tanque nº	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m ³)	Produto
01	9,32	7,45	508	GASOLINA
02	9,32	7,45	508	GASOLINA
03	7,64	7,50	344	AEAC
04	7,64	7,50	344	AEHC
05	7,64	7,50	344	DIESEL

[Fonte: ANP, 2009 (<http://nxt.anp.gov.br>)]

Embora a autorização da ANP seja para cinco tanques, pode-se notar a existência de seis tanques na Figura 30. Segundo reportagens publicadas pelo jornal O Globo na época do acidente, o sexto tanque era usado para armazenar água [O Globo, 2013a]. O parque de tanques da empresa e suas dependências estão ilustrados na Figura 30.



Figura 30 - Vista aérea do terreno após o acidente.

[Fonte: O Globo, 2013b]

5.2.O incêndio

No dia 23 de maio de 2013, por volta das 11h da manhã, teve início um incêndio que atingiu todo o parque de tancagem da empresa, localizado em Duque de Caxias. Devido a severidade do evento, casas e escolas no entorno foram evacuadas [Agência Brasil, 2013].

Segundo depoimento do coronel Ronaldo Alcântara, comandante da operação do Corpo de Bombeiros de Caxias, para o site G1, o fogo foi controlado às 15h30 [G1.Globo, 2013]. Porém, as chamas foram combatidas por mais de 20h até que o fogo fosse completamente extinto. Os tanques foram muito danificados, como mostra a Figura 30. Imagens do evento (Figura 31) mostram as chamas nos tanques e ao seu redor, no interior do dique.

Durante o evento, viaturas de seis quartéis do Corpo de Bombeiros e cento e vinte homens atuaram no combate. Segundo o site G1, “doze casas foram diretamente atingidas pelas chamas e outros 114 imóveis foram interditados por medida de segurança” [G1.Globo, 2013]. O incêndio teve uma vítima fatal: um funcionário da distribuidora. Este teve 90% do corpo queimado [G1.Globo, 2013].

Diretores dos hospitais da região afirmaram que atenderam outros 5 homens e 2 mulheres, mas que foram liberadas no mesmo dia [Globo News, 2013].



Figura 31 - Incêndio no dique da transportadora Petrogold.

[Fonte: Sidney Rezende, 2013].

A seguir encontram-se outras imagens do acidente (Figuras 32, 33, 34, 35 e 36).



Figura 32 - Incêndio no dique.

[Fonte: O Globo, 2013b].



Figura 33 - Muro destruído durante o evento accidental.

[Fonte: O Globo, 2013b].



Figura 34 - Danos sofridos por estruturas próximas ao tanque.

[Fonte: Antonio Lacerda/EFE, 2013].



Figura 35 - Foto do incêndio da perspectiva dos moradores da vizinhança, na área de contenção delimitada pelo corpo de bombeiros.

[Fonte: Agência O Globo, 2013].



Figura 36 – Parque de tancagem da Petrogold após o incêndio ter sido extinguido.

[Fonte: Brasil 247, 2013].

5.3. Propriedades físico-químicas dos combustíveis armazenados

As características e propriedades da gasolina, do diesel e do etanol são apresentadas nas Tabelas 3 e 4. De acordo com a Tabela 4 pode-se verificar que a gasolina tem um calor de combustão e uma taxa de queima superiores aos

demais combustíveis. Logo, em um cenário genérico de incêndio pode-se, a princípio, concluir que incêndios em tanques de armazenamento de gasolina liberam mais calor do que incêndios em tanques com etanol ou diesel.

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas da gasolina, diesel, AEAC e AEHC.

	Álcool Etílico Anidro	Álcool Etílico Hidratado	Diesel	Gasolina
Aspecto	Líquido límpido, incolor	Líquido límpido, incolor	Líquido límpido, amarelado	Líquido límpido, incolor
Ponto de fusão	- 117 °C	- 117 °C	- 40 a 6 °C	N/D
Ponto de ebulição inicial/faixa de temperatura de ebulição	79 °C	77 °C	150 a 471 °C	>35 °C
Ponto de Fulgor	13 °C	15 °C	38 °C	< - 43 °C
Pressão de vapor	5,8 kPa a 20 °C	5,8 kPa a 20 °C	0,4 kPa a 40°C	79 kPa a 37,8 °C
Temperatura de auto-ignição	363 °C	363 °C	≥ 225 °C	N/D
Coeficiente de partição - noctanol/água	Log Kow: -0,32	Log Kow: -0,32	Log kow: 7,22	Log kow: 2-7
Solubilidade	Solúvel em água e solventes orgânicos	Solúvel em água e solventes orgânicos	Insolúvel em água, solúvel em solventes orgânicos	Insolúvel em água, solúvel em solventes orgânicos

[Fonte: Petrobras, 2014].

Tabela 4 – Propriedades dos combustíveis líquidos relacionadas a sua queima

Líquido	Taxa Mássica de Queima, m" (kg/m²/s)	Calor de Combustão (kJ/kg)	Taxa Total de Calor Emitido (HRR) por unidade de Área, q" (kW/m²)
Álcool Etílico	0,015	26800	400
Diesel	0,035	39700	1400
Gasolina	0,055	43700	2400

[Fonte: Adaptado de NIST, 2000].

5.4. Estudo de caso do evento acidental – empresa Petrogold

O objetivo deste capítulo é, a partir da modelagem de incêndio em poça descrita acima e algumas hipóteses iniciais, avaliar quatro cenários possíveis para o evento acidental da Petrogold. Nestes cenários analisa-se o calor irradiado pela chama, o calor que atinge um alvo e a distância segura para pessoas e estruturas, e avalia-se ainda o efeito de barreiras térmicas na atenuação desta radiação emitida.

5.5. Cenários simulados

a) Cenário 1: Incêndio em poça em um único tanque, sem barreiras térmicas

Neste caso, considera-se que somente o material armazenado dentro de um único tanque que está em chamas, ocasionando o incêndio em poça. Não há barreiras físicas de proteção ao redor do tanque e não existe incêndio no dique. Com o objetivo de avaliar o pior cenário, foi considerado o tanque que apresenta a maior área superficial. Este cenário descreve o caso onde o incêndio em tanque fica contido em um único reservatório.

b) Cenário 2: Todos os tanques e o dique apresentam-se em chamas, sem barreiras térmicas

Esta hipótese é o pior cenário para incêndio em poça em termos de área superficial da poça. Também é o pior cenário do ponto de vista das consequências para a comunidade no entorno da distribuidora. Neste cenário considera-se que a poça se espalhe por todo o parque de tancagem. Uma característica importante deste cenário é que não se desconta, da área total do dique, as áreas referentes às bases dos tanques. Isto ocorre porque se considera que cada tanque também se apresenta em chamas. Desta forma toda a superfície do parque de tancagem está em chamas, caracterizando um enorme incêndio em poça (pool fire).

c) Cenário 3: Incêndio em poça em um único tanque, com barreiras térmicas

Possui as mesmas características do primeiro caso, porém, considerando-se o muro ao redor do parque como uma barreira térmica.

d) Cenário 4: Todos os tanques e o dique apresentam-se em chamas, com barreiras térmicas

Este cenário se assemelha ao segundo, com exceção da barreira térmica (muro), que passou a ser considerada.

