



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO PERCINIO MARTINS DE LIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO À DECISÃO PARA SISTEMAS
COM RISCO À INCÊNDIO POR VAZAMENTO DE PETRÓLEO E/OU DERIVADOS**

Recife

2018

BRUNO PERCINIO MARTINS DE LIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO À DECISÃO PARA SISTEMAS
COM RISCO À INCÊNDIO POR VAZAMENTO DE PETRÓLEO E/OU DERIVADOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca de sessão de defesa do trabalho de conclusão de curso da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de engenheiro mecânico.

Orientadora: Prof^a Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

L768d	<p>Lira, Bruno Percinio Martins de. Desenvolvimento de um método de apoio à decisão para sistemas com risco à incêndio por vazamento de petróleo e/ou derivados / Bruno Percinio Martins de Lira - 2018. 90folhas, Il.; Tab. e Simb.</p> <p>Orientador(a): Profª Dra. Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte.</p> <p>TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2018. Inclui Referências e Apêndices.</p> <p>1. Engenharia Mecânica. 2. Métodos de apoio à decisão. 3. Sistemas com risco de incêndio. 4. Efeitos do calor irradiado. 5. <i>Matriz payoff</i>. I. Duarte, Dayse Cavalcanti de Lemos. II. Título.</p> <p style="text-align: right;">UFPE</p> <p>621 CDD (22. ed.) BCTG/2019-05</p>
-------	--



Universidade Federal de Pernambuco Departamento de
Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2

Aos vinte e um dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 08:00, na Sala de Reuniões do Departamento de Enga. Mecânica da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE APOIO À DECISÃO PARA SISTEMAS COM RISCO À INCÊNDIO POR VAZAMENTO DE PETRÓLEO E/OU DERIVADOS**, elaborado pelo aluno **Bruno Percínio Martins de Lira**, matrícula 082.666.774-09, composta por, Profa. **Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte** (Orientador), Prof. **Marcus Costa de Araújo**, (examinador 1) e Prof. **Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela _____ (aprovação/reprovação) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso d Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média _____. Para constar, redigi a presente Ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Profa. **Dayse Cavalcanti de Lemos Duarte** - Nota: _____
DEMEC/UFPE

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof. **Marcus Costa de Araújo** - DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof. **Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira** - Nota: _____
DECIV/UFPE

Assinatura: _____

Recife, 21 de Dezembro de 2018

José Marta A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

AGRADECIMENTOS

À minha família, sobretudo a minha mãe Cinthia, ao meu irmão Eric, ao meus tios Tuca, Milton, Sandra, Bárbara, Erllinho e Beto, e aos meus avós Ayrton, Dalvany e Aurora.

À minha orientadora prof^a. Dayse Cavalcanti, que desde o início acreditou em mim e mostrou-se, além de educadora, uma boa amiga.

Aos professores do departamento de engenharia mecânica da UFPE, Armando Lúcio Ramos de Medeiros e Nadege Sophie Bouchonneau da Silva, por, além de educadores, serem modelos a serem seguidos por seus alunos e amigos.

Às amizades que fiz na UFPE, em especial à Rubia, Eduardo Corte, Daniele Brooman, Caio, João Scognamiglio, Ricardo Mello, Luiz Gustavo, Beatriz Asfora, Vitor Parente, Danilo Aragão, Maria Eduarda Teixeira, Júnior Burgos, Rafael Oliveira, Clarissa, Maria Eduarda Barros, Victor Miranda, Vitor Leão, Matheus Vinícius, Mona, Augusto Cacho, Marcelo, Rafael Rodrigues, Suellem, Paula e Luiza.

À banca presente nesta defesa, a ANP (Agência Nacional de Petróleo), a Petrobras e a UFPE.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo desenvolver e aplicar um método de apoio à decisão, o qual foi baseado no sistema de decisão de matriz *payoff* para o transporte de petróleo e derivados com risco de incêndio. Para este escopo, são abordados os temas de sistemas de apoio à decisão, princípios matemáticos e equações de fluxo térmico de radiação, ou fluxo de calor, e probabilidade dos efeitos do calor irradiado. O método desenvolvido é fundamentado por uma etapa de descrição do cenário e afirmação do problema proposto, delimitando a conjuntura do estudo; por uma etapa de formulação das entradas e variáveis da problemática, a qual modela e define o que se almeja com a análise; etapa de desenvolvimento de um critério de escolha; as etapas de cálculo da quantidade de fluxo térmico de radiação e efeitos do calor irradiado; etapa de construção da matriz *payoff*, a qual deve ser estruturada nas variáveis que definem a problemática; revisão da análise e a etapa de recomendação de alguma opção das escolhas, as quais são mensuradas através da esperança matemática da probabilidade dos efeitos do calor irradiado. O método proposto desenvolvido ao decorrer deste trabalho foi aplicado em um estudo de caso de um processo decisório associado a troca preventiva de tubulações de transporte de gasolina e querosene, derivados do petróleo. O proposto trabalho poderá ser utilizado por especialistas sem um conhecimento profundo das ferramentas de apoio à decisão, pois o método apresentado tem aplicabilidade transparente, somente dependendo da complexidade dos dados coletados. A recomendação realizada através da análise mostrou-se, mesmo que com uma diferença relativamente pequena entre as opções, eficaz para indicar a melhor alternativa dentre as possíveis opções de escolha. Por fim, o método, dentro de suas limitações, demonstrou competência no auxílio de decisões de risco.

Palavras-chave: Métodos de apoio à decisão. Sistemas com risco de incêndio. Efeitos do calor irradiado. Matriz *payoff*.

ABSTRACT

The present study had as objective to develop and apply a decision aiding method, based on the payoff matrix decision system to the transportation of petroleum and its derivatives with fire risk. For this scope, will be addressed the themes of decision aiding systems, mathematical principles and equations of thermal radiation flow, or heat flux, and the probabilities of the effects of radiated heat. The developed method is grounded with one step of the description of the scenario and the affirmation of the proposed problem, limiting the study situation; one step for the formulation of the entries and variables of the problem, modeling and defining what to crave with the analysis; one step for the development of a selection criteria; the stages for the calculation of the thermal radiation flow and the effects of radiated heat; the step for the construction of the payoff matrix, which must be structured on the variables that define the problem; the analysis review and the recommendation step for one of the available choices, that are measured through the mathematical expectation of the probabilities of the effects of radiated heat. The proposed method developed during this study was applied in a case study of a decision-making process associated with the preventive exchange of gasoline and kerosene transport pipelines, petroleum derivatives. The proposed study can be used by experts without a thorough knowledge of decision support tools, since the presented method has transparent applicability, only depending on the complexity of the collected data. The recommendation made through the analysis showed, even if with a relatively small difference between the options, effective to indicate the best alternative among the possible options of choice. Finally, the method, within its limitations, demonstrated competence in the aid of risk decisions.

Keywords: Decision aiding methods. Systems with a risk of fire. Effects of irradiated heat. Payoff matrix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Passos de um método de apoio à decisão	26
Figura 2 -	Estrutura lógica da matriz payoff.....	27
Figura 3 -	Chama cilíndrica inclinada pela ação do vento	33
Figura 4 -	Chama cilíndrica sem a ação do vento	34
Figura 5 -	Fluxograma desenvolvido para o método de análise à decisão.....	45
Figura 6 -	Refinaria Abreu e Lima	46
Figura 7 -	Algoritmo desenvolvido para cálculo do fluxo de calor e efeitos do calor irradiado	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Tipos de queimaduras.....	37
Tabela 2 -	Efeitos do fluxo de calor em materiais e humanos	38
Tabela 3 -	Tempo de reação e velocidade de fuga	39
Tabela 4 -	Coeficientes c_1 e c_2	41
Tabela 5 -	Classificação dos sistemas de detecção e isolamento.....	50
Tabela 6 -	Tipos de diâmetro dos vazamentos (API RP 581).....	50
Tabela 7 -	Tempo máximo de vazamento por classificação dos sistemas de detecção e isolamento.....	51
Tabela 8 -	Descrição dos tipos de furos (<i>Concawe</i>).....	52
Tabela 9 -	Número de eventos, causa do vazamento e média de m^3 vazado tipo de furo (<i>Concawe</i>)	52
Tabela 10 -	Média de m^3 vazado por evento corrido (<i>Concawe</i>).....	53
Tabela 11 -	Proporção de ocorrência do tipo do diâmetro por vazamento (API RP 581)	53
Tabela 12 -	Ocorrência dos tipos de diâmetro para as tubulações A e B.....	54
Tabela 13 -	Vazão específica para cada tipo de furo - tubulações A e B	54
Tabela 14 -	Propriedades da gasolina, querosene e do ambiente	55
Tabela 15 -	Matriz payoff base para o estudo de caso.....	56
Tabela 16 -	Relevância e pontuação do critério desenvolvido	57

Tabela 17 -	Fluxos de calor pra diversas distâncias por tipo de vazamento - gasolina.....	58
Tabela 18 -	Fluxos de calor pra diversas distâncias por tipo de vazamento - querosene.....	58
Tabela 19 -	Distância segura, tempo de exposição e dose de radiação térmica por tipo de vazamento - gasolina.....	59
Tabela 20 -	Distância segura, tempo de exposição e dose de radiação térmica por tipo de vazamento - querosene	59
Tabela 21 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro pequeno - gasolina	60
Tabela 22 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro médio - gasolina	60
Tabela 23 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro grande - gasolina	60
Tabela 24 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro pequeno - querosene.....	60
Tabela 25 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro médio - querosene.....	61
Tabela 26 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro grande - querosene.....	61
Tabela 27 -	Matriz payoff da tubulação A	61
Tabela 28 -	Matriz payoff da tubulação B	62
Tabela 29 -	Valor esperado para as probabilidades dos efeitos do calor - tubulação A	62

Tabela 30 -	Valor esperado para as probabilidades dos efeitos do calor irradiado - tubulação B	63
Tabela 31 -	Critério de comparabilidade dos efeitos do calor irradiado entre as tubulações A e B	63
Tabela 32 -	Critério de pontuação dos efeitos do calor irradiado entre as tubulações A e B	64
Tabela 33 -	Fator de vista por distância do observador e tipo de diâmetro - gasolina	74
Tabela 34 -	Transmissividade atmosférica por tipo de diâmetro e distância ao observador - gasolina	75
Tabela 35 -	Fluxo de calor pelo tipo de diâmetro e distância ao observador - gasolina	75
Tabela 36 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado por tipo de diâmetro - gasolina	78
Tabela 37 -	Fator de vista por distância do observador e tipo de diâmetro - querosene.....	83
Tabela 38 -	Transmissividade atmosférica por distância do observador e tipo de diâmetro - querosene.....	84
Tabela 39 -	Fluxo de calor pelo tipo de diâmetro e distância ao observador - querosene.....	84
Tabela 40 -	Probabilidade dos efeitos do calor irradiado por tipo de diâmetro - querosene.....	87

