



**MODELAGEM MATEMÁTICA DE  
INCÊNDIOS EM POÇA VIA  
ABORDAGEM NIST**

**Rodrigo César Barcellos de Souza**

**Projeto Final de Curso**

**Orientador**

**Prof. Carlos André Vaz Junior, D. Sc.**

**Setembro de 2013**

# MODELAGEM MATEMÁTICA DE INCÊNDIOS EM POÇA VIA ABORDAGEM NIST: UM ESTUDO DE CASO

*Rodrigo César Barcellos de Souza*

Projeto 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:

---

Carla Reis de Araújo, D.Sc.

---

Hermes Ribeiro Sant'anna, Eng. Químico

---

Diego Macedo de Oliveira Silva, Eng. Químico

Orientado por:

---

Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Setembro de 2013

Barcellos de Souza, Rodrigo César

Modelagem Matemática de Incêndios em Poça via abordagem NIST/Rodrigo César  
Barcellos de Souza. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

ix, 124 p., il.

(Projeto Final) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2013.

Orientador: Carlos André Vaz Junior

Projeto Final de Curso – UFRJ/ EQ/ Engenharia Química, 2013.

1. Incêndio em Poça. 2. abordagem NIST. 3. Petrogold. 4. Projeto Final.  
(Graduação - UFRJ/EQ) 5. Carlos André Vaz Junior. I. Modelagem Matemática de  
Incêndios em Poça via abordagem NIST.

*“Aquietai-vos e sabeis que Eu sou Deus;  
serei exaltado sobre toda a terra”*

*(Salmos 34:7)*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais e irmão, pelo grande esforço que sempre fizeram para que eu pudesse seguir meus estudos, mesmo nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Carlos André pela orientação, apoio, comprometimento e compreensão em todos os aspectos que envolveram este trabalho.

A todos que de certa forma foram importantes durante o tempo que estive na UFRJ.

A Professora Carla Reis de Araújo, ao Pesquisador Hermes Ribeiro Sant'anna e ao Engenheiro Químico pela disponibilidade de participar da banca de avaliação deste trabalho.

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

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE INCÊNDIOS EM POÇA VIA  
ABORDAGEM NIST: UM ESTUDO DE CASO**

Rodrigo César Barcellos de Souza

Setembro, 2013

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

O posicionamento de instalações industriais em meio a áreas urbanas é motivo de preocupação porque muitas vezes pouco se sabe a respeito das consequências que possíveis acidentes acarretariam a comunidade ao redor. Primeiramente é traçado um histórico dos combustíveis e caracterização do mercado brasileiro. A seguir, os principais acidentes ocorridos na indústria química com consequências desastrosas à população vizinha são citados. No caso de depósitos de combustíveis, este problema se agrava pela inflamabilidade do material armazenado gerando possíveis cenários de incêndio. Este estudo trata do cálculo da distância segura que pessoas e estruturas de armazenamento devem ficar em cenários de incêndio em poça de hidrocarboneto aplicando ao Estudo de caso do acidente ocorrido na Petrogold.

# Sumário

Introdução .....	8
2. Combustíveis .....	9
2.1 Histórico Brasileiro .....	10
2.2 Classificação dos Combustíveis.....	12
2.3 Distribuidoras.....	13
2.4 Distribuição dos Principais Derivados do Petróleo no Brasil.....	17
3. Acidentes Ampliados .....	18
3.1 Seveso .....	18
3.2 Bhopal.....	20
3.3 Reduc .....	24
4. Tanques de Armazenamento.....	29
4.1 Classificação de Tanques de Armazenamento.....	29
4.1.1 Tanque de Teto Fixo ( <i>Fixed Roof</i> ) .....	29
4.1.2 Tanque de Teto Móvel ( <i>Lifting Roof</i> ).....	31
4.1.3 Tanque de Teto Flutuante .....	31
a) Teto flutuante externo ( <i>External Floating Roof</i> ).....	31
b) Teto flutuante interno ( <i>Internal Floting Roof</i> ) .....	32
5. Equipamentos de Proteção.....	33
5.1 Diques e Bacias de Contenção .....	34
5.2 Acessórios e Dispositivos de Segurança .....	35
5.2.1 Respiro aberto (open vent) .....	35
5.2.2 Válvula de pressão e vácuo .....	36
5.2.3 Quebra Vácuo Automático .....	36
5.2.4 Válvulas Corta-Chama .....	37
5.2.5 Drenos de Teto Flutuante Externo.....	37
5.2.6 Selo de Teto Flutuante .....	38
5.2.7 Bocais .....	38
5.2.8 Bocas de visita .....	39
5.2.9 Câmaras e Aplicadores de Espuma Contra Incêndio .....	39
5.2.10 Sistemas de Inertização .....	40

5.2.11 Indicadores de Nível.....	41
5.2.12 Misturadores .....	41
5.2.13 Anéis de Contraventamento .....	42
5.2.14 Aterramento Elétrico .....	42
5.2.15 Escotilha de medição .....	42
5.2.16 Sistemas de Aquecimento.....	43
5.2.17 Isolamento Térmico a Alta Temperatura.....	43
6. Teoria de Incêndio .....	44
6.1 Transferência de Calor em Incêndios.....	48
6.2 Tipos de Modelos.....	48
6.3 Variáveis Empregadas.....	49
6.3.1 Taxa de Liberação de Calor – Heat Release Rate .....	49
6.3.2 Calor de Combustão .....	50
6.3.3 Fração Radiada .....	50
6.3.4 Poder Emissivo e Emissividade.....	51
6.3.5 Fatores de Configuração .....	52
6.4 Aproximação Geral para a Modelagem da Radiação Térmica .....	52
6.5 Correlação de Shokri and Beyler .....	53
6.6 Modelo de Fonte Pontual .....	55
6.7 Modelo de Chama Sólida .....	57
6.8 Modelo de Chama Sólida Modificado .....	60
6.8.1 Cálculo da Distância Aceitável de Separação .....	66
a) Cálculo simplificado.....	67
b) Cálculo Detalhado Incêndios em Poças de Líquidos .....	70
7. Estudo de Caso .....	73
7.1 Descrição da Empresa .....	73
7.2 O Evento .....	76
7.3 Modelagem de Incêndio.....	83
7.3.1 Cenários .....	83
a) Cenário 1: Todos os tanques e dique apresentam-se em chamas, não há sem barreiras .....	83
b) Cenário 2: Todos os tanques e dique apresentam-se em chamas, existe presença de muro ao redor do complexo .....	84
c) Cenário 3: Incêndio em piscina em um único tanque, sem barreiras .....	84

d) Cenário 4: Incêndio em piscina um único tanque com barreiras.....	84
7.3.4 Cálculos .....	85
8. Conclusão .....	94
Referências Bibliográficas .....	95

# Introdução

Um dos motivos de preocupação em relação ao posicionamento geográfico de plantas industriais é quanto à proximidade com regiões habitadas. Muitas vezes, a população vizinha pouco sabe a respeito do risco até que eventos graves ocorram. Em alguns casos, a indústria é construída em regiões isoladas, porém, com o passar do tempo, problemas em relação à ocupação humana desordenada torna plantas e moradores vizinhos.

Normalmente a licença de operação está vinculada ao desenvolvimento de uma Análise de Risco, que indica, entre outros fatores, a vulnerabilidade de moradores próximos. Muitas vezes é necessário que as indústrias tenham um plano de evacuação da região próxima a plantas, de maneira a diminuir o número de vítimas de um possível acidente.

Parques de tancagem de combustíveis, apesar de simples, podem ser incluídos no grupo de instalações com o potencial de causar danos, uma vez que acidentes envolvendo grande quantidade de produtos inflamáveis acarretam consequências desastrosas.

Este estudo apresenta inicialmente informações gerais a respeito dos combustíveis derivados do petróleo, um breve histórico, classificações e informações de mercado. A seguir alguns acidentes industriais são detalhados com o objetivo de focar nas consequências, principalmente para as comunidades ao redor. Posteriormente são apresentadas algumas correlações encontradas na literatura para o cálculo de incêndio em poça. Informações a respeito dos principais equipamentos e dispositivos de segurança utilizados usualmente na indústria de armazenamento de combustíveis são também apresentados. Por último, são avaliadas através de uma correlação pertinente as distâncias seguras ao incêndio tendo como estudo de caso o acidente na distribuidora de combustíveis Petrogold. Neste estudo serão avaliadas exclusivamente as consequências relacionadas ao incêndio em poça identificado ao redor dos tanques. Não serão consideradas as situações de Jato de fogo e Bola de fogo, que também ocorreram durante o incêndio.

## 2. Combustíveis

O uso de combustível pelos seres humanos data desde a pré-história, através do uso da madeira para manter o fogo. O uso do combustível, neste caso, proporcionava proteção contra animais, fonte de luz e calor, e, posteriormente, a capacidade de cozinhar os alimentos. O domínio do fogo se deu graças ao conhecimento do uso não apenas das fontes de ignição, mas também dos combustíveis, iniciando o caminho do homem rumo a civilizações cada vez mais complexas.

Posteriormente, o controle e manuseio do fogo tornou possível a produção de materiais cerâmicos, fundir metais para elaborar ferramentas e criar ligas como o bronze. A madeira, inicialmente a principal fonte de energia, foi lentamente dando lugar ao carvão vegetal, por este apresentar maior eficiência energética. Com a Revolução Industrial, na segunda metade do século XVIII, e a criação da máquina-a-vapor, o carvão mineral tornou-se a ainda mais relevante, sendo o principal combustível das indústrias da época.

Embora conhecido desde a Idade Antiga, o petróleo até então era pouco utilizado como combustível, tanto devido ao desconhecimento das técnicas necessárias para sua obtenção em grande quantidade e quanto às dificuldades de emprego. No ano de 1859, na Pensilvânia (EUA) ocorreu a perfuração do primeiro poço de petróleo com maior profundidade, obtendo uma produção diária de 19 barris. Este poço marcou o início da utilização em larga escala do petróleo. Seu crescente uso acabou por substituir em grande parte o emprego do carvão como combustível. No final do século, a invenção do motor à combustão exigiu o desenvolvimento de combustíveis com propriedades específicas. Frações do petróleo até então não utilizadas, como a gasolina, passaram a ter enorme aplicação. (LIQUIGAS, 2013)

Durante o século XIX à medida que a industrialização avançava, houve a necessidade do desenvolvimento de processos de refino em larga escala para acompanhar a crescente demanda do mercado por diferentes derivados de petróleo. Exploração e produção precisavam andar juntas para atender a demanda.

Na década de 70 a Organização dos Países Produtores e Exportadores de Petróleo (OPEP) aumentou o preço do barril dando origem a duas grandes crises impactando a

economia mundial totalmente dependente deste produto. Aos países mais afetados restou o investimento em novas reservas e fontes energéticas (LIMA, 2011).

As constantes pressões sobre a utilização de combustíveis fósseis, seus impactos ao ambiente e a consciência de que o petróleo é um recurso finito despertou também a procura por fontes alternativas de combustíveis. Os Biocombustíveis, destacando-se o álcool e o biodiesel são os dois grandes exemplos de investimentos em recursos renováveis em substituição ou complementação ao petróleo.

Em resumo, a história do uso de combustíveis tem profunda ligação com a história do homem e seu desenvolvimento na criação de novas tecnologias.

## **2.1 Histórico Brasileiro**

Relatos de exploração de petróleo no Brasil datam de 1860 na Bahia, com o principal objetivo voltado para a produção de querosene.

Até o início do século XIX a exploração de petróleo no Brasil se caracterizou por iniciativa do setor privado. Em 1907, os primeiros veículos automotores chegavam ao país, acarretando a necessidade de se importar gasolina (ARAGÃO, 2005 apud AYRES; FREITAS, 2007). Apenas em 1939 ocorreu a descoberta de petróleo brasileiro em escala industrial, possibilitando a produção de diesel, GLP, gasolina entre outros derivados (IBGE, 1990 apud ARAGÃO, 2005).

Nas décadas de 40 e 50, com o aumento da industrialização do Brasil, cresceu também a necessidade de integração entre as diferentes regiões do país. O modelo de integração escolhido foi o transporte rodoviário, aumentando o consumo de combustíveis, em especial o diesel. Cresceu assim a necessidade de importação dos derivados do petróleo, uma vez que a produção local não suportava a crescente demanda. É nesse contexto que, em 1953, sob o lema “O Petróleo é nosso”, o governo de Getúlio Vargas cria a Petrobras – empresa estatal para exploração de petróleo no país (AYRES; FREITAS, 2007).

As primeiras refinarias construídas em solo brasileiro foram criadas a RLAM, na Bahia em 1950, a RPBC em Cubatão, a REDUC em 1955, a REFAP no Rio Grande do

Sul e a REGAP em Minas Gerais em 1968 (Ayres; Freitas, 2007). Destaca-se que a década de 60 se caracterizou pela baixa produtividade dos poços terrestres nacionais, e pela descoberta dos primeiros poços offshore (LUCCHESI, 1998 apud AYRES; FREITAS, 2007).

Na década de 70, as grandes crises envolvendo elevação dos preços do petróleo atinge em cheio o Brasil, fortemente dependente da importação de petróleo. Novamente o governo decide diminuir a dependência do petróleo externo, novamente incentivando investimentos para alavancar a produção interna. Na mesma época surge também o Programa Proálcool, visando o emprego de etanol como combustível automotivo em substituição à gasolina. Neste contexto ocorrem as descobertas de poços no litoral do Espírito Santo e na Bacia de Campos, iniciando a exploração de petróleo em águas profundas.

A década de 80 marcou o aumento da produção offshore com a criação do Programa de Inovação Tecnológica e Desenvolvimento Avançado em Águas Profundas (Procap 1000), que visava à exploração em poços abaixo dos 1000 metros de profundidade. No mesmo ano de criação, o programa já alcançava a meta de perfuração de poços a profundidades de 1200 metros e produção para 400 metros (ARAGÃO, 2005).

Mudanças na lógica política e econômica fizeram com que a década de 90 marcasse um processo de abertura do mercado de combustíveis, mediante ao questionamento quanto à eficiência do monopólio da Petrobras. O governo, que atuava como operador e proprietário de ativos no setor produtivo se tornaria apenas regulador e acionista. Assim, em 1997, criou-se a ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) que se tornou responsável por elaborar editais para promover as licitações para concessão e exploração, desenvolvimento, produção, assim como a realização de contratos e fiscalização. (AYRES; FREITAS, 2007).

O processo de desregulamentação do mercado se estendeu até o ano de 2002, permitindo a outras empresas a produção e o comércio nacional, assim como a importação e a exportação de derivados do petróleo. Com o fim do monopólio da Petrobras, aumentaram o número de agentes no mercado de combustíveis.

Embora o processo de desregulamentação ainda esteja vigente, atualmente o cenário do setor aproxima-se muito mais de um monopólio de fato do que de livre mercado. A Petrobras domina praticamente todas as refinarias em operação, restando as demais empresas possuírem coparticipações ou tentar manter a operação de pequenas plantas, como a refinaria de Mangueiras e a da Ipiranga no sul.

Em paralelo destaca-se que, em 2007 ocorreu a descoberta do Pré-sal, com estimativas de barris de petróleo equivalente entre 50 e 70 bilhões. O Brasil passou a viver com a expectativa de se tornar um grande produtor. Porém, devido a inúmeros desafios tecnológicos enfrentados na exploração em condições tão complexas, e muitos questionamentos políticos quando a atuação da ANP, o fato é que a exploração no Pré-sal ainda não avançou significativamente. Essa demora desperta a desconfiança de muitos profissionais do setor em relação à viabilidade técnica e econômica da sua exploração no contexto atual do preço mundial do petróleo. Durante este tempo outras reservas mundiais foram descobertas como no caso do Shale gas (EUA), o Pré-sal na costa africana e o avanço tecnológico na exploração das areias betuminosas no Canadá.

## **2.2 Classificação dos Combustíveis**

Atualmente os principais combustíveis consumidos no Brasil são a gasolina, o óleo diesel, o querosene de aviação e o GLP com destaques também para o Etanol e o Biodiesel (ANUÁRIO ANP, 2012).

A gasolina é usada em veículos com motores de ciclo Otto. No Brasil de acordo com a ANP são do tipo A que seria a “gasolina pura” e do tipo C que é obtida da mistura da gasolina tipo A com etanol de acordo com a legislação em vigor.

O Biodiesel é formado por alquil ésteres de ácidos graxos com cadeia longa, originados de gordura animal ou de óleos vegetais.

O óleo diesel é destinado a veículos do ciclo Diesel para transporte rodoviário e podem ser do tipo: A, B e BX. O tipo A não tem adição de Biodiesel sendo que o tipo B contém Biodiesel. O óleo diesel BX deve conter X% em volume de Biodiesel. O óleo diesel pode ser classificado ainda de acordo com a presença de enxofre, para isso criou-

se a classificação S-10, S-50, S-500, S-1800 que indicam o teor de enxofre (mg/kg) em cada combustível.

O etanol divide-se em duas classificações. O Etanol anidro combustível (EAC) que se destina ao distribuidor onde será adicionado à gasolina A para obtenção da gasolina C e o Etanol hidratado combustível (EHC) que se encontra no posto (revendedor) para imediato consumo.

De acordo com a ANP, em alguns combustíveis devem ser adicionados corantes, que atuam como forma de diferenciação visual e evita a adulteração com a mistura entre eles. É o caso do Etanol anidro combustível, no qual deve ser adicionado corante laranja, e o óleo diesel S-500 em que se adiciona corante vermelho.

## 2.3 Distribuidoras

Em relação às distribuidoras de combustíveis no Brasil, estas registraram no ano de 2011 um aumento 8,2% nas vendas, movimentando um volume superior a 100 milhões de metros cúbicos de combustíveis (Anuário Estatístico da ANP, 2012). Neste total não estão relacionados os combustíveis que não têm a intermediação das distribuidoras, ou seja, são comprados pelos consumidores diretamente dos produtores – tais como nafta, óleo marítimo e óleo combustível.

Em termos de volume negociado, o óleo diesel representou a maior parcela, seguido pela gasolina C e o GLP, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.1: Vendas nacionais, pelas distribuidoras, dos principais derivados do petróleo de 2002 à 2011.

Derivados de petróleo	Vendas nacionais pelas distribuidoras (mil m <sup>3</sup> )										11/10 %
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	
Total	84.705	81.389	83.907	84.140	84.486	88.419	92.602	92.332	102.070	111.335	8,22
Gasolina C	22.610	22.610	23.174	23.553	24.008	24.325	25.175	25.409	29.844	35.491	18,92
Gasolina de aviação	63	59	61	55	52	55	61	62	70	70	1,18
GLP	12.165	11.436	11.708	11.639	11.783	12.034	12.259	12.113	12.558	12.868	2,46
Óleo combustível	7.561	6.200	5.413	5.237	5.127	5.525	5.172	5.004	4.901	3.672	-25,09
Óleo diesel	37.668	36.853	39.226	39.167	39.008	41.558	44.764	44.298	49.239	52.264	6,14
QAV	4.436	3.972	4.209	4.429	4.466	4.891	5.227	5.428	6.250	6.955	11,28
Querosene Iluminante	201	177	116	59	42	31	24	16	15	14	-7,00

Fonte: Anuário Estatístico da ANP, 2012, p.142.

A Figura 2.1 complementa os dados da Tabela, apresentando de modo gráfico a evolução das vendas de derivados de petróleo entre os anos de 2002 e 2011. Destaca-se a aceleração nas vendas a partir de 2009, refletindo o bom momento econômico nacional e o crescimento do país.

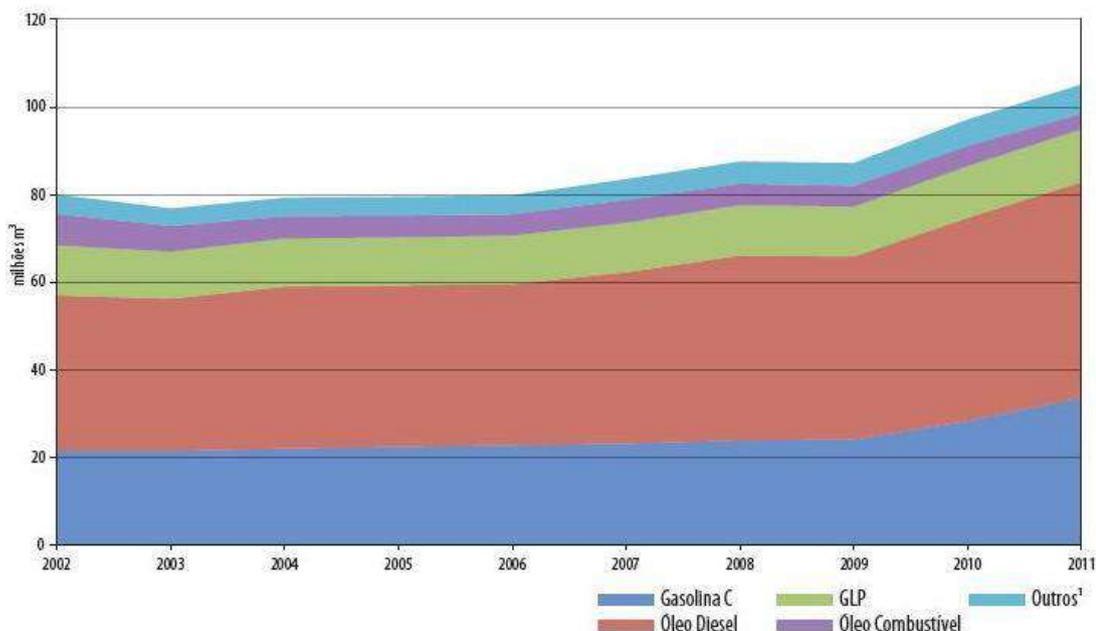


Figura 2.1: Evolução das vendas nacionais, pelas distribuidoras, entre 2002 e 2011.

Fonte: Anuário Estatístico da ANP, 2012, p.142.

Ainda de acordo com a Tabela 2.2, o aumento registrado nas vendas de Gasolina C foi de 18,9 % em 2011 quando comparado a 2010, chegando ao volume total de 35,5 milhões de metros cúbicos. A gasolina corresponde assim a mais de 30% de todas as vendas de derivados.

Para atender este gigantesco mercado em crescimento, o país conta com 143 distribuidoras. A Tabela 2.3 apresenta a participação de cada uma. A Tabela destaca ainda a participação da empresa Petrogold, cujo acidente ocorrido no ano de 2013 será analisado neste estudo. A empresa, antes do acidente, respondia por 0,00001% do mercado nacional.

Destaca-se aqui que, embora existam 143 distribuidoras no mercado, as três maiores empresas respondem juntas por mais de 60% de todo o volume. Das 143 empresas, apenas 10 apresentam uma fatia de vendas superior a 1% do volume total negociado. Trata-se assim de um setor, na prática, extremamente concentrado na mão de poucos players (Figura 2.2).

Destaca-se ainda a forte presença de empresas de pequeno porte neste mercado. A operação de empresas de micro e pequeno porte apresentam características muito peculiares, em especial quando consideradas questões relativas à segurança de processos e segurança do trabalho. Mendonça (2012) destaca em sua dissertação de mestrado as particularidades de empresas deste porte, suas dificuldades para atender leis, regras e regulamentos muitas vezes pensados e desenvolvidos para grandes empresas. Segundo Medonça (2012), a pequena empresa em geral não dispõe de um setor específico de segurança de processos, sendo a tarefa dividida entre os profissionais da produção, ou mesmo concentrada no dono da empresa. A análise das particularidades e características próprias das pequenas empresas quanto à segurança de processos ultrapassa o escopo deste estudo, porém deve ser considerada para a melhor compreensão do acidente aqui estudado.