5.6.Cálculos

Na Figura 37 tem-se uma imagem aérea do local após o incêndio ser combatido. Observa-se que um dos tanques foi mais danificado que os demais (tanque marcado na figura). Este estudo assume que foi neste tanque onde se iniciou o incêndio. Os cálculos apresentados nos cenários 1 e 3 são referentes apenas a este tanque.



Figura 37 - Vista aérea do terreno com destaque para o tanque onde se iniciou o incêndio.

[Fonte: Foto de Paulo Jacob / Agência O Globo]

Como o calor emitido pelo incêndio de uma poça de gasolina é superior a aquele emitido na queima de etanol e de diesel, foi suposto que o tanque estava preenchido por gasolina. Apenas para efeito de comparação foram feitas simulações também para o diesel e o etanol. Os valores estimados são: calor gerado pela poça, calor que atingiu um alvo real, altura da chama, calor irradiado e distância de separação aceitável ou segura (DSA).

Foi escolhido um estabelecimento comercial como alvo para o cálculo do calor que atingiu um alvo. Este estabelecimento está localizado na Rua Geraldo Rocha, em frente ao portão da Petrogold, como pode ser visto na Figura 38.



Figura 38 - Localização do alvo real em relação à Petrogold.

[Fonte: Google Street View 2015 (adaptado)].

a) Cenário 1

Para os cenários de incêndio no tanque, o diâmetro de poça é o próprio diâmetro do tanque; no caso 9,32 metros – conforme Anexo III.

Estima-se a taxa de calor irradiado através de (17):

$$\dot{Q}_r = \dot{Q} \chi_r \quad (17)$$

Onde a taxa total de calor emitido \dot{Q} e a fração radiada χ_r são dadas pelas equações (7) e (8), respectivamente. O valor para taxa de liberação de calor foi de 2400 kW/m², considerando o combustível armazenado como gasolina (Tabela 1).

$$\dot{Q} = \dot{q}''_f A$$

$$A = \text{área do cilindro} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * (9,32 \text{ m})^2}{4} = 66,91 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_g = 2400 \text{ kW/m}^2 * 66,91 \text{ m}^2 = 160584,83 \text{ kW}$$

$$\chi_r = \chi_{r \text{ max}} e^{-kD}$$

$$\chi_r = 0,35 * e^{-0,05 \text{ m}^{-1} * 9,32 \text{ m}} = 0,22$$

Então,

$$\dot{Q}_r = \dot{Q} \chi_r$$

$$\dot{Q}_{r,g} = 35328,66 \text{ kW}$$

Conforme apresentado anteriormente, para combustíveis que são líquidos a temperatura ambiente e pressão atmosférica, com poça circular e sem barreiras a serem consideradas, pode-se aplicar o método de cálculo simplificado da NIST para calcular a distância segura. Assim, os valores de DSA são obtidos no gráfico das Figuras 28 e 29.

Considerando a poça com diâmetro de 9,32 metros, obteve-se uma distância segura aceitável de aproximadamente 51,82 metros para pessoas e uma distância menor que 9,14 metros para estruturas (Figura 39). Além disso, para uma poça de gasolina com diâmetro infinito, a distância sempre segura para pessoas é de 550 metros e para estruturas é de 20 metros, como pode ser visto na Tabela 1.

A próxima meta é calcular o calor que atinge um alvo real. Para tanto, precisa-se primeiro definir o fator de forma F. Este depende da altura e diâmetro da chama, e da distância entre a chama e o alvo.

De acordo com a Figura 40, a distância entre a chama e o alvo é de 83,19 metros.



Figura 39 - DSA - Distância de Separação Aceitável para o cenário 1 para um tanque de gasolina.
 [Fonte: Google Maps 2015 (adaptado)].



Figura 40 - Estimativa da distância entre alvo e tanque.
 [Fonte: Adaptado de Google Street View, 2015].

Para calcular a altura efetiva da chama foi utilizada a equação (9), que destina-se a diâmetros de poça menores que 20 metros.

$$H = \frac{\chi_{r \max} e^{-kD} D \dot{q}''_f}{4 E_f}$$

$$\chi_{r \max} = \text{fração radiada máxima} = 0,35$$

$$k = \text{constante} = 0,05 \text{ m}^{-1}$$

$$D = \text{diâmetro da poça} = 9,32 \text{ m}$$

$$\dot{q}''_f = \text{taxa total de calor emitido por unidade de área} = 2400 \text{ kW/m}^2$$

$$E_f = \text{poder emissivo total do fogo na superfície} = 100 \text{ kW/m}^2$$

$$H_g = 12,282 \text{ m}$$

Pode-se então calcular o fator de forma conforme descrito no capítulo 4. O cálculo detalhado pode ser visto no Anexo IV. O valor encontrado foi:

$$F_g = 5,412 * 10^{-3}$$

Com isso, o calor incidente sobre o alvo real pode ser calculado com a equação (11).

$$\dot{q}''_g = F E_f$$

$$\dot{q}''_g = 5,412 * 10^{-3} * 100 = 0,541 \text{ kW/m}^2$$

Para efeito de comparação, os cálculos foram refeitos supondo tanque preenchido com álcool etílico e diesel. Os dados utilizados para os cálculos e os resultados obtidos podem ser vistos nas Tabelas 6 e 7, no fim deste capítulo.

b) Cenário 2

Este caso avalia o incêndio nos tanques e no dique, sem considerar qualquer barreira térmica. Uma hipótese simplificadora é que o dique apresenta formato retangular. Tendo como base a Figura 41, tem-se que o dique tem dimensões aproximadas de 32,66 metros de comprimento e 22,30 metros de

largura. Utilizando a equação (16), pode-se calcular o diâmetro equivalente para a chama cilíndrica.

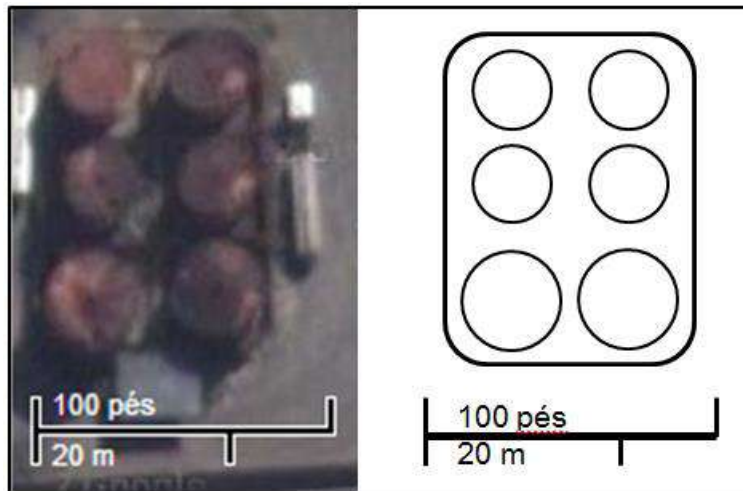


Figura 41 - Representação esquemática simplificada da área do dique.