LISTA DE SÍMBOLOS

x	Variável aleatória discreta ou contínua
$P(x), P$	Probabilidade de x
$E(X)$	Esperança matemática de X
q'	Fluxo térmico de radiação
ε	Emissividade do corpo
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
T_a	Temperatura ambiente
T_f	Temperatura da superfície da chama
SEP_{act}	Potência real da emissividade da superfície
F_v	Fator de vista
τ_a	Transmissividade atmosférica
m'	Taxa de queima
ΔH_c	Calor de combustão
ΔH_v	Calor de vaporização
C_p	Calor específico a pressão constante
SEP_{max}	Potência máxima de emissividade da superfície
F_s	Fração de radiação
L	Altura da chama

d_p	Diâmetro da poça
ρ_{ar}	Densidade do ar
ρ_{gas}	Densidade da gasolina
ρ_{qrs}	Densidade do querosene
u^*	Velocidade do vento
u_w	Velocidade do vento a 10 metros do chão
s	Porcentagem da superfície da chama que está coberta por fuligem
SEP_{soot}	Potência de emissividade da superfície da fuligem
F_{ver}	Parcela vertical do fator de vista
F_h	Parcela horizontal do fator de vista
F_r	Número de <i>Froude</i>
Re	Número de <i>Reynolds</i>
η_{ar}	Viscosidade cinemática
P_w	Pressão parcial de vapor de água no ar
P_w^0	Pressão de vapor de saturação do ar
RH	Umidade relativa do ar
D	Dose térmica de radiação
t_{eff}	Tempo de exposição do indivíduo
t_r	Tempo de reação do indivíduo

u_f	Velocidade de fuga
x_0	Distância entre a superfície da chama e o local onde o fluxo térmico de radiação é menor ou igual a 1kW/m^2
r	Distância do observador até a superfície da chama
P_r	Função probit
F_k	Fator de influência das roupas utilizadas com a probabilidade do efeito do calor irradiado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVO GERAL.....	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	RISCO E INCERTEZA	19
2.2	ESTATÍSTICA	20
2.2.1	Variáveis Aleatórias Discretas e Contínuas.....	20
2.2.2	Esperança Matemática.....	21
2.3	SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO.....	21
2.4	MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO.....	24
2.4.1	Método de Análise Matriz Payoff.....	26
2.6	INCÊNDIOS	29
2.6.1	Fluxo Térmico de Radiação.....	29
2.6.2	Incêndio de Poça.....	30
2.6.3	Efeitos do Calor Irradiado.....	36
3	METODOLOGIA	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO À DECISÃO BASEADO NO MÉTODO DE MATRIZ <i>PAYOFF</i>	42

3.2	DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO À DECISÃO	43
4	RESULTADOS	46
4.1	CENÁRIO E AFIRMAÇÃO DA PROBLEMÁTICA.....	46
4.1.1	Descrição do Cenário.....	47
4.1.2	Condições e Afirmação da Problemática	47
4.2	ENTRADAS E VARIÁVEIS DO SISTEMA.....	49
4.2.1	Tipos de Sistemas de Detecção e Isolamento	49
4.2.2	Tipos de Vazamentos e sua Proporção de Ocorrência.....	50
4.2.3	Características do Ambiente e do Conteúdo Transportado	54
4.3	CRITÉRIO DE ESCOLHA	56
4.4	FLUXO DE CALOR	57
4.5	PROBABILIDADE DOS EFEITOS DO CALOR IRRADIADO	59
4.6	CONSTRUÇÃO DA MATRIZ <i>PAYOFF</i>	61
4.7	ESPERANÇA DAS OPÇÕES DE ESCOLHA.....	62
4.8	REVISÃO DA ANÁLISE	63
4.9	RESULTADOS E RECOMENDAÇÃO	63
5	CONCLUSÃO	65
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68
	APÊNDICE A1	70

APÊNDICE A2	76
APÊNDICE B1	79
APÊNDICE B2	85
APÊNDICE C	88

1 INTRODUÇÃO

Grandes desafios estão sempre atrelados as tomadas de decisões para com os problemas, os quais possuem caráter de risco acentuado. É o escopo desse trabalho aludir métodos de apoio à decisão para com as indústrias de processos com risco. Tais riscos surgem de eventos como incêndios, explosões ou o vazamento de algum produto inflamável, os quais tem características imediatas de causar dano as pessoas ou ao meio ambiente.

Diante deste contexto, métodos que auxiliem os responsáveis a tomarem a melhor decisão em diversos cenários, respeitando as políticas de sua empresa e cliente, assim como suas preferências, faz-se como requerimento ao almejo para um gerenciamento de excelência. A implementação, e execução, de métodos de apoio à decisão para as adversidades encontradas na administração está a encargo do decisor, contudo, sendo apoiado por diversos outros profissionais no âmbito teórico e empírico, onde simultaneamente deve atender não somente seus colaboradores, como o grupo social os quais estão inseridos.

É necessário considerar que essas decisões dificilmente serão fáceis. Nem a escolha em si, como os meios para se chegar a ela. Essas decisões requerem uma grande coleta de dados através dos diversos setores da empresa, integrando valores aos profissionais que criam alternativas para os cenários discutidos, como o custeio da produção de um produto, o tempo de vida e para falha nos equipamentos, o risco financeiro de um produto novo, ou até mesmo quando, baseado no risco, deve-se optar pela saída do mercado.

Contudo, em vista da singularidade dos problemas encontrados em nossas escolhas, a personalização de métodos de apoio à decisão torna-se cada vez mais comum, desenvolvendo e aglutinando modelos de análise ao sistema. Apesar de sua complexidade, o aprimoramento destes métodos torna-se uma medida saudável a empresa, que possibilita um melhor gerenciamento dos riscos inerentes as suas atividades.

1.1 JUSTIFICATIVA

Cada problemática encontrada em cenários de risco deve ser tomada como singular, cercando-se ao máximo de todos os dados disponíveis para sua resolução. A indústria de processos, em geral, adota três passos para lidar com problemas decisórios de risco: identificar o perigo, avaliar os riscos e decidir qual a melhor conduta a ser tomada. Sem uma metodologia consistente, torna-se um ainda maior desafio escolher qual ação a ser tomada, abrindo possibilidades para acidentes e fatalidades. É com essa visão que é necessário não ponderar esforços para, em sua maioria, reduzir todo e qualquer risco vinculado aos processos industriais, a todo momento aspirando a eliminação destes riscos.

Procedimentos de avaliação de perigos e análise quantitativa de riscos são essenciais para a escolha da ação a ser tomada, contudo não tem a característica de identificar qual caminho a ser tomado. É neste âmbito que o desenvolvimento de um método de apoio à decisão é um grande aliado de gestores e analistas, pois as ferramentas concebidas serão provedoras de dados e valores das escolhas realizadas e das políticas adotadas.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um método de apoio à decisão, apresentando a metodologia básica para a linha lógica necessária para avaliar os riscos inerentes as possíveis escolhas, em um cenário com risco de incêndio por vazamento de petróleo e/ou derivados.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Familiarização com o processo e sistemas de decisão de risco
- Utilização de ferramentas de auxílio à decisão
- Desenvolvimento de um método de auxílio à decisão para sistemas com risco de incêndio por vazamento de petróleo e/ou derivados através do método de matriz *payoff*
- Emprego do método desenvolvido em um estudo de caso

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No que se faz menção a métodos de auxílio à decisão, uma gama variada de assuntos pode ser trabalhada, aglutinando temas empresariais e fundamentações matemáticas. Contudo, independente de como aproxima-se deste tópico, o risco e a incerteza são inevitavelmente inerentes. Sendo assim, esta seção do trabalho proposto é contextualizar o leitor em o que é risco e incerteza, sistemas e métodos de apoio à decisão, princípios matemáticos probabilísticos e as equações essenciais para o cálculo de vazamentos em tubulações, incêndios de poça e os efeitos do calor irradiado no incêndio.

2.1 RISCO E INCERTEZA

Independente de nossas posições sociais ou profissionais, sempre estamos fazendo decisões com algum nível de incerteza, com o risco de consequências desimportantes ou de seriedade elevada. É muito comum nos depararmos com a indagação de dormir ou não um pouco mais. Esta escolha pode acarretar em quanto tempo iremos esperar por um veículo de transporte público ou por quanto tempo ficaremos preso no trânsito, se teremos tempo para um café da manhã reforçado ou apenas um copo de suco. As escolhas do dia a dia estão atreladas a uma série de incertezas, com riscos diversos. Sendo assim, as incertezas atreladas a riscos de alta severidade são as exceções e não a regra. Pelo menos por muito tempo pensou-se assim.

Contudo, esta linha de pensamento, com a chegada dos tempos modernos e da 4ª Era industrial, mudou drasticamente. As exceções estão cada vez mais presentes em nossas rotinas. As pessoas, de posse ou não do poder da influência, estão progressivamente interpelando-se sobre as incertezas e possíveis riscos de suas decisões, chegando a conclusão de que não mais pode-se ignorá-las. O risco de cada aleatoriedade nas escolhas realizadas devem ser contabilizadas de um modo muito mais amplo.

Assim como Morgan e Henrion (1990) definem, as incertezas não estão limitadas as nossas vidas privadas. Elas ocorrem em grandes escalas e em

situações públicas. Em processos decisórios regulamentadores, deve-se agir de tal modo como pudéssemos prever e entender o mundo a nossa volta. É através de uma avaliação de risco, sustentada por um banco de dados confiável, que pode-se aferir as incertezas dos eventos em foco, assegurando os riscos inerentes. Para tal, Terje Aven (2003) expressa uma linha de pensamento comum entre os analistas de risco:

- Como podemos expressar os riscos e incertezas?
- Como entendemos e usamos modelos de análise?
- Como podemos usar os dados históricos e de especialistas?

Os eventos de uma problemática representados em um modelo de análise são as representações quantitativas observáveis do mundo ao nosso redor, sendo estes modelos funções determinísticas que fazem um vínculo entre os eventos e suas probabilidades. E em diversos modelos, apenas dados de especialistas ou dados históricos podem ser empregados em certos fenômenos. Em sua maioria, a experiência do analista irá ditar a aproximação que será realizada.

Dispondo dessas diretrizes na avaliação de risco, quando os riscos de nossas escolhas tem algum impacto na integridade física de outros, os piores cenários dos acontecimentos viáveis deverão ser contabilizados.

2.2 ESTATÍSTICA

Como anteriormente apresentado, as incertezas estão presentes em cada escolha que realizamos, independente do seu grau de complexidade. E estas incertezas, de um modo geral, relacionam-se a variáveis aleatórias. Variáveis aleatórias são geralmente confundidas com variáveis ordinárias, as quais tem pouquíssima, ou nenhuma, afinidade com aleatoriedade, além da falta de uma natureza condicional.

2.2.1 Variáveis Aleatórias Discretas e Contínuas

As variáveis aleatórias pode ser classificadas em discretas ou contínuas. As de caráter discreto tem um valor finito de possíveis resultados, como a soma das

faces de dois dados quando jogados. As variáveis de natureza contínua pode tomar todos os valores presentes em um dado intervalo, como o tempo médio de realização de uma atividade.

2.2.2 Esperança Matemática

Quando uma grande quantidade de dados é reunido, é usual e crescente o interesse não por seus valores individuais, mas sim pelas características que este agrupamento proporciona. Uma característica comum de estudo é a esperança matemática, ou o valor esperado desses dados. Grinstead e Snell (1998) definem a esperança matemática, como sendo a convergência absoluta do produto dos valores da variável x com suas respectivas probabilidades de ocorrência. É definida pela equação:

$$E(X = x) = \sum_{i=1}^n x_i P(x) \quad (1)$$

É comum designar a esperança matemática como média. Contudo, deve-se atentar que este tipo de média leva em consideração a ocorrência dos valores, não somente os valores numéricos dos dados. Se a equação (1) não convergir de forma absoluta, é dito que X não tem valor esperado.

2.3 SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO

Os riscos presentes em sistemas de processamento de materiais perigosos, como plantas de processamento de petróleo e seus derivados, são apresentados como incêndios, explosões ou liberação de material tóxico, os quais podem prejudicar as pessoas, o meio ambiente e a economia, tanto em níveis locais como em níveis nacionais.

A gerência possui a incumbência da responsabilidade para com seus *stakeholders* para, de modo efetivo, gerir desde o armazenamento até distribuição de dos produtos. E para tal, o primeiro passo é identificar em quais situações na instalação existe o perigo. Esta iniciativa permite indicar se existe risco tanto com as pessoas, colaboradores ou não, a propriedade ou com o meio ambiente. Sendo um

risco relevante, deve-se fazer escolhas para que o risco seja reduzido ao ponto de total controle ou completamente anulado. Estas escolhas não são fáceis, e muitas vezes apresentam-se com caráter complexo. Raramente os riscos podem ser reduzidos a zero, salvo a eliminação da atividade como um todo, originando um grande custo para a empresa.