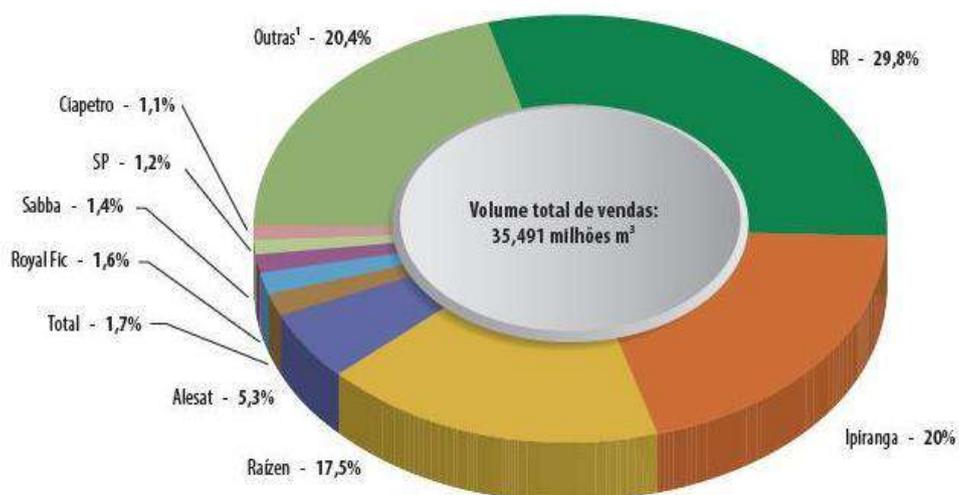


Figura 2.2: Participação das distribuidoras nas vendas de gasolina C em 2011.

Fonte: Anuário Estatístico da ANP, 2012, p.148.

Tabela 2.2: Participação das distribuidoras nas vendas de gasolina C em 2011

Distribuidoras	Participação (%)	Distribuidoras	Participação (%)
Total (143 distribuidoras)	100,0000		
BR	29,7833	Dibrape	0,0819
Ipiranga	20,0387	Maxsul	0,0809
Raizen	17,4566	Quality	0,0690
Alesat	5,3418	UBP Petróleo	0,0596
Total	1,6822	Podium	0,0542
Royal Fic	1,5664	Tinspetro	0,0497
Sabba	1,3609	DIP	0,0480
SP	1,2365	Petromais	0,0440
Giapetro	1,0700	Stang	0,0418
Aster	1,0684	Petroluz	0,0372
Manguinhos	0,7558	Vetor	0,0361
D'mais	0,7092	Uni	0,0347
RM Petróleo	0,6754	SL	0,0337
Idaza	0,6599	Flexpetro	0,0336
Latina	0,6501	Art Petro	0,0335
Atem's	0,5534	Tube Toy's	0,0329
Ruff CJ	0,5542	Walendowsky	0,0291
Zema	0,5203	Watt	0,0280
Mime	0,4932	Redepetro	0,0273
Equador	0,4710	Sul Combustíveis	0,0270
Federal	0,4645	Vega	0,0253
Triângulo	0,4429	DNP	0,0237
Petrox	0,4428	Félix	0,0227
Setta	0,4366	Monte Cabral	0,0208
Pantera	0,3975	Realcool	0,0191
Dislub	0,3959	Direcional	0,0188
Ello-Puma	0,3852	Araguaia	0,0187
Larco	0,3705	Rede Brasil	0,0173
Simarelli	0,3475	RZD Distribuidora	0,0168
Potencial	0,3409	Petroalcohol	0,0160
Charrua	0,3409	Euro	0,0139
Petrosul	0,3142	Visual	0,0120
Rejaille	0,3101	Magnum	0,0119
Tobras	0,3002	Montepetro	0,0112
Petronac	0,2963	Acol	0,0099
Small	0,2922	Noroeste	0,0090
Petrobahia	0,2800	Gasforte	0,0089
Brasil Oil	0,2676	Jacar	0,0088
Atlântica	0,2621	Simeira	0,0079
Temape	0,2592	Centro Oeste	0,0067
Estrada	0,2588	Gran Petro	0,0056
Taurus	0,2511	Pedevesa	0,0053
Torrão	0,2460	Tranço	0,0052
Rodoil	0,2327	Santarem	0,0052
Pelikano	0,2306	Aliança	0,0042
Petroserra	0,2294	Gol Combustíveis	0,0042
Saara	0,2211	Mister Oil	0,0039
Megapetro	0,2168	Sul America	0,0038
Naki	0,2088	SR	0,0037
Rio Branco	0,2007	Manguary	0,0033
Gasdiesel	0,1708	Petronor	0,0033
Hora	0,1649	Arrows	0,0032
Petropar	0,1639	Petrogoiás	0,0032
Fera	0,1567	Queiroz	0,0031
Liderpetro	0,1552	Flag	0,0030
Petro Amazon	0,1525	Cruz de Malta	0,0027
Fan	0,1466	WD Distribuidora	0,0027
Soll	0,1389	Isabella	0,0023
Petronossa	0,1383	Ouro Negro	0,0021
Mazp	0,1375	Petrozara	0,0015
Premium	0,1369	Sauro	0,0013
Aspen	0,1356	Phoenix	0,0010
Petroexpress	0,1254	Tower	0,0007
MMP	0,1222	Meta	0,0006
America Latina	0,1053	Beta	0,0006
Global	0,1051	Terra	0,0004
Rede Sol	0,1050	Fix	0,0002
Pontual	0,1035	Ecológica	0,00021
Atlanta	0,0999	Petroball	0,00007
Americanoil	0,0975	Petrogold	0,00001
PDV Brasil	0,0958	Tim	0,00001
Tabocão	0,0938		

Fonte: Anuário Estatístico da ANP, 2012, p.147.

## 2.4 Distribuição dos Principais Derivados do Petróleo no Brasil

No final do ano de 2011 o Brasil contava com 329 bases de distribuição de combustíveis líquidos autorizadas, sendo que 118 se localizavam no Sudeste, 66 no Sul, 52 no Centro-Oeste, 47 no Norte e 46 no Nordeste. Destas 79 em São Paulo. (ANUÁRIO ANP, 2012)

O armazenamento total de combustíveis contava, em 2011, com uma capacidade nominal de 3,9 milhões de metros cúbicos, sendo 77,4% destinados aos derivados do petróleo (exceto GLP). A região Sudeste correspondia a 41,5% da capacidade total, sendo também a região de maior demanda.

Com relação ao etanol as capacidades de armazenamento chegaram a 720,9 mil metros cúbicos, correspondendo a 18,4% do total. Novamente o Sudeste responde pelo maior volume armazenado, com 47% do total. A tabela 2.1 apresenta alguns detalhes.

A tabela 2.1 apresenta a capacidade nominal de armazenamento por estado e região

Grandes regiões e unidades da Federação	Quantidade de bases de distribuição	Capacidade nominal de armazenamento (m <sup>3</sup> )		
		Derivados de petróleo (exceto GLP)	GLP	Etanol
<b>Brasil</b>	<b>329</b>	<b>3.030.308</b>	<b>761.662</b>	<b>720.916</b>
<b>Região Norte</b>	<b>47</b>	<b>437.946</b>	<b>17.200</b>	<b>62.618</b>
Roraima	11	59.233	2.350	11.370
Acre	5	11.939	491	2.297
Amazonas	5	95.340	7.263	21.388
Roraima	2	9.086	0	947
Pará	20	252.908	6.899	24.210
Amapá	1	6.408	0	1.184
Tocantins	3	2.933	196	1.223
<b>Região Nordeste</b>	<b>46</b>	<b>616.665</b>	<b>30.984</b>	<b>117.283</b>
Maranhão	6	124.761	5.746	23.861
Piauí	1	11.492	353	4.681
Ceará	6	115.595	5.819	15.074
Rio Grande do Norte	2	37.065	1.653	12.530
Paraíba	3	31.504	1.344	9.579
Pernambuco	7	122.686	7.521	21.717
Alagoas	2	33.858	1.121	4.530
Sergipe	2	20.925	1.184	3.383
Bahia	17	118.779	6.243	21.928
<b>Região Sudeste</b>	<b>118</b>	<b>1.257.926</b>	<b>75.431</b>	<b>359.441</b>
Minas Gerais	19	216.418	11.643	53.738
Espírito Santo	3	124.266	3.475	8.655
Rio de Janeiro	17	245.280	17.866	56.352
São Paulo	79	671.962	42.447	240.696
<b>Região Sul</b>	<b>66</b>	<b>511.672</b>	<b>27.356</b>	<b>94.710</b>
Paraná	40	283.566	9.772	55.384
Santa Catarina	13	16.061	3.966	6.812
Rio Grande do Sul	13	212.044	13.618	32.513
<b>Região Centro-Oeste</b>	<b>52</b>	<b>286.199</b>	<b>10.691</b>	<b>86.864</b>
Mato Grosso do Sul	12	36.272	1.348	9.575
Mato Grosso	26	50.873	904	35.670
Goiás	10	74.046	4.745	30.211
Distrito Federal	4	45.008	3.694	11.407

Fonte: Anuário Estatístico da ANP, 2012, p.141.

## 3. Acidentes Ampliados

Acidentes graves enfatizam a importância do planejamento antecipado para situações de emergência, assim como o projeto de instalações que minimizem a ocorrência e as consequências desses possíveis eventos.

Os acidentes descritos a seguir geraram impactos para a população externa a empresa, fazendo crescer a importância da avaliação dos perigos e gerenciamento de riscos em instalações industriais.

### 3.1 Seveso

Seveso, uma pequena cidade italiana com 17.000 mil habitantes, localizada a 25 km ao norte de Milão sofreu o primeiro grande acidente químico registrado. Nesta cidade era localizada uma planta de pesticidas da Icmesia Chemical Company.

Na síntese de pesticida o TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzoparadioxina) era obtido em pequena quantidade através de uma reação paralela. Além de ser carcinogênica, trata-se de uma das substâncias mais tóxicas para o ser humano, capaz de ser fatal em doses muito pequenas. Outra característica é a insolubilidade em água, o que torna a descontaminação da área afetada complicada. Doses não letais são capazes de gerar a cloroacnase, doença capaz de persistir por vários anos. (CROWL; LOUVAR, 2002)

A fórmula estrutural do TCDD encontra-se na Figura 3.1

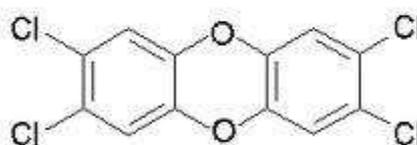


Figura 3.1: Fórmula estrutural do TCDD Fonte: UFOP, 2013

No dia 27 de julho de 1976, durante a operação, ocorreu um superaquecimento do reator, aumentando consideravelmente a quantidade de TCDD produzida. Cerca de 2 kg de TCDD foram liberados pelo sistema de alívio do reator. Porém, uma falha neste sistema fez com que o material acaba-se sendo jogado na atmosfera, formando uma grande nuvem branca sobre a cidade de Seveso. Uma tempestade fez com o que o TCDD fosse infiltrado no solo, contaminando uma grande extensão territorial. (CROWL; LOUVAR, 2002)

A planta não possuía planos de alarme e alerta à população externa. A demora da comunicação com as autoridades locais fez com que a evacuação da população só ocorresse vários dias depois do acidente. Ao todo 250 casos de cloroacne foram registrados, 600 pessoas foram evacuadas de suas casas e mais de 2000 receberam tratamento contra o TCDD. A área mais contaminada vizinha à fábrica foi isolada e assim permanecendo até hoje. (CROWL; LOUVAR, 2002)



Figura 3.3: Trabalho de descontaminação da cidade de Seveso. Fonte: DIE WELT, 2008

Embora não tenham ocorrido mortes, muitas foram as consequências para a população. Segundo médicos da universidade de Milão que acompanham o caso há 25 anos, o número de casos de diabetes e tumores na região é maior que a média da população. (SWISSINFO, 2008)

Mesmo não sendo o acidente químico mais grave da história, em especial por não ter gerado fatalidades, ele alterou a imagem que a população tinha da indústria química,

em especial na Europa. Parcela importante passou a considerar plantas do setor como sendo potencialmente perigosa e não desejada – deixando de avaliar os benefícios que os produtos finais da indústria química proporcionam.

Depois de Seveso, vários países criaram leis e formas de controle mais severas para a indústria química. (SWISSINFO, 2008)

## 3.2 Bhopal

Em Bhopal, Índia, localizava-se uma planta de pesticidas administrada pela Union Carbide e investidores locais. Um composto intermediário obtido no processo, mais precisamente o metil iso-cianato (MIC), é extremamente perigoso, sendo tóxico, reativo, volátil e inflamável. A exposição causa acumulação nos pulmões impedindo a respiração. Para uma jornada de trabalho de 8 horas, a quantidade máxima permitida de exposição é de 0,02 ppm. Afeta também os olhos. Esse agente químico atua como corrosivo, corroendo o tecido úmido vulnerável como membranas mucosas e superfícies oculares. As vítimas experimentam severas irritações no nariz e garganta quando expostos a concentrações superiores a 21 ppm de MIC.

MIC tem ponto de ebulição de apenas 39,1 graus Celsius, passando facilmente para a fase vapor quando aquecido. Seu vapor é duas vezes mais pesado que o ar, portanto, tende a se concentrar próximo ao solo em caso de liberação.

O MIC reage exotermicamente com água a uma taxa que, embora seja lenta, permite o aumento da temperatura e a consequente vaporização do MIC armazenado.

O acidente em questão foi atribuído a uma reação criada pela contaminação de um tanque de armazenamento de isocianato de metilo com uma quantidade substancial de água. Embora a válvula de segurança tenha aberto na pressão de projeto, todas as medidas para mitigar uma liberação externa de MIC estavam em standby (torre de lavagem cáustica) ou fora de serviço (flare).

Quando, de alguma maneira, o tanque contendo MIC foi contaminado com grandes quantidades de água, o calor da reação ultrapassou a temperatura de ebulição do MIC. Com o aumento da pressão, a válvula de segurança abriu como descrito em

projeto, porém, todas os sistemas responsáveis pelo tratamento desse vapor antes da liberação para a atmosfera não estavam em operação. De acordo com estimativas, 25 mil toneladas de vapor tóxico de MIC foram liberadas.

A nuvem formada permaneceu no ar durante 15 a 30 minutos. Depois, por ser mais denso, o MIC desceu para o nível do solo onde se infiltrou nas residências vizinhas. O material seguiu em direção ao centro de Bhopal, localizado a dois quilômetros ao sul da planta.

Cerca de 2.000 pessoas morreram e 20.000 mil ficaram feridas (CROWL; LOUVAR, 2002). De acordo com estudos realizados anos depois, o acidente causou 3787 mortes documentadas e 10.000 não documentadas. Nenhum trabalhador da planta foi morto ou ferido. (WILLEY *et al*, 2006)

Segundo alguns relatos, logo após o evento a Union Carbide negou-se a fornecer informações detalhadas sobre a natureza do contaminante o que impediu o tratamento adequado dos indivíduos expostos.

A figura 3.4 mostra a localização da planta e a área atingida deste que foi um dos maiores acidentes já registrados na indústria química mundial.

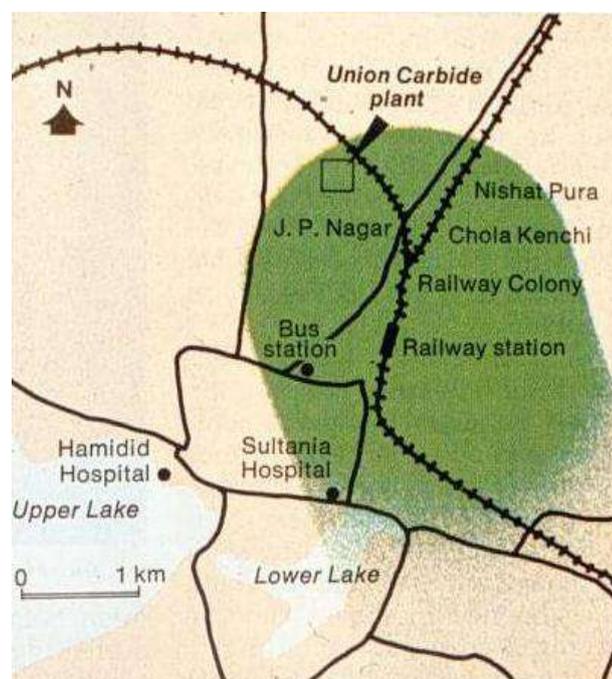


Figura 3.4: Destaque em verde para a região mais afetada

Fonte: WILLEY *et. al*, 2006, p.3.

As investigações posteriores mostraram que, dentre as possíveis causas para a contaminação do tanque de MIC por água, estão:

Água de lavagem: Teria ocorrido admissão de água nos tanques durante um processo de limpeza, onde a válvula de isolamento da linha com o tanque não foi bloqueada.

Sabotagem: Um indivíduo teria deliberadamente conectado uma mangueira de água na tubulação, que causou a admissão de água no tanque de armazenamento. Esta causa teria exigido íntimo conhecimento da tubagem em torno do tanque, onde fazer fisicamente a ligação correta, e a remoção de um indicador de pressão para, logo após, a refixação de acessórios de tubagens. (WILLEY *et al*, 2006)

A Figura 3.5 apresenta uma visão geral da tubulação da fábrica.

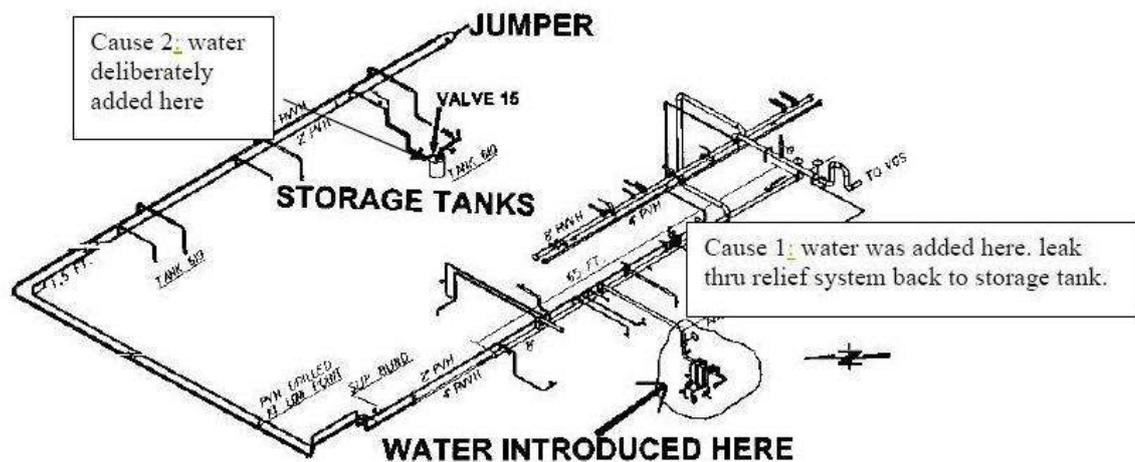


Figura 3.5: Visão geral do sistema de tubulação

Fonte: WILLEY *et. al*, 2006, p.4.

Apesar das duas hipóteses, as verdadeiras causas do acidente foram decisões gerenciais:

Negligência de um sistema de flare que necessitava de reparo.

Diminuição das despesas operacionais colocando o sistema de purificação em “stand by”.

Decisão de retirar o refrigerante do sistema de refrigeração utilizado nos tanque de armazenamento de MIC.

Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da planta é mostrado a seguir na Figura 3.6.

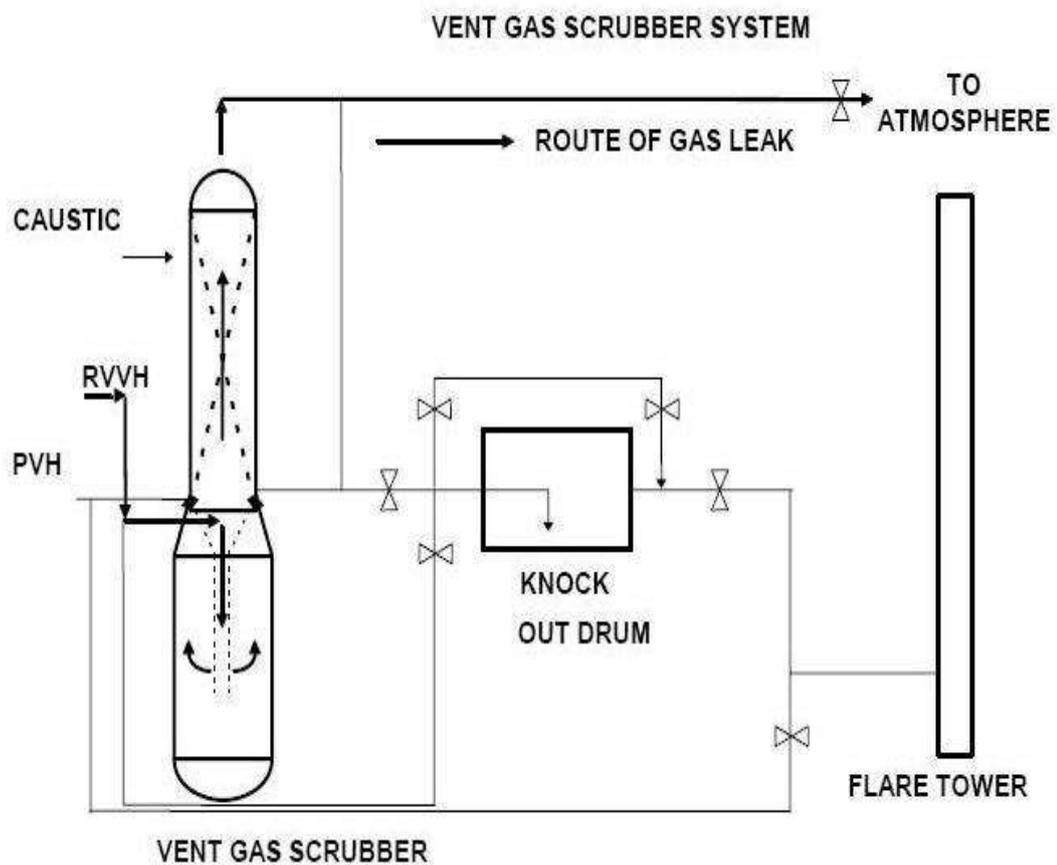


Figura 8: Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da planta apresentando a Torre de tratamento cáustico e a Torre de Flare. (WILLEY et al, 2006, p.6)

Tratava-se de uma planta que seria desativada, o que pode explicar, porém não justificar, parte da negligência da gestão corporativa.

Como causas adicionais que tornaram esse acidente mais severo estão:

Planejamento de emergência insuficiente e pouca conscientização da comunidade.

Falta de consciência do impacto potencial do MIC na comunidade; Falta de comunicação entre os trabalhadores da planta e as autoridades da cidade antes de durante o acidente.

Planejamento incorreto sobre a forma de ocupação da comunidade ao redor da fábrica, permitindo que uma grande população vivesse perto de uma indústria potencialmente perigosa, tipo de situação muito comum na década de 80.