[Fonte: Adaptado do Google Maps]

$$D = \sqrt{4A/\pi}$$

$$A = \text{área} = 32,66 \text{ m} * 22,30 \text{ m} = 728,318 \text{ m}^2$$

$$D = \text{diâmetro equivalente} = 30,45 \text{ m}$$

Novamente, pode-se calcular a taxa de calor total emitido pela gasolina com a equação (8):

$$\dot{Q} = \dot{q}''_f A$$

$$A = \text{área} = 32,66 \text{ m} * 22,30 \text{ m} = 728,318 \text{ m}^2$$

$$\dot{Q}_g = 2400 \text{ kW/m}^2 * 728,318 \text{ m}^2 = 1747963,2 \text{ kW}$$

Uma vez que o diâmetro correspondente é maior que 20 metros, o NIST recomenda usar X_r com valor de 0,35. Deste modo,

$$\dot{Q}_r = \dot{Q} \chi_r$$

$$\dot{Q}_{r,g} = 611787,12 \text{ kW}$$

Considerando a poça com diâmetro equivalente de 30,45 metros, obteve-se uma distância segura aceitável de aproximadamente 90 metros para pessoas, e uma distância de 9,14 metros para estruturas (Figura 42).



Figura 42 - Distância de Separação Aceitável para o cenário 2.

[Fonte: Google Maps 2015 (adaptado)]

Como o modelo NIST indica que a altura da chama máxima ocorre para poças com diâmetro de 20 metros, considera-se esse diâmetro para o cálculo da altura (10).

$$H_{max} = \frac{0,35 e^{-1} 20 \dot{q}''_f}{4 \cdot E_f}$$

$$\dot{q}''_f = \text{taxa total de calor emitido por unidade de área} = 2400 \text{ kW/m}^2$$

$$E_f = \text{poder emissivo total do fogo na superfície} = 100 \text{ kW/m}^2$$

$$H_g = 15,45 \text{ m}$$

De acordo com a Figura 43, a distância entre a borda da chama e o alvo é de 60,65 metros.



Figura 43 - Estimativa da distância entre alvo e dique.

[Fonte: Adaptado de Google Street View, 2015].

Calcula-se então o fator de forma (12). O cálculo detalhado pode ser visto no Anexo IV. O valor encontrado foi:

$$F_g = 5,109 * 10^{-2}$$

Com isso, o calor que atinge o alvo pode ser calculado com a equação (11).

$$\dot{q}'' = F E_f$$

$$\dot{q}''_g = 5,109 * 10^{-2} * 100 = 5,11 \text{ kW/m}^2$$

De maneira análoga, refaz-se os cálculos para o caso de um tanque cheio de álcool etílico ou diesel, para efeito de comparação. Os dados necessários e os resultados podem ser encontrados nas Tabelas 6 e 7.

c) Cenário 3

Neste cenário avalia-se a influência da presença de barreiras térmicas nos cálculos referentes ao cenário de incêndio em apenas um único tanque.

Como o valor da taxa de calor irradiada se preserva e não depende da existência de barreiras, tem-se o mesmo \dot{Q} do cenário 1.

$$\dot{Q} = 160584,83 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_r = 35328,66 \text{ kW}$$

A etapa seguinte é o cálculo da altura da barreira térmica, neste caso, o muro da propriedade. Pela análise da Figura 44, estima-se que o muro lateral do parque de tancagem tinha uma altura de aproximadamente 5,3 metros em relação ao pavimento. Pela figura estima-se que a altura do muro é de aproximadamente 3/2 da altura do caminhão retratado na imagem.



Figura 44 - Estimativa da altura do muro.

[Fonte: Google Street View, 2015]

Continua-se utilizando a equação (9) para o cálculo da altura. Conforme recomendação do NIST, para não superestimar a capacidade da barreira o poder emissivo agora é reduzido pela metade – gerando elevação na altura de chama estimada.

Entretanto, nota-se que a base do fogo do incêndio no tanque já se encontra a 7,5 metros do chão, ou seja, acima do muro de 5,3 metros. Logo, o muro não pode ser considerado uma barreira térmica, e o cenário 3 se iguala ao cenário 1.

d) Cenário 4

Neste cenário avalia-se a presença de barreiras térmicas nos cálculos para o incêndio em todos os tanques e no dique. A base de cálculos é a mesma do

cenário 2, considerando agora que $E_f = 50 \text{ kW/m}^2$, conforme recomendado pelo NIST.

$$D = \sqrt{4A/\pi}$$

$$A = \text{área} = 32,66 \text{ m} * 22,30 \text{ m} = 728,318 \text{ m}^2$$

$$D = \text{diâmetro equivalente} = 30,45 \text{ m}$$

Novamente considerando o líquido como gasolina e como o valor da taxa de calor irradiada se preserva, tem-se o mesmo \dot{Q} do cenário 2.

$$\dot{Q} = 1747963,2 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_r = 611787,12 \text{ kW}$$

Pode-se calcular também a altura da chama pela equação (12):

$$H_{\max} = \frac{0,35 e^{-1} 20 \dot{q}''_f}{4 \cdot E_f}$$

$$\dot{q}''_f = \text{taxa total de calor emitido por unidade de área} = 2400 \text{ kW/m}^2$$

$$E_f = \text{poder emissivo total do fogo na superfície} = 50 \text{ kW/m}^2$$

$$H_g = 30,90 \text{ m}$$

O cálculo da altura poderia ser feito também apenas considerando o fato de que E_f cai pela metade, enquanto os outros parâmetros se mantêm pela conservação de energia. Logo, a altura H dobra.

Na altura efetiva calculada deve-se subtrair a altura da barreira térmica, que neste caso foi estimada em 5,3 metros.

$$H_g = 30,90 \text{ m} - 5,3 \text{ m} = 25,60 \text{ m}$$

$$\frac{H_g}{D} = \frac{25,60}{30,45} = 0,84$$

Logo, pode-se encontrar o valor de da distância segura aceitável utilizando a tabela do Anexo II, que é o método do NIST empregado para contabilizar o efeito da barreira térmica, encontrando-se S a partir de H/D e F. No caso, H/D=0,84 e F=0,014, pois o fator de forma (F) deve ser no máximo 0,014, já que o NIST prevê que o fluxo máximo de radiação térmica para pessoas deve ser de 1,4 kW/m².

Vale ressaltar que para os casos de incêndio com barreira térmica o modelo NIST não prevê a distância segura para estruturas, apenas para pessoas.

Com o valor de H/D e F, o valor de S/D é encontrado por interpolação. O resultado pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Cálculo de S/D por interpolação.

H/D	F	S/D
0,8	0,045	2,000
0,84	0,028	2,850
0,9	0,025	3,000

[Fonte: Autores].

$$\frac{S_g}{D} = 2,85$$

Logo, encontra-se a distância de separação aceitável.

$$S = 86,78 \text{ m}$$

Agora, para o cálculo do calor que atinge um alvo, usa-se o raciocínio parecido com o do cenário 1:

$$\dot{q}'' = [F(X_1, H) - F(X_1, H')] * E_f$$

Este caso está ilustrado na Figura 45.

Ambos os fatores de forma são calculados conforme descritos no capítulo anteriores, e H' é calculado por semelhança de triângulos.