Nenhuma empresa possui recursos infinitos à sua disposição para a redução de riscos nos processos de suas instalações. Mesmo assim, constantemente elas precisam tomar decisões de quanto tempo e capital deve ser investido para a redução de riscos. Tipicamente, indústrias de processamento tem como decisões de risco:

- Deve-se alguma ação ser tomada para reduzir o risco de certo processo?
- Quais deve ser a alternativa escolhida, dentre um certo número, para reduzir o risco de certo processo?
- Como deve uma companhia distribuir seus recursos, dentre sua planta e operações, para reduzir os risco geral de processamento?
- Deve uma companhia executar um novo empreendimento que possui risco processual e financeiro relevante?
- Quando a companhia deve sair de certa área empresarial, baseada no risco dos processos?

Alguns riscos podem ser drasticamente reduzidos através de decisões relativamente fáceis, quando é alcançada por intermédio de medidas simples e de baixo custo.

Somente o custo e o risco nos processos de materiais perigosos não fosse suficiente para deixar as decisões complicadas suficientemente, a multiplicidade de outros fatores pela decisão de risco afeta de modo drástico a complexidade de cada decisão. Como o *Center for Chemical Process Safety* (1994) evidencia, alguns dos principais fatores são:

- Alternativas tangíveis para redução ou eliminação dos riscos.
- Disposição de capital.
- Códigos, padrões e regulamentações e boas práticas industriais.

- A imagem da companhia.
- O custo da implementação da alternativa disponível.
- Impacto econômico da alternativa na comunidade local.
- Oportunidades de trabalho que a alternativa possibilita.
- Rentabilidade da atividade.
- Impacto social do risco.

As tomadas de decisões nos processos advindos da gestão de uma empresa possuem cada vez mais uma natureza conflitante. O decisor tem um trabalho gradativamente mais ímprobo pois está lidando com alternativas as quais possuem diversas variáveis e objetivos antagônicos, os quais podem levar a uma tomada de decisão falha. São em situações como essa que o uso de uma metodologia de Apoio à Decisão torna-se medular por adicionar ao processo decisório objetividade, neutralidade e transparência. Esses métodos pretendem estabelecer uma estrutura de preferência do decisor, estabelecendo-a as consequências provenientes das escolhas. (Almeida, 2013)

Nestes cenários, as decisões não são feitas somente por uma pessoa. Elas são um reflexo de preferências e ideias de pessoas ou um grupo, representadas por alguém ou por uma equipe. Para compreensão dos papéis de cada atuante, seja um sistema de apoio à decisão multicritério ou não, Roy (1996) dá um breve esclarecimento:

Opção de escolha – Uma das alternativas a serem tomadas no processo decisório, atrelada à disposição e direcionamento de recursos com o intuito de mudança.

Decisão – A opção escolhida, dentre duas ou mais.

Indivíduos – São aqueles responsáveis pelas tomadas de decisões nos processos, sendo a decisão uma reflexão das interações entre o decisor e seus representativos.

Entidades – Quando as decisões não são tomadas por uma única pessoa, elas são realizadas por um grupo de pessoas apropriado, funcionários de um gabinete, um conselho administrativo.

Comunidades – Algumas decisões processuais também podem ser efetuadas por um grupo de pessoas com limites menos definidos, como os funcionários de uma empresa, o público em geral.

Stakeholders – Atribuída a indivíduos, entidades ou comunidades. Detém importantes interesses nas decisões e irão intervir para afetá-las diretamente através dos sistemas válidos.

Terceiros – São aqueles que não se classificam como indivíduos, entidades ou comunidades na dada situação, mas serão afetados pela decisão tomada, como consumidores de mercado, pagadores de impostos, equipe da empresa, etc.

Valor – É aquilo de importância para o decisor, advindo de seus desejos e conhecimento, orientados sempre a melhoria de alguma forma.

2.4 MÉTODOS DE APOIO À DECISÃO

Métodos de Apoio à Decisão (MAD's) são, em geral, sistêmicos e rigorosamente lógicos para a análise de risco envolvendo incertezas de grande complexidade. Segundo Doumpos (2014), o principal propósito de um MAD é prover ajuda no contexto decisório de um problema de grande complexidade e mal estruturação, sempre em concordância com as preferências do decisor, das hipóteses voluntárias e limites do escopo do estudo definidos pelas perguntas.

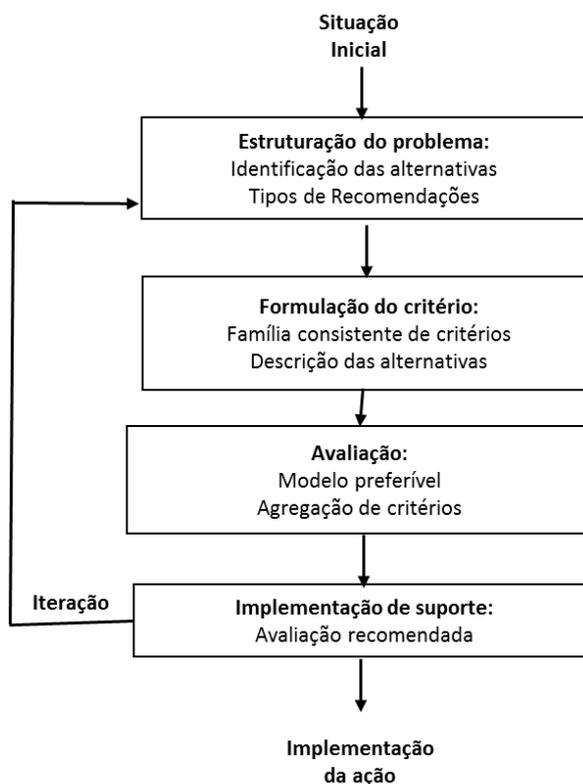
Um MAD intervém em todas as fases do processo decisório, desde sua estruturação até as soluções recomendadas. Um perfil dos passos tomados em uma MAD é ilustrado na Figura 1. A determinação do objetivo da decisão especifica as maneiras como as alternativas factíveis para a solução do problema devam ser consideradas para a decisão final. Isso envolve a seleção da decisão problemática mais adequada ao problema em questão:

- Escolha da(s) melhor(es) alternativa(s).
- *Ranking* das alternativas, de melhor a pior.
- Classificação/agrupamento das alternativas em categorias predefinidas por performance.
- Descrição das alternativas.

Para qualquer que seja o estudo de caso, para o uso de algum método de MAD é necessário a diferenciação dos tipos de problemas que a análise pode lidar, segregando-os de uma maneira tal que facilite a escolha do método a ser utilizado. Podemos identificar quatro categorias de problemas (Lopes *apud* Roy 2009):

- Problemática de escolha – auxilia o decisor através da escolha de um subconjunto de alternativas até que uma única ação possa ser escolhida. Este subconjunto contém as melhores ações, ou as mais satisfatória.
- Problemática de classificação – tem o propósito de classificar as ações em categorias, as quais são previamente definidas por certo grupo de normas cabíveis ao conjunto de ações.
- Problemática de ordenação – auxilia o decisor através de um ranking obtido através do agrupamento de todas as ações disponíveis em classes equivalentes, as quais são ordenadas por preferência.
- Problemática de descrição – tem por finalidade explicar as descrições das ações e suas consequências em termos apropriados.

Figura 1: Passos de um método de apoio à decisão



Fonte: Adaptado de DOUMPOS (2014)

Tendo isto em mente, a próxima seção apresentará o método base para o desenvolvimento do MAD deste proposto trabalho – O método de Matriz *Payoff*

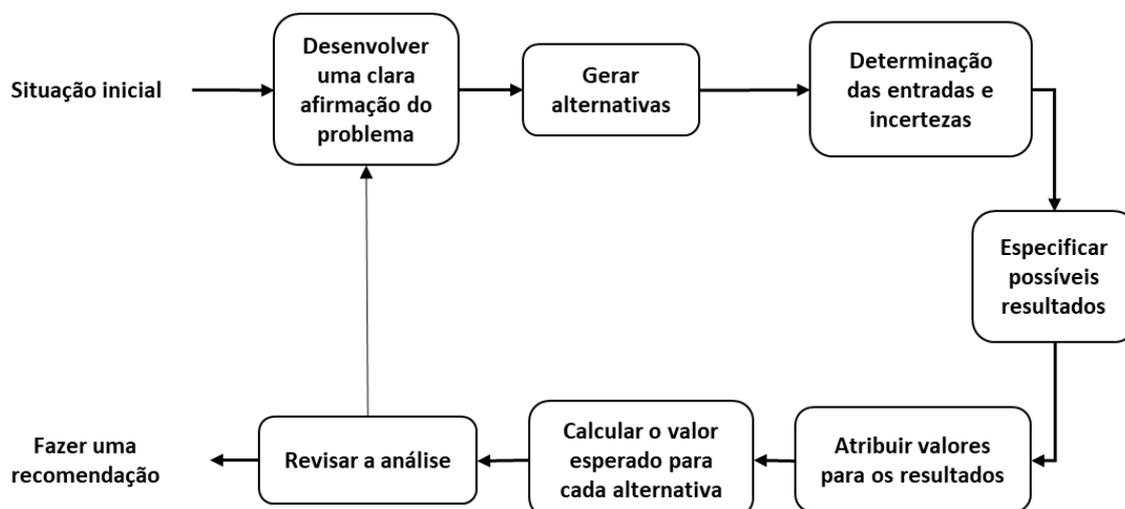
2.4.1 Método de Análise Matriz *Payoff*

Em situações de decisão de risco, as incertezas são intrínsecas a problemática quando trata-se de sistemas com risco de explosão. E muitas vezes a incerteza é abordada de forma informal, deixando as etapas do processo de decisão menos rigorosas e, conseqüentemente, comprometendo a recomendação final. O método de análise matriz *payoff* lida com as incertezas do problema de modo explícito e exigente, segregando probabilidades e valores. Sua estrutura lógica pode ser observada na Figura 2.

A análise deste método utiliza uma matriz para descrever os elementos fundamentais ao problema, com suas linhas referindo-se as saídas das incertezas e

as colunas são as ações. As probabilidades de cada saída estão dispostas no começo de cada linha. Seus resultados são mensurados através do valor esperado de cada alternativa, tendo os critérios do decisor como prioridade.

Figura 2: Estrutura lógica da matriz *payoff*



Fonte: Adaptado de CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (1994)

É um método simples e não possui a necessidade de uso de *software*, somente requerendo-se conhecimentos rudimentares de matemática e probabilidade para sua aplicação, de modo simples. O *Center for Chemical Process Safety* (1994) explica de modo sucinto as oito etapas de seu processo lógico. São elas:

- 1ª Etapa – Desenvolver uma clara afirmação do problema.

Esta é a etapa inicial do método, onde uma afirmação da problemática deve ser realizada. Resume-se a uma etapa simplória, contudo fundamental ao método, pois é deste ponto inicial que o problema obterá alguma recomendação.

- 2ª Etapa – Gerar Alternativas.

A segunda etapa do método consiste no desenvolvimento de alternativas para uma possível solução da problemática. É o processo organizacional de *brainstorming* para as soluções, onde diversas ideias para o problema são expostas. Em contrapartida, os critérios e valores do decisor são explanados, assim como suas preocupações. Levando todos esses fatores em consideração, alternativas serão

descartadas ou refinadas, conduzindo o decisor a um grupo de alternativas que melhor satisfaça-o.

- 3ª Etapa – Determinação de Entradas e Incertezas

Nesta fase do processo de decisão, as entradas e valores dos eventos que afetam o sistema, bem como suas incertezas, são calculados. Esta etapa é um reflexo de quão bem foi executada a etapa de conceber alternativas, onde as aferições e estimativas dos eventos serão uma resposta as opções estabelecidas.

- 4ª Etapa – Especificar Possíveis Resultados

Agora deve-se especificar as saídas resultantes de cada possibilidade das entradas e incertezas dos eventos.

- 5ª Etapa – Atribuir Valores para os Resultados

Tendo conhecimento de cada possibilidade para os eventos das entradas e incertezas, tem de se atribuir valores para as alternativas, correspondendo-se as unidades utilizadas inicialmente no sistema.