Esta última causa foi atribuída a falhas do governo indiano que foi incapaz de conter o surgimento de favelas em regiões próximas à planta aumentando muito o número de vítimas.

Após o acidente, a Union Carbide foi banida da Índia, e os produtos químicos que permaneceram na região nunca foram removidos, levando a impactos ambientais e a saúde, que mesmo décadas após o acidente ainda se mostram evidentes. O nascimento de um grande número de bebês mortos na região até hoje é atribuído ao acidente químico.

Embora catastrófico, o acidente de Bhopal trouxe consequências positivas para a indústria química mundial, pois levou ao surgimento de melhores práticas de segurança de processos. Práticas como Gestão de Mudanças, Integridade Mecânica, Análise de Perigos e Camadas de Proteção se tornaram cada vez mais comuns. Fez crescer ainda o controle a respeito da existência de comunidades ao redor de indústrias e os possíveis cenários acidentais que afetem à população vizinha.

### **3.3 Reduc**

Em 1972 a Refinaria de Duque de Caxias, no Rio de Janeiro, foi cenário de um grave acidente.

Refinarias acumulam grande quantidade de líquidos e gases inflamáveis ou combustíveis. No caso do GLP, este é armazenado em grandes esferas. É comum o acúmulo de água na região inferior da esfera, fruto a condensação da umidade presente no gás. Quando o gás úmido é pressurizado e liquefeito, a água também se liquefaz, acumulando-se no fundo.

O procedimento de drenagem de uma esfera é simples. O operador deve abrir manualmente a válvula localizada na parte inferior do tanque, permitindo a retirada da

água. O operador deve fechá-la quando não houver mais água na esfera, não permitindo a saída de GLP.

No dia 30 de Março de 1972, durante a realização da drenagem, o operador abriu a válvula manual para a retirada de água e por algum motivo se ausentou do local. Ao retornar reparou que estava vazando GLP, pois a água já havia sido completamente drenada durante sua ausência. Imediatamente, tentou fechar a válvula manual, porém, não obteve sucesso, pois a mesma estava congelada. O motivo do congelamento se deve ao fato de que o gás liquefeito dentro do tanque, ao se expandir rapidamente na válvula, retira calor do ambiente provocando o congelamento dos equipamentos mais próximos. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

O vazamento de GLP não pôde ser contido, dando origem a uma nuvem inflamável. Esta sofreu ignição, dando início a um incêndio próximo a esfera de GLP. Este incêndio na saída de gás da esfera poderia ter sido controlado interrompendo-se a saída de combustível da esfera, porém, estes recursos não estavam disponíveis na época. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

O incêndio durou horas, mesmo com o esforço realizado pelos brigadistas. A temperatura no ponto de vazamento atingiu cerca de mil graus Celsius provocando o aquecimento da esfera. (COSTA, 2011)

Durante o incêndio, com o vazamento incapaz de ser contido, o tanque apresentava cada vez menos carga e juntamente com as temperaturas externas muito altas, formou-se um cenário propício a ocorrência do fenômeno BLEVE (Boiling Liquid Expand Vapor Explosion), pouco conhecido na época.

Três esferas explodiram em sequência, matando ou ferindo inúmeros brigadistas, assustando moradores das regiões próximas, quebrando vidraças e lançando pedaços de esfera a longas distâncias.

O local mais afetado foi Campos Elíseos onde portas dos comércios foram arrancadas. Aproximadamente 500 moradores desesperados se refugiaram em localidades próximas. A rodovia Washington Luís chegou a ser interditada e motoristas chegaram a entrar em pânico abandonando seus veículos. (COSTA, 2011)

A seguir a figura 3.7 exibe parte de uma esfera que, com a violência da explosão, foi arremessada a um quilômetro de distância e a figura 3.8 mostra a destruição do parque de esferas.



Figura 3.7: Parte superior de um tanque de GLP encontrada a um quilômetro do local Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.26.



Figura 3.8: Parque de esferas após o acidente  
Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.25.

Este acidente resultou ao todo em 38 vítimas fatais e outros 35 feridos com queimaduras graves. Todos trabalhadores, a maioria da REDUC e outros da FABOR que ajudaram no combate ao incêndio (COSTA, 2011).

Alguns fatores contribuíram para o elevado número de vítimas. O acidente ocorreu em horário de troca de turno, fazendo com que os funcionários do turno anterior se juntassem aos do turno em vigência na tentativa de ajudar, aumentando assim o número de pessoas durante o evento. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

Outro fator a ser considerado foi a pouca compreensão sobre o fenômeno de BLEVE. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

A tarefa de drenagem de água em esferas de GLP é uma atividade ainda hoje realizada, porém, atualmente conta com uma série de medidas de segurança. Hoje o piso embaixo das esferas é cimentado e possui inclinação. O objetivo é que em caso de vazamento não seja gerado um acúmulo perto da esfera em forma de poça. Assim, um eventual incêndio na poça não aumentaria drasticamente a temperatura da esfera. (LIONE, 2011 apud SCOLARIK; CESARIO, 2013) As linhas de descarga da esfera sofreram alterações, como a introdução de duas válvulas (redundância), seguidas de um acumulador onde a tubulação se divide em duas. O trecho derivado da parte superior do acumulador é usado para escoamento de GLP onde se encontra uma válvula de retenção. O trecho inferior é usado para a drenagem de água e apresenta duas válvulas conhecido como duplo bloqueio. (LIONE, 2011 apud SCOLARIK; CESARIO, 2013)

Esferas hoje contam com sistemas de drenagem fechada em que a água não é liberada para ao ambiente, evitando também o contato dos operadores com o GLP. A figura a seguir mostra o projeto para Drenagem Fechada e do Sistema de Amostragem das esferas de GLP da U-1237 (UN-REDUC). (MCG Engenharia, 2013)

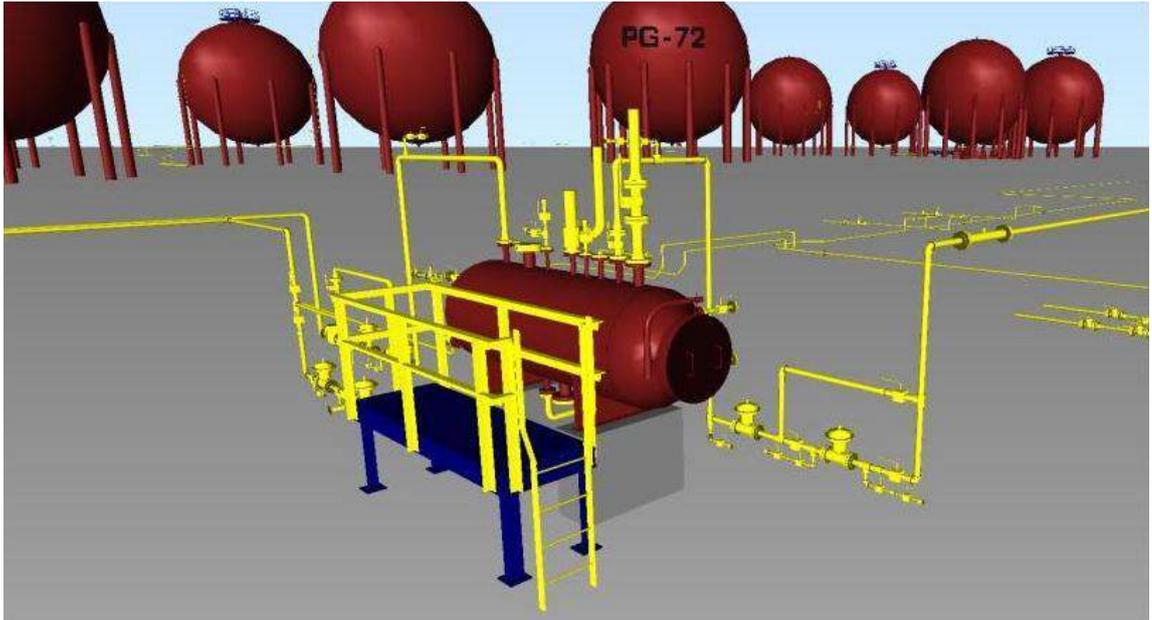


Figura 3.9: Sistema de drenagem projetado para REDUC pela MCG Engenharia. Fonte: mcgengenharia.com, 2013

Hoje a válvula localizada na saída da esfera pode ser acionada remotamente, direto da sala de controle, ou seja, não é manual como ocorrido no acidente. Outras modificações são o afastamento da região desta válvula, logo abaixo da esfera, do ponto de drenagem. O objetivo é que em caso de congelamento da válvula de bloqueio, a válvula de ação remota possa ser fechada impedindo o vazamento de GLP. A presença de fusíveis termossensíveis nesta válvula permite o fechamento instantâneo em caso de aumento de temperatura externa. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

Finalmente, as esferas hoje contam com sistema remoto de lançamento de água, visando reduzir a temperatura do casco em caso de incêndio. (SCOLARIK; CESARIO, 2013) Não existe mais a necessidade de manter brigadistas neste local com tal tarefa durante um incêndio.

## 4. Tanques de Armazenamento

As indústrias químicas e petroquímicas tradicionalmente utilizam enormes tanques de armazenamento de matérias-primas e produtos. A estocagem garante a logística necessária para atender o mercado, seja por aumento da demanda do produto, seja por suspensão do abastecimento de matéria-prima. Os tanques garantem a segurança da continuidade operacional e o fornecimento dos produtos sem interrupções ao cliente. Os tanques funcionam ainda como “amortecedores”, tornando o sistema produtivo mais estável e facilitando o controle operacional.

Existem diversos tipos de tanques atualmente em uso. Fatores que influenciam na escolha do tipo de tanque de armazenamento utilizado para determinado produto são principalmente a segurança, a exigência ambiental, o custo de operação e a rentabilidade.

### 4.1 Classificação de Tanques de Armazenamento

No caso da estocagem de combustíveis líquidos os tipos de tanques mais usados são o de teto fixo, teto flutuante externo e de teto flutuante interno. Estes modelos são abordados a seguir com suas principais características e sistemas de segurança.

#### 4.1.1 Tanque de Teto Fixo (*Fixed Roof*)

São os mais simples de construir e muito comuns na indústria. São formados por um corpo cilíndrico chamado de costado com a cobertura ligada permanentemente à parte superior. Podem ser suportados por uma estrutura interna de perfis metálicos ou autosuportantes quando são sustentados apenas na periferia do costado. O formato dos tetos apresentam algumas variações construtivas mais usuais que são o teto cônico (Figura 4.1) e o teto curvo (Figura 4.2).



Figura 4.1: Teto Fixo Cônico

Fonte: BARROS, 2011, p.8.



Figura 4.2: Teto Fixo Curvo

Fonte: BARROS, 2011, p.8.

Como existe um espaço entre o nível do líquido e o teto, há formação de vapor, e por isso necessitam de suspiros para a ventilação durante o armazenamento e descarregamento de produto (MARTINS, 2004).

Normalmente são empregados para derivados de petróleo mais pesados com pouca perda por evaporação como o gasóleo, o óleo diesel, o asfalto, resíduo de vácuo entre outros.

## 4.1.2 Tanque de Teto Móvel (*Lifting Roof*)

Nestes tanques os tetos se movimentam externamente ao costado em função da pressão de seu espaço vapor. Sistemas de segurança evitam o excesso de pressão ou vácuo interno e o sistema de selagem diminui as perdas por evaporação entre o costado e o teto.

## 4.1.3 Tanque de Teto Flutuante

Nestes tanques o teto é suportado pela superfície do líquido armazenado. O espaço entre o nível do líquido e o teto é bem reduzido, fazendo com que a formação de vapor seja pequena durante a movimentação de produto. Normalmente são usados para produtos mais voláteis como a gasolina, naftas, solventes entre outros. Como a flutuação do teto ocorre interna ao costado do tanque, existe a necessidade de um sistema de selagem. O teto flutuante pode ser externo ou interno.

Dentre os tipos de teto flutuante podemos ter:

### a) Teto flutuante externo (*External Floating Roof*)

O teto flutuante externo é formado pelo costado cilíndrico aberto no topo com o teto livre para se movimentar conforme a alteração do nível. A perda por evaporação é minimizada pela redução do espaço entre o teto e o nível do líquido e 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 não permitem a total vedação do teto, permitindo pequenos vazamentos. Sistemas de selagem são usados entre o teto e o costado do tanque para minimizar estas perdas evaporativas e são de grande importância no projeto. Aberturas e conexões operacionais que atravessam o teto também geram emissões. (MARTINS, 2004)

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.

A seguir a Figura 4.3 mostra um exemplo de tanques deste tipo com tetos em diferentes posições de acordo com a quantidade armazenada.



Figura 4.3: Tanques de Teto Flutuante Externo

Fonte: Marco 2010 apud SCOLARIK; CESARIO, 2013 p.10.

### **b) Teto flutuante interno (*Internal Floating Roof*)**

Este tipo de tanque possui um teto flutuante interno e um teto fixo acima. 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 (Figura 4.4) pode ser suportado por colunas verticais dentro do tanque. Estes normalmente abrangem tanques de teto fixo que foram transformados para empregar um teto flutuante. Uma desvantagem é que há perda por evaporação nas colunas de suporte que passam pela plataforma.

O teto fixo também pode ser autosuportado, ou seja, sem coluna interna de sustentação. Desta forma não há perda por evaporação, emendas e conexões, combinando as vantagens de ambos os tetos. O mais comum é o teto de alumínio autosuportado em forma de domo.

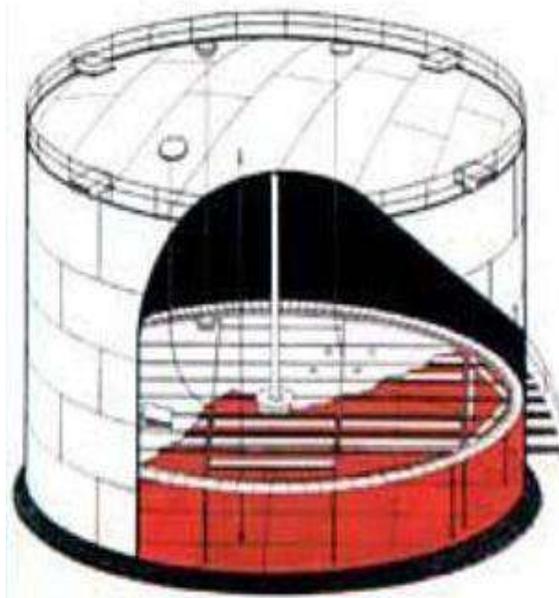


Figura 4.4: Tanque de Teto Fixo Interno

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013 p.11.

## 5. Equipamentos de Proteção

A instalação de equipamentos de proteção em parques de tanques é de fundamental importância uma vez que estes parques apresentam riscos envolvidos no armazenamento, carregamento e descarregamento dos produtos líquidos inflamáveis. Por isso, parques modernos contam com diversos sistemas de proteção para evitar incêndios e explosões, garantindo a integridade da planta assim como a segurança dos trabalhadores e populações vizinhas a instalação.

## 5.1 Diques e Bacias de Contenção

Diques de volume adequados são geralmente construídos em torno de cada tanque, ou conjunto de tanques, limitando uma região que se denomina bacia de contenção.

Os diques são instalados com o objetivo de promover a segurança da instalação de armazenamento. Dentre as principais finalidades estão:

Conter o produto armazenado em caso de rompimento do tanque ou tubulação de interligação, falha de operação ou qualquer outro vazamento ocasional.

Limitar um eventual incêndio a uma pequena área.

As bacias de contenção podem ser construídas por inúmeros materiais, os mais frequentes são concreto e terra.

Diques de terra tem baixo custo, porém, apresentam elevado custo de manutenção devido à erosão. Para evitar a erosão normalmente utiliza-se o plantio de grama, asfaltamento ou outro método adequado. Os diques de concreto apesar de serem mais caros apresentam menores custos de manutenção.

As bacias de contenção devem conter sistema de drenagem próprio, constituído de drenos. Estes devem ser mantidos limpos e desobstruídos, para eliminar os riscos de transbordamento em caso de lançamento de água durante incêndios.

Os tanques de armazenamento devem ser dispostos na bacia de contenção de tal forma que cada tanque tenha pelo menos um lado adjacente a uma via de acesso, facilitando a chegada de equipamento móvel de combate a incêndio.

A ANP incorporou a norma brasileira de Armazenamento de Líquidos Inflamáveis e combustíveis (ABNT NBR-17505) onde se apresentam nos seguintes requisitos em relação aos diques e bacias de contenção:

- Dimensão dos diques (crista e altura);
- Possibilidade de agrupamento de tanques dentro de uma mesma bacia;
- Volume mínimo da bacia de contenção
- Espaçamento entre tanques

-Espaçamento entre tanques e outras instalações limites como: limites das propriedades, rodovias, vias públicas e etc.;

## 5.2 Acessórios e Dispositivos de Segurança

O tipo de dispositivo a ser usado dependerá do tipo de teto do tanque em questão.

### 5.2.1 Respiro aberto (open vent)

São aberturas na cobertura para a ventilação. 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.

A ausência do “vent” ou o bloqueio pode gerar acidentes (Figura 4.5). O colapso do tanque poderia ocorrer por sobrepressão durante o enchimento. De outra forma, a retirada de produto poderia causar pressões negativas, com o vácuo tendo a possibilidade de causar a deformação (SCOLARIK; CESARIO, 2013 p.13).

Esses respiros são geralmente usados quando o produto armazenado tiver ponto de fulgor igual ou superior a 37,8 graus Celsius.



Figura 4.5: Tanque que sofreu colapso por vácuo devido ao vent bloqueado por um filme plástico.

Fonte: LEMMERS 2011 apud SCOLARIK; CESARIO, 2013 p.13.

## 5.2.2 Válvula de pressão e vácuo

As válvulas de pressão e vácuo são usadas, ao invés do “vent”, quando produto armazenado apresenta ponto de fulgor inferior a 37,8 graus Celsius.

Estes dispositivos têm modo de funcionamento conjugado, a pressão e vácuo. 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.

O equipamento é mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6: Funcionamento de uma válvula de pressão e vácuo.

Fonte: QUILK-VENT<sup>®</sup>, 2012 apud SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.14.

## 5.2.3 Quebra Vácuo Automático

Permite a saída do ar ou gás, acumulados sob o teto flutuante, por ocasião do enchimento inicial. O quebra-vácuo fecha automaticamente assim que o teto começa a flutuar. Quando o tanque é esvaziado, o quebra-vácuo abre antes de o teto atingir a posição de repouso e evita, portanto, o desenvolvimento do vácuo sob o teto. A seguir um exemplo deste dispositivo.



Figura 4.7: Válvula Quebra Vácuo.

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.20.

## 5.2.4 Válvulas Corta-Chama

Os respiros abertos podem ser acoplados aos corta chamas (flame arresters). O corta-chamas é constituído geralmente por um conjunto de chapas corrugadas que evita o retrocesso de chama e permite, durante certo tempo especificado pelo fabricante, a operação de esvaziamento do tanque mesmo havendo uma exposição a fogo externamente ao equipamento.

## 5.2.5 Drenos de Teto Flutuante Externo

A drenagem de um teto flutuante externo deve ser feita para evitar o acúmulo de águas pluviais sobre a estrutura. Podem ser do tipo sanfonados de mangueira ou tubulação metálica articulada como indicado na Figura 4.8.

O teto deve possuir também drenos de emergência descarregando a água diretamente para o interior do tanque para o caso de entupimento dos drenos principais. O sistema de drenagem deve ser projetado e construído de forma a evitar a possibilidade de esmagamento ou dobramento pelas pernas de sustentação.

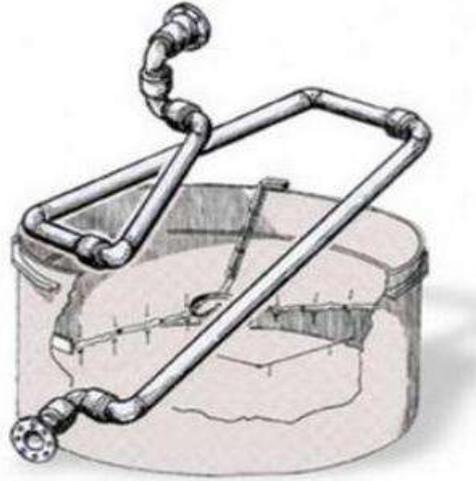


Figura 4.8: Dreno de Tanque

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.20.

## 5.2.6 Selo de Teto Flutuante

O sistema de selagem de um teto flutuante pode ser de dois tipos: metálicos e não metálicos. Os metálicos estão em desuso por apresentarem desgaste, baixa vedação e na existência de vapor, ocasionam risco de incêndios. Os selos não metálicos mais comuns são do tipo: bolsão com espuma, bolsão de ar, bolsão de líquido.

## 5.2.7 Bocais

No costado de tanques de armazenamento encontramos bocais com diversas finalidades.

Entre elas estão os bocais de movimentação de produtos, sistemas de drenagem (dreno de fundo e dreno de teto flutuante), sistemas de aquecimento (entrada de vapor e saída de condensado), sistemas de combate a incêndio (câmara de espuma), misturadores e limpeza com vapor.

## 5.2.8 Bocas de visita

As bocas de visita (figura 4.10) devem ser orientadas na direção dos ventos predominantemente no local e localizadas de forma igualmente espaçadas ao redor do tanque. Isto para facilita o arejamento do equipamento durante as paradas de manutenção.



Figura 4.10: Bocas de Visita

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.18.

## 5.2.9 Câmaras e Aplicadores de Espuma Contra Incêndio

São obrigatórios sistemas de espuma para a proteção de todas as áreas onde seja possível o derrame ou o vazamento de líquidos combustíveis ou inflamáveis. (NBR-15505-7)

A espuma pode ser definida como um sistema formado por água, ar e agente formador de espuma, também denominado LGE (Líquido Gerador de Espuma). (SCOLARIK; CESARIO, 2013) Os LGEs usados podem ser do tipo proteínicos, que apresentam baixa estabilidade no estoque e por isso vem sendo substituídos pelos Fluorproteínicos, mais estáveis e com espuma de melhor qualidade. Existem ainda os LGEs 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 em caso de necessidade. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

Para tanques com teto fixo ou teto fixo com flutuante interno a proteção deve ser por meio de câmaras de espuma (Figura 4.11), instaladas no costado do equipamento. O equipamento denominado proporcionador regula a proporção adequada da mistura ar mais 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. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)



Figura 4.11: Câmara de Espuma

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.18.

Para tanques com teto flutuante externo a proteção é realizada por aplicadores de espuma localizados em chapas de extensão do costado, lançando a espuma na região do sistema de selagem do teto envolvida por anel de contenção de espuma.

## 5.2.10 Sistemas de Inertização

Em certos tanques, como forma de proteger o seu conteúdo contra explosão, degradação ou polimerização devido à presença de oxigênio são usados sistemas de inertização. Nestes sistemas, o gás inerte, normalmente nitrogênio, é injetado impedindo a formação de uma mistura inflamável de vapor de combustível e ar.

Todo combustível tem uma concentração mínima de oxigênio em que pode se inflamar. Desta forma, a concentração de oxigênio considerada segura no interior do equipamento varia de acordo com cada produto estocado. A mínima concentração de oxigênio capaz de promover a ignição de um combustível é chamada de LOC “concentração limite de oxigênio” ou MOC mínima concentração de oxigênio (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

.A tabela 4.1 apresenta alguns valores de LOC para vários combustíveis.