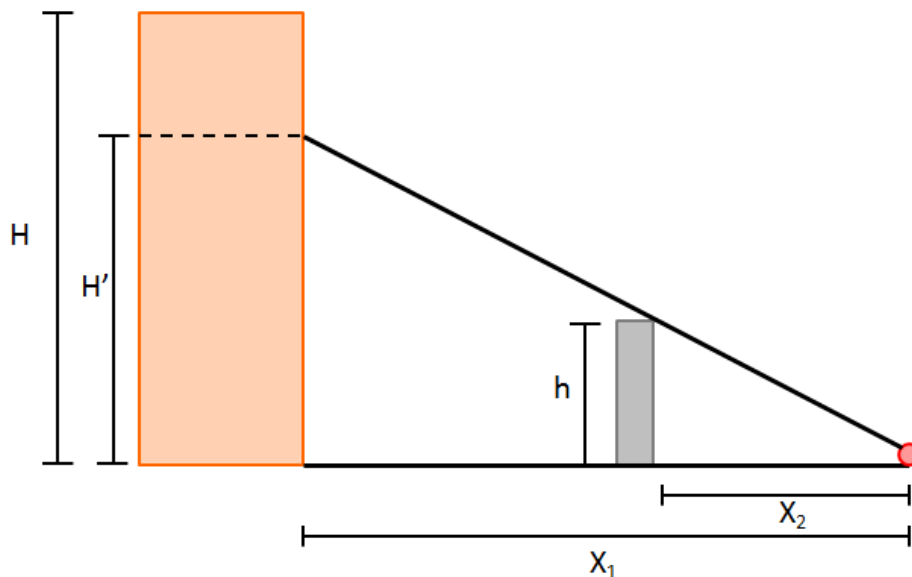


Figura 45 - Desenho esquemático do cenário 4.

[Fonte: Autores].

Onde H é a altura total da chama, H' é a parte da chama bloqueada pela barreira térmica, h é a altura do muro, X_1 a distância do alvo até a chama e X_2 a distância do alvo até a barreira térmica.

Com isso, temos que o calor gerado por uma poça de gasolina que atinge o alvo é de $4,42 \text{ kW/m}^2$.

Novamente, todos os cálculos foram refeitos para efeito de comparação, levando em consideração incêndios gerados por diesel e álcool etílico. Os resultados podem ser vistos na Tabela 7.

5.7. Resultados

Uma vez estimados todos os valores necessários para a análise, este item discute os resultados obtidos. Na Tabela 6, encontram-se os parâmetros necessários para resolução das equações em cada um dos cenários descritos anteriormente. As taxas de calor emitido por unidade de área foram obtidas na Tabela 1, os valores de poder emissivo são aqueles recomendados pelo NIST para cada caso, o diâmetro da chama e a distância entre o alvo e a chama foram estimados, e a fração radiada foi calculada pela equação (7).

Tabela 6 – Parâmetros necessários para resolução de cada cenário.

Cenário	Combustível	Diâmetro da chama (m)	Taxa total de calor emitido por unidade de área (kW/m ²)	Fração radiada	Poder emissivo (kW/m ²)	Distância chama-alvo (m)
1	Gasolina	9,32	2400	0,22	100	83,19
	Álcool etílico	7,64	400	0,24	100	83,19
	Diesel	7,64	1400	0,24	100	83,19
2	Gasolina	30,45	2400	0,35	100	60,65
	Álcool etílico	30,45	400	0,35	100	60,65
	Diesel	30,45	1400	0,35	100	60,65
3	Gasolina	9,32	2400	0,22	100	83,19
	Álcool etílico	7,64	400	0,24	100	83,19
	Diesel	7,64	1400	0,24	100	83,19
4	Gasolina	30,45	2400	0,35	50	60,65
	Álcool etílico	30,45	400	0,35	50	60,65
	Diesel	30,45	1400	0,35	50	60,65

[Fonte: Autores].

Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados obtidos em cada cenário proposto.

Cenário	Combustível	Calor gerado pela poça (kW)	Calor irradiado (kW)	Altura da chama (m)	Fator de forma	Calor que atinge um alvo real (kW/m ²)
1	Gasolina	160585	35329	12,28	0,0054	0,540
	Álcool etílico	18337	4401	1,83	0,0007	0,066
	Diesel	64176	15402	6,39	0,0023	0,230
2	Gasolina	1747963	611787	15,45	0,0511	5,109
	Álcool etílico	291327	101965	2,58	0,0086	0,861
	Diesel	1019645	356876	9,01	0,0300	2,997
3	Gasolina	160585	35329	12,28	0,0054	0,540
	Álcool etílico	18337	4401	1,83	0,0007	0,066
	Diesel	64176	15402	6,39	0,0023	0,230
4	Gasolina	1747963	611787	30,90	0,0884	4,420
	Álcool etílico	291327	101965	5,15	0,0157	0,785
	Diesel	1019645	356876	18,03	0,0533	2,665

[Fonte: Autores].

Assim como era esperado, o calor gerado por uma poça de gasolina é bem maior que o calor gerado por uma poça de diesel ou de álcool etílico. E a gasolina gera chamas com aproximadamente o dobro de altura da chama do diesel.

Pode-se notar também que a presença de uma barreira térmica de 5,3 metros de altura reduziu o calor incidente sobre o alvo em cerca 10% (13,5%, 8,8% e 11,1% para incêndios de gasolina, álcool etílico e diesel, respectivamente).

Como dito anteriormente, o fluxo de radiação térmica máximo suportado para pessoas é de 1,4 kW/m², e para estruturas 31,5 kW/m². Assim, de acordo com a equação (11), e considerando $E_f = 100 \text{ kW/m}^2$, o fator de forma deve ser no máximo 0,014 e 0,315 para pessoas e estruturas, respectivamente.

Para $E_f = 50 \text{ kW/m}^2$, o fator de forma F deve ser de no máximo 0,028 e 0,630, respectivamente. Assim, pode-se explicar porque no cenário 4 só pode ser calculada a distância segura para pessoas, de acordo com a NIST. Isto porque na tabela do Anexo II, o maior fator de forma que pode ser encontrado é 0,518, que é muito abaixo de 0,630.

Para os cenários 1 e 3, em nenhum dos casos o fator de forma extrapola os valores aceitáveis dos fatores de forma para uma distância segura, tanto para pessoas como para estruturas. Porém, nos cenários 2 e 4, o mesmo excede o valor máximo aceitável para pessoas, tanto para a gasolina como para o diesel, em ambos os cenários. Quanto ao fator de forma máximo para estruturas, nenhum dos quatro cenários excedem seu valor. A Tabela 8 resume estes resultados. Isso significa que pessoas desprotegidas que permanecessem na posição do alvo ao longo de alguns minutos poderiam sofrer lesões.

Para a análise da distância de separação aceitável, pode-se verificar os resultados compilados na Tabela 9- Distância de separação aceitável para pessoas (P) e estruturas (E).

Nos cenários 1 e 3, pelo método gráfico não é possível calcular com precisão a distância segura considerando álcool etílico como combustível e uma poça com diâmetro de 7,64 metros, pois o menor tamanho de poça no gráfico é de 10 metros. O mesmo se repete quando se considera o diesel como combustível e uma poça com diâmetro de 7,64 metros.