- 6ª Etapa – Calcular o Valor Esperado de Cada Alternativa

Obtendo-se os valores para cada possível saída, calcula-se o valor esperado das opções através da multiplicação do valor dos resultados pela probabilidade deste resultado acontecer, somando-se cada valor esperado de certa alternativa, podendo-se comparar a pertinência das opções com os critérios do decisor.

- 7ª Etapa – Revisar a Análise

Após chegar-se a uma escolha através do valor esperado, antes de fazer uma recomendação, a opção precisa ser satisfatória e creditada nos fundamentos e precauções do decisor. Caso não seja adequada, deve se retomar a 1ª etapa e/ou etapas adiante, revisando os passos tomados para divergir-se de resultados insatisfatórios, afinando opções mais apropriadas.

- 8ª Etapa – Fazer uma Recomendação

Após a revisão do método e do resultado obtido, em caso satisfatório, segue-se com a recomendação da melhor alternativa aos possíveis eventos da problemática. Em caso do desejo de uma alternativa mais refinada, é recomendado a procura de um outro MAD, o qual cubra as necessidades do cliente.

A matriz *payoff* é um método simples, sem a necessidade de utilização de software, que quando usado nas condições certas pode fornecer, de modo acurado, a melhor opção para a situação em questão. Este método é melhor implementado quando a escolha das alternativas muda os resultados e/ou suas consequências, mas não quando muda-se o risco.

2.6 INCÊNDIOS

Para o nosso estudo de caso faz-se necessário o cálculo da poça formada pelo vazamento do conteúdo da tubulação em questão, a quantidade de calor liberada na ignição do conteúdo e a probabilidade de lesões e mortes. Assael e Kakosimos (2010) fizeram um ótimo trabalho em seu livro *Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions*, abordando os assuntos requeridos para o desenvolvimento de nosso estudo de caso, sendo eles: incêndios, incêndios de poça, fluxo térmico de radiação, também chamado de fluxo de calor para simplificações, e probabilidade de lesões e mortes.

2.6.1 Fluxo Térmico de Radiação

Os incêndios, reações exotérmicas na fase gasosa, são resultados da mistura de gases inflamáveis e o ar ou outro meio oxidável, quando dispostos de uma fonte de calor para suprir a ignição da mistura. Incêndios e explosões são as causas mais significantes de danos a equipamentos e lesões e até mortes em indústrias, especialmente na indústria de petróleo e em plataformas de extração, onde encontra-se uma grande quantidade de equipamentos, combustíveis e fontes de calor em um pequeno espaço.

Os danos causados são diretamente proporcionais ao fluxo de calor (W/m²) gerado, aproximado pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$q' = \varepsilon\sigma(T_f^4 - T_a^4) \quad (2)$$

Onde ε é a emissividade do corpo (-), σ é a constante de Stefan-Boltzmann (= $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$), T_a é a temperatura ambiente e T_f é a temperatura da superfície da chama. Contudo, a equação 2 não pode ser diretamente aplicada por a temperatura na chama variar em sua superfície. Desse modo, diversos modelos surgiram para tentar aproximar resultados satisfatórios para o cálculo do fluxo de calor.

Neste trabalho, será feito o uso do modelo de chama sólida, o qual assume que a chama terá um formato sólido que radiará calor somente de sua superfície. Este modelo calcula o fluxo de calor como sendo função da potência de emissão da superfície, seu fator de forma e a transmissividade atmosférica, como expressado abaixo:

$$q' = SEP_{act} F_v \tau_\alpha \quad (3)$$

Onde SEP_{act} é a potência real de emissão da superfície, F_{view} é o fator de vista, τ_α é a transmissividade atmosférica e q' é o fluxo de calor a uma certa distância do observador. A potência real de emissão da superfície é calculada empiricamente como uma função da taxa de queima do combustível, além de levar em consideração a porção da chama que está coberta com fuligem; o fator de vista depende do formato da chama, da distância ao observador e se há presença de vento; a transmissividade atmosférica é relativa à absorção de calor pelo ar entre a chama e o observador.

2.6.2 Incêndio de Poça

O incêndio de poça é definido como sendo turbulento e que queima em uma poção horizontal de vapores inflamáveis, onde o material em questão tem quantidade de movimento igual a zero ou próxima de zero. Certas propriedades pode ser observadas em um incêndio de poça:

- As características do incêndio, até certo nível, dependem das condições meteorológicas e, especificamente, do vento;
- A duração do incêndio dependerá da quantidade de material na poça;
- A taxa de queima do conteúdo da poça é igual a sua taxa de vaporização da poça;
- Existe uma relação entre o fluxo de calor liberado pela chama e a poça em si, afetando a taxa de queima do material e conseqüentemente o tamanho da poça;
- Incêndios de poça geralmente acontecem em combustíveis hidrocarbonetos, óleos e fluidos hidráulicos. Para o cálculo do fluxo de calor, a forma da chama é tomada como sendo cilíndrica;

O algoritmo tomado para o cálculo do fluxo de calor para o incêndio de poça segue uma metodologia fixada. Primeiro calcula-se a taxa de queima do conteúdo espalhado, e dela a potência máxima de emissividade da superfície. Em seguida, a potência real de emissividade da superfície e o fator de vista, podendo-se agora calcular o fluxo de calor.

Existem alguns métodos para o cálculo, mas para este trabalho foi escolhido o método de Mudan (Assael e Kakosimos *apud* Mudan, 2010). Ele é um pouco menos preciso que outros métodos em termos de combustíveis líquidos, contudo, seu métodos também descreve bem a taxa de queima de gases liquefeitos. Segue a fórmula do método:

$$m' = \frac{c_1 \Delta H_c}{\Delta H_V + C_p (T_b - T_a)} \quad (4)$$

Onde $c_1 = 0,001 \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$

A equação (4) acima, T_b e T_a são, respectivamente, as temperaturas de ebulição e ambiente do combustível; ΔH_V e ΔH_c são, respectivamente, os calores de vaporização e combustão do combustível, C_p é o calor específico a pressão constante.

A potência máxima de emissividade da superfície (SEP_{max}) expressa a potência da emissividade da superfície da chama quando nenhuma fuligem está presente. É uma função do calor de combustão ΔH_c e da taxa de queima m' .

$$SEP_{max} = F_s \frac{1}{1 + 4(L/d_p)} m' \Delta H_c \quad (5)$$

Como a taxa de queima refere-se a uma poça de diâmetro D e a potência de emissividade, de uma maneira aproximada, refere-se a superfície cilíndrica da chama. Sendo assim, o fator de correção $1/1 + 4(L/D)$ faz-se necessário, onde L é a representação da altura da chama da poça. F_s é a fração de radiação, a qual reflete a energia de combustão irradiada da superfície da chama.

No caso da altura da chama, o método de Pritchard-Binding (Assael e Kakosimos *apud* Pritchard & Binding, 2010) foi o escolhido por não subestimar a altura da chama, levando em consideração as condições do vento. Segue abaixo:

$$L/D = 10,615 \left[\frac{m'}{\rho_{ar} \sqrt{g d_p}} \right]^{0,305} (u^*)^{-0,03} \quad (6)$$

Onde u^* é velocidade do vento, que está relacionada com a velocidade do vento a 10 metros do solo, u_w .

$$u^* = u_w \left(\frac{g m' d_p}{\rho_{ar}} \right)^{-1/3}, \quad \text{if } u^* < 1 \text{ então } u^* = 1 \quad (7)$$

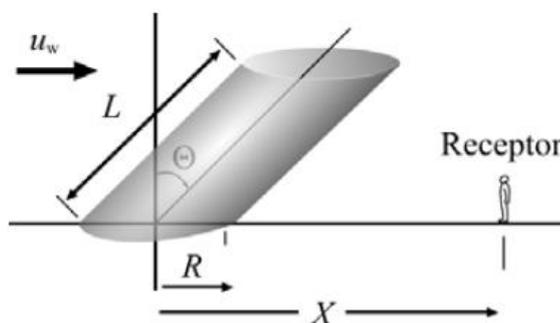
A potência máxima de emissividade da superfície é a representação da radiação emitida pela superfície da chama quando não há fuligem presente. Contudo, a fuligem acaba reduzindo bastante essa radiação. Logo, para uma melhor aproximação da realidade, deve-se calcular a potência real de emissividade da superfície.

$$SEP_{act} = SEP_{max}(1 - s) + SEP_{soot} s \quad (8)$$

Na equação (8) acima, SEP_{soot} equivale a emissividade da superfície da fuligem, e s representa a porcentagem da superfície que está coberta por fuligem. Os produtos derivados de petróleo, que são o foco deste trabalho, s equivale a 80% e SEP_{soot} é igual a 20 kW/m² (Assael e Kakosimos *apud* Hagglund & Person, 2010). Nos casos de poças pequenas, com diâmetros de 1 a 2 metros, onde não forma-se tanta fumaça, pode-se assumir que $SEP_{act} = SEP_{max}$.

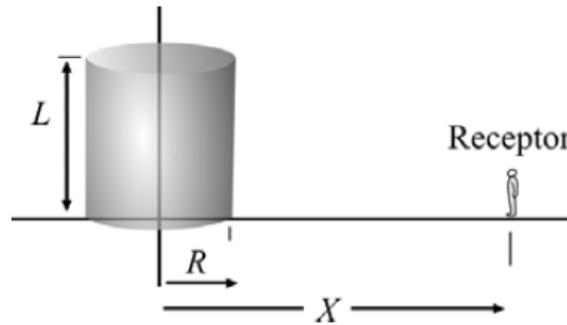
O fator de vista é a representação da fração de radiação emitida que chega no receptor por unidade de área, dependente do formato adotado da chama. A forma para a chama, definida para incêndios de poças, é um cilindro. No caso do fator de vista, podemos ter a possibilidade do cilindro de chama estar ou não inclinado, a depender da presença ou não de vento, como observado nas Figuras 3 e 4 a seguir.

Figura 3: Chama cilíndrica inclinada pela ação do vento



Fonte: ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

Figura 4: Chama cilíndrica sem a ação do vento



Fonte: ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

O ângulo de inclinação do cilindro na figura A, θ , representa a inclinação do cilindro devido ao vento. O fator de vista é calculado através de suas contribuições horizontal e vertical.

$$F_v = \sqrt{F_{ver}^2 + F_h^2} \quad (9)$$

Mudan (Assael e Kakosimos *apud* Mudan, 2010) derivou as contribuições vertical e horizontal através da geometria apresentada na figura A. Para o caso de presença de vento no cenário, o fator de vista terá as seguintes equações:

$$\begin{aligned} \pi F_{ver} = & -E \tan^{-1} D + E \left[\frac{\alpha^2 + (\beta + 1)^2 - 2\beta(1 + \alpha \text{sen}\theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \\ & + \frac{\cos\theta}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\alpha\beta - F^2 \text{sen}\theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \text{sen}\theta}{C} \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

E

$$\begin{aligned} \pi F_h = & \tan^{-1} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\text{sen}\theta}{C} \left[\tan^{-1} \left(\frac{\alpha\beta - F^2 \text{sen}\theta}{FC} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{F \text{sen}\theta}{C} \right) \right] \\ & - \left[\frac{\alpha^2 + (\beta + 1)^2 - 2(\beta + 1 + \alpha\beta \text{sen}\theta)}{AB} \right] \tan^{-1} \left(\frac{AD}{B} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Onde:

$$\alpha = L/R \quad e \quad \beta = X/R \quad (12)$$

E

$$A = \sqrt{\alpha^2 + (\beta + 1)^2 - 2\alpha(\beta + 1)\text{sen}\theta}, \quad D = \sqrt{(\beta - 1)/(\beta + 1)} \quad (13)$$

$$B = \sqrt{\alpha^2 + (\beta - 1)^2 - 2\alpha(\beta - 1)\text{sen}\theta}, \quad E = \alpha\text{cos}\theta/(\beta - \alpha\text{sen}\theta) \quad (14)$$

$$C = \sqrt{1 + (\beta^2 - 1)\text{cos}^2\theta}, \quad F = \sqrt{(\beta^2 - 1)} \quad (15)$$