Tabela 4.1: Concentração Mínima de Oxigênio

Gás ou Vapor	N <sub>2</sub> /Ar	CO <sub>2</sub> /Ar	Gás ou vapor	N <sub>2</sub> /Ar	CO <sub>2</sub> /Ar
Metano	12	14,5	Querosene	10 (150°C)	13 (150°C)
Etano	11	13,5	Gás natural	12	14,5
Propano	11,5	14,5	Tricloroetileno	13	-
n-Butano	12	14,5	Acetona	11,5	14
Isobutano	12	15	Monóxido de Carbono	5,5	5,5
n-Pentano	12	14,5	Etanol	10,5	13
Etileno	10	11,5	Hidrogênio	5	5,2
Benzeno	11,4	14	Metanol	10	12

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.16

Este sistema atua a pressões mais altas que a atmosférica para impedir a entrada de ar externo. Atua em conjunto com as válvulas de pressão e vácuo, liberando o nitrogênio e os vapores em situações de pressão positiva acima do desejado. Em caso de vácuo, injetando o nitrogênio para evitar a pressão negativa. (SCOLARIK; CESARIO, 2013)

## 5.2.11 Indicadores de Nível

Equipamento indispensável para a operação do tanque. Normalmente interligados a alarmes de “Nível Muito Alto” para evitar transbordamento do tanque.

## 5.2.12 Misturadores

Agitam o produto de forma a mantê-lo homogêneo evitando a sedimentação de impurezas no fundo. Os principais são do tipo jato e mecânico.

### 5.2.13 Anéis de Contraventamento

De acordo com a Norma-270 todo tanque de topo aberto (exemplo do teto flutuante externo) deve possuir anel de contraventamento (Figura 4.12) que aumentam a resistência do costado, mantendo sua circularidade quando submetido á carga de vento.



Figura 4.12: Escada e Anel de Contravento

Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.16.

### 5.2.14 Aterramento Elétrico

Os tanques de armazenamento devem ser aterrados para escoamento das correntes de descarga atmosférica, bem como para evitar elevações de potencial que possam causar centelhamento para a terra.

Vazões elevadas de produto sendo descarregado no interior do espaço de vapor de um tanque de armazenamento podem causar níveis de descarga eletrostáticas suficientes para servirem de fonte de ignição de vapores inflamáveis presentes no interior do equipamento. Por isso, até que o bocal de enchimento do tanque esteja submerso por uma distância de dois diâmetros de bocais da superfície, a sua velocidade de enchimento não deve ultrapassar 1 m/s.

### 5.2.15 Escotilha de medição

Tanques devem apresentar escotilhas de medição para coleta de amostras. Com a análise dessas amostras é possível saber se o produto está dentro das especificações corretas e pronto para a venda.

### **5.2.16 Sistemas de Aquecimento**

Pode ser realizado por vapor, fluido térmico ou resistência elétrica e são usados para facilitar a movimentação de petróleo bruto, asfaltos, óleos combustíveis, entre outros de elevada viscosidade.

### **5.2.17 Isolamento Térmico a Alta Temperatura**

Tanques com temperatura de operação acima da temperatura ambiente são isolados termicamente através de isolantes flexíveis (lã de vidro, lã de rocha e fibra cerâmica) e isolantes rígidos (silicato de cálcio, espuma e etc).

## 6. Teoria de Incêndio

Incêndios industriais têm grandes impactos para as instalações, funcionários 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 distúrbio gerado durante um incêndio já é fator de relevante prejuízo tanto para a própria empresa quanto para terceiros externos a planta.

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 outras plantas, outras empresas ou mesmo as casas vizinhas. Deste modo, torna-se necessária uma avaliação da radiação térmica emitida em cenários como esses, e a determinação de uma distância considerada aceitável e segura.

Para a prevenção e o combate ao incêndio é muito importante compreender o seu comportamento. Desta forma, diversos autores têm se desdobrado para criar correlações que descrevam suas principais características. Há basicamente três principais tipos de incêndio principais envolvendo líquidos e vapores:

**Incêndio em Jato ou Jet-Fire:** Ocorre em vazamentos de combustíveis líquidos ou vaporizados armazenados sob pressão que durante a liberação formam um jato. Este jato ao sofrer ignição forma o Jet-Fire ou Incêndio em Jato que pode ser visualizado pela Figura 6.1.

**Bola de Fogo ou Fireball:** Este tipo ocorre quando há a formação de uma nuvem de combustível e a posterior ignição formando uma Bola de Fogo. A propagação se dá na forma de esferas crescentes, na direção vertical e com pequena duração. A Figura 6.2 retrata esse fenômeno. Este tipo de incêndio é bastante perigoso devido à alta quantidade de radiação térmica liberada durante as explosões formadas pelas enormes Bolas de Fogo geradas. O fenômeno pode se tornar ainda mais danoso quando oriundo de um BLEVE.

Pool-Fire ou Incêndio em poça: Ocorre quando há o derramamento de combustível líquido sobre uma superfície e a posterior ignição. A queima do combustível ocorre apenas na superfície como pode ser visualizado pela Figura 6.3. Este fenômeno engloba a grande maioria dos incêndios originados por vazamentos de combustíveis líquidos assim como em grandes tanques. (NOGUEIRA, 2007)



Figura 6.1: Jet-Fire ou Jato de Fogo Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.46.



Figura 6.2: Fireball ou Bola de Fogo Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.46.



Figura 6.3: Pool Fire ou Incêndio em Poça Fonte: SCOLARIK; CESARIO, 2013, p.46.

Apresentados os três principais tipos de incêndio, o presente estudo tratará apenas os aspectos relativos ao Incêndio em Poça ou Pool-Fire por acreditar que este apresenta grande relevância em eventos relacionados a parques de tancagem de combustíveis líquidos, como o ocorrido na PETROGOLD.

De acordo com revisões realizadas pelo NIST (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD TECHNOLOGY) muitos modelos matemáticos deduzidos ao longo dos anos por pesquisadores do setor têm apresentado estimativa exagerada para o fluxo de radiação emitido em grandes incêndios em poça. Para grandes incêndios, o NIST alega que os resultados dos modelos matemáticos tendem a serem superiores aqueles medidos em experimentos reais, de campo. O principal motivo é que esses modelos não assumem que parte da radiação emitida é bloqueada pela fumaça liberada durante a queima. Ou seja, a fumaça formaria uma espécie de “escudo”, diminuindo a radiação que efetivamente é emitida pelo fogo e atinge um alvo externo. Vale lembrar que este efeito de escudo não se repete em Jet-fire e Fireball.

Sendo assim, apenas a parte visível da chama, que em geral está mais próxima ao solo, chamada de “banda luminosa”, é responsável pela maior parte da radiação emitida. É essa região que, segundo o NIST, deve efetivamente ser levada em consideração no cálculo da radiação emitida pelo incêndio, e assim na definição da distância segura.

Segundo o NIST, dependendo do tamanho da poça e do combustível empregado, mais de 20% da massa do combustível é convertida em fumaça no processo de combustão parcial. Gera-se assim um escudo negro, que absorve a radiação que está sendo emitida. A figura exhibe esquema simplificado da chama, a fumaça gerada, sua zona luminosa e a efetiva emissão de radiação térmica.

O motivo pelo qual existe formação de elevada quantidade de fumaça escura em incêndios envolvendo poças de grandes dimensões é a dificuldade do oxigênio presente no ar atingir os pontos centrais da poça. Enquanto as laterais apresentam elevada troca de oxigênio com o meio externo, o centro da chama praticamente não entra em contato com o meio. Essa redução na concentração local de oxigênio promove a queima parcial, levando deste modo a formação de fumaça escura. Conforme apresentado, esse fenômeno é típico de grandes incêndios em poça de hidrocarbonetos.

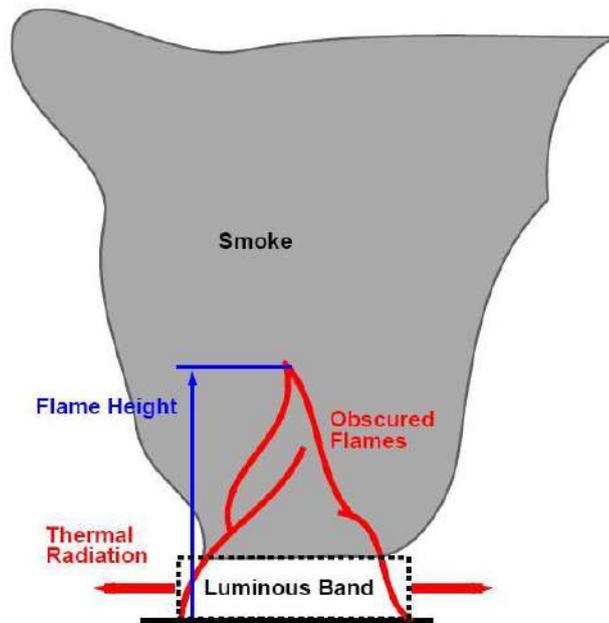


Figura 6.4: Um esquema das diferentes regiões da chama. Fonte: NIST, 2000, p.2



Figura 6.5: Em piscinas grandes, ocorre muita queima parcial. Logo ocorre muita formação fumaça escura. Isso bloqueia a radiação. A exposição à radiação ocorre muito mais nas partes mais próximas ao tanque. Fonte: Aula de Incêndio, CARLOS ANDRÉ, 2013.

## 6.1 Transferência de Calor em Incêndios

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

A condução tem maior importância quando o objetivo é definir a temperatura que corpos em contato podem atingir. A condução térmica entre sólidos, especialmente aqueles considerados “bons condutores” pode ser muito significativa, ajudando ou dificultando na propagação do incêndio.

De forma geral, porém, é a radiação o principal meio de transferência de calor para a propagação de chamas dentro de compartimentos (KARLSSON; QUINTIERE, 2000). Através da radiação, objetos distantes da fonte de incêndio são aquecidos e eventualmente podem sofrer ignição.

## 6.2 Tipos de Modelos

Conforme detalhado, o principal mecanismo para avaliar estragos e ferimentos em incêndios de grande porte é a emissão de calor via radiação térmica. A maioria dos modelos se resume a previsão do fluxo de radiação térmica emitida.

Existem dois modelos que geralmente são usados para determinar a radiação térmica emitida por um incêndio: Modelos de Campo (Field models) e os Modelos Semi-Empíricos (Semi-Empirical Models). (REW, *et al.*, 1997 apud FLEURY, 2010).

Os modelos de campo utilizam ferramentas computacionais para a resolução da equação de Navier-Stokes. Também chamados de CFD (Computational Fluid Dynamics), estes modelos dividem o cálculo em células chamadas de “mesh”, resolvendo a equação de Navier-Stokes em termos de conservação de Entalpia para cada mesh (COX; KUMAR, 2002 apud FLEURY, 2010). A vantagem desse modelo é a capacidade de prever diversos cenários. No entanto, existem desvantagens associadas ao tempo de simulação (custo computacional) e a configuração dos parâmetros de entrada.

Por outro lado, os modelos Semi-Empíricos foram desenvolvidos para serem de rápida resolução, e não incluem algoritmos matemáticos complexos (FLEURY, 2010).

São comparativamente mais fáceis para a compreensão e uso em variadas situações. Sendo assim, são utilizados com mais frequência em avaliação de riscos quando comparados com os modelos de campo (REW, *et al.*, 1997 apud FLEURY, 2010). Estes modelos são desenvolvidos a partir de dados obtidos em uma série de experimentos dos quais foram criadas correlações que apresentam resultados satisfatórios dentro de certos limites para utilização. (REW, *et al.*, 1997 apud FLEURY, 2010).

## 6.3 Variáveis Empregadas

A seguir serão apresentadas as principais variáveis empregadas nos diferentes modelos de radiação.

### 6.3.1 Taxa de Liberação de Calor – Heat Release Rate

É a taxa de energia liberada ( $HRR$  ou  $\dot{Q}$ ), sendo a energia gerada liberada por unidade de área de líquido, no caso de incêndio em poça. Pode ser encontrada através da realização de vários experimentos ou estimada a partir da taxa de queima do combustível.

$$\dot{Q} = m'' \times \Delta H_c \times x_c \times \pi \times \left( \frac{D^2}{4} \right)$$

Eq (6.1)

$m''$  = taxa de queima mássica por área;  $\Delta H_c$  = calor de combustão;

$x_c$  = eficiência da combustão;  $D$  = diâmetro do incêndio;

A taxa de energia liberada é uma ótima informação para uma estimativa do potencial de causar danos de um determinado cenário. Atualmente existem inúmeros valores tabelados na literatura, para diferentes combustíveis. (NIST, 2000).

### 6.3.2 Calor de Combustão

Representado por  $\Delta H_{comb}$ , é a quantidade de energia liberada quando uma unidade de massa de combustível é queimada. Do mesmo modo que  $HRR$ , os calores de combustão de vários combustíveis encontram-se hoje tabelados. Drysdale (2002) apresenta, por exemplo, valores de 46,45  $KJ/Kg$  como o calor de combustão do propano.

### 6.3.3 Fração Radiada

Representada por ( $\chi_r$ ), é a fração da energia total de combustão liberada na forma radiação térmica. É chamada de fração radiada. É dependente de inúmeros fatores, como o combustível, tamanho e configuração da chama, etc. (MARKSTEIN 1976 apud FLEURY, 2011). Valores para o gás propano são relatados por Beyler (2002) entre 0,30 e 0,32.

Conforme explicado no início deste capítulo, de acordo com o NIST (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARD TECHNOLOGY, 2000) em grandes incêndios em poça, parte significativa da radiação é bloqueada pela fumaça gerada. Assim, ainda de acordo com as observações experimentais do NIST (2000), pode se dizer que a fração radiada decresce à medida que o diâmetro de poça aumenta. Esta variação é mostrada pela equação 6.2:

$$\chi_r = \chi_{rmax} \times e^{-\kappa \times D}$$

(Eq 6.2)

Adota-se:

$$\chi_{rmax} = 0,35 \text{ e } \kappa = 0,05m^{-1}$$

A equação e os valores acima foram deduzidos pelo NIST a partir de uma série de experimentos envolvendo incêndios em poça com diferentes diâmetros. Os pontos experimentais obtidos estão apresentados na Figura 6.6.

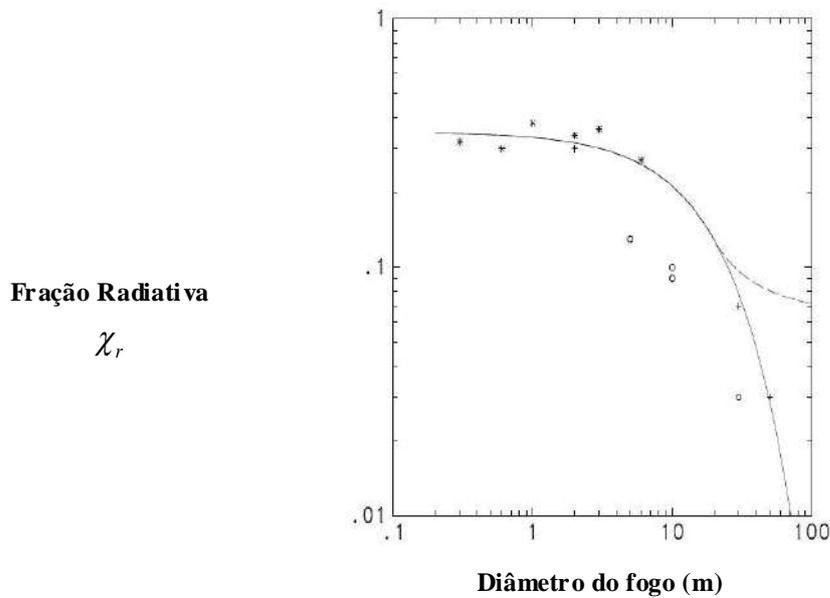


Figura 6.6: Fração Radiativa como função do diâmetro  $D$  para o heptano(\*), óleo cru(+) e querosene(o). A linha sólida é a curva adaptada  $\chi_r = 0,35 \times \exp(-\kappa \times D)$  aonde  $\kappa = 0,05$ .  
Fonte: NIST, 2000, p.5.

### 6.3.4 Poder Emissivo e Emissividade

O poder emissivo total de uma chama ( $E_f$ ) é uma função da temperatura e dos comprimentos das ondas emitidas, como descrito pela Lei de Planck (SIEGEL; HOWELL, 1992 apud FLEURY, 2010). A razão entre a radiação efetivamente emitida por uma superfície e o máximo possível é definida como emissividade ( $\varepsilon$ ). Assim, uma superfície considerada emissora ideal é chamada de “corpo negro” e tem emissividade igual a 1. Superfícies reais têm emissividade menor que 1, podendo ser consideradas “corpos cinza”. Para um corpo cinza, o poder emissivo por unidade de área é dado pela equação 6.3.

$$E = \sigma \times \varepsilon \times T_f^4$$

(Eq 6.3)

$\varepsilon$  = emissividade (igual a um para corpo negro)

$\sigma$  = constante de Boltzmann ( $5,65 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$T_f$  = temperatura da chama (K)

### 6.3.5 Fatores de Configuração

Para saber a taxa de energia radiada que efetivamente atinge um alvo próximo, o “fator de configuração”, ou “fator de forma” ou “de visualização”, deve ser estimado. 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 pela equação abaixo 6.4.

$$q'' = F_{12} \times \sigma \times \varepsilon \times T_f^4$$

(Eq 6.4)

Aonde  $q''$  é o fluxo de calor radiante ( $kW/m^2$ ) e  $F_{12}$  é o fator de configuração. O fator varia entre 0 e 1, onde 1 é quando virtualmente toda a radiação emitida é recebido pelo alvo.

Por motivos de simplificação, é comum que formato da chama seja tratado de maneira aproximado, assumindo como um cilindro ou um retângulo. A partir daí, os fatores de configuração são calculados de acordo com equações previamente deduzidas e tabeladas. Embora esta simplificação, dando a chama um formato padrão e estável, não reproduza a verdadeira geometria observada, é considerada aceitável. O cálculo do fator de configuração para a verdadeira geometria é extremamente complicado, tanto devido ao caráter particular de cada incêndio, quando devido as modificações que sofre ao longo do tempo. Em termos de geometria do alvo, em geral assume-se como sendo pontual (infinitesimal). O objetivo neste caso é avaliar a quantidade de calor que atinge um ponto específico do alvo.

## 6.4 Aproximação Geral para a Modelagem da Radiação Térmica

O objetivo final da aplicação de modelos de emissão de radiação térmica em incêndios é, em geral, a determinação da distância aceitável de segurança, entre a fonte e alvos em potencial. Estes alvos podem ser desde construções, tanques de armazenamento de produto inflamável, outros equipamentos, trabalhadores da planta e

público externo. As distâncias de segurança são calculadas de modo que a radiação térmica não cause danos às pessoas, estruturas e não provoque a autoignição de compostos estocados.

Beyler (2002) descreve os principais passos gerais envolvidos na estimação de radiação térmica nas vizinhanças do incêndio:

- Determinar a taxa de queima e suas características geométricas (dimensões físicas do incêndio).
- Caracterização das propriedades da chama, como o seu poder de emissivo médio.
- Determinar a localização, a geometria e a orientação do alvo, estimando o fator de forma,
- Calcular o fluxo radiante incidente.

Dependendo das limitações de cada modelo, assim como do grau de rigor e nível de detalhamento desejados na análise, o modelo adequado poder ser escolhido. A maioria dos modelos abordados não leva em consideração, por exemplo, a velocidade do vento.

## 6.5 Correlação de Shokri and Beyler

Esta correlação foi desenvolvida a partir de dados experimentais obtidos a partir de uma série de experimentos de incêndio em grandes poças. Algumas hipóteses são adotadas para a utilização deste método (BEYLER, 1999 apud FLEURY, 2010):

- A poça é circular ou quase circular
- O alvo é vertical em relação a poça, e localizado no nível do solo

Neste método bastante simples, calcula-se, a partir da poça, o fluxo de calor radiante como sendo função do raio da poça. O raio é traçado considerando a base da chama. A equação 6.5, deduzida por Shokri and Beyler, apresenta o fluxo radiante para uma poça de diâmetro  $D$  e distancia em relação ao alvo  $L$ :

$$q'' = 15,4 \times \left( \frac{L}{D} \right)^{-1,59}$$

(Eq 6.5)

Para casos em que a poça não é circular, mas sua razão comprimento / largura é próxima de um, pode ser feita uma aproximação por “diâmetro equivalente” (SHOKRI; BEYLER, 1989 apud FLEURY, 2010). O cálculo do diâmetro equivalente é dado pela equação 6.6:

$$D = \sqrt{\frac{4 \times A}{\pi}}$$

(Eq 6.6)

Onde  $A$  é igual à área de superfície da poça em metros.

De acordo com Beyler (1999) existem algumas limitações para este método que são:

- Nos experimentos realizados durante a elaboração da correlação foram empregados combustíveis que originavam chamas luminosas, sendo assim, ao analisar chamas não luminosas podem-se encontrar resultados não satisfatórios.

- Para valores de diâmetro pequenos, menores que 50 metros, a correlação apresenta resultados com erros de 100% em relação ao valor medido experimentalmente. No entanto, para valores grandes de diâmetro, a correlação apresenta resultados satisfatórios.

- Os valores de  $L/D$  recomendados para uso da equação 6.5 devem estar entre 0,7 e 15. Para valores menores que 0,7 o fluxo radiante encontrado pode ser muito menor que o medido.

Beyler recomenda um fator de segurança de dois para ser aplicado na equação 6.5 quando for usada para fins de projeto.

## 6.6 Modelo de Fonte Pontual

O Point Source Model (modelo de fonte pontual) assume que toda liberação de calor do incêndio pode ser aproximada como sendo proveniente de um único ponto, localizado no centro da chama. Uma analogia com “centro de gravidade” de um sólido pode facilitar a compreensão. É o modelo mais simples, de fácil aplicação e que não requer a determinação do diâmetro da poça como pode se visto na figura 6.7.

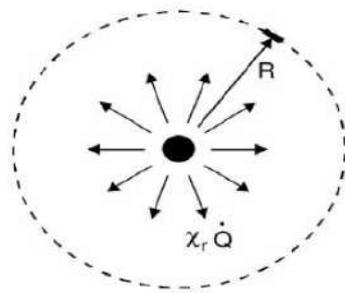


Figura 6.7: Esquema do Modelo de Fonte Pontual Fonte: FLEURY, 2010,p.15.

Assim, o fluxo radiante é inversamente proporcional ao quadrado da distância até o alvo conforme a equação 6.7.

$$q'' = \frac{Q_r \times \cos(\theta)}{4 \times \pi \times R^2}$$

(Eq 6.7)

Nesta equação  $Q_r$  é a energia radiada liberada pelo fogo (KW),  $\theta$  é o ângulo entre a normal para o alvo e a linha de visão a partir do alvo para o local de origem (radianos) e  $R$  é igual a distância da fonte pontual até o alvo. A Figura 6.7 ajuda na compreensão.

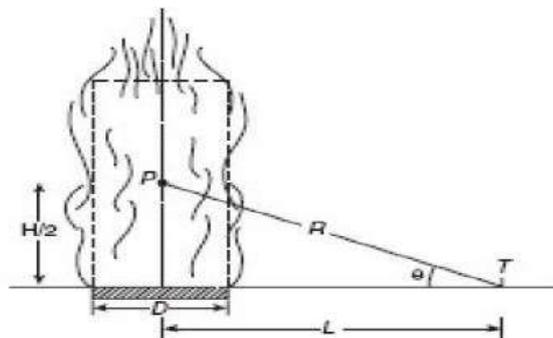


Figura 6.8: Esquema e notação para o Modelo de Fonte de Ponto.