Tabela 8- Análise do fator de forma.

Cenário	Combustível	Fator de forma limite		Fator de forma calculado	Análise	
		Pessoas	Estrutura		Pessoas	Estrutura
1	Gasolina	0,014	0,315	0,0054	Não excede	Não excede
	Álcool etílico	0,014	0,315	0,0007	Não excede	Não excede
	Diesel	0,014	0,315	0,0023	Não excede	Não excede
2	Gasolina	0,014	0,315	0,0511	Excede	Não excede
	Álcool etílico	0,014	0,315	0,0086	Não excede	Não excede
	Diesel	0,014	0,315	0,0300	Excede	Não excede
3	Gasolina	0,014	0,315	0,0054	Não excede	Não excede
	Álcool etílico	0,014	0,315	0,0007	Não excede	Não excede
	Diesel	0,014	0,315	0,0023	Não excede	Não excede
4	Gasolina	0,028	0,630	0,0884	Excede	Não excede
	Álcool etílico	0,028	0,630	0,0157	Não excede	Não excede
	Diesel	0,028	0,630	0,0533	Excede	Não excede

[Fonte: Autores].

Tabela 9- Distância de separação aceitável para pessoas (P) e estruturas (E).

Distância / Combustível	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4
	P (m)	E (m)	P (m)	E (m)	P (m)	E (m)	P (m)
Gasolina	51,32	<9,14	90	9,14	51,32	<9,14	86,78
Álcool Etílico	-	-	40	-	-	-	-
Diesel	-	-	65	<10	-	-	60,90

[Fonte: Autores].

Para o cenário 2, considerando a poça de gasolina com diâmetro equivalente de 30,45 metros, obteve-se uma distância segura aceitável de aproximadamente 90 metros para pessoas, e uma distância de 9,14 metros para estruturas. Para um a poça de diesel, tem-se uma DSA de 65 metros para pessoas e de menos de 10 metros para estruturas. No caso do álcool etílico, só foi possível estimar a DSA para pessoas (40 metros), pois as curvas de taxa de calor emitido por unidade de área começam em 1000 kW/m².

Para o cenário 4, foi utilizado o método de tabelas, e obteve-se uma distância segura de 86,78 metros para uma poça de 30,45 metros de diâmetro de gasolina, e de 60,90 metros para uma poça de diesel com este mesmo tamanho.

No caso no diesel, a razão da altura da chama pelo diâmetro foi de 0,4181, não sendo necessário fazer interpolação na tabela (Anexo II), pois o valor de F (0,028) pode ser lido diretamente, indicando o valor de S/D correspondente, no caso S/D=2,0 (Tabela 10).

Tabela 10 - Resultados obtidos de S/D e distância segura para o cenário 4.

Combustível	H/D	F	S/D	S (m)
Gasolina	0,8	0,045	2,000	-
	0,84	0,028	2,850	86,78
	0,9	0,025	3,000	-
Diesel	0,4181	0,028	2,000	60,90

[Fonte: Autores]

Não foi possível obter um valor da distância segura para o álcool etílico, pois a altura da chama do álcool (5,15 metros) é menor que a altura da barreira térmica (5,3 metros), logo o valor de H/D é negativo nesse caso.

Pode-se então analisar a distância segura, representada pela figura 49, para os cenários 2 e 4, respectivamente, que são os dois piores casos vistos neste trabalho. Como esperado, para os cenários 1 e 3 o alvo considerado está fora da área limite, ou seja, não é atingido pelo fluxo de radiação térmico máximo considerado pela NIST.



Figura 46 - DSA - Distância de Separação Aceitável para os cenários 2 e 4.

[Fonte: Google Maps 2015 (adaptado)].

Por fim, é possível fazer uma análise qualitativa das alturas das chamas encontradas pelas equações (9) e (10) contra imagens do acidente. Os valores calculados se encontram na Tabela 7. Nas Figuras 47, 48 e 49, pode-se ver estimativas para as chamas em diversos momentos do acidente.

Percebe-se que a altura calculada para um incêndio em um tanque de gasolina é de 12,28 metros, valor bem próximo da altura estimada para um incêndio deste tipo ilustrado na Figura 47.

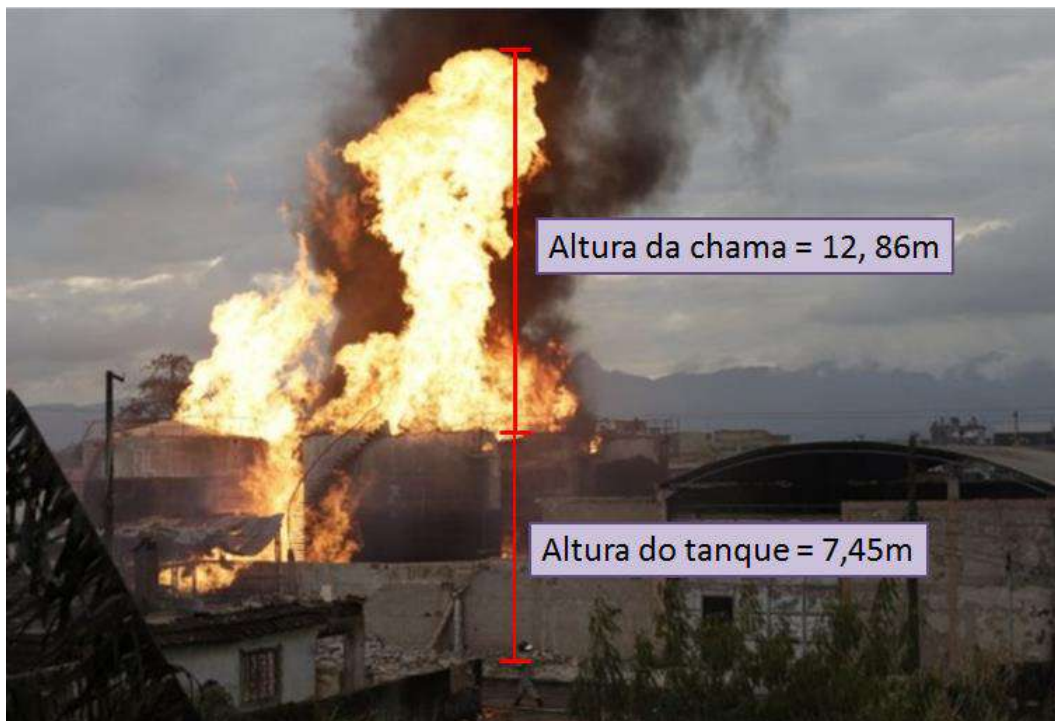


Figura 47 - Estimativa da altura da chama de um incêndio em tanque.

[Fonte: Foto de Paulo Jacob / Agência O Globo].

O cenário 4, o que mais se aproxima do evento real, foi o que apresentou maior altura de chama, com 30,90 metros (para gasolina). Essa altura calculada está próxima do valor estimado para a Figura 48 (aproximadamente 35 metros), porém o modelo adotado desconsidera a ação do vento, claramente presente na figura. Quando comparada com a Figura 49, percebe-se que sem a ação do vento estima-se uma altura muito maior (aproximadamente 46 metros) do que a calculada, logo o modelo não é tão preciso para este caso.