O ângulo de inclinação, como pode ser observado na equação a seguir, dar-se através de uma função da velocidade do vento (Assael e Kakosimos *apud* Pritchard & Binding, 2010)

$$\tan\theta/\text{cos}\theta = 0,666F_r^{0,333}Re^{0,117} \quad (16)$$

Onde o número de Froude, F_r , e o número de Reynolds, Re , são expressados pelas equações a seguir:

$$F_r = \frac{u_w^2}{gD} \quad e \quad Re = \frac{u_w\rho_{ar}D}{\eta_{ar}} \quad (17)$$

A outra possibilidade nesse cenário é não ocorrência no local, simplificando as equações para o cálculo do fator de vista, visto a seguir:

$$\pi F_v = -\frac{\alpha}{\beta}\tan^{-1}(D) + \left[\frac{\alpha(\alpha^2 + \beta^2 + 1)}{\beta AB}\right]\tan^{-1}\left(\frac{AD}{B}\right) + \frac{1}{\beta}\tan^{-1}\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\beta^2 - 1}}\right) \quad (18)$$

$$\pi F_h = \tan^{-1}\left(\frac{1}{D}\right) - \left[\frac{\alpha^2 + \beta^2 - 1}{AB}\right]\tan^{-1}\left(\frac{AD}{B}\right) \quad (19)$$

Onde:

$$A = \sqrt{\alpha^2 + (\beta + 1)^2}, \quad B = \sqrt{\alpha^2 + (\beta - 1)^2}, \quad D = \sqrt{(\beta - 1)/(\beta + 1)} \quad (20)$$

Como discutido na seção 2.6.1, o fluxo de calor será definido como:

$$q' = SEP_{act} F_{view} \tau_a \quad (21)$$

Para o cálculo da transmissividade atmosférica, τ_a , a equação empírica a seguir será aplicada (Assael e Kakosimos *apud* Bagster & Pittblado, 2010).

$$\tau_a = c_4 [P_w (X - R)]^{-0,09} \quad (22)$$

Na expressão acima, P_w (Pa) é a pressão parcial de vapor da água no ar, X (m) é a distância do receptor ao centro da poça de raio R (m). A constante c_4 é igual a $2,02 \text{ Pa}^{0,09} \text{ m}^{0,09}$. A pressão parcial de vapor de água no ar pode ser calculada através da pressão de vapor de saturação no ar, P_w^0 (Pa), e a umidade relativa do ar, RH (fração variante de 0 a 1, relativa a porcentagem de água no ar).

$$P_w = RHP_w^0 \quad (23)$$

2.6.3 Efeitos do Calor Irrradiado

Além dos danos causados aos equipamentos e a instalação, as lesões causadas as pessoas no início de um incêndio se dá pela grande quantidade de calor irradiado pela combustão do conteúdo inflamável. Além disso, uma enorme emissão de gases tóxicos, muito nocivos aos seres humanos quando inalados, como CO_2 , NO_x e SO_x , é produzida nesta combustão. Esses gases ainda dificultam a fuga de pessoas que tentam se proteger do incêndio, ou até mesmo a possibilidade de ajudar os outros.

As queimaduras sofridas em eventos como um incêndio estão diretamente relacionadas com a intensidade do fluxo de calor gerado e o tempo que a pessoa ficou exposta. A Tabela 1 descreve os tipos de queimaduras.

Tabela 1: Tipos de queimaduras

Tipo de Queimadura	Descrição
1º grau	Afetam apenas a epiderme ou camadas mais superficiais da pele. O local fica avermelhado e seco, além de doloroso.
2º grau	Além de afetar a epiderme, queimaduras de 2º grau também afetam a derme, camada abaixo da derme. O local fica doloroso, inchado e avermelhado, e com a presença de bolhas.
3º grau	As queimaduras de 3º grau destroem a epiderme e a derme. Também é comum o dano em músculos, tendões e até ossos. Não existe sensação de dor no local pois os terminais dos nervos são destruídos.

Fonte: Adaptado de ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

Queimaduras de 2º e 3º graus podem levar a certos tipos de deficiências, especialmente motoras, além de poder causar a morte do indivíduo. De modo realístico, a mortalidade por queimaduras é apresentada probabilisticamente através da porcentagem do corpo que foi queimada. E nota-se que para uma fixa porcentagem queimada do corpo, a chance de sobreviver diminui com o aumento da idade.

Com o propósito de evitar-se os efeitos do fluxo de calor em eventos de grande escala térmica, limites de radiação térmica foram propostos pelo *World Bank* [Assael e Kakosimos *apud* World Bank, 2010], como mostra a Tabela 2.

Um fator considerado nos cálculos para proposição de limites de radiação térmica é a intensidade radiação emitida pelo sol, que encontra-se aproximadamente entre 0,8 e 1 kW/m². O valor usualmente adotado, o qual também será usado neste trabalho, para o cálculo dos efeitos do calor irradiado é igual a 1 kW/m².

Os cálculos dos efeitos da radiação emitida pelo fluxo de calor gerado em um dado incêndio irão abranger as probabilidades de lesões (queimaduras de 1º e 2º graus) e mortes. O cálculo dos efeitos se dá em dois passos:

1º - Cálculo da dose de radiação térmica através do fluxo de calor obtido em uma distância específica, e o tempo de fuga, que é o tempo requerido para que uma pessoa consiga afastar-se suficientemente da fonte de calor a obter uma intensidade de calor recebida de no mínimo 1 kW/m².

2º - A probabilidade de lesão (queimaduras de 1º e 2º graus) e morte, através das expressões empíricas chamadas de funções proibit.

Tabela 2: Efeitos do fluxo de calor em materiais e humanos

Fluxo de Calor (kW/m²)	Efeitos em Materiais	Efeitos em Humanos
37,5	Danos diversos aos materiais	100% letal em 1 min 1% letal em 10 s
25	Intensidade mínima para a ignição de madeira em uma exposição longa	100% letal em 1 min Lesões sérias em 10 s
12,5	Intensidade mínima para a ignição e derretimento de tubos plásticos	1% letal em 1 min Queimaduras de 1º grau em 10 s
4	-	Não letal Possibilidade de queimaduras de 2º grau Dor após exposição de 20 s
1,6	-	Limite aceitável para longos períodos de exposição

Fonte: Adaptado de ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

As lesões e/ou mortes ocorridas durante um incêndio são diretamente proporcionais a quantidade de radiação térmica recebida durante o tempo em que uma pessoa ficou exposta ao fluxo de calor. Essa quantidade de radiação recebida é chamada de dose térmica de radiação, D ($W^{4/3}.s/m^{8/3}$), definida pela equação a seguir:

$$D = t_{eff}(q')^{\frac{4}{3}} \quad (24)$$

Na equação (24) q' (W/m^2) é o fluxo de calor calculado com dependência na distância ao observador e t_{eff} representa o tempo que a pessoa ficou exposta a este fluxo de calor. O tempo de exposição depende de certos fatores. São eles:

1. O tipo de incêndio
2. Tempo necessário para o indivíduo reagir e como se dá sua reação quando ele percebe o que está acontecendo
3. Os obstáculos que possam estar presentes em sua trajetória de saída e as condições físicas da pessoa

O tempo de exposição irá depender de modo intrínseco ao tipo de incêndio. Incêndios do tipo *flash fire* ou *fire ball* tem uma curta duração (menor que 1 minuto). No outro lado do espectro, incêndio do tipo de jato ou de poça tem uma maior duração. Nesse último caso, o tempo de exposição irá depender do período preciso para chegar-se a um local protegido ou onde a intensidade da radiação térmica seja aceitável.

Desse modo, podemos definir o tempo de exposição como sendo a soma de dois fatores temporais: o período de tempo estabelecido para sua reação e o tempo requerido para a pessoa sair de sua posição inicial no incêndio e percorrer o trajeto que o levará a uma posição segura. O tempo de reação é estabelecido através dos dados da Tabela 3.

Tabela 3: Tempo de reação e velocidade de fuga

Investigadores	Tipo de população	Velocidade de fuga	Tempo de reação	Dose para probabilidade de	
				Mortes ($10^4 \times W^{4/3}$ s/m ^{8/3}) 1%	Lesões ($10^4 \times W^{4/3}$ s/m ^{8/3}) 50%
Eisengerg et al, 1975	-	-	-	960	2380
Tsao e Perry 1979	-	-	-	420	1050
H.S.E. 1981	Média Sensível	2,5 1	0 5		
Hynes 1983		6			
TNO 1989	Média Sensível	4 -	5	520 430	- 1090

Fonte: Adaptado de ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

De acordo com a figura 5, mostra-se que o tempo de reação terá valor de 5 segundos. Para a velocidade de fuga, que é a velocidade média a qual o indivíduo percorreu o percurso de saída, o valor adotado mais comum é 4 m/s. Assim sendo, podemos escrever a fórmula do tempo de exposição como sendo:

$$t_{eff} = t_r + \frac{(x_0 - r)}{u_f} \quad (25)$$

Na equação (25) t_r (s) é o tempo de reação, adotado como 5 segundos, x_0 (m) é a distância entre a superfície da chama até onde a intensidade do fluxo de calor é igual ou menor a 1kW/m², r (m) é a distância do observador até a superfície da chama e u_e é a velocidade de fuga do indivíduo, adotada de 4 m/s.

De modo a estimar os danos causados pela dosagem de radiação térmica, relações desenvolvidas em laboratório e com dados de campo são amplamente utilizadas, sendo as funções probit as mais utilizadas na área. Elas Calculam a probabilidade de lesões (queimaduras de 1º e 2º graus) e morte como consequência de níveis de dosagem de radiação térmica. Segue a seguir sua expressão:

$$P = F_k \frac{1}{2} \left[1 + erf \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (26)$$

Na expressão acima, P_r (-) é a função probit dada de modo empírico como sendo:

$$P_r = c_1 + c_2 \ln(D) \quad (27)$$

Na equação 27 as constantes c_1 e c_2 definem o tipo de efeito que está sendo calculado no momento. Seus valores estão representados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes c_1 e c_2

Efeitos	c_1	c_2
Queimadura de 1º grau	-39,83	3,0186
Queimadura de 2º grau	-43,14	3,0186
Morte	-36,38	2,56

Fonte: Adaptado de ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

Voltando a equação (26), erf é a função erro de Gauss, de fácil resolução através de simples programas computacionais, e $F_k (-)$ é o fator que relaciona a influência das roupas utilizada pelo indivíduo com a probabilidade do efeito. Este fator varia de 0,14 para roupas de inverno e 0,95 para roupas de verão. Nosso estudo tomará o valor de F_k como sendo 0,80. Desse modo podemos reescrever a equação (26) como:

$$P = \frac{2}{5} \left[1 + erf \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (28)$$

Deve-se atentar que a porcentagem de morte por radiação térmica tem incluso no seu valor as porcentagens de queimaduras de 1º e 2º graus, assim como a porcentagem de queimaduras de 2º grau também tem incluso os valores de queimaduras de 1º grau.

3 METODOLOGIA

Como visto anteriormente, o desenvolvimento de modelos para o auxílio a decisão tornam-se cada vez mais comum entre os analistas, dada a necessidade de personalização requerida a cada problemática. E tendo posse do conhecimento metodológico da matriz *payoff*, da esperança matemática de uma variável, e das equações sobre fluxo de calor e probabilidade dos efeitos do calor irradiado, podemos desenvolver um modelo de apoio à decisão para vazamentos em sistemas de transporte de petróleo e derivados com risco de incêndio.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO À DECISÃO BASEADO NO MÉTODO DE MATRIZ *PAYOFF*

Analisando a linha lógica da matriz *payoff* podemos estabelecer os pontos mais relevantes à sistemas com risco de incêndio:

- A descrição do objeto de estudo é parte essencial para o desenvolvimento da análise e para obter-se uma recomendação satisfatória.
- A formulação da problemática é um dos pontos mais importantes da análise, pois a obtenção de dados e estimativas será condicionada pela caracterização do cenário.
- Devido a escassez de estudos e dados históricos com relação a incidentes com explosão, será necessário realizar estimativas e projeções com os dados e incertezas dispostas até o momento.