Fonte: FLEURY, 2010, p.11.

Nem toda a energia produzida na combustão é emitida na forma de radiação térmica. O modelo acima considera apenas a chamada “fração radiada”, conforme equação 6.8. Na equação,  $\chi_r$  corresponde a fração (entre 0 e 1) da energia total que é efetivamente liberada na forma de radiação. Valores de  $\chi_r$  para vários compostos estão tabelados na literatura.

$$Q_r = \chi_r \times Q$$

(Eq 6.8)

Conforme exibido na figura 6.8, a fonte pontual localiza-se no “centro” da chama. Para definir sua posição é necessário estimar a altura da chama. Diversos modelos estão atualmente disponíveis para estimar altura de chama em incêndios em poça. Uma das correlações mais usada é a de Heskestead (Equação 6.9), onde  $H$  é a altura da chama em metros, e  $D$  o diâmetro da poça (em metros):

$$H = 0,23 \times Q^{\frac{2}{5}} - 1,02 \times D$$

(Eq 6.9)

O valor de  $R$  ( $m$ ) é calculado a partir da Figura 6.8, por geometria a partir da equação 6.10.

$$R = \sqrt{L^2 + H_T^2}$$

(Eq 6.10)

Para alvos localizados no solo, como ilustrado na figura,  $H_T = H/2$ . Para alvos localizados na mesma altura da fonte pontual, ou seja, a meia altura da chama, adota-se  $H_T$  como sendo igual à zero.

Embora simples, o modelo de fonte pontual apresenta algumas limitações. A principal é que a distância entre o alvo e a chama deve ser grande o suficiente para que a fonte emissora possa ser simplificada como um ponto. É possível compreender tal simplificação imaginando a chama de uma vela. Esta, quando observada bem de perto, apresenta efetivamente dimensões, tais como largura, altura e volume. Porém, se

observarmos a chama da vela a uma distância razoável, está se parecerá com um ponto. A “transformação” de uma chama com dimensões reais para sua forma pontual é assim função tanto da distância entre esta e o alvo como da altura da chama em si.

Segundo Beyler (2002), o modelo não tem bom desempenho para fluxos acima de  $5 \text{ KW/m}^2$  que atingem o alvo, sendo assim, não é aconselhável quando a ignição de combustível é considerada.

Apesar da simplicidade, este modelo oferece resultados satisfatórios sendo frequentemente aplicado na indústria para projetos de flare (queimadores) em plantas por apresentar adequadas previsões da radiação térmica para as vizinhanças. (BEYLER 2002).

## 6.7 Modelo de Chama Sólida

Também chamado de “Solid Flame Radiation Model”, neste modelo a chama é idealizada como sendo um cilindro sólido vertical, que emite radiação térmica uniformemente ao longo de sua superfície. Trata-se também de um modelo simples, embora realista. Assim como tantos outros modelos nesta área, foi desenvolvido a partir de dados experimentais.

A Figura 6.9 apresenta a aplicação desta geometria para alvos verticais e horizontais no nível do solo. Quando o alvo está acima do nível do solo o cilindro deve ser dividido em dois como mostra a figura 6.10. Em tais casos, um cilindro representa a chama abaixo da altura do alvo, enquanto o outro representa a chama acima da altura do alvo.

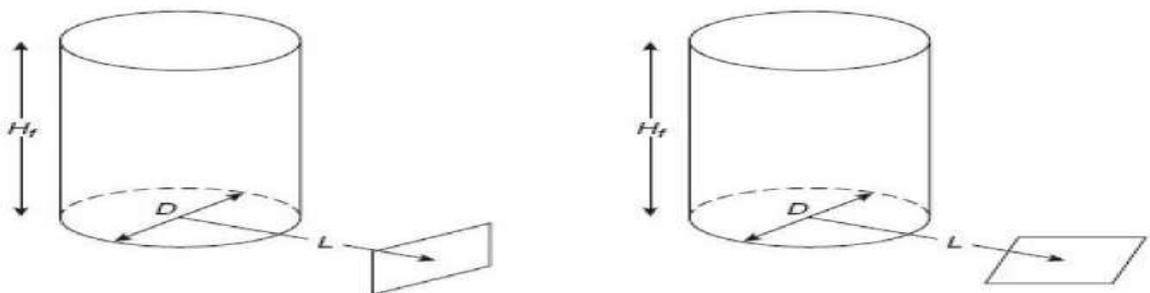


Figura 6.9: Fator de configuração geométrico no formato de chama cilíndrica para alvo vertical e horizontal no nível do solo. Fonte: FLEURY, 2010, p.17.

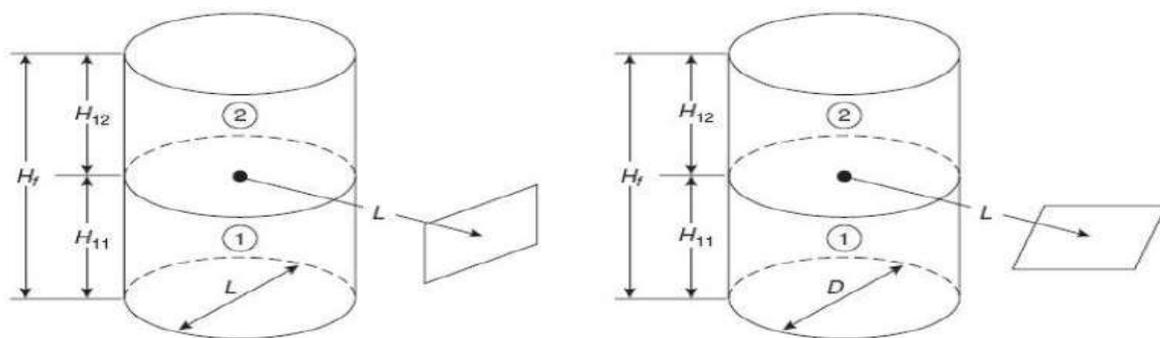


Figura 6.10: Representação para o fator de configuração de dois cilindros para um alvo acima do nível do solo. Fonte: FLEURY, 2010, p.17.

O fluxo incidente no alvo pode ser calculado pela equação :

$$q'' = E \times F_{12}$$

Eq(6.11)

$F_{12}$ : fator de configuração

$E$ : poder emissivo

Conforme apresentado, a altura da chama pode ser estimada a partir da correlação citada anteriormente, enquanto um “diâmetro equivalente” pode ser obtido em casos de peças não circulares.

O modelo de chama sólida sempre adota as geometrias apresentadas nas figuras acima, onde a chama é cilíndrica e o alvo um elemento infinitesimal. Os fatores de forma  $F_{12,H}$  para alvo horizontal,  $F_{12,V}$  para alvo vertical, podem ser calculados pelas equações 6.11 a 6.14.

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

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

(Eq 6.12 e 6.13)

Onde:

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2 \times S}, \quad B = \frac{1 + S^2}{2 \times S}$$

$$S = \frac{2 \times L}{D}, \quad h = \frac{2 \times H}{D}$$

(Eq 6.14, 6.15)

No caso de alvos verticais acima da altura do solo, deve-se empregar a propriedade aditiva do fator de forma. Ou seja, devem ser considerados ambos os cilindros abaixo e acima do alvo, somando os dois fatores de configuração ( $F_{12,V1}$  e  $F_{12,V2}$ ):

$$F_{12} = F_{12,V1} + F_{12,V2}$$

(Eq 6.16)

Para alvos horizontais acima da altura do solo, considera-se que o alvo recebe radiação de apenas um dos dois cilindros. Assume-se que este recebe radiação em apenas uma das faces, superior ou inferior.

O poder emissivo da chama neste modelo é definido como poder emissivo médio em toda a chama, que é considerada como homogênea, não se tratando de um valor medido em um ponto específico. Sabe-se que na realidade, certas partes da chama apresentam poder emissivo maior que a média principalmente em regiões próximas da base. (SHOKRI; BEYLER, 1989 apud FLEURY, 2010) O poder emissivo efetivo é calculado pela equação 6.17 como função do diâmetro do cilindro.

$$E = 58 \times (10^{-0,00823 \times D})$$

(Eq 6.17)

Segundo Shokri and Beyler (1989), algumas imprecisões na aplicação deste modelo estão mais relacionadas ao valor do poder emissivo adotado do que no fator de visualização.

## 6.8 Modelo de Chama Sólida Modificado

Ao analisar o modelo de chama sólida descrito acima, observa-se que a chama é representada como sendo um cilindro com altura igual à altura de chama obtida a partir de modelo adequado. O poder emissivo empregado é o poder emissivo médio da chama, sendo aplicado sobre todo cilindro.

De acordo com o NIST (2000) o valor médio do poder emissivo é menor que o valor local para a zona luminosa da chama que se localiza próxima à base. Sendo assim, este método apresentará valores subestimados de fluxo de radiação térmica a menores distâncias, especialmente para alvos próximos ao solo, onde a influência da chama luminosa é preponderante.

Conforme a distância da fonte aumenta, a radiação proveniente exclusivamente da zona luminosa é menos intensa e os resultados encontrados são melhores. Em diâmetros de poça maiores que 30 metros, o valor médio para poder emissivo da chama usado por pesquisadores é menor que  $31,5 \text{ kW/m}^2$ . Este é exatamente o valor limite de fluxo considerado pelo NIST como suportável em se tratando de alvos como prédios e estruturas de armazenamento de combustíveis.

O gráfico abaixo mostra o poder emissivo e a altura da chama de acordo com as correlações de Shokri and Beyler, Mudan e Croce que usam o valor médio para toda a altura da chama. Ambas apresentam valores abaixo de  $31,5 \text{ kW/m}^2$  para diâmetros maiores que 30 metros.

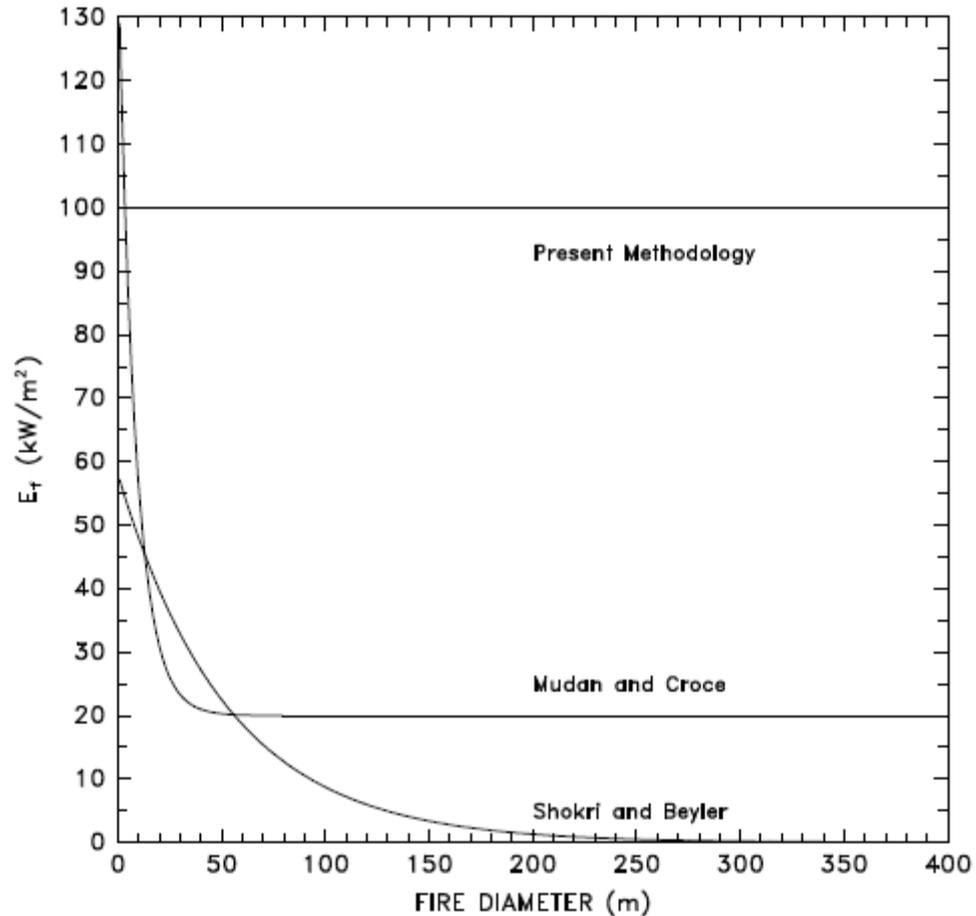


Figura 6.11 Fonte: NIST

Estas correlações podem ser interpretadas de maneira errada, como se prédios pudessem ser construídos próximos de regiões de potencialidade de grandes incêndios simplesmente porque o fluxo não ultrapassaria este valor limite.

Com o objetivo de criar uma correlação que tenha validade para regiões perto e longe da chama e para a avaliação da eficácia das barreiras térmicas, foi criado o Modelo de Chama Sólida Modificado, desenvolvido pelo NIST. Neste método o poder emissivo ( $E_f$ ) será considerado como poder emissivo da zona luminosa da chama (maior que o valor médio) e  $H_f$  será a altura da chama luminosa (menor que a altura total da chama). Como simplificação, um poder emissivo constante de  $100 \text{ KW/m}^2$  é adotado, porque este valor foi observado como sendo poder emissivo das regiões luminosas da chama para incêndios em poças de gasolina e querosene, segundo o NIST. A altura da chama luminosa pode ser calculada de acordo com a equação (6.18).

$$\chi_r \times \dot{Q} = P \times H \times E_f$$

(Eq 6.18)

$\chi_r$  = Fração radiada

$\dot{Q}$  = Taxa de calor liberada

$P$  = Perímetro da poça de formato arbitrário

$H$  = altura da chama

A taxa de calor liberada pode ser expressa em taxa de calor liberada por área pela equação 6.19.

$$\dot{Q}/A = \dot{q}'' \quad , \quad \dot{q}'' \text{ [kW/m}^2\text{]}$$

(Eq 6.19)

Para simplificar a análise, a poça pode ser tratada como circular com perímetro igual ao perímetro do círculo de diâmetro equivalente. Desta forma substituindo as equações 6.20, 6.21 na 6.18, chega-se a equação 6.22.

$$P = \pi \times D$$

(Eq 6.20)

$$\dot{Q} = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \dot{q}''_f$$

(Eq 6.21)

$$H = \frac{\left( \chi_{rmax} \times e^{-\kappa \times D} \times D \times \dot{q}''_f \right)}{4 \times E_f}$$

(Eq 6.22)

$$\chi_{r\max} = 0,35 \text{ e } \kappa = 0,05m^{-1}$$

$\chi_r$  = Fração radiada

$\dot{Q}$  = Taxa de calor liberada

$P$  = Perímetro da poça de formato arbitrário

$H$  = altura da chama

A Figura 6.12 mostra a relação de  $H \times D$ , relacionando a altura da parte luminosa da chama versus o diâmetro de poça. A altura apresenta um máximo para diâmetros de poça de 20 metros. Quanto maior o diâmetro da poça mais difícil a queima completa na sua parte central, graças a reduções na concentração de oxigênio. Assim, para diâmetros de poça muito grandes a altura da parte luminosa começa a se reduzir, conforme gráfico abaixo.

De modo conservador, a NIST assume que para incêndios como diâmetros de poça maiores que 20 metros, a altura da zona luminosa da chama é igual a este valor máximo.

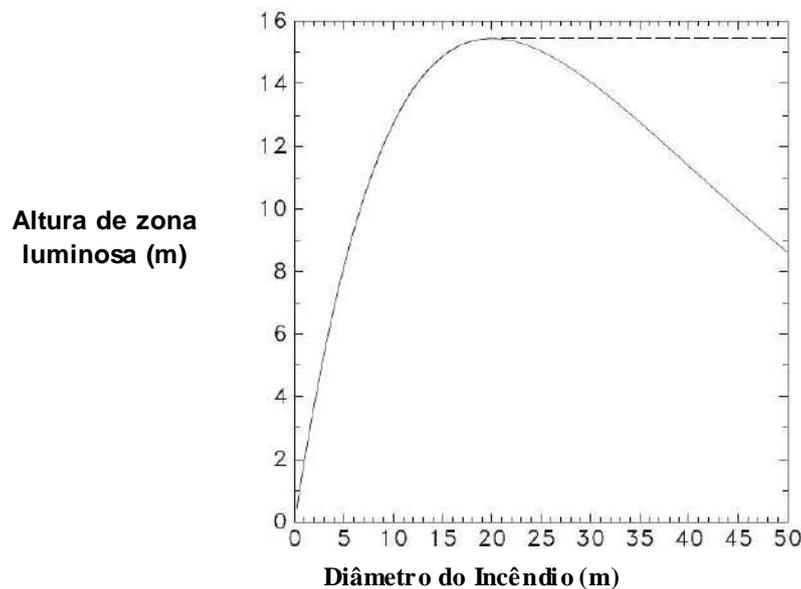


Figura 6.12: Altura de zona luminosa para chama de incêndio de gasolina aonde  $\chi_r = 0,35$ ,  $q''_f = 2400 \text{ kW/m}^2$ ,  $k = 0,05m^{-1}$  e  $E = 100 \text{ kW/m}^2$ . Em geral a altura máxima para chama zona luminosa de uma poça de líquido é dado por  $H_{\max} = 6,4 \times 10^{-3} \times q''$ , onde  $q''$  é a taxa de liberação de calor por unidade de área ( $\text{kW/m}^2$ ). A linha tracejada no gráfico indica a  $H_{\max}$ .  
Fonte: NIST, 2000 p.9.

O valor máximo de  $H$  é determinado substituindo na Eq(6.22) o valor de diâmetro de 20 metros com os seguintes valores para as demais variáveis:

$$\chi_{r\acute{m}ax} = 0,35 \text{ e } \kappa = 0,05m^{-1}, E_f = 100 \text{ kW/m}^2$$

O valor constante de 100 kW/m<sup>2</sup> para o poder emissivo é adotado porque este é citado na literatura como sendo o poder emissivo para a região luminosa da chama para gasolina e querosene. (MUDAN; CROCE, 1995 apud NIST, 2000)

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{\left(0,35 \times e^{-1} \times 20 \times \dot{q}''_f\right)}{4 \times 100} = 6,4 \times 10^{-3} \times \dot{q}''_f$$

(Eq 6.23)

$$H_{m\acute{a}x} \text{ [m] , } \dot{q}''_f \text{ [kW/m}^2\text{]}$$

Para todos os casos, para obter-se uma estimativa da altura da zona de chama luminosa é preciso do valor estimado da taxa de liberação de calor do combustível que pode ser calculada pela taxa mássica de queima de acordo com a equação 6.1.

O produto de  $E_f \times H$  é outro parâmetro de interesse para verificar o comportamento dos modelos diante de diferentes diâmetros de poça. Ao se comparar o valor da metodologia da NIST com as outras mais usadas, como Shokri e Beyler e Mudan e Croce, nota-se que na faixa de 1 até 50 metros, estes valores são relativamente similares. Porém divergem para diâmetros maiores.

Conforme apresentado anteriormente, a NIST considera que  $H$  não cresce a medida que o diâmetro da poça cresce indefinidamente. Valores de diâmetro de poça de 20 metros correspondem a máxima altura ( $H$  máximo). A partir deste ponto, o produto  $E_f \times H$  permanece constante, como mostra a Figura 6.13. No modelo de Mudan e Croce,  $H$  cresce indefinidamente a medida que  $D$  cresce, ignorando a limitação de oxigênio nas partes centrais do incêndio. Segundo a NIST, isso ocasiona valores irrealis, muito superiores àqueles obtidos em experimentos dirigidos pela NIST. A NIST alega que muitas das correlações foram baseadas em experimentos envolvendo poças de pequenas dimensões, e os resultados foram simplesmente extrapolados para diâmetros

maiores. Por outro lado a metodologia proposta pela NIST estaria baseada em experimentos de grande porte.

A presença de barreiras térmicas construídas pelo homem ou naturais podem ser avaliadas realizando-se alterações no cálculo do fator de forma. A fonte de energia, de acordo com este método, está concentrada perto da base da chama ao invés de ser distribuída por toda altura. Por este motivo, a eficácia de barreiras térmicas que bloqueiam a radiação térmica acaba sendo superestimada. Assim, este método apesar de ter sido elaborado para ser conservativo, torna-se arrojado na avaliação de barreiras de proteção.

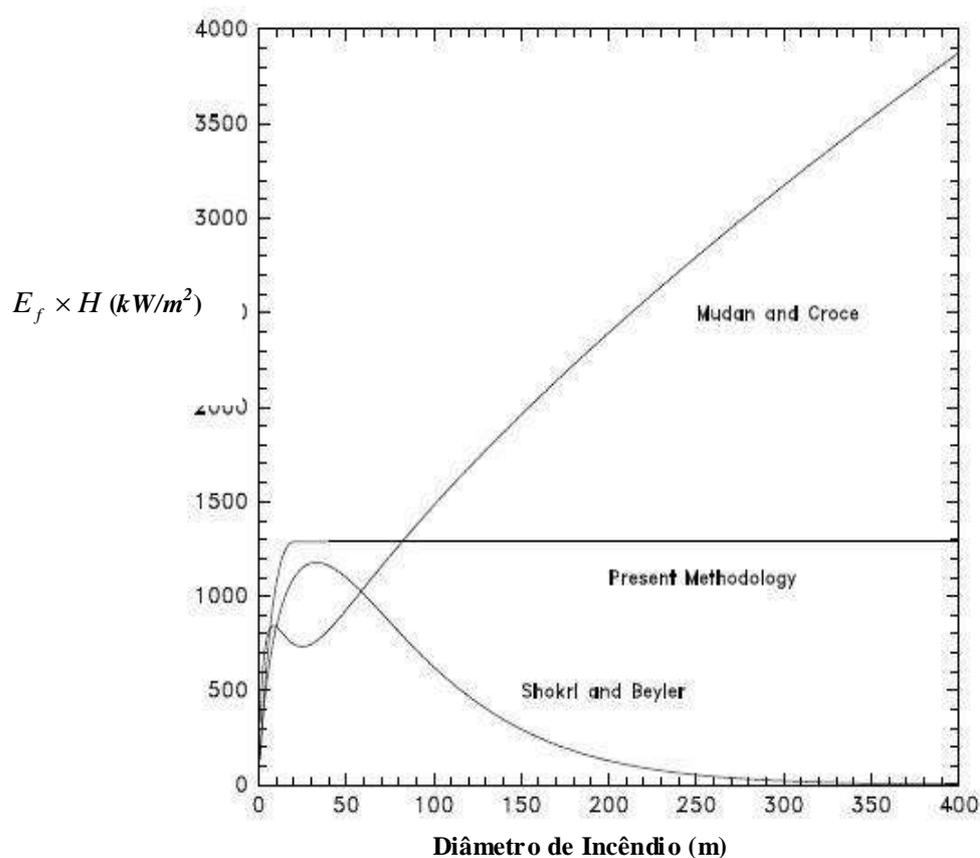


Figura 6.13: Energia de Fluxo Radiativo ( $E_f \times H$ ) como uma função do diâmetro do incêndio para a poça de gasolina. Fonte: NIST, 2000, p.8.