Figura 48 - Estimativa da altura da chama, com ação do vento.

[Fonte: Adaptado de vídeo da Globo News, retirado das notas de aula do Prof. Carlos André].



Figura 49 – Estimativa da altura da chama.

[Fonte: Adaptado de vídeo da Record, retirado das notas de aula do Prof. Carlos André].

6. Conclusão

Levando-se em conta a modelagem simplificada da NIST, nenhuma estrutura seria danificada pela radiação dentro de uma distância segura de aproximadamente 10 metros para a gasolina, e ainda menor para o diesel e o etanol. Porém, isto não foi o que se verificou na realidade, pois edificações distantes mais do que 10 metros da empresa foram atingidas. Uma possível explicação é a presença de outros fenômenos que também emitem radiação, como a formação de bolas de fogo.

Considerando-se o método rigoroso, o calor que atinge um alvo real só é significativo para a gasolina e o diesel, apenas nos cenários de incêndio em todo o dique, com ou sem barreira. Porém, deve-se ressaltar que o cenário real estaria mais próximo de um incêndio de uma mistura de gasolina, diesel e etanol, o que levaria a um calor observado menor do que o obtido considerando-se o caso do dique composto totalmente apenas por gasolina.

Quanto à efetividade das barreiras térmicas, têm-se uma redução nula ou muito pequena da distância segura dos cenários sem barreiras e uma redução do calor incidente sobre o alvo de, em média, 10%. Isto indica que a barreira de 5,3 metros é baixa para possuir um efeito significativo na mitigação da radiação térmica.

Além disso, as variáveis considerando-se o cenário real são bem mais complexas que as utilizadas neste trabalho, podendo gerar resultados maiores para o calor que atinge um alvo, aumentando ainda mais a distância segura. Isto ocorre principalmente pelo fato de não se ter contabilizado o efeito do vento na parcela de convecção da transferência de calor, e também a existência de *fireballs* e *jet-fires*.

Isto é facilmente visto pela análise da altura da chama, onde as alturas calculadas foram menores do que as alturas estimadas a partir de registros fotográficos e de vídeo do evento.

Possíveis continuações para este trabalho seriam modelar do caso de estudo aqui apresentado usando modelos de chama modificada, que levassem em conta a ação do vento sobre a chama, e também uma modelagem para os incêndios de *jet fire* e *fire ball*, a fim de aumentar a precisão do modelo.

Referências Bibliográficas

[ABNT 7505-1, 2003] ABNT – NBR 7505-1. Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 1: Armazenagem em tanques estacionários. Dezembro 2003.

[Adaptação de notas de aula do Prof. Carlos André] Carlos André Vaz Júnior, D.Sc. Notas de Aula: Segurança de Processos e Prevenção de Perdas – UFRJ Escola de Química.

[Agência Brasil, 2013] Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-05-23/funcionario-morre-em-incendio-de-deposito-de-combustivel-em-duque-de-caxias>>

[Agência O Globo, 2013] Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/05/1284508-apos-incendio-na-petrogold-28-imizeis-continuam-isolados-no-rio.shtml>>

[Alpina termoplásticos, 2010] Disponível em <<http://www.alpinatermoplasticos.com.br/man-seg.htm>>

[Antonio Lacerda/EFE, 2013] Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/05/1284243-bombeiros-controlam-fogo-em-distribuidora-de-combustiveis-no-rio.shtml>>

[ANP, 2009] Autorização ANP N° 179, de 6.4.2009 - DOU 7.4.2009 ANP, disponível em <<http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/autorizacao/2009/abril/aut%20179%20-%202009.xml>> Acessado em maio de 2015.

[Argus Engenharia, 2014] Disponível em <http://www.argus-engenharia.com.br/site/wpcontent/uploads/2014/02/Camara_de_Espuma_Argus_Tipo-TC.pdf>

[Bombeiros, 2015] Disponível em <<http://www.bombeiros.com.br/br/bombeiros/glossario.php>> Acessado em: maio de 2015.

[BOMBEIROS SP, 2004] Instrução Técnica 27/2004. Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo – Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis, 2004.

[BOMBEIROS SP, 2011] Instrução Técnica Nº 25/2011 – Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo – Segurança contra incêndio para líquidos combustíveis e inflamáveis.

[Brasil 247, 2013] Disponível em <<http://www.brasil247.com/pt/247/rio247/103071/Inc%C3%AAndio-deixa-mais-de-100-casas-interditadas.htm>>

[CCPS, 2008] CCPS (Center for Chemical Process Safety) “*Guidelines for Chemical Transportation Safety, Security, and Risk Management*”. Wiley-AIChE; 2ª. edição, Setembro 2008.

[CEETEPS, 2008] Curso Técnico de Segurança do Trabalho – Disciplina: Prevenção e Combate a Incêndio. Professor Flávio Amorim Gomes de Araújo, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Governo do Estado de São Paulo. Versão 2, Janeiro de 2008.

[CETESB, 2011] Norma Técnica CETESB – P4.261 - Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência - 2011.

[CETEBS, 2014] Disponível em <<http://riscotecnologico.cetesb.sp.gov.br/estudo-de-analise-de-risco/historico/>> e <<http://emergenciasquimicas.cetesb.sp.gov.br/tipos-de-acidentes/industrias-de-armazenamentos/introducao-industrias-de-armazenamentos/>> Acessado em maio de 2015.

[Chevron, 1999] Disponível em <<http://www.petroplaza.com/technology/articles/MiZlbiYxMDMyMCYmMSYzJjEyNSY%3D>>

[Confab – TenarisGroup] Disponível em <lcsime.files.wordpress.com>

[Crocker & Napier, 1986] Crocker, W.P. and Napier, D.H., “*Thermal radiation hazards of liquid pool fires and tank fires*”, Institution of Chemical engineers Symposium Series No. 97, Pergamon Press, Oxford, U.K., pp. 159-84, 1986.

[CENGEL & CHAJAR, 2012] Çengel, Y.A & Chajar, A.J. “Transferência de Calor e de Massa, uma Abordagem Prática”. Editora McGraw Hill Brasil. 4ª Edição, 2012.

[EESC/USP, 2002] Disponível em <http://www.sel.eesc.usp.br/lasi/lasi_joomla/index.php/membros/8-lasi/pesquisa>

[FERRARI, 2013] Cap. Benício Ferrari Junior “Curso de Formação Profissional de Bombeiro Profissional Civil. Módulo: prevenção e combate a incêndio”. Centro de Ensino e Instrução de Bombeiros. Governo do Estado do Espírito Santo, 2013.

[FIGUEREDO, 1998] Rita C. Figueredo, Fabiana A. L. Ribeiro e Edvaldo Sabadini. “Ciência de espumas – aplicação na extinção de incêndios”. Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas, 1998.

[FLEURY, 2010] Fleury, R. “*Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects*”, 2010.

[Freitas, Porte & Gomez, 1995] Freitas, C.M.; Porte, M.S.F.; Gomez C.M. “Acidentes químicos ampliados: um desafio para a saúde pública”, Revista de Saúde Pública vol.29 no.6, São Paulo. Dezembro, 1995.