Como cada opção de escolha irá apresentar o mesmo risco para o incêndio, visto que nosso método irá trabalhar com a variação das consequências e não das causas, deve-se usar o diagrama lógico do método de matriz *payoff*. Contudo, deve-se atribuir características pertinentes para com sistemas com risco de incêndio. Desse modo, os pontos cruciais do método de matriz *payoff* que precisam ter força no método a ser desenvolvido são:

- Determinação das entradas e incertezas do cenário;
- Atribuição de valores para as possíveis alternativas;
- Cálculo do valor esperado para cada opção de escolha;

Com relação aos sistemas com risco de incêndio, não é incomum realizar decisões, claramente direcionadas a diminuição do risco, onde as variáveis foram parametrizadas financeiramente. Contudo, as projeções de um acidente contemplam elementos de caráter demasiadamente subjetivo, dificultando sua estimativa em termos monetários. Desse modo, o critério de mensuração mais cabível a este sistema de decisão são os efeitos do calor de radiação através da probabilidade de lesões e óbitos, dada a falha no sistema.

Deve-se acentuar que o método de apoio à decisão aqui desenvolvido não almeja representar a realidade em sua perfeição, mas sim retratar o cenário de estudo de forma que seja possível mensurar a quantidade de calor produzida no pior caso possível (quando ocorre o vazamento e uma fonte de calor externa proporciona a ignição do conteúdo vazado) nas condições que possibilitam seu estudo.

Diante destas características, podemos formular uma estrutura lógica baseada no método de matriz *payoff*, assistido por ferramentas matemáticas e equações de cálculo do calor e efeitos gerados pela radiação térmica gerada em um incêndio.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APOIO À DECISÃO

Disposto das características necessárias ao sistema de apoio à decisão almejado, pode-se agora desenvolver as etapas requeridas para otimizar este sistema à vazamentos de petróleo e/ou derivados. Desse modo podemos segregar as etapas lógicas do nosso método de apoio à decisão:

- 1ª Etapa – Cenário e Afirmação da problemática

Esta etapa caracterizasse pela descrição do cenário, enunciação clara do problema e estabelecimento de suposições.

- 2ª Etapa – Entradas e variáveis do sistema

Todas as entradas e variáveis do sistema, relevantes ao analista, devem ser estabelecidas.

- 3ª Etapa – Critério de Escolha

Nesta etapa deve-se usar ou desenvolver um critério para escolha baseado nos dados obtidos.

- 4ª Etapa – Fluxo de calor

Um das unidades de mensuração requeridas para a realização da escolha é a quantidade de fluxo de calor, o qual deve ser calculado para cada possível resultado das escolhas a serem tomadas.

- 5ª Etapa – Probabilidade de lesões e morte

Mediante o fluxo de calor, a unidade de mensuração para o critério estabelecido será a probabilidade de lesões (queimaduras de 1º e 2º graus) e morte, o qual deve ser calculado para cada possível resultado das escolhas a serem tomadas.

- 6ª Etapa – Construção das Matrizes *Payoff*

Após a obtenção das diversas entradas e variáveis do sistema, faz-se possível a construção das matrizes *payoff* da problemática, obtendo-se uma visualização organizada da problemática, com os dados necessários para o cálculo da esperança de cada opção de escolha.

- 7ª Etapa – Esperança das escolhas

Com os valores probabilísticos das lesões e mortes para cada possível alternativa, será usado a ocorrência dos tipos de vazamentos para calcular-se o valor esperado para cada opção de escolha.

- 8ª Etapa – Revisão da análise

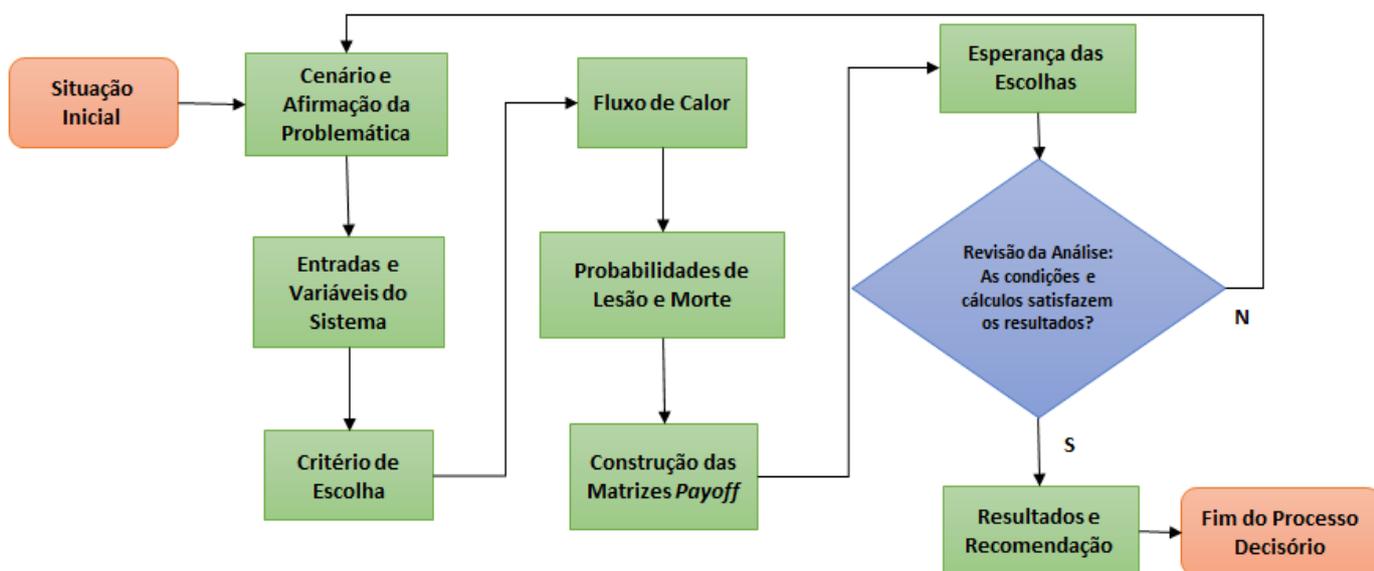
Devido a proximidade da realização de uma escolha, deve-se revisar toda a análise para eliminar qualquer tipo de erro propagado por suposições, estimativas ou cálculos.

- 9ª Etapa – Resultados e recomendação

Através do valor esperado de cada opção de escolha, será recomendada a ação que possuir um valor satisfatório para o critério de escolha adotado.

Com as etapas listadas do método, um fluxograma foi construído com o processo lógico desenvolvido demonstrado na Figura 5.

Figura 5: Fluxograma desenvolvido para o método de análise à decisão



Fonte: O Autor

4 RESULTADOS

Neste capítulo faremos uso do modelo de apoio à decisão desenvolvido anteriormente através de um cenário ambientado em uma instalação de processamento petrolífero, onde o objeto de estudo serão dois segmentos de tubulação, os quais transportam gasolina e querosene. O objetivo aqui é, por meio do conhecimento obtido, fazer uma descrição do problema e diferenciar os possíveis eventos das escolhas palpáveis; estimar as incertezas inerentes aos eventos; realizar o cálculo do fluxo de calor e dos efeitos do calor de radiação para as possíveis alternativas das opções de escolha e calcular a esperança para as opções; revisar a análise e gerar uma recomendação baseada no critério de escolha e pelos dados obtidos. O intuito deste trabalho é a demonstração da linha lógica do processo decisório desenvolvida pelo método de apoio à decisão.

4.1 CENÁRIO E AFIRMAÇÃO DA PROBLEMÁTICA

Nosso cenário de estudo passa-se em uma instalação de processamento de petróleo, a qual está na eminência de realizar manutenções preventivas para trocas de alguns segmentos de suas tubulações que realizam transporte de gasolina.

Figura 6: Refinaria Abreu e Lima



Fonte: Petrobras

4.1.1 Descrição do Cenário

Em primeira mão, o foco para a manutenção serão duas linhas de tubulações de 30 metros de extensão e 80 centímetros de diâmetro, similares a Figura 6, e precisa-se decidir qual segmento trocar primeiro. Os dois segmentos operam em condições de pressão de trabalho similares e transportando o fluido a 3 metros por segundo. Contudo, um dos segmentos transporta gasolina, denominada tubulação A, e o outro segmento, tubulação B, transporta querosene. Suas vizinhanças são consideradas análogas. São de fabricantes diferentes, contudo, tem projetos e designs muito similares. Será estipulado que a proporção de vazamentos da tubulação A para B é de 10 para 11, e os dados de perda de conteúdo (vazão mássica) serão estimados no Apêndice C. Está a cargo do decisor estabelecer qual tubulação, A ou B, deve ser trocada primeiro.

4.1.2 Condições e Afirmação da Problemática

Em um primeiro momento pode-se pensar que não faz diferença na escolha da troca, visto que as tubulações operam nas mesmas condições e são bastante similares. Entretanto, por serem de fabricantes diferentes e possuírem expectativas de falhas por vazamento diferentes, seria prudente realizar uma análise para conhecimento da quantidade esperada de conteúdo vazado dada uma falha, visto que uma maior expectativa de conteúdo vazado resultaria em incidente de maiores proporções. Como determinado na Metodologia, a unidade mensuração será o efeito do calor irradiado através da probabilidade de lesões e morte.

Para esta análise deve-se assumir certas condições para o processo decisório ser coerente. São elas:

- As tubulações serão tratadas em meios abertos, contudo isoladas. Virtualmente, para o cálculo, não existe a presença de outros equipamentos em sua vizinhança.

- Dado um vazamento, a poça formada terá sempre uma geometria cilíndrica e altura constante de 2 centímetros (0,02m), independente de seu diâmetro.

- A escolha tomada será baseada na falha do equipamento em estudo (vazamento da tubulação e ignição do conteúdo vazado) e não na probabilidade de falha do equipamento. Esta condição deve ser estabelecida pelo motivo da falta de dados para uma estimativa de falha do equipamento. Além disso, análises baseadas na probabilidade da falha e não na falha em si, são geralmente mensuradas de forma financeira, o que não é o foco deste estudo, assentado em uma unidade de mensuração somente na falha do equipamento. Contudo, os dados de proporção de vazamentos da equipe de manutenção são muito importantes para caracterizar o critério de escolha do processo decisório (ver 4.3).

- A ignição somente acontecerá após a interrupção do vazamento (Ver Tabela 7 em 4.2.2). Isso se dá pelo fato de que um modelo mais realístico, onde a ignição é provável em algum momento qualquer, possibilitando a existência de mais de um tipo de incêndio, como os tipos *jet fire* e de poça, acarreta em problemas como o fator de vista desconhecido, o qual depende da geometria que as labaredas assumem ao decorrer do incêndio, assim como volumes de vazamentos desconhecidos devido a incerteza da geometria da poça e/ou cone do *jet fire*.

- Os sistemas de detecção e isolamento do cenário serão do tipo B e B, respectivamente (Ver Tabela 5 em 4.2.1).

- Somente serão abordados os vazamentos com diâmetros de furo do tipo pequeno, médio e grande (API RP 581). Vazamentos com diâmetro do tipo de ruptura desconfiguram completamente o cenário de modo a não conseguir a modelagem necessária para o cálculo dos efeitos do calor irradiado.

- As proporções dos tipos de vazamentos apresentadas neste trabalho serão estimadas com dados do relatório da *Concawe* de título *Performance of European cross-country oil pipelines – Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971*.

- Para os efeitos do calor irradiado, o observador será fixado a uma distância de 15 metros da superfície da chama, independente do diâmetro da poça.

Sendo assim, a problemática pode ser estabelecida de forma clara como sendo a escolha para troca preventiva entre os segmentos de tubulação A ou B, que transportam gasolina e querosene, com critério de escolha mensurado através da probabilidade de lesões e mortes.