Segundo o NIST, medidas realizadas demonstraram que, para uma chama de petróleo cru originária de uma poça com 20 metros de diâmetro, 85% da energia radiante foi emitida em alturas abaixo de 20 metros. Os 15% restantes foram emitidos

pela fumaça a alturas maiores, e ocasionalmente pelas rajadas de chama (*burst*). Usando unicamente o método proposto pelo NIST, com a Eq(6.23) servindo para o cálculo da altura de chama luminosa, substituindo o valor de *HRR* por unidade de área para o petróleo cru (2.000 *kW/h*) chega-se ao valor de 12,8 metros. Neste contexto, uma barreira de 13 *m* de altura deveria bloquear toda a radiação térmica. O que na prática não ocorre.

Para remediar a situação, o NIST propõe que, para o propósito de avaliar a proteção promovida por barreiras térmica, o poder emissivo da chama deve ser reduzido para metade, ou seja, de 100 *kW/m<sup>2</sup>* para 50 *kW/m<sup>2</sup>*. Como este parâmetro entra no denominador da equação de cálculo da altura luminosa de chama, esta vai dobrar como consequência da menor estimativa do poder emissivo. A maior altura de zona luminosa vai exigir barreiras maiores para prover o mesmo grau de proteção.

A faixa de valores para poderes emissivos entre 50 *kW/m<sup>2</sup>* e 100 *kW/m<sup>2</sup>* não é arbitrária. Muitos pesquisadores fizeram medições poder emissivo de grandes incêndios em poças, resultando em valores no interior deste intervalo. Estas medidas são de difícil obtenção porque na realidade o poder emissivo varia tanto espacialmente quanto temporalmente.

Deste modo, tem-se como regra geral no procedimento indicado pelo NIST a escolha de 100 *KW/m<sup>2</sup>* para cálculos em geral, e 50 *KW/m<sup>2</sup>* para a avaliação da influência gerada pela ação de barreiras. Deste modo, busca-se obter estimativas confiáveis e razoavelmente conservadoras da Distância Aceitável de Separação (ASD), ou seja, a distância segura em termos de radiação térmica.

### **6.8.1 Cálculo da Distância Aceitável de Separação**

Em geral existem dois critérios para o cálculo da distância segura. O primeiro é destinado a evitar danos em estruturas, admitindo como aceitáveis as distâncias com fluxos radiativos menores que 31,5 *KW/m<sup>2</sup>*. O segundo é voltado para proteção a pessoas, sendo aceitáveis as distâncias com fluxos radiativos menores que 1,4 *KW/m<sup>2</sup>*. Esse é o critério recomendado pelo NIST e pela CETESB, no Brasil.

Adotando o procedimento NIST, dentro de certas condições os cálculos da distância segura podem seguir podem simplificados, conforme descrito no próximo item.

### **a) Cálculo simplificado**

O cálculo simplificado para determinação da distância segura é usado em casos nos quais a poça pode ser aproximada como circular, não existem obstruções ou barreiras a serem consideradas e o combustível é líquido a temperatura e pressão atmosféricas.

Em situações que o perímetro da poça não é circular essa aproximação fica prejudicada. Nestes casos, a adoção da metodologia simplificada exige a definição de uma área circular equivalente. Um método para obter isso é através do cálculo de um diâmetro equivalente, através da equação:

$$D = \sqrt{4 \times A / \pi} \quad (\text{Eq 6.24})$$

Outra forma seria a utilização de um cilindro ou paralelepípedo equivalente. Estes devem cobrir completamente a “visão” do alvo em relação ao fogo, conforme exibido na Figuras 6.14.

Se houver mais de um local de destino (alvo) a ser avaliado, o cilindro tem de ser redesenhado para cada local, a menos que o fogo esteja completamente circunscrito ao cilindro original. Se a região real de incêndio é alongada, pode-se desenhar mais de um cilindro para representar toda a área de incêndio, ou ainda a adição de cilindros e paralelepípedos.

Após a determinação do diâmetro da poça, ou medida equivalente, o gráfico da Figura 6.15 pode ser usado para encontrar a distância segura. Destaca-se que a distância segura é definida a partir da borda da poça, e não de seu centro.

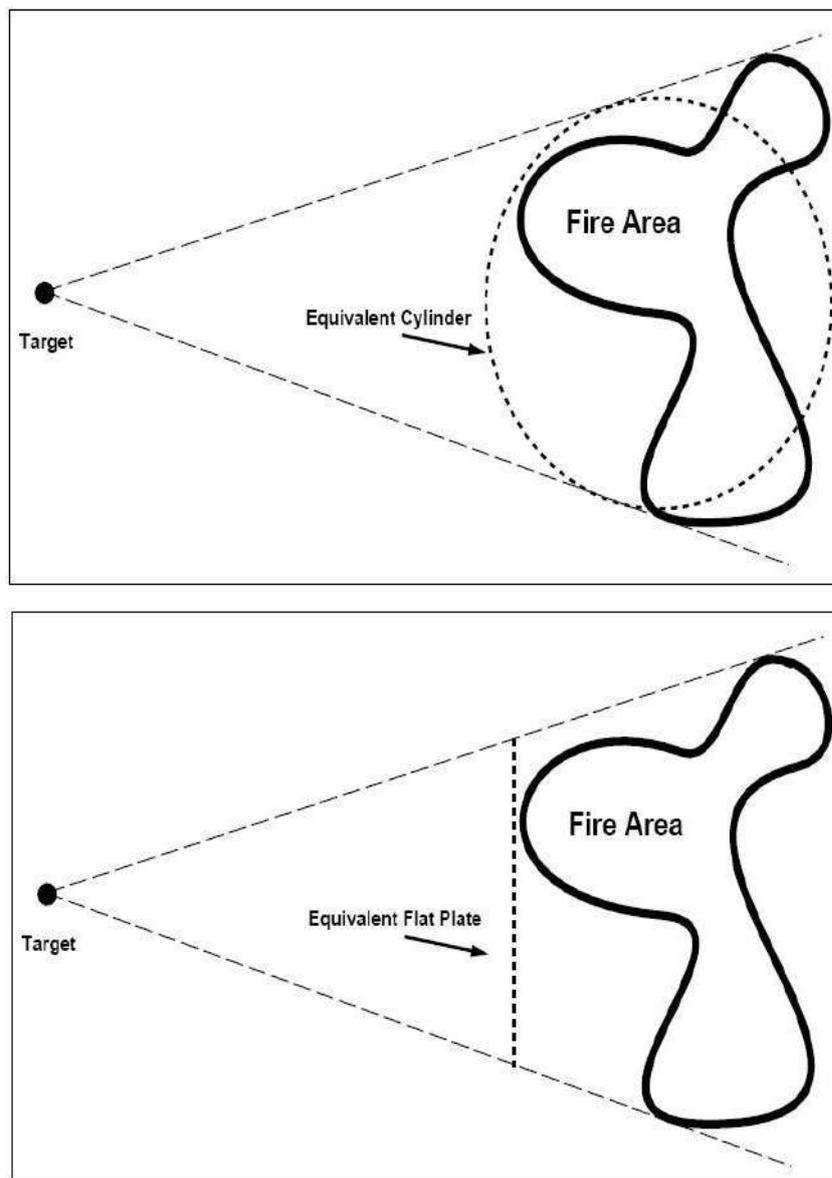


Figura 6.14: Diagrama esquemático mostrando como um cilindro ou um plano vertical pode ser usado para simplificar o cálculo do fator de configuração. Fonte: NIST, 2000, p.16.

O gráfico da Figura 6.15 apresenta diferentes curvas para taxas de liberação de calor por unidade de área de queima. Essa taxa é função do combustível empregado. Valores para alguns combustíveis encontram-se na Tabela 6.1.

A figura apresenta dois conjuntos de curvas. O conjunto inferior, identificado pela palavra “structures” servem para estivar as distâncias seguras para estruturas ( $31,5 \text{ kW/m}^2$ ). Por outro lado, o conjunto de curvas na parte superior do gráfico, identificado pela palavra “people”, aplica-se a determinação da distância segura para pessoas ( $1,4 \text{ kW/m}^2$ ).

Tabela 6.1: Dados de taxa de queima, calor de combustão, taxa de liberação de calor Distância Aceitável Screen para líquidos.

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

Fonte: NIST, 2000, p.14.

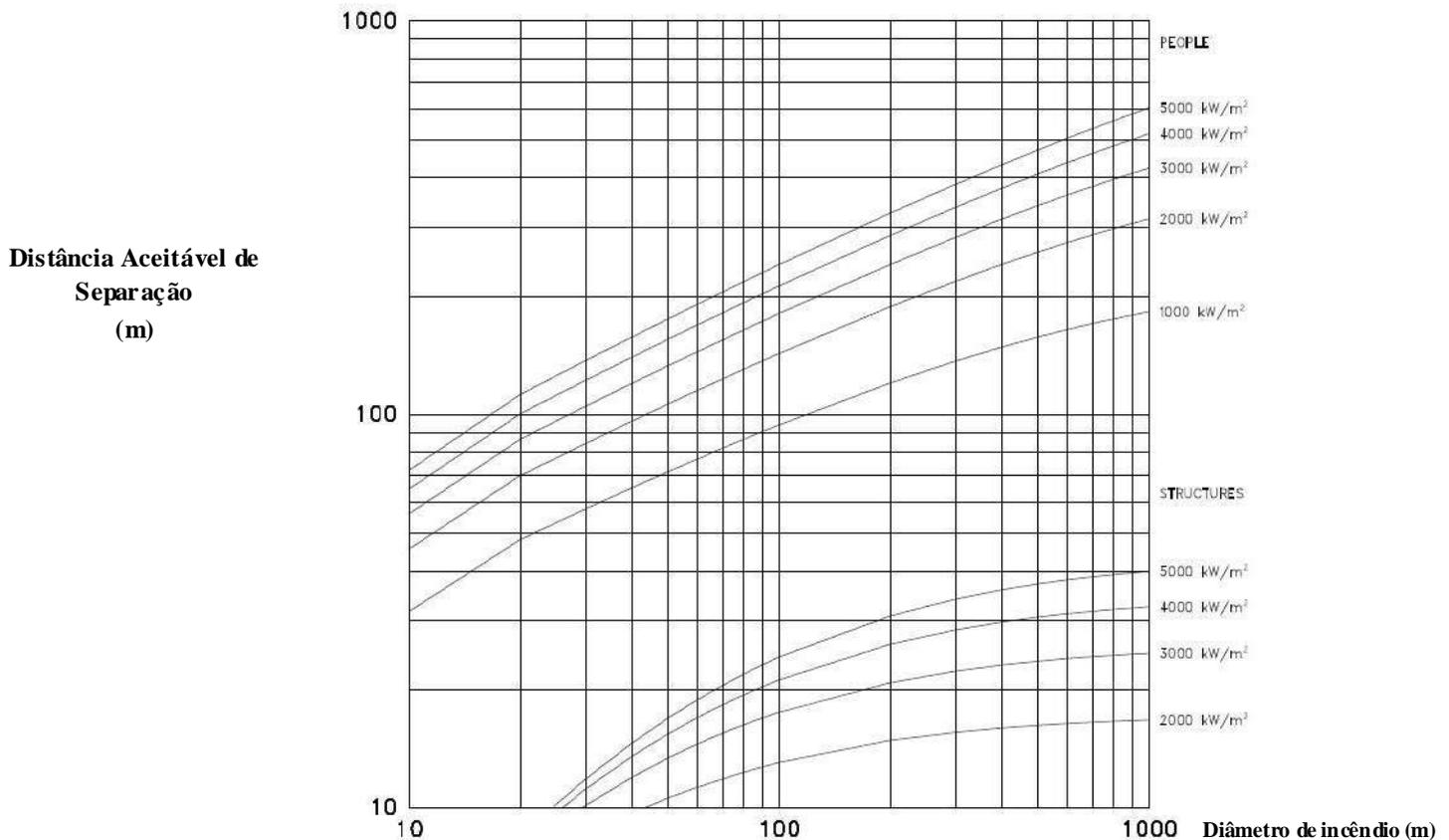


Figura 6.15: Distância Aceitável de Separação (ASD) para incêndios aproximadamente cilíndricos proveniente de derramamento de líquidos perigosos. Os valores associados a cada curva são as taxas de liberação de calor por área de queima  $q''$ (kW/m<sup>2</sup>). Estes valores para vários combustíveis estão listado na Tabela 6.1. Fonte: NIST, 2000, p17.

Uma característica do método da NIST é que cada combustível apresenta uma distância de segurança máxima, na qual a radiação nunca ultrapassará o limite seguro, independente do tamanho da poça de incêndio. Este valor máximo pode ser obtido via gráfico extrapolando-se as curvas para valores elevados de diâmetro de poça. A tabela abaixo apresenta estes valores limites para diferentes combustíveis, na coluna “Screen ASD”.

## **b) Cálculo Detalhado Incêndios em Poças de Líquidos**

Em casos em que a aproximação da poça como circular através do cálculo de diâmetro equivalente não é adequada ou, principalmente, existem barreiras físicas entre o alvo e a fonte de calor, o método de cálculo detalhado deve ser usado.

Neste método o fluxo de radiação térmica deve ser calculado pela equação:

$$q'' = F \times E_f$$

(Eq 6.25)

Onde  $E_f$  (poder emissivo) =  $100 \text{ KW/m}^2$  (valor recomendado pelo NIST)

O fator de forma ( $F$ ) pode ser calculado a partir das equações deduzidas para cilindros ou planos, conforme explicado anteriormente. Para simplificar o procedimento, o NIST assumindo que o perímetro de chama é formado ou por uma placa plana de largura  $W$  e altura  $H$ ; ou por um cilindro de diâmetro  $D$  e altura  $H$ . Ambas as situações são ilustradas na figura abaixo. No caso da chama representada por um cilindro, o alvo localiza-se a uma distância  $S$  da borda do cilindro. No caso da placa plana, o alvo localiza-se a uma distância  $S$  em relação ao centro da placa, porém deslocado por  $S'$ , conforme exibido na Figura 6.16.

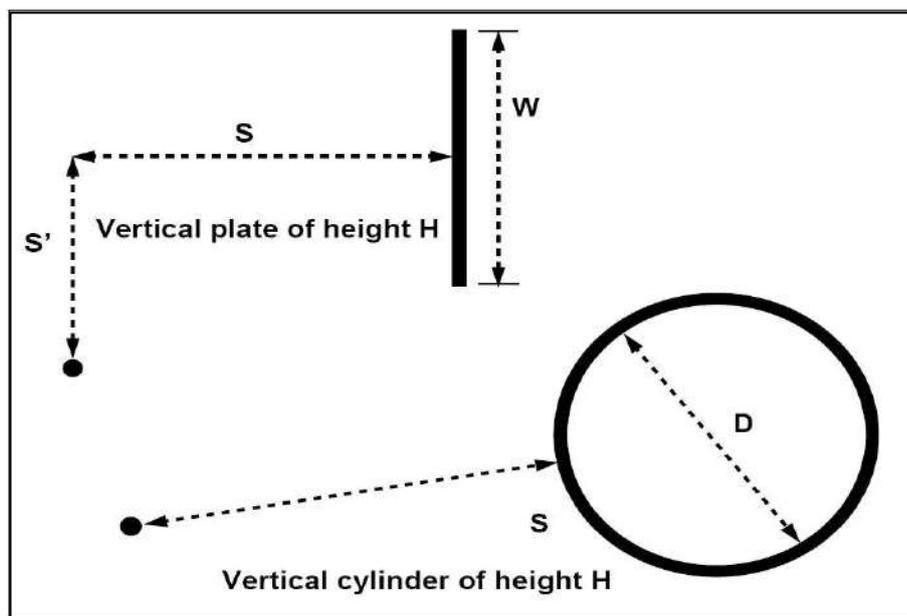


Figura 6.16: Diagrama mostrando como um cilindro ou um plano vertical pode ser usado para simplificar o cálculo do fator de configuração. Fonte: NIST, 2000, p.16.

Assume-se inicialmente  $S'$  como sendo zero em todos os casos. O fator  $F$  é pré-calculado através das razões de  $S/W$  e  $H/W$  para o caso da representação em placa, e  $S/W$  e  $D/W$  para o cenário em cilindro. O valor de  $F$  é obtido na tabela 6.2 ou 6.3.

Tabela 6.2: Fatores de visualização de um cilindro para um elemento recebendo a máxima radiação.  $H$  e  $D$  são a altura e o diâmetro do cilindro respectivamente.  $S$  é a distância da borda do incêndio até o alvo. É assumido que o elemento está na altura do incêndio.

$S/D$	$H/D$																		
	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	0.002	0.003	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.010	0.011
6.0	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	0.006	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	0.002	0.002	0.003	0.004	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	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	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	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	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	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003

Fonte: NIST, 2001, p.20.

Tabela 6.3: Fatores de visualização de um cilindro para um elemento recebendo a máxima radiação.  $H$  e  $D$  são a altura e o diâmetro do cilindro respectivamente.  $S$  é a distância da borda do incêndio até o alvo. É assumido que o elemento está na altura do incêndio.

$S/W$	$H/W$																		
	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	0.050	0.098	0.143	0.185	0.223	0.256	0.286	0.311	0.333	0.352	0.444	0.470	0.480	0.484	0.486	0.488	0.489	0.489	0.489
0.2	0.024	0.049	0.072	0.096	0.118	0.140	0.161	0.181	0.200	0.218	0.343	0.401	0.428	0.442	0.450	0.455	0.457	0.459	0.461
0.3	0.016	0.031	0.047	0.062	0.077	0.092	0.106	0.120	0.134	0.148	0.257	0.325	0.364	0.387	0.401	0.409	0.415	0.418	0.421
0.4	0.011	0.022	0.033	0.044	0.055	0.065	0.076	0.086	0.096	0.107	0.195	0.259	0.302	0.330	0.348	0.360	0.368	0.373	0.377
0.5	0.008	0.016	0.024	0.033	0.041	0.049	0.057	0.065	0.072	0.080	0.151	0.206	0.248	0.277	0.298	0.312	0.322	0.329	0.335
0.6	0.006	0.013	0.019	0.025	0.031	0.038	0.044	0.050	0.056	0.062	0.118	0.166	0.203	0.232	0.253	0.269	0.281	0.289	0.296
0.7	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.039	0.044	0.049	0.095	0.135	0.168	0.195	0.216	0.232	0.244	0.253	0.261
0.8	0.004	0.008	0.012	0.016	0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040	0.077	0.111	0.140	0.164	0.184	0.200	0.212	0.222	0.230
0.9	0.003	0.007	0.010	0.013	0.016	0.020	0.023	0.026	0.029	0.033	0.064	0.093	0.118	0.140	0.158	0.173	0.185	0.195	0.203
1.0	0.003	0.005	0.008	0.011	0.014	0.016	0.019	0.022	0.025	0.027	0.054	0.078	0.100	0.120	0.136	0.151	0.162	0.172	0.180
2.0	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.007	0.008	0.015	0.023	0.030	0.037	0.043	0.050	0.056	0.061	0.066
3.0	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.007	0.010	0.014	0.017	0.020	0.023	0.027	0.030	0.032
4.0	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.004	0.006	0.008	0.010	0.012	0.014	0.015	0.017	0.019
5.0	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.004	0.005	0.006	0.008	0.009	0.010	0.011	0.012
6.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
7.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
8.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	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	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004
10.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003

Fonte: NIST, 2001, p.21.

A correção do fator de forma para situações onde  $S'$  é diferente de zero segue a equação 6.26:

$$F(S, S', H, W) = \left\{ \frac{F((S, 0, H, 2S'+W)) - F((S, 0, H, 2S'-W))}{2} \right\}, \text{ para } 2S' > W$$

ou

$$F(S, S', H, W) = \left\{ \frac{F((S, 0, H, 2S'+W)) - F((S, 0, H, 2S'-W))}{2} \right\}, \text{ para } 2S' < W$$

(Eq 6.26)

Usualmente uma barreira física pode ser construída para atenuar o fluxo de radiação térmica que atinge o alvo. Isto faz com que o valor do fator de configuração calculado para o mesmo cenário, porém sem a barreira, seja reduzido. Em casos mais simples pode ser considerado que uma barreira de altura  $X$  irá atenuar o fator de configuração em  $X/H$ , se a barreira é suficiente para bloquear a visão do alvo em relação à chama tanto na largura quanto a altura. Se a barreira apenas bloqueia a largura da chama, o fator de visualização pode ser calculado apenas considerando a regiões onde a chama luminosa é vista pelo alvo.

Quando o propósito é avaliar as barreiras térmicas, no método proposto pelo NIST o valor de  $E_f$  (poder emissivo) deve passar  $100 \text{ KW/m}^2$  para  $50 \text{ KW/m}^2$  na equação 6.23, gerando a equação 6.27:

$$H_{\text{m}ax} = \frac{\left(0,35 \times e^{-1} \times 9,32 \times \dot{q}''_f\right)}{4 \times 50} = 12,8 \times \dot{q}''_f$$

Eq (6.27)

A energia será conservada uma vez que a altura efetiva da chama irá dobrar. O valor de  $E_f \times H$  permanece o mesmo, portanto, a previsão do fluxo radiativo em distância longas não sofrerá alteração. Os valores de 50 e 100 kW/m<sup>2</sup> são baseados em medidas de poder emissivo realizada por muitos pesquisadores em incêndio em poça de hidrocarboneto. Tais medidas caem nesta faixa. Estes valores são considerados como uma forma de avaliar a distância de segurança a partir de estimativas conservativas.

## 7. Estudo de Caso

Uma vez apresentada a teoria, este capítulo trata de sua aplicação em um caso prático. O estudo de caso escolhido foi o incêndio ocorrido no parque de tancagem da distribuidora Petrogold, no município de Duque de Caxias. Dentre os motivos que levaram a escolha deste acidente foram a atualidade do evento, ocorrido a pouco mais de quatro meses, a proximidade de moradores do local do incêndio e a possibilidade da aplicação do modelo de NIST para Cálculo da Distância de Segurança no cenário acidental.

### 7.1 Descrição da Empresa

A Petrogold Distribuidora de Derivados de Petróleo LTDA iniciou suas atividades em 1999 no estado de São Paulo. Atualmente possui unidades operacionais também no Rio de Janeiro e Goiás. A sede administrativa se encontra na Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro. (PETROGOLD, 2013)

O estudo de caso aqui desenvolvido focou o incêndio ocorrido no Parque de Tanques da empresa Petrogold, localizado no município de Duque de Caxias. Mais

especificamente, a unidade localiza-se na Rua Geraldo Rocha, bairro de Jardim Primavera, às margens da rodovia Rio-Teresópolis ou BR-116 (Figura 7.1).



Figura 7.1: Localização da Distribuidora Fonte: GLOBONOTÍCIAS, 2013.

Como é possível observar, a unidade encontra-se inserida em zona residencial, composta em sua maioria por casas, escolas e pequeno comércio local. Unidades de armazenamento de líquidos inflamáveis sempre apresentam perigo de incêndio, intrínseco ao produto operado. Um acidente em um parque de tancagem envolvendo fogo tem o potencial de causar danos não somente a estrutura da distribuidora, mas também ao entorno. Quando o mesmo encontra-se inserido em uma zona residencial, os danos podem ser ainda maiores. O incêndio afeta a comunidade vizinha, seja em função da fumaça gerada, do combate ao fogo, e, principalmente, pela grande emissão de calor. O risco de explosão, assim como a propagação do incêndio para as casas próximas também deve ser considerado.