[G1.Globo, 2013] Disponível em <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2013/05/incendio-continua-atingir-deposito-em-caxias-rj-nesta-sexta.html>> Acessado em maio de 2015.

[GEXAS Solutions D’Entreprises, 2015] Disponível em <<http://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/03/>>.

[Globo News, 2013] Disponível em <<http://g1.globo.com/globo-news/noticia/2013/05/foi-um-erro-nao-uma-fatalidade-diz-especialista-em-risco-sobre-incendio.html>> Acessado em junho de 2015.

[HazardEx, 2013] Disponível em <<http://www.hazardexonthenet.net/article/55563/Catastrophic-Events--Breaking-the-cycle.aspx>>

[INCROPERA, 2005] Incropera, F.P; DeWitt, D.P; Bergman, T.L.; Lavine, A.S. “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”. Editora Gen, LTC, sexta edição, 2005.

[JOSÉ, 2004] Apostila Combustão e Combustíveis, Prof. Humberto Jorge José. Agosto 2004.

[KARLSSON; QUINTIERE, 2000] Karlsson, B. & Quintiere, J.G, “Enclosure Fire Dynamics”. CRC Press, Washington, DC, 2000.

[LINDENBERG, 2008] Lindenberg, Andrey [*et al.*] “Área de tancagem”. Salvador da Baía, Brasil: SENAI, 2008.

[MANSOUR, 2012] Mansour K.A. “*Fires in large atmospheric storage tanks and their effect on adjacent tanks*”. Doutorado em Filosofia na Engenharia Química. Loughborough University Institutional Repository, 2012.

[Manual de Fundamentos PMESP, 2006] Disponível em
<<http://www.bombeiros.pr.gov.br/arquivos/Image/bombeiros/fogo.png>>

[MARTINS, 2004] Martins, D.O., “Estudo do controle de emissões de compostos orgânicos voláteis em tanques de armazenamento de produtos químicos”, Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, 2004.

[Mello, 2013] <http://www.segurado.com.br/bloggustavo/?p=498>, O Incêndio na Petrogold – Duque de Caxias (RJ). Publicado em 25 de maio de 2013. Gustavo Cunha Mello (Economista com MBA em Gerenciamento de Riscos pela COPPE-UFRJ, Pós Graduação em Engenharia de Planejamento e Mestrado em Engenharia de Produção pela UFF-RJ). Acessado em maio de 2015.

[MORISHITA, 2004] Hélio Morishita “Princípios Fundamentais de Transferência de Calor”. Agosto, 2004.

[NIST, 2000] “Thermal Radiation from Large Pool Fires”, 2000.

[O Globo, 2013a] Disponível em <<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2013/05/incendio-continua-atingir-deposito-em-caxias-rj-nesta-sexta.html>>
Acessado em junho de 2015.

[O Globo, 2013b] Disponível em <<http://oglobo.globo.com/rio/as-imagens-do-incendio-em-duque-de-caxias-8475281>>

[Pablo Jacob/ Agência O Globo] Disponível em <<http://oglobo.globo.com/rio/o-rescaldo-do-incendio-em-duque-de-caxias-8487670>>

[PETROBRAS, 2014] Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico - FISQP – Gasolina Comum; Álcool Etílico Anidro Combustível; Álcool Etílico Hidratado Combustível; Óleo Diesel S500. Petrobrás Distribuidora S.A., Outubro 2014.

[Reuters/Veja, 2013] Disponível em <<http://veja.abril.com.br/noticia/brasil/mp-relata-ineficiencia-do-inea-no-licenciamento-da-petrogold/>>

[Revista Geográfica da América Central, 2011] Revista Geográfica de América Central, Número Especial EGAL, pp. 1-11, 2011- Costa Rica.

[Shutterstock.com] Disponível em <http://www.shutterstock.com/cat.mhtml?autocomplete_id=&language=en&lang=en&search_source=&safesearch=1&version=llv1&searchterm=storage%20tanks&media_type=images&page=1&inline=140856376>

[Sidney Rezende, 2013] Disponível em <<http://www.sidneyrezende.com/noticia/208376+rio+incendio+atinge+deposito+de+combustiveis>>

[SIQUEIRA, 2010] Prof. MSc. Robério Alves Siqueira, Curso: Engenharia de Petróleo e Gás, 2010. Centro Universitário Jorge Amado. Disponível em <<http://xa.yimg.com/kq/groups/24400912/1315070801/name/AULA2+-TANQUES.ppt>>

[Soteria, 2015] Disponível em <<http://www.soteriafire.com>>

[SOUSA, 2013] Sousa, D.R.V. “Sistemas de proteção contra incêndio e explosões para prevenção de acidentes industriais ampliados ou para redução de suas consequências” Monografia, departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro 2013.

[Yasuyoshi Chiba/AFP, 2013] Disponível em <<http://oglobo.globo.com/rio/as-imagens-do-incendio-em-duque-de-caxias-8475281>>

[Zona de Risco, 2014] “Lembrança: Explosão na Refinaria Duque de Caxias (Reduc)” Disponível em <http://zonaderisco.blogspot.com.br/2014/12/lembranca-explosao-na-refinaria-duque_11.html>, Postado em 11 de dezembro de 2014. Acessado em maio de 2015.

ANEXO I

Tabela completa dos dados de taxa de queima, calor de combustão, taxa de liberação de calor e Distância de Separação Aceitável para alguns líquidos [NIST, 2000].

Liquid	Mass Burning Rate, \dot{m}''	Heat of Combustion	HRR Per Unit Area, \dot{q}''_f	Screen ASD		Reference
	kg/m ² /s	kJ/kg	kW/m ²	Struct. m	People m	
Acetic Acid	0.033	13,100	400	10	90	Ref. [10]
Acetone	0.041	25,800	1,100	10	250	Ref. [9]
Acrylonitrile	0.052	31,900	1,700	15	390	Ref. [10]
Amyl Acetate	0.102	32,400	3,300	30	750	Ref. [10]
Amyl Alcohol	0.069	34,500	2,400	20	550	Ref. [10]
Benzene	0.048	44,700	2,100	20	480	Ref. [9]
Butyl Acetate	0.100	37,700	3,800	35	860	Ref. [10]
Butyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]
m-Cresol	0.082	32,600	2,700	25	620	Ref. [10]
Crude Oil	0.045	42,600	1,900	15	430	Ref. [9]
Cumene	0.132	41,200	5,400	50	1220	Ref. [10]
Cyclohexane	0.122	43,500	5,300	45	1200	Ref. [10]
No. 2 Diesel Fuel	0.035	39,700	1,400	12	320	Ref. [9]
Ethyl Acetate	0.064	23,400	1,500	15	340	Ref. [10]
Ethyl Acrylate	0.089	25,700	2,300	20	530	Ref. [10]
Ethyl Alcohol	0.015	26,800	400	10	90	Ref. [9]
Ethyl Benzene	0.121	40,900	4,900	40	1100	Ref. [10]
Ethyl Ether	0.094	33,800	3,200	30	730	Ref. [10]
Gasoline	0.055	43,700	2,400	20	550	Ref. [9]
Hexane	0.074	44,700	3,300	30	750	Ref. [9]
Heptane	0.101	44,600	4,500	40	1000	Ref. [9]
Isobutyl Alcohol	0.054	35,900	1,900	15	430	Ref. [10]
Isopropyl Acetate	0.073	27,200	2,000	20	460	Ref. [10]
Isopropyl Alcohol	0.046	30,500	1,400	15	320	Ref. [10]
JP-4	0.051	43,500	2,200	20	500	Ref. [9]
JP-5	0.054	43,000	2,300	20	530	Ref. [9]
Kerosene	0.039	43,200	1,700	15	400	Ref. [9]
Methyl Alcohol	0.017	20,000	340	10	80	Ref. [9]
Methyl Ethyl Ketone	0.072	31,500	2,300	20	530	Ref. [10]
Pentane	0.126	45,000	5,700	50	1300	Ref. [10]
Toluene	0.112	40,500	4,500	40	1000	Ref. [10]
Vinyl Acetate	0.136	22,700	3,100	25	700	Ref. [10]
Xylene	0.090	40,800	3,700	30	850	Ref. [9]