4.2 ENTRADAS E VARIÁVEIS DO SISTEMA

Nesta etapa do processo decisório, serão levantados os aspectos relevantes para a escolha entre as opções, assim como definir as constantes e incertezas, de expressiva significância, presentes no cenário.

4.2.1 Tipos de Sistemas de Detecção e Isolamento

O maquinário e sistemas que estão propensos às falhas que podem ocasionar em acidentes graves, como no caso de sistemas de transporte e/ou armazenamento de petróleo e/ou derivados, possuem sistemas de detecção e isolamento dada uma falha na estrutura. O API (*American Petroleum Institute*) já lançou diversas RP's (*Recommended Practice*) para uma orientação rígida de como lidar com diversas situações acerca da indústria do petróleo. A API RP 581, Tecnologia de Inspeção Baseada em Riscos, mostra-se de grande suporte para análises de risco, provendo base e auxílio para os diversos aspectos do sistema.

A API RP 581 classifica os tipos de sistemas de detecção e isolamento como demonstra a Tabela 5. Sua classificação será tomada como base para este estudo, sendo eles do tipo B para detecção e B para isolamento.

Tabela 5: Classificação dos sistemas de detecção e isolamento

Tipo de Sistema de Detecção	Classificação de Detecção
Instrumentação especificamente projetada para detectar a perda de material através de mudanças nas condições de operação (e.g. perda de pressão ou fluxo) no sistema.	A
Detetores devidamente colocados para determinar quando o material está fora do invólucro de pressão.	B
Detecção visual, câmeras ou detetores com cobertura marginal.	C
Tipo de Sistema de Isolamento	Classificação de Isolamento
Sistemas de isolamento ou desligamento são diretamente ativados por instrumentos ou detetores, sem alguma intervenção de qualquer operador.	A
Sistemas de isolamento ou desligamento são ativados por operadores na sala de controle ou locações adequadas longe do vazamento.	B
A isolamento depende de válvulas manualmente operadas.	C

Fonte: Adaptado de API RP 581 (2008)

4.2.2 Tipos de Vazamentos e sua Proporção de Ocorrência

Os vazamentos ocorridos em tubulações ou tanques de armazenamento possuem uma devida classificação em relação ao seu tamanho. A API RP 581 os classifica como exibido na Tabela 6:

Tabela 6: Tipos de diâmetro dos vazamentos (API RP 581)

Número do furo do vazamento	Tamanho do furo do vazamento	Variação dos diâmetros do furo (mm)	Tamanho médio do diâmetro do furo, d_n (mm)
1	Pequeno	0 – 6,4	$d_1=6,4$
2	Médio	>6,4 - 51	$d_2=25$
3	Grande	>51 - 152	$d_3=102$
4	Ruptura	>406	$d_4=406$ [min]

Fonte: Adaptado de API RP 581 (2008)

Como anteriormente aludido nas condições do processo de análise, este estudo não levará em conta vazamentos com furos de proporção de ruptura. A ruptura de uma tubulação ou tanque de armazenamento desconfigura sua estrutura de modo aleatório, perdendo-se características essenciais para a modelagem dos cálculos requeridos. Por serem eventos de ocorrência muito baixa, em relação aos outros tipos de furos, optou-se por excluir os vazamentos de ruptura do sistema de apoio a decisão.

Em relação aos tamanhos dos furos, os sistemas de detecção e isolamento possuem os tempos máximos de vazamento para cada tipo de furo descrito na API RP 581, demonstrados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7: Tempo máximo de vazamento por classificação dos sistemas de detecção e isolamento

Classificação do Sistema de Detecção	Classificação do Sistema de Isolamento	Tempo Máximo de Vazamento
A	A	20 minutos para vazamentos de 6,4 mm 10 minutos para vazamentos de 25 mm 5 minutos para vazamentos de 102 mm
A	B	30 minutos para vazamentos de 6,4 mm 20 minutos para vazamentos de 25 mm 10 minutos para vazamentos de 102 mm
A	C	40 minutos para vazamentos de 6,4 mm 30 minutos para vazamentos de 25 mm 20 minutos para vazamentos de 102 mm
B	A ou B	40 minutos para vazamentos de 6,4 mm 30 minutos para vazamentos de 25 mm 20 minutos para vazamentos de 102 mm
B	C	1 hora para vazamentos de 6,4 mm 30 minutos para vazamentos de 25 mm 20 minutos para vazamentos de 102 mm
C	A, B ou C	1 hora para vazamentos de 6,4 mm 40 minutos para vazamentos de 25 mm 20 minutos para vazamentos de 102 mm

Fonte: API RP 581 (2008)

O relatório da *Concawe*, mencionado nas condições da problemática, reportou 741 vazamentos de 1971 a 2016. Desses 741 vazamentos, 347 possuem dados sobre a especificação do furo. Os furos de vazamentos são identificados, pela *Concawe*, como exibidos na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8: Descrição dos tipos de furos (Concaew)

Tipo do Furo	Descrição
Desconhecido	Falha em alguma vedação ou defeito mecânico em algum equipamento ao invés da tubulação em si
<i>Pinhole</i>	Menor que 2 mm x 2 mm
<i>Fissure</i>	2 a 75 mm de comprimento x 10% da largura máxima
<i>Hole</i>	2 a 75 mm de comprimento x 10% da largura mínima
<i>Split</i>	75 a 1000 mm de comprimento x 10% da largura máxima
<i>Rupture</i>	>75 mm de largura x 10% da largura mínima

Fonte: Concaew Report (2016)

Os vazamentos com o tipo de furo classificado como “Desconhecido” somam um total de 15 eventos, os quais não serão contabilizados, restando 332 episódios. Disposto dessa classificação, podemos analisar os dados de distribuição de vazamentos pelo tamanho do furo, como demonstra a Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Número de eventos, causa do vazamento e média de m³ vazado por tipo de furo (Concaew)

Tipo de Furo	Pinhole	Fissura	Furo	Split	Ruptura	Total
Número de Eventos	39	54	125	53	61	332
%	11,75%	16,23%	37,65%	16%	18,37%	100%
Causa do Vazamento						
Mecânica	5	14	13	17	7	56
Operacional	0	1	2	3	4	10
Corrosão	27	11	25	17	5	85
Perigo Natural	1	2	0	2	2	7
Terceiros	6	26	85	14	43	174
Média de m³ Vazados por Evento	48	206	67	233	354	230

Fonte: Adaptado de Concaew Report (2016)

Percebe-se um grande número de eventos relacionados com Terceiros, o qual se encaixam, em uma grande parte, roubos. Isso se dá pelo fato de que esses dados são, em sua grande maioria, providos de tubulações subterrâneas de grande extensão, facilitando este tipo de ação. No nosso cenário, esta conduta não será levada em consideração. Sendo assim, a exclusão desses eventos torna-se necessária para uma melhor aproximação da problemática com o cenário. A Tabela 10 foi construída com os valores corrigidos.

Contudo, antes desta correção, devemos relacionar os tipos de furos listados na *Concawe* e na API RP 581 através da média de m³ vazados por evento de cada tipo de furo. Além da área do furo, que é diretamente proporcional a vazão, o outro fator que contribui para o total de conteúdo vazado é tempo do vazamento. Contudo, não há dados que relacionem o tempo requerido para o vazamento ser contido com o tipo do furo. Sendo assim, iremos assumir que o tempo para detecção e isolamento do vazamento é proporcional ao tamanho do furo, como mostrado nos sistemas apresentados pela API RP 581.

Desse modo, disposto dos tamanhos de furos apresentados na Tabela 8, em comparação com a Tabela 6, podemos assumir que os furos do tipo *pinhole* e *hole* se assemelham ao furo estabelecido como pequeno; os furos do tipo *split* e *fissure* são comparáveis com o furo de tamanho médio; e o furo do tipo *rupture* assemelha-se com o furo do tipo grande. Desse modo, podemos fazer uma correlação da proporção de ocorrência dos tipos de diâmetros dos vazamentos apresentados pela API RP 581, demonstrado na Tabela 11.

Tabela 10: Média de m³ vazado por evento corrido (*Concawe*)

Tipo de Furo	<i>Pinhole</i>	<i>Fissure</i>	<i>Hole</i>	<i>Split</i>	<i>Rupture</i>	Total
Número de Eventos	33	28	40	39	18	158
%	20,88%	17,72%	25,32%	24,70%	11,38%	100%
Média de m ³ Vazados por Evento	40,62	106,81	21,44	171,45	104,46	109,46

Fonte: O Autor

Tabela 11: Proporção de ocorrência do tipo do diâmetro por vazamento (API RP 581)

Diâmetro do Vazamento	Probabilidade de Ocorrência
6,4 mm	(20,88% + 25,32%) = 46,20%
25 mm	(17,72% + 24,70%) = 42,42%
102 mm	11,38%

Fonte: O Autor

Dispostos da média das ocorrências para cada tipo de diâmetro em relação aos vazamentos, devemos estabelecer as ocorrências para as tubulações A e B. Como realizado neste estudo pelo relatório da *Concawe*, esse tipo de dado é

usualmente coletado ao longo dos anos ou obtido empiricamente em amostras através de testes para fadiga mecânica. Como o intuito deste trabalho é a demonstração do método desenvolvido para o apoio à decisão baseado no método de matriz *payoff*, os dados de ocorrência para as tubulações A e B serão gerados de modo aleatório, como exibidos na Tabela 12, contudo mantendo-se a proporção obtida no relatório da *Concawe*.

Tabela 12: Ocorrência dos tipos de diâmetro para as tubulações A e B

Diâmetro do Vazamento	Ocorrência – Tubulação A (%)	Ocorrência – Tubulação B (%)
6,4 mm	49,20	45,9
25 mm	40,42	44,42
102 mm	10,38	9,68

Fonte: O Autor

A média de vazão mássica para cada tipo de furo (API RP 581), proporcionando o cálculo do volume da poça e posteriormente o seu diâmetro (ver Apêndice C).

Tabela 13: Vazão específica para cada tipo de furo - tubulações A e B

Tipo de Furo	Vazão (kg/s) – Tubulação A	Vazão (kg/s) – Tubulação B
6,4 mm	0,25	0,31
25 mm	1,72	1,95
102 mm	14,16	16,38

Fonte: O Autor

4.2.3 Características do Ambiente e do Conteúdo Transportado

O conteúdo transportado nas tubulações são a gasolina (C₄ - C₁₂) e querosene (mistura). As propriedades da gasolina, do querosene e do ar ambiente utilizadas para os cálculos da análise estão listadas na Tabela 14.

Tabela 14: Propriedades da gasolina, querosene e do ambiente

Gasolina			
Composto químico			C ₄ C ₁₂
Temperatura de ebulição	T_b	(K)	333 - 473
Fração de radiação	F_s	-	0,2
Fase líquida (@ 298,15K)			
Densidade ρ_L		(kg/m ³)	723
Capacidade calorífica específica	C_p	(kJ/kg.K)	2,23
Viscosidade cinemática	η_{gas}	(μ Pa.s)	442
Calor de vaporização	ΔH_v	(kJ/kg)	370
Calor de combustão	ΔH_c	(kJ/kg)	44.380
Querosene			
Composto químico			(Mistura)
Temperatura de ebulição	T_b	(K)	333 - 573
Fração de radiação	F_s	-	0,2
Fase líquida (@ 298,15K)			
Densidade ρ_L		(kg/m ³)	810
Capacidade calorífica específica	C_p	(kJ/kg.K)	2,01
Viscosidade cinemática	η_{qrs}	(μ Pa.s)	239
Calor de vaporização	ΔH_v	(kJ/kg)	250
Calor de combustão	ΔH_c	(kJ/kg)	43.200
Ar ambiente			
Velocidade do vento a 10 metros	u_w	(m/s)	5
Densidade do ar	ρ_{ar}	(kg/m ³)	1,184
Viscosidade do ar	η_{ar}	(μ Pa.s)	16,7
Umidade relativa do ar	RH	-	0,7
Temperatura ambiente	T_a	(K)	298,15

Fonte: Adaptado de ASSAEL e KAKOSIMOS (2010)

Visto que a temperatura de ebulição da gasolina varia de 333K e 473K, a temperatura adotada para os cálculos será a mediana destes extremos, 403K. De modo análogo, a temperatura adotada para os cálculos do querosene será de 453K.