Na figura 7.2, é possível observar os seis tanques de armazenamento no centro da imagem. Todo o redor da empresa é ocupado por casas.



Figura 7.2: Localização da Distribuidora Fonte: Google Maps, 2013.

Moradores afirmam que em 1995 no mesmo terreno ocorreu um acidente em menores proporções, época em que outra empresa atuava no local. Vizinhos do depósitos constantemente reclamavam do alto trânsito de caminhões na região, e já haviam até realizado um abaixo-assinado contra a presença das distribuidoras, mas sem êxito (GLOBONEWS, 2013). A figuras 7.3 e 7.4 exibem os caminhões estacionados ao redor da distribuidora. A figura 7.4 mostra ainda um campo de futebol com um parque de crianças ao fundo separado dos tanques por um pequeno muro.



Figura 7.3: Entorno da Distribuidora Fonte: Jornal da Record, 24/05/2013.



Figura 7.4: Entorno da Distribuidora Fonte: Google Maps (Street View), 2013.

Em Julho de 2012 o INEA (Instituto Estadual do Ambiente) auxiliou a Polícia Federal em um inquérito que apurou denúncias de vazamento e armazenamento ilegal de combustível, poluição e contaminação do lençol freático. A Petrogold chegou a ser multada pelo órgão em R\$ 210 milhões. Segundo Minc, no mesmo quarteirão onde fica a distribuidora de combustível, há ao menos três depósitos de armazenamento e distribuição de combustíveis.(UOL, 2013)

## 7.2 O Evento

Pouco antes das onze horas da manhã no dia 23 de Maio de 2013, o Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Rio de Janeiro (CBMERJ) foi acionado para conter um incêndio no depósito de combustíveis acima descrito. Com apoio da Polícia Militar do Estado do Rio de Janeiro (PMERJ), realizaram um perímetro de segurança envolvendo quatro quarteirões no entorno da empresa. Obrigando assim que os moradores da região abandonassem suas residências. Uma escola próxima também foi evacuada. (G1.GLOBO, 2013)

Por volta das 12h20, o incêndio já ultrapassava os domínios da distribuidora, atingindo a rede elétrica da rua e as casas ao redor. Por precaução, o fornecimento de energia de responsabilidade da empresa Ampla foi interrompido na região. Às 13h30, ao menos dois caminhões-tanque já haviam sido consumidos pelas chamas e moradores afirmaram terem ouvido ao menos três explosões em um espaço curto de tempo, assustando a comunidade. (UOL, 2013)

O Coronel Ronaldo Alcântara, Sub-Comandante Geral do Corpo de Bombeiros, afirmou que no início do incêndio a radiação era “insuportável” obrigando a equipe fazer um “recoo estratégico” retirando das proximidades suas viaturas e homens conforme visualizado na figura 7.4. Assim que o calor permitiu os Bombeiros realizaram primeiro um trabalho de resfriamento dos tanques que ainda não estavam em chamas para evitar a propagação do incêndio. Geralmente, este é o trabalho realizado em incêndio de reservatórios de combustíveis, em que o foco não é combatido diretamente, mas realiza-se o resfriamento do perímetro até que todo o líquido inflamável seja consumido. Bombeiros afirmaram que no início do trabalho, existia a desconfiança de que a empresa armazenava combustível em depósitos subterrâneos, tornando a situação ainda mais delicada. (FOLHA DE SÃO PAULO, 2013)



Figura 7.5: Trabalho dos Bombeiros Fonte: O Globo

Apesar do isolamento inicialmente adotado, muitos curiosos permaneceram nas proximidades, acompanhando o trabalho dos Bombeiros – conforme visto na figura 7.6. Moradores afirmaram que mesmo de longe era possível sentir o calor emitido pelas

chamas, que chegaram a 50 metros de altura. A temperatura no depósito ultrapassou os mil graus Celsius e nas ruas ao redor cerca de 600 graus Celsius. (G1.GLOBO, 2013)



Figura 7.6: População acompanhando o trabalho dos bombeiros Fonte: O Globo

O incêndio consumiu não apenas o material presente no interior dos tanques de armazenamento, mas também o combustível localizado no dique de contenção.



Figura 7.7: Incêndio em piscina e incêndio dentro dos tanques Fonte: Globo News.

Pelas figuras 7.8 e 7.9 nota-se que os três tipos de incêndios mais comuns em acidentes industriais (Piscina (Pool Fire), Jato de Fogo (Jet Fire) e Bola de Fogo (Fire Ball)) podem ser observados neste evento.



Figura 7.8: Jet-Fire acima dos tanques Fonte: Globo News



Figura 7.9: Fireball Fonte: Globo News.

Embora o incêndio tenha começado as onze horas da manhã, durante a madrugada cerca de 50 homens de sete quartéis ainda trabalhavam para controlar as chamas. Quinze viaturas da Defesa Civil e dez carros-pipa auxiliavam no combate ao fogo. Cerca de 16 pessoas desalojadas passaram a noite em um abrigo montado por uma igreja próxima, alguns se dirigiram para casas de parentes e amigos, enquanto outros permaneceram no local acompanhando o trabalho dos Bombeiros.

Na manhã do dia seguinte o trabalho ainda continuava e foi possível ouvir uma nova explosão. Segundo o Sub-Comandante Geral do Corpo de Bombeiros, a explosão foi ocasionada pela combustão no tanque de diesel por conta do aumento do calor no local. (O GLOBO, 2013)



Figura 7.10: Trabalho dos Bombeiros Fonte: O Globo

Posteriormente, já com o incêndio controlado, os Bombeiros realizaram o lançamento de espuma, de maneira que um filme da espuma se espalhasse pela superfície do líquido inflamável, impedindo o contato deste com o ar (combate por abafamento).

Finalmente, após 24 horas as chamas foram contidas e deu-se início o trabalho de rescaldo, fase do serviço de combate em que se localizam focos de incêndio ou brasas ocultas, os quais são resfriados. O rescaldo é importante para evitar o surgimento de um novo incêndio.

Dentre os seis tanques do depósito, dois armazenavam álcool, dois gasolina, um diesel e o sexto água, somando dois milhões de litros de líquido inflamável no depósito.

Durante o evento, oito quartéis de bombeiros com cento e vinte homens atuaram no combate. Cerca de treze casas foram destruídas pelo incêndio e cento e catorze foram interditadas. (DUQUEDECAXIAS.NET, 2013) O incêndio teve uma vítima fatal, funcionário da distribuidora, que teve 90% do corpo queimado. As direções de hospitais da região afirmaram que atenderam outros 5 homens e 2 mulheres, somando um total de 8 vítimas que foram liberadas no mesmo dia. (ODIA.IG, 2013)

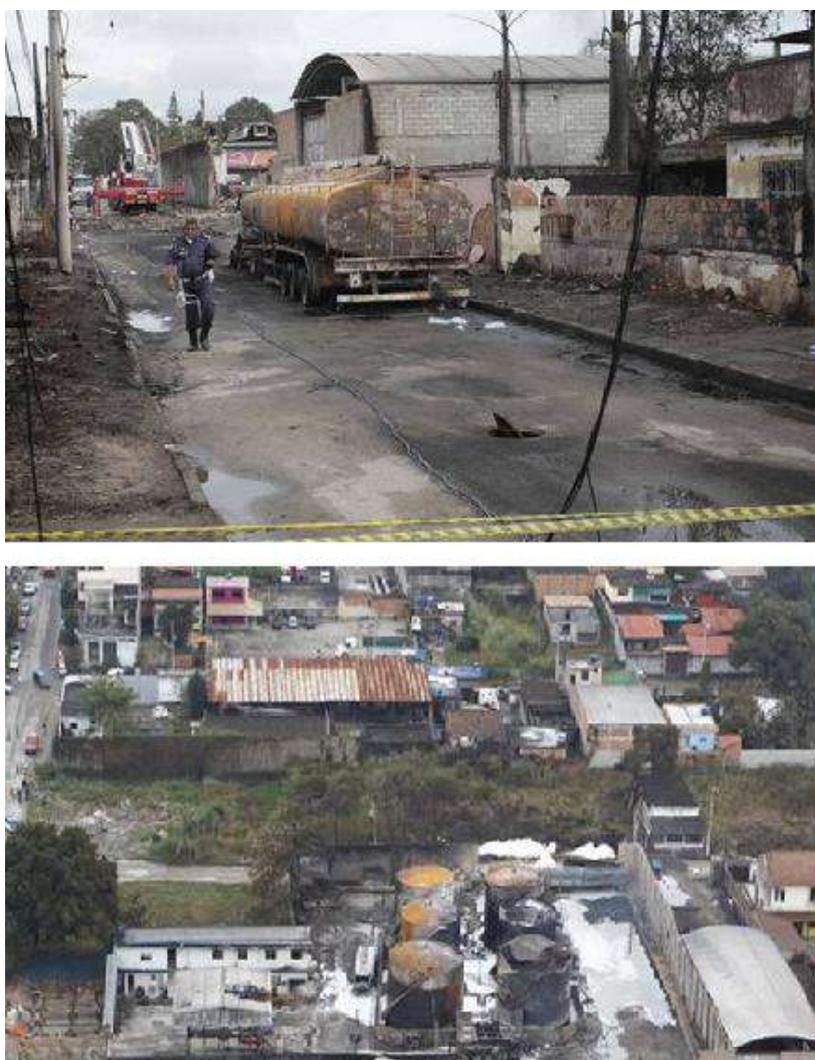


Figura 7.11: Destruição após o incêndio Fonte: O Globo.

Acidentes semelhantes geralmente são oriundos de erros durante as operações de carregamento de caminhões tanque. Incêndios deste tipo são tradicionalmente associados a eletricidade estática, indicando falha do sistema de aterramento e falha no sistema de carga do caminhão (GLOBONEWS, 2013).

Segundo a presidente do Sindicato dos Trabalhadores do Comércio de Minérios Derivados de Petróleo (SITRAMICO-RJ), o incêndio nos tanques pode ter sido causado por falha humana durante a operação de abastecimento do caminhão. As distribuidoras de pequeno e médio porte estariam cortando funcionários qualificados para esta tarefa como os operadores de abastecimento. O serviço acabaria sendo feito por motoristas de caminhões, acumulando funções, e sem seguir as normas de segurança. (ODIA.IG, 2013)

Moacyr Duarte, diante de uma análise preliminar, verificou que a distância do caminhão em relação ao parque de tancagem, pode indicar que o incêndio evoluiu da plataforma, local em que o caminhão realiza as operações de carga, para os tanques. (GLOBONEWS, 2013)

Ainda segundo Moacyr Duarte, pela quantidade de combustível estocada, o depósito deveria contar com um sistema de água pressurizada e de aplicação de espuma. O local deveria ter também uma brigada treinada para realizar o combate ao incêndio e prestar socorro aos funcionários. Para Moacyr, o cenário de perda total da tancagem indica que o combate e os equipamentos disponíveis não foram eficientes para tal (GLOBONEWS, 2013).

Outro aspecto a ser notado é que empresa está localizada fora do pólo central Industrial de Campos Elíseos em Duque de Caxias, onde se localiza a REDUC, e as principais distribuidoras. Nesta região existe um Plano de Auxílio Mútuo (PAM) e no caso de um acidente como este, todas as empresas ao redor atuariam em conjunto combatendo o incêndio e auxiliando na evacuação da população.

## 7.3 Modelagem de Incêndio

Conforme apresentado, o incêndio real envolveu os três tipos mais comuns de fenômenos: Jet-fire, Fireball e Pool Fire. Na literatura é possível encontrar modelos que avaliam matematicamente cada um destes comportamentos.

Este estudo limita-se a avaliar o incêndio em poça. Desta forma, para uma análise completa dos riscos para a população externa, necessariamente os outros fenômenos também deveriam ser considerados nos cálculos de radiação emitida.

É importante ressaltar ainda que cenários reais de incêndio em piscina caracterizam-se pela formação de várias chamas simultâneas, formando um “aglomerado de chamas” com alturas e diâmetros variantes e diferentes (SCOLARIK; CESARIO, 2013). O método NIST, porém, adotado a formação de uma única e grande chama, empregando o modelo de “chama sólida”.

### 7.3.1 Cenários

O objetivo da modelagem do incêndio em poça deste trabalho é, a partir de algumas hipóteses iniciais, analisar 4 cenários possíveis através do cálculo de diferentes distâncias de segurança para pessoas e estruturas. Foi avaliado ainda o efeito das barreiras (muros) na atenuação da radiação, e conseqüentemente, na diminuição da distância de segurança. Para isto foi utilizado o método proposto pelo NIST, conforme descrito anteriormente.

#### **a) Cenário 1: Todos os tanques e dique apresentam-se em chamas, não há sem barreiras**

Esta hipótese é o pior cenário para o incêndio em piscina no ponto de vista das conseqüências para a comunidade no entorno da distribuidora, uma vez que se considera que o fogo está presente na área que engloba todo o dique de contenção e nos tanques. Neste cenário, considera-se que o dique não possui subdivisões para cada tanque, permitindo que a poça se espalhe por todo o parque de tancagem. Como uma forma de avaliar posteriormente a influência da barreira (muro) ao redor dos tanques, esta hipótese não considera a existência do muro.

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 piscina (pool fire).

### **b) Cenário 2: Todos os tanques e dique apresentam-se em chamas, existe presença de muro ao redor do complexo**

Este cenário apresenta todas as características do primeiro, com exceção da barreira (muro), que passou a ser considerado. Este cenário a princípio aproxima mais do evento ocorrido na empresa aqui analisada, devido a presença do muro ao redor das instalações.

### **c) Cenário 3: Incêndio em piscina em um único tanque, sem barreiras**

Nesta hipótese, considera-se que somente material armazenado dentro de um tanque está em chamas, criando incêndio em piscina. Não há barreira 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. Dispositivos de segurança, como corta-chamas, quando corretamente especificados e instalados, muitas vezes conseguem evitar a propagação do incêndio entre tanques.

### **d) Cenário 4: Incêndio em piscina um único tanque com barreiras**

Tem as características do terceiro cenário, porém, considerando o muro ao redor do tanque.

### 7.3.4 Cálculos

De acordo com a figura 7.10, uma imagem obtida durante o combate ao incêndio, nota-se que os tanques são rodeados por um dique de contenção que é delimitado por uma barreira (muro). Visualmente é possível notar que dos 6 tanques, 4 apresentam diâmetros menores e 2 diâmetros maiores. Uma hipótese simplificadora é que o dique, assim como o muro, apresenta formato retangular. A figura 7.12 ilustra estas considerações.

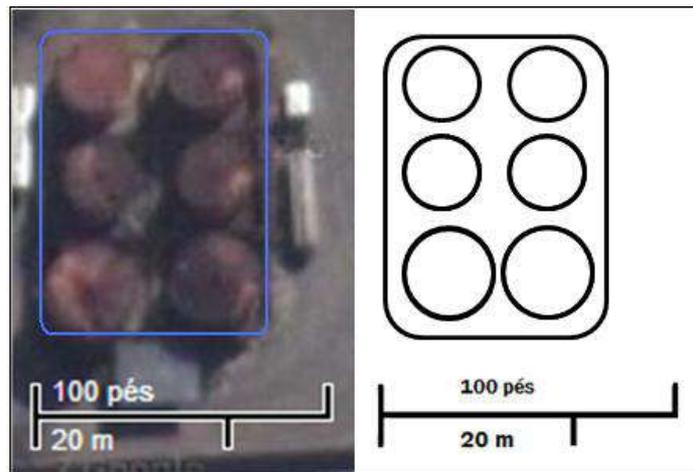


Figura 7.12: Vista aérea de cima dos tanques Fonte: Adaptada de Google Maps

Para a avaliação da barreira térmica, não estão disponíveis dados sobre a altura do muro. A mesma foi estimada a partir das imagens do local, em comparação com a altura da carroceria do caminhão (obtida por meio de um catálogo do fabricante). Como visualizado na figura 7.13, o muro tem aproximadamente a altura correspondente ao que seria a metade do para-brisa da cabine do caminhão. Com os valores do catálogo indicando uma altura da carroceria de 3,2m, chegou-se ao valor de 2,5 metros.

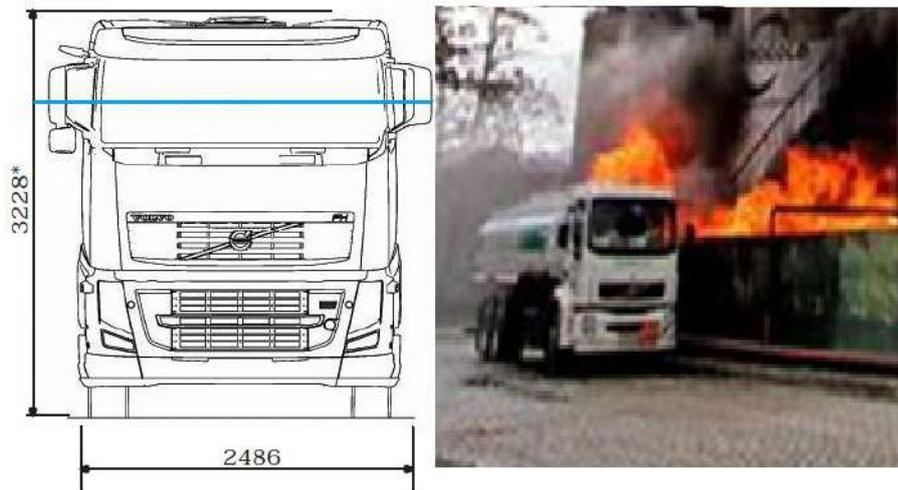


Figura 7.13: Cabine do caminhão (Visão Frontal) comparada com caminhão no incêndio.  
 Fonte: Catálogo VOLVO e Imagem O Globo

A modelagem aqui desenvolvida considerou o modelo de chama cilíndrica, adotando o círculo como a base da chama, conforme proposto na metodologia NIST já apresentada.

Utilizando a escala da figura 7.12, o dique tem dimensões aproximadas de 31,25 metros de comprimento por 23,125 metros de largura. Como a razão entre as dimensões é menor que 2,5, o método NIST permite a utilização da equação 6.24 para o cálculo do diâmetro equivalente na consideração de chama cilíndrica.

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

onde:

$$A = \text{área} = 31,25\text{m} \times 23,125\text{m} = 722,65625 \text{ m}^2$$

$$D = \text{diâmetro equivalente} = 30,34 \text{ m}$$

Para os cenários de incêndio no tanque, o diâmetro de poça é o próprio diâmetro do tanque, que foi estimado em 9,32 metros por meio da escala da foto aérea. As figuras 7.14 e 7.15 ilustram a área do incêndio e o diâmetro equivalente de poça para os cenários.

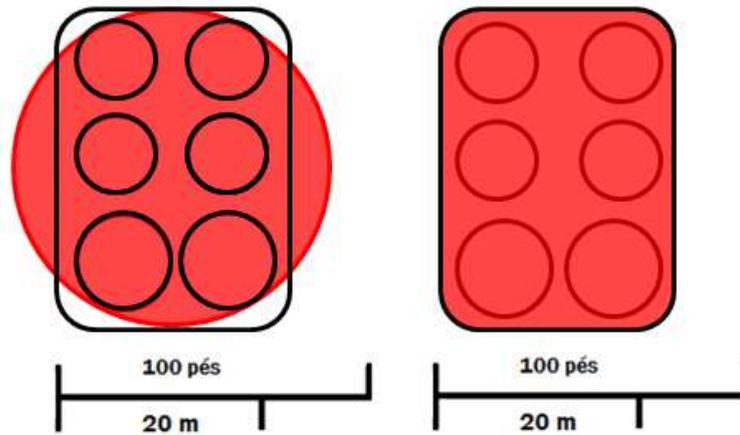


Figura 7.14: Traçado do Diâmetro Equivalente para Incêndio em todo o dique (Cenários 1 e 2)

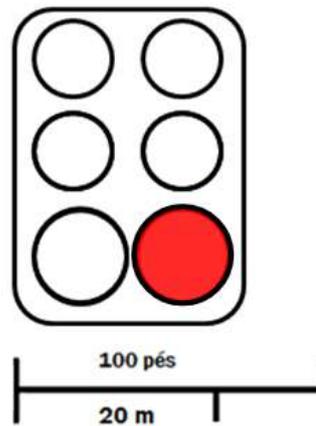


Figura 7.15: Traçado do Diâmetro Equivalente para Incêndio em um tanque (Cenários 3 e 4)

Para calcular a altura efetiva da chama foram utilizadas as equações 6.22 e 6.23. A equação 6.22 destina-se a diâmetros de poça menores que 20 metros, por isso foi utilizada nos cenários 3 e 4 (Incêndio em um único tanque, sem barreira) enquanto a 6.23 aplica-se para diâmetros maiores que 20 metros sendo então usada nos cenários 1 e 2 (Incêndio no dique, sem barreira).

Segundo a NIST, para uma poça igual ou maior que 20 metros, a altura da chama é considerada como máxima, não dependendo mais do diâmetro.

O valor para taxa de liberação de calor foi de  $2.400 \text{ kW/m}^2$ , considerando o combustível armazenado como gasolina, retirado da tabela 6.1. A escolha da gasolina

foi baseada na tabela 2.3 em que a Petrogold apresenta uma porcentagem da distribuição nacional, não apresentando representatividade para outros combustíveis.

$$H = \frac{\left( \chi_{r\max} \times e^{-\kappa \times D} \times D \times \dot{q}''_f \right)}{4 \times E_f}$$

Eq (6.22)

$$H = \frac{\left( \chi_{r\max} \times e^{-\kappa \times D} \times D \times \dot{q}''_f \right)}{4 \times E_f} = 6,4 \times 10^{-3} \times \dot{q}''_f$$

Onde:

H = altura efetiva;(m);

Xr = fator de ajustes, sendo seu valor máximo de 0,35;

k = constante (0,05 m-1);

D = diâmetro de poça (m);

qf'' = taxa de emissão de calor por unidade de área (kW/m²) ;

Ef = poder emissivo total do fogo na sua superfície (kW/m²).

$$H_{\max} = \frac{\left( 0,35 \times e^{-1} \times 9,32 \times \dot{q}''_f \right)}{4 \times 100} = 12,28m \text{ (Cenário 1)}$$

$$H_{\max} = \frac{\left( 0,35 \times e^{-1} \times 20 \times \dot{q}''_f \right)}{4 \times 100} = 15,36m \text{ (Cenário 3)}$$

Para a avaliação das barreiras as equações 6.23 e 6.27 também foram usadas, porém, com o valor de E = 50kW/m². Da altura efetiva calculada diminuiu-se a altura do muro (2,5 m), obtendo a altura da chama efetiva para o caso de barreiras. Na altura efetiva calculada deve-se subtrair a altura da barreira térmica, que neste caso foi estimada em 2,5 metros.

$$H_{\text{m}ax} = \frac{\left(0,35 \times e^{-1} \times 9,32 \times \dot{q}''_f\right)}{4 \times 50} = 28,32m \text{ (Cenários 2)}$$

Eq (6.23)

$$H_{\text{m}ax} = \frac{\left(0,35 \times e^{-1} \times 20 \times \dot{q}''_f\right)}{4 \times 50} = 22,06m \text{ (Cenários 4)}$$

Eq (6.27)

Os resultados para a altura efetiva dos cenários seguem-se a seguir na tabela 7.3

Tabela 7.3. Altura efetiva para os cenários

Altura Efetiva (m)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
	15,36	28,32	12,28	22,06

O procedimento para o cálculo das distâncias seguras para os diversos cenários é descrito a seguir.