ANEXO II

S/D	H/D																		
	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0.1	0.044	0.087	0.128	0.166	0.201	0.233	0.262	0.288	0.311	0.331	0.442	0.481	0.497	0.506	0.510	0.513	0.515	0.517	0.518
0.2	0.019	0.039	0.058	0.077	0.095	0.113	0.130	0.146	0.162	0.177	0.289	0.349	0.380	0.399	0.410	0.417	0.422	0.425	0.427
0.3	0.012	0.023	0.035	0.046	0.057	0.068	0.079	0.090	0.101	0.111	0.198	0.256	0.294	0.318	0.334	0.344	0.352	0.357	0.361
0.4	0.008	0.016	0.024	0.031	0.039	0.047	0.054	0.062	0.069	0.076	0.142	0.193	0.230	0.256	0.274	0.287	0.297	0.304	0.310
0.5	0.006	0.011	0.017	0.023	0.029	0.034	0.040	0.045	0.051	0.056	0.107	0.149	0.183	0.208	0.227	0.242	0.253	0.261	0.268
0.6	0.004	0.009	0.013	0.017	0.022	0.026	0.030	0.035	0.039	0.043	0.084	0.119	0.148	0.172	0.190	0.205	0.217	0.226	0.233
0.7	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.021	0.024	0.028	0.031	0.034	0.067	0.096	0.122	0.143	0.161	0.175	0.187	0.196	0.204
0.8	0.003	0.006	0.008	0.011	0.014	0.017	0.020	0.022	0.025	0.028	0.055	0.080	0.102	0.121	0.137	0.151	0.162	0.172	0.180
0.9	0.002	0.005	0.007	0.009	0.012	0.014	0.016	0.019	0.021	0.023	0.046	0.067	0.086	0.103	0.118	0.131	0.142	0.151	0.159
1.0	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0.018	0.020	0.039	0.057	0.074	0.089	0.102	0.114	0.125	0.134	0.141
2.0	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.012	0.018	0.024	0.030	0.035	0.040	0.045	0.050	0.055
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.017	0.020	0.023	0.025	0.028
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.007	0.009	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017
5.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005
9.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003

Anexo II: Fatores de forma de um cilindro para um elemento recebendo radiação máxima, onde H é a altura do cilindro, D é o seu diâmetro, e S é a distância da borda da chama e o ponto de análise. O ponto de análise se encontra no mesmo nível da base do cilindro.

ANEXO III

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS

AUTORIZAÇÃO ANP Nº 179, DE 6.4.2009 - DOU 7.4.2009

O SUPERINTENDENTE DE ABASTECIMENTO da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP, no uso das atribuições que foram conferidas pela Portaria ANP nº 92, de 26 de maio de 2004 e considerando as disposições da Portaria ANP nº 29, de 9 de fevereiro de 1999, e o que consta do Processo nº 48610.011012/2000-16, toma público o seguinte ato:

Art. 1º Fica a PETROGOLD DISTRIBUIDORA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO LTDA., CNPJ nº 02.909.866/0001-45, registrada na ANP como distribuidora de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível, biodiesel, mistura óleo diesel/biodiesel sob o número nº 3024, autorizada a operar as instalações localizadas na Rua Emilio Gomes, nº 1070, Quadra 42 - Vila Maria Helena - Município de Duque de Caxias - RJ.

A Base de Distribuição em tela, com capacidade de 2.048m³, cuja autorização para operação está sendo solicitada, é constituída pelos tanques verticais apresentados na tabela abaixo.

Tanque nº	Diâmetro (m)	Altura (m)	Volume (m³)	Produto
01	9,32	7,45	508	GASOLINA
02	9,32	7,45	508	GASOLINA
03	7,64	7,50	344	AEAC
04	7,64	7,50	344	AEHC
05	7,64	7,50	344	DIESEL

Art. 2º O objeto da presente Autorização deve ser executado em conformidade com as normas técnicas pertinentes.

Art. 3º Fica revogada a Autorização ANP nº 76, de 31 de março de 2006, publicada no DOU de 3 de abril de 2006.

Art. 4º Esta Autorização entra em vigor na data de sua publicação.

EDSON MENEZES DA SILVA

ANEXO IV

Cálculo detalhado do fator de forma feito no MathCad14.

$$\begin{aligned}
 \underline{\underline{F}}(D, H, FL, x, E) &:= \\
 D &\leftarrow D \\
 l &\leftarrow H \\
 x &\leftarrow x \\
 R &\leftarrow \frac{D}{2} \\
 S &\leftarrow \frac{x}{R} \\
 L &\leftarrow \frac{1}{R} \\
 A &\leftarrow (S + 1)^2 + L^2 \\
 B &\leftarrow (S - 1)^2 + L^2 \\
 F1 &\leftarrow \frac{1}{\pi \cdot S} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{L}{\sqrt{S^2 - 1}}\right) + \frac{L}{\pi} \cdot \left[\frac{(A - 2 \cdot S)}{S \cdot \sqrt{A \cdot B}} \cdot \operatorname{atan}\left[\sqrt{\frac{A \cdot (S - 1)}{B \cdot (S + 1)}}\right] - \frac{1}{S} \cdot \operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{S - 1}{S + 1}}\right) \right] \\
 FL &\leftarrow FL \\
 c &\leftarrow FL + H \\
 C &\leftarrow \frac{c}{R} \\
 F2 &\leftarrow \frac{1}{\pi \cdot S} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{C}{\sqrt{S^2 - 1}}\right) + \frac{C}{\pi} \cdot \left[\frac{(A - 2 \cdot S)}{S \cdot \sqrt{A \cdot B}} \cdot \operatorname{atan}\left[\sqrt{\frac{A \cdot (S - 1)}{B \cdot (S + 1)}}\right] - \frac{1}{S} \cdot \operatorname{atan}\left(\sqrt{\frac{S - 1}{S + 1}}\right) \right] \\
 F &\leftarrow F2 - F1 \\
 q &\leftarrow E \cdot F \\
 xh_0 &\leftarrow F \\
 xh_1 &\leftarrow q \\
 xh &
 \end{aligned}$$