Com os dados obtidos e estimados, pode-se construir a base para a matriz *payoff* do nosso estudo de caso, demonstrada na Tabela 15.

Tabela 15: Matriz *payoff* base para o estudo de caso

Tipo de diâmetro	Ocorrência	Fluxo de Calor (kW/m ²)	Probabilidades dos Efeitos do Calor Irradiado		
			Queimaduras de 1º grau (%)	Queimaduras de 2º grau (%)	Mortes (%)
6,4 mm					
25 mm					
102 mm					
Valor Esperado					

Fonte: O Autor

4.3 CRITÉRIO DE ESCOLHA

Com todas as condições estabelecidas e dados obtidos, podemos fixar um critério para a escolha da melhor opção. Sabe-se que o valor a ser mensurado será a probabilidade de queimaduras de 1º grau, 2º grau e morte. São 3 valores a serem comparados, de relevâncias diferentes. Assim sendo, será desenvolvido um sistema de pontuação, demonstrado na Tabela 16, no qual poderemos estabelecer que:

- As opções serão comparadas através de suas probabilidades de lesões e morte singularmente. Entre as duas opções, quando comparadas por suas probabilidades, a opção com menor chance de ocorrência irá receber 1 ponto. Uma opção obterá no máximo 3 pontos, 1 para cada tipo de efeito do calor irradiado.
- Probabilidades muito próximas (com diferença menor ou igual a 0,1%) serão consideradas na comparação como empate.
- No caso das opções de escolha estarem empatadas (cada uma com 1 ponto), a norma para o desempate será a relevância do tipo de efeito do calor irradiado (morte mais relevante que queimaduras de 2º grau e queimaduras de 2º mais relevantes que queimaduras de 1º grau), dando preferência para a opção com maior relevância.

Tabela 16: Relevância e pontuação do critério desenvolvido

Efeitos do Calor Irrradiado	Relevância do Efeito	Pontuação por Probabilidade
Queimaduras de 1º grau	1	1
Queimaduras de 2º grau	2	1
Morte	3	1

Fonte: O Autor

Contudo, faz-se necessário uma condição para comparação das probabilidades de lesões e mortes. A proporção de vazamentos das tubulações A e B é de 10, da tubulação A, para 11, da tubulação B. Sendo assim, um fator de correção para comparação será implementado:

$$f_{cc} = 10/11 = 0,909 \quad (29)$$

$$P_{real\ B} = P_B \cdot f_{cc} = 0,909 P_B \quad (30)$$

À vista dessas condições, a opção que obter uma maior pontuação será a mais segura. Logo, na escolha para a troca de uma das tubulações, A ou B, o segmento que tiver pontuado menos será o mais necessitado para substituição.

4.4 FLUXO DE CALOR

De posse dos dados adquiridos na seção 4.2 e das equações (3) a (23), podemos calcular o fluxo de calor a um observador, primeiramente, posicionado na superfície da chama e, em seguida, distante de 10, 15 e 20 metros da superfície da chama. Após a construção de um algoritmo no Excel para o cálculo do fluxo de calor, exibido na Figura 7, será possível adquirir valores para quaisquer que sejam a distância entre o observador e a superfície da chama. As Tabelas 17 e 18 apresentam os valores para o fluxo de calor a um observador localizado na superfície da chama, distante de 10 metros, 15 metros e 20 metros da superfície da chama para os diâmetros de vazamento pequeno, médio e grande, para gasolina e querosene, respectivamente. Os cálculos do fluxo de calor estão nos apêndice A1 e B1.

Figura 7: Algoritmo desenvolvido para cálculo do fluxo de calor e efeitos do calor irradiado

142		Fator de vista		
143		Pequeno	Médio	Grande
144		0,009273954	0,231483935	0,510545424
145				
146				
147	Tal a			
148		RH	Pw0	c4
149		0,7	2320	2,02
150				
151		Pw		
152		1624		
153				
154			Tal a	
155		Pequeno	Médio	Grande
156		0,752743041	0,762193241	0,793059784
157				
158	Fluxo de calor			
159			q'	
160		Pequeno	Médio	Grande
161		0,198854709	5,269129806	12,72755689
162				

Fonte: O Autor

Tabela 17: Fluxos de calor pra diversas distâncias por tipo de vazamento - gasolina

Diâmetro do Vazamento	Fluxo de Calor (kW/m ²) – superfície	Fluxo de Calor (kW/m ²) 10 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 15 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 20 metros
6,4 mm	40,460	7,946	5,315	3,401
25 mm	41,903	12,603	9,826	8,059
102 mm	43,458	16,930	14,517	12,727

Fonte: O Autor

Tabela 18: Fluxos de calor pra diversas distâncias por tipo de vazamento - querosene

Diâmetro do Vazamento	Fluxo de Calor (kW/m ²) – superfície	Fluxo de Calor (kW/m ²) 10 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 15 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 20 metros
6,4 mm	41,139	8,363	5,715	3,894
25 mm	42,563	12,824	10,112	8,228
102 mm	44,206	17,276	14,830	13,015

Fonte: O Autor

Podemos perceber que os valores de fluxo de calor na superfície da chama são de intensidades próximas. Contudo, ao se afastar mais da superfície percebe-se que o fluxo de calor diminui mais quanto menor o diâmetro da poça. Isso se dá devido ao fator de vista, que é dependente do raio da poça e da altura da chama, e também da transmissividade atmosférica.

4.5 PROBABILIDADE DOS EFEITOS DO CALOR IRRADIADO

O critério de distância entre o observador e a superfície da chama, para o cálculo dos efeitos do calor irradiado, será de 15 metros. Através das equações (24) a (28) e das Tabela 17 e 18, podemos calcular os tempos de exposição ao fluxo de calor e a dose de radiação térmica. Seguem os dados nas Tabelas 19 e 20 com respectivos cálculos nos anexos A2 e B2.

Tabela 19: Distância segura, tempo de exposição e dose de radiação térmica por tipo de vazamento - gasolina

Diâmetro do Vazamento	Distância x_0 (Fluxo de Calor $< 1 \text{ kW/m}^2$) (m)	Tempo de Exposição t_{eff} (s)	Dose de Radiação Térmica $D (\text{kW}^{4/3} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-8/3})$
6,4 mm	23,31	7,077	0,656
25 mm	49,74	13,685	2.880,141
102 mm	111,04	29,011	10.273,463

Fonte: O Autor

Tabela 20: Distância segura, tempo de exposição e dose de radiação térmica por tipo de vazamento - querosene

Diâmetro do Vazamento	Distância x_0 (Fluxo de Calor $< 1 \text{ kW/m}^2$) (m)	Tempo de Exposição t_{eff} (s)	Dose de Radiação Térmica $D (\text{kW}^{4/3} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-8/3})$
6,4 mm	24,89	7,472	0,763
25 mm	51,02	14,005	3.064,427
102 mm	115,05	30,012	10.935,123

Fonte: O Autor

Com esses valores, pode-se calcular os efeitos do calor irradiado (queimaduras de 1º e 2º graus e morte) para cada tipo de vazamento e combustível. Dados exibidos nas Tabelas 21 a 26.

Tabela 21: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro pequeno - gasolina

Tipo do Efeito ao Calor Irradiado	Função Probit $P_r (-)$	Probabilidade do Efeito $P (%)$
Queimadura de 1º	0,603	0
Queimadura de 2º	-2,707	0
Morte	-2,089	0

Fonte: O Autor

Tabela 22: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro médio - gasolina

Tipo do Efeito ao Calor Irradiado	Função Probit $P_r (-)$	Probabilidade do Efeito $P_A (%)$
Queimadura de 1º	5,067	42,127
Queimadura de 2º	1,757	0,047
Morte	1,710	0,038

Fonte: O Autor

Tabela 23: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro grande - gasolina

Tipo do Efeito do Calor Irradiado	Função Probit $P_r (-)$	Probabilidade do Efeito $P_A (%)$
Queimadura de 1º	8,905	79,996
Queimadura de 2º	5,595	57,940
Morte	4,951	38,449

Fonte: O Autor

Tabela 24: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro pequeno - querosene

Tipo do Efeito ao Calor Irradiado	Função Probit $P_r (-)$	Probabilidade do Efeito $P_A (%)$
Queimadura de 1º	1,059	0
Queimadura de 2º	-2,251	0
Morte	-1,703	0

Fonte: O Autor

Tabela 25: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro médio - querosene

Tipo do Efeito ao Calor Irradiado	Função Probit	Probabilidade do Efeito
	P_r (-)	P_B (%)
Queimadura de 1º	5,252	47,956
Queimadura de 2º	1,942	0,089
Morte	1,853	0,066

Fonte: O Autor

Tabela 26: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado - diâmetro grande - querosene

Tipo do Efeito ao Calor Irradiado	Função Probit	Probabilidade do Efeito
	P_r (-)	P_B (%)
Queimadura de 1º	9,094	79,998
Queimadura de 2º	5,784	62,676
Morte	5,111	43,541

Fonte: O Autor

4.6 CONSTRUÇÃO DA MATRIZ PAYOFF

Através dos dados coletados e estimados na seção 4.2, da matriz *payoff* base apresentada na Tabela 15 e dos resultados dos cálculos de fluxo de calor e efeitos do calor irradiado, seções 4.4 e 4.5 respectivamente, podemos realizar a construção das matrizes *payoff*.

Tabela 27: Matriz *payoff* da tubulação A

Tipo de diâmetro	Ocorrência (%)	Fluxo de Calor a 15 metros (kW/m ²)	Probabilidades dos Efeitos do Calor Irradiado		
			Queimaduras de 1º grau (%)	Queimaduras de 2º grau (%)	Mortes (%)
6,4 mm	49,20	5,315	0	0	0
25 mm	40,42	9,826	42,127	0,047	0,038
102 mm	10,38	14,517	79,996	57,940	38,449
Valor Esperado					

Fonte: O Autor

Com o fator de correção apresentado na seção 4.3 de valor 0,909 e dos valores das tabelas 24, 25 e 26, podemos contruir a matriz *payoff* da tubulação B.

Tabela 28: Matriz *payoff* da tubulação B

Tipo de diâmetro	Ocorrência (%)	Fluxo de Calor a 15 metros (kW/m ²)	Probabilidades dos Efeitos do Calor Irrradiado		
			Queimaduras de 1º grau (%)	Queimaduras de 2º grau (%)	Mortes (%)
6,4 mm	45,90	5,715	0	0	0
25 mm	44,42	10,112	43,592	0,080	0,060
102 mm	9,68	14,830	72,718	56,972	39,579
Valor Esperado					

Fonte: O Autor

Observamos que o fator decisivo para a mudança das consequências da ação de troca da tubulação é a ocorrência dos tipos de diâmetro para cada segmento, uma vez que o calor de combustão dos dois combustíveis têm valores muito próximos.

4.7 ESPERANÇA DAS OPÇÕES DE ESCOLHA

Com todas as variáveis calculadas, somente resta calcular a esperança matemática da probabilidade dos efeitos do calor irradiado ao observador para cada opção de escolha através da equação (1) e das Tabelas 27 e 28

Tabela 29: Valor esperado para as probabilidades dos efeitos do calor irradiado - tubulação A

Tipo do Efeito do Calor Irrradiado	Probabilidade do Efeito <i>P</i> (%)
Queimadura de 1º	25,331
Queimadura de 2º	6,033
Morte	4,006

Fonte: O Autor

Tabela 30: Valor esperado para as probabilidades dos efeitos do calor irradiado - tubulação B

Tipo do Efeito do Calor Irradiado	Probabilidade do Efeito <i>P</i> (%)
Queimadura de 1º	26,402
Queimadura de 2º	5,550
Morte	3,858

Fonte: O Autor

4.8 REVISÃO DA ANÁLISE

As condições e cálculos adotados neste estudo satisfazem o escopo e