Para pessoas o fluxo de radiação térmica máximo suportado é de 1,4 kW/m<sup>2</sup>. Assim, de acordo com a equação 6.24, o fator de configuração deve ser tal para que o fluxo máximo seja 1,4 kW/m<sup>2</sup> para pessoas, ou seja, F deve ser no máximo 0,014.

$$q'' = F \times E_f \text{ (Eq 6.24)}$$

$$q'' = 1,4 \text{ kW/m}^2$$

$$E_f = 100 \text{ kW/m}^2$$

O mesmo procedimento é adotado para o fluxo de radiação térmica em estruturas, resultando em um valor de F máximo de 0,315.

No caso da avaliação das barreiras, o método proposto pelo NIST prevê apenas a atenuação da radiação em relação as pessoas, não estendendo para o cálculo para as

estruturas. Adotando o método descrito acima, porém, considerando agora  $E = 50 \text{ kW/m}^2$ , chega-se ao valor de  $F$  máximo de 0,028.

O método de cálculo para as distâncias seguras foi baseado no valor máximo de  $F$  que gera o valor máximo de fluxo suportado pelo receptor. Desta forma, utilizando-se a tabela 6.2 e com os valores de  $H$  e  $D$  já calculados, pode-se achar os valor de  $S/D$  para  $F = 0,014$  (pessoas sem barreiras),  $F = 0,315$  (estruturas sem barreiras) e  $F = 0,028$  (pessoas com barreiras).

O gráfico da Figura 7.16 foi traçado a partir da tabela 6.2, como uma maneira de facilitar os cálculos. Desta forma, para cada valor de  $H/D$  (eixo X), existe uma curva de  $S/D$  e um fator de forma ( $F$ ) correspondente que pode ser lido no eixo Y. A tabela 6.2 apresenta uma limitação em relação aos cenários 3 e 4 aqui estudados pois valores de  $H/D$  maiores que 1 não são encontrados nesta tabela. Como alternativa, para valores maiores de  $H/D$  optou-se por uma extrapolação a partir dos cinco últimos valores. Estas extrapolações seguem-se nas Figuras 7.17, 7.18 e 7.19.

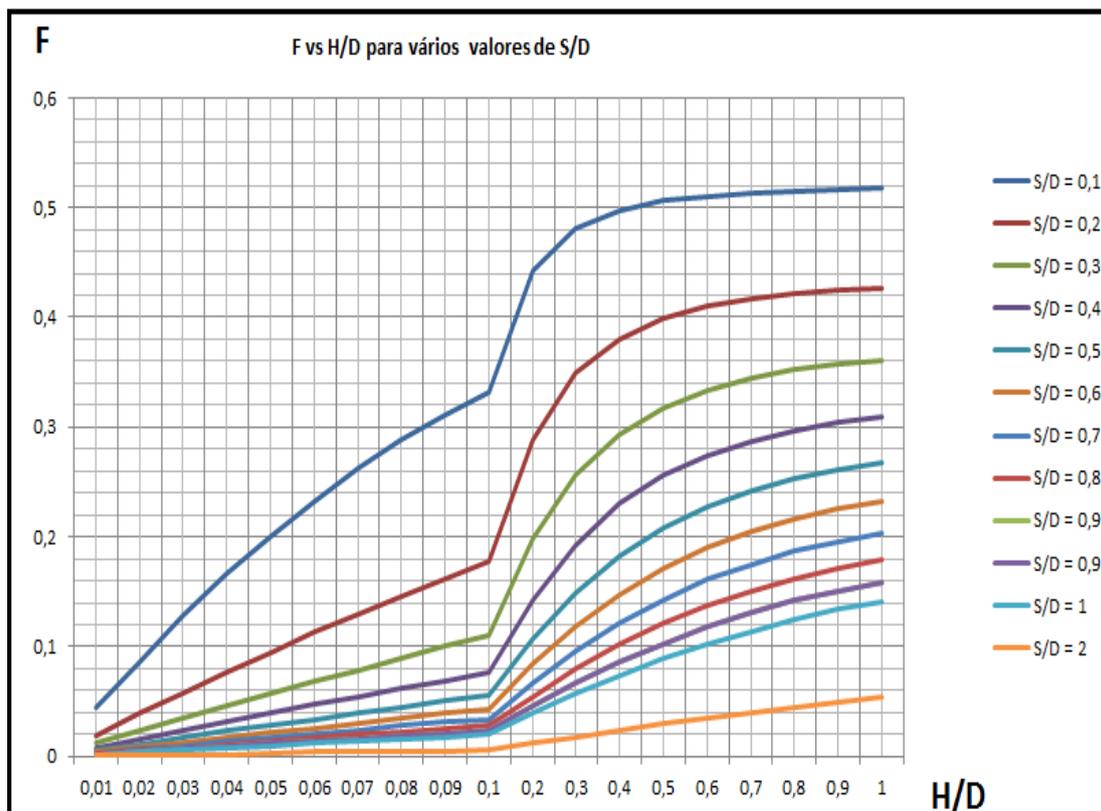


Figura 7.16: F versus H/D

Para a extrapolação, uma equação logarítmica foi a que melhor se ajustou aos pontos.

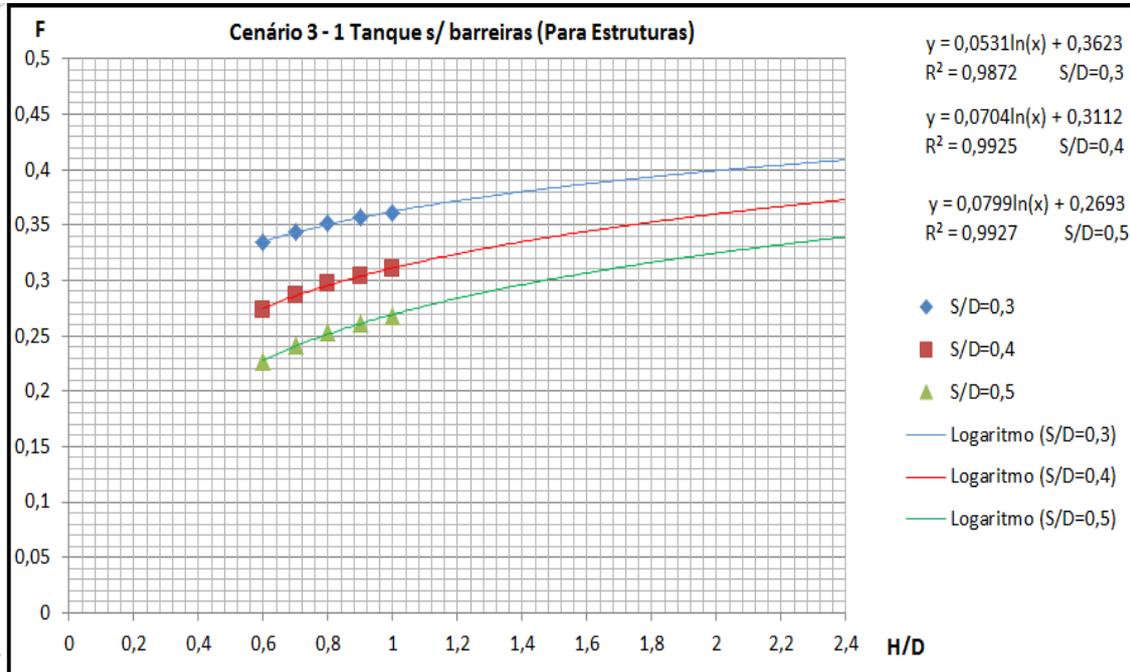


Figura 7.17: F versus H/D

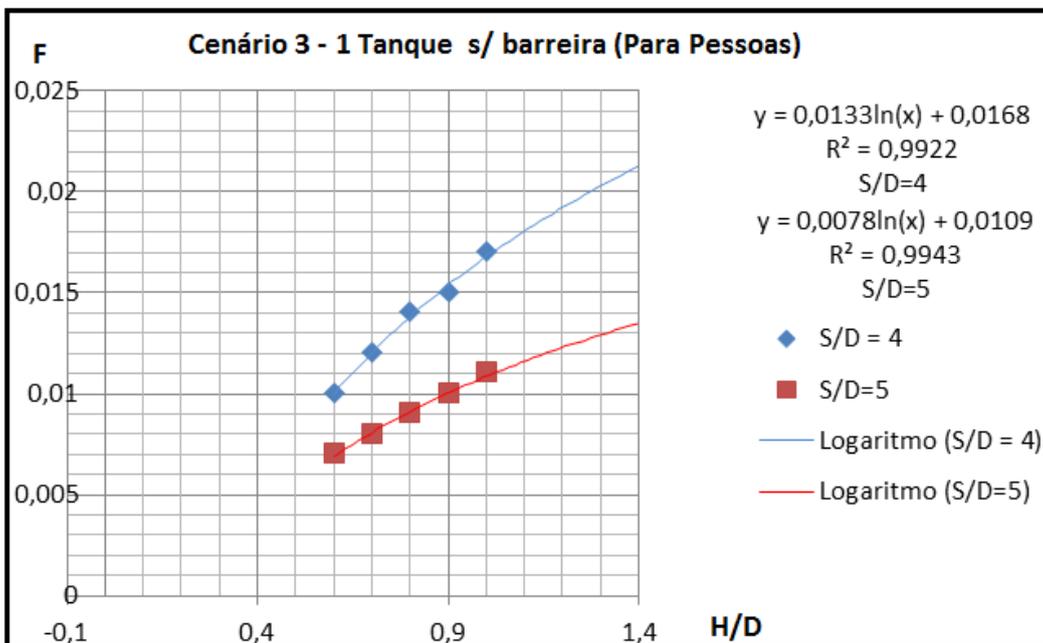


Figura 7.18: F versus H/D

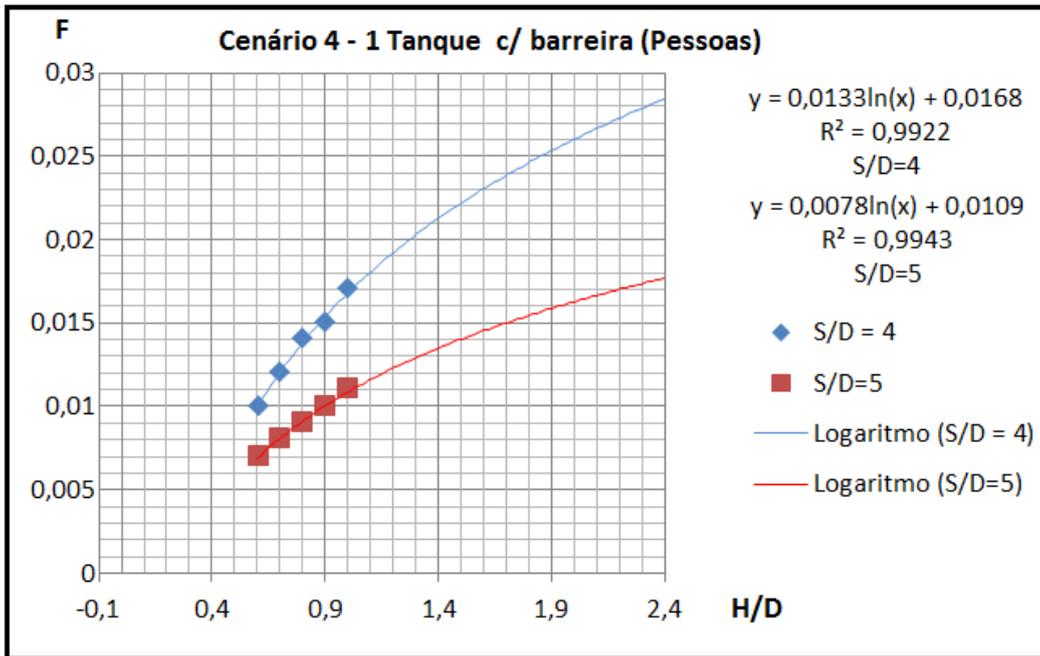


Figura 7.19: F versus H/D

Os valores encontrados no procedimento estão descritos na tabela 7.3.

Tabela 7.4. Valores de H/D, F, S/D

	Cenário 1		Cenário 2	Cenário 3		Cenário 4
	Estruturas	Pessoas	Pessoas	Estruturas	Pessoas	Pessoas
H/D	0,51	0,51	0,93	1,32	1,32	2,37
F	0,32	0,01	0,03	0,32	0,01	0,03
S/D	3,17	0,32	3,00	0,44	4,83	4,02

Sendo S a distância da borda da poça até o alvo, os valores de distância segura encontrados foram:

Tabela 7.5. Distância de Segurança

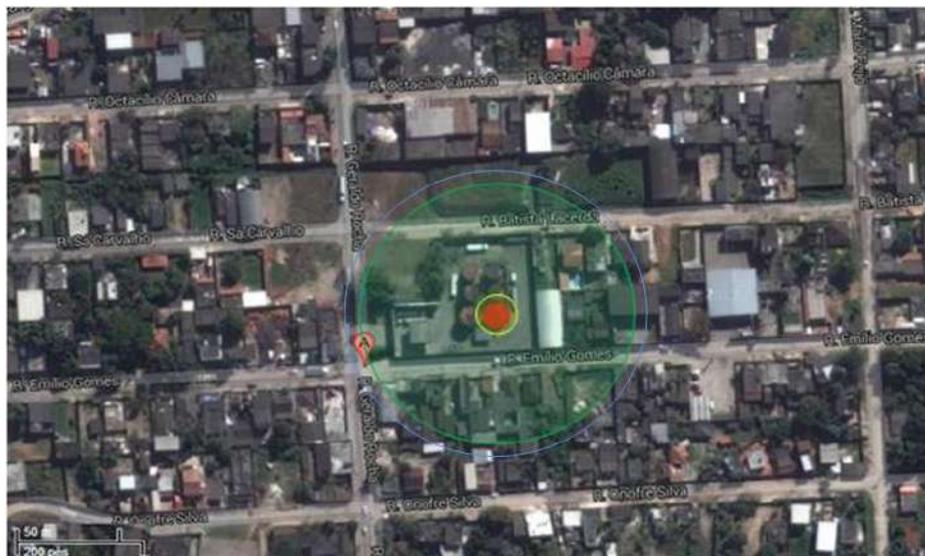
Distância de Segurança (m)	Cenário 1		Cenário 2	Cenário 3		Cenário 4
	Estruturas	Pessoas	Pessoas	Estruturas	Pessoas	Pessoas
	9,3	96,2	91	4,1	45	37,5

A partir desses resultados, foram traçadas as distâncias de segurança ao redor da distribuidora para os quatro cenários como pode ser visualizado através das figura 7.20 e 7.21.



- Diâmetro equivalente de incêndio
- Distância Segura para Estruturas
- Distância Segura para Pessoas
- Distância Segura para Pessoas avaliando-se a barreira

Figura 7.20: Distância de Segurança em escala para Incêndio em todo dique (Cenários 1 e 2)



- Diâmetro equivalente de incêndio
- Distância Segura para Estruturas
- Distância Segura para Pessoas
- Distância Segura para Pessoas avaliando-se a barreira

Figura 7.21: Distância de Segurança em escala para Incêndio em apenas um tanque (Cenários 3 e 4)

## 8. Conclusão

Para todos os cenários analisados, tanto o incêndio em apenas um tanque quanto o incêndio em todo o dique, a população externa é afetada, uma vez que a distância considerada segura ultrapassa os domínios da distribuidora, englobando diversas casas ao redor principalmente para o pior cenário de incêndio em todo dique.

No cenário 4, de incêndio em apenas um único tanque, esta distância engloba parte dos tanques vizinhos. Sendo assim, estes poderiam sofrer ignição provocada pela emissão de calor gerada na queima do primeiro tanque.

Comparando os resultados com o evento, as casas ao redor da distribuidora foram destruídas, indicando que mesmo pessoas mesmo abrigadas sofreriam danos. A diferença está nos fireballs e Jet-fires não avaliados neste estudo, ocorridos durante o incêndio e aumentando o potencial de emissão de radiação.

Na avaliação das barreiras térmicas, a distância de segurança nos cenários 2 e 3 sofrem pouca redução, mostrando que a barreira de 2,5 metros é considerada baixa para atenuar o fluxo de radiação térmica emitida.

Por fim, comparando-se os resultados com a realidade, verificou-se que o perímetro de isolamento usado foi maior que a distância considerada segura para o incêndio em poça. Este isolamento foi adequado, uma vez que as características do cenário real foram mais complexas que as abordadas neste estudo, não envolvendo apenas o fenômeno de incêndio em poça, mas também incêndio em jato e bolas de fogo que têm dinâmicas complicadas e fluxo de radiação térmica maior.

# Referências Bibliográficas

ABNT BR 17505-1 “Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis”, 2006.

ABNT BR 7821, “Tanques soldados para armazenamento de petróleo e Derivados”, 1983.

AGENCIABRASIL, Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/noticia/2013-06-05/policia-do-rio-fecha-mais-um-deposito-de-combustivel-em-duque-de-caxias>>, Acessado em: setembro de 2013.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO ANP, 2012.

ARAGÃO, “Estimativa da Contribuição do Setor de Petróleo ao Produto Interno Bruto Brasileiro”, 2005.

AYRES; FREITAS, “Análise do Mercado de Combustíveis no Brasil e no Rio Grande do Sul, 2007.

BARROS, “Tanques de Armazenamento”, 2011.

BEYLER, C. L. (1999). Engineering Guide: “Assessing Flame Radiation to External Targets from Pool Fires”. Bethesda, MD: Society of Fire Protection Engineers.

BEYLER, C. L. (2002). “Fire hazard calculations for large, open hydrocarbon fires”. In P. J. DiNenno, et al. (Ed.), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd ed.). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

BEYLER, C. L., et all (2008). “ Introduction to fire modeling”. In A. E. Cote, J. R. Hall, P. Powell, C. C. Grant & R. E. Solomon (Eds.), Fire protection handbook (20th ed., Vol. 1). Quincy, MA: National Fire Protection Association.

CBNNOTICIAS, Disponível em: <<http://noticias-do-brasil.cbfnfoz.com.br/noticias-do-brasil/editorial/brasil/24052013-25991-incendio-continua-a-atingir-deposito-em-caxias-rj-nesta-sexta/>>, Acessado em: setembro de 2013.

CATÁLOGO VOLVO, Disponível em:

<<http://pt.scribd.com/doc/17251730/Catalogo-Volvo-FH-6x2/>>, Acessado em: setembro de 2012.

COSTA, P. “A evolução da atividade de refino no Brasil e a presença do estado: a criação do Conselho Nacional do Petróleo e da Petrobras”, Pierre Costa e Sandra L. Videira, Universidade Federal Fluminense, S/D.

COSTA, P. “O maior acidente da Refinaria de Duque de Caxias (RJ)-Brasil: Um estudo geográfico-histórico”, Pierre Costa, Revista Geográfica de América Central, 2011.

CROWL; LOUVAR, “Chemical Process Safety Fundamentals With Applications, 2nd Ed “, 2002.

DRYSDALE, D. “An Introduction to Fire Dynamics 2nd Edition, 2002.

DIE WELT, Disponível: <<http://em www.welt.de>>, Acessado em Setembro de 2013.

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

G1OGLOBO, Disponível em:

<<http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2013/05/abaixo-assinado-tentou-impedir-deposito-entre-casas-em-caxias-rj.html>>, Acessado em: setembro de 2013.

GLOBONEWS, Disponível em:

<<http://g1.globo.com/globonews/noticia/2013/05/foi-um-erro-nao-uma-fatalidade-diz-especialista-em-risco-sobre-incendio.html>>, Acessado em: setembro de 2013.

LIMA, “Formação dos Preço do Etanol Hidratado no Mercado Brasileiro de Combustíveis”, 2011.

LIQUIGAS,CATÁLOGOVOLVO, Disponível em:

<<http://www.liquigas.com.br/wps/portal>> Acessado em: setembro de 2013.

KARLSON; QUINTIERE “Fundamentals\_of\_Fire\_Phenomen”, 2000.

OFLUMINENSE, Disponível em:

<<http://www.ofluminense.com.br/editorias/cidades/incendio-consome-deposito-de-combustivel-em-caxias/>>, Acessado em: setembro de 2013.

ODIA.IG, Disponível em:

<<http://odia.ig.com.br/noticia/rio/2013-05-25/caxias-tem-campo-minado-e-tragedia-pode-se-repetir.html/>>, Acessado em: setembro de 2013.

OLIVEIRA, ANDRÉ RIBEIRO, “Análise Econômica e Financeira do Mercado de Combustíveis”, 2011.

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

MENDONÇA, R. “Sistema de Gestão Integrada em Micro e Pequenas Empresas” (PROGRAMA DE ENGENHARIA AMBIENTAL) UFRJ, 2012.

MCGENGENHARIA, Disponível: <<http://mcgengenharia.com>> Acessado em Agosto de 2013.

NIST, “Thermal Radiation from Large Pool Fires, 2000.

NOTICIASUOL, Disponível em:

<<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/05/24/area-de-incendio-no-rio-possui-ate-30-galpoes-clandestinos-de-combustivel.htm/>>, Acessado em: setembro de 2013.

NOTICIASR7, Disponível em:

<[http://noticias.r7.com/rio-de-janeiro/pf-denuncia-mafia-de-combustivel-em-bairro-  
onde-deposito-pegou-fogo-em-duque-de-caxias-24052013/](http://noticias.r7.com/rio-de-janeiro/pf-denuncia-mafia-de-combustivel-em-bairro-onde-deposito-pegou-fogo-em-duque-de-caxias-24052013/)>, Acessado em: setembro de 2013.

NOTICIASR7, Disponível em:

<<http://noticias.r7.com/rio-de-janeiro/incendio-em-caxias-operacao-busca-depositos-clandestinos-de-combustiveis-no-municipio-28052013>>, Acessado em: setembro de 2013.

PETROBRAS, Normas N-270 “Projeto de Armazenamento de Tanques Atmosféricos”, 2010.

PINTO; SILVA, “Concorrência do Mercado de Combustíveis no Brasil”

ROBERT P. “National Fire Protection Association, 2003”

SHOKRI, M., BEYLER, C. L. (1989). Radiation from Large Pool Fires. “*Journal of Fire Protection Engineering*”,

SCOLARIK; CESARIO. “Simulação de Cenários de Incêndio em Parques de Tancagem”, Projeto Final de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

STEINMACHER,F.R.. “Dimensionamento e instalação de válvulas de controle, de segurança e de alívio na Refinaria REPAR”, Fernanda R. Steinmacher, 150f, Universidade Federal de Santa Catarina (Graduação em Engenharia Química),2007.

SWISSINFO, Disponível em:< <http://www.swissindo.ch>> Acessado em: setembro de 2013.

WILLEY ET. AL., “Accident in Bhopal: observations 20 years later’, 2006.

WILLEY ET. AL, “The Bhopal tragedy: its influence on process and community safety as practiced in the United States”, 2005.

YOUTUBE, Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=MF1ks953iAk>>, Acessado em: setembro de 2013.

YOUTUBE, Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=TtM4xz43QXU>>, Acessado em: setembro de 2013

YOUTUBE, Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=rr7TWgUy7zM>>, Acessado em: setembro de 2013.

YOUTUBE, Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=TtM4xz43QXU>>, Acessado em: setembro de 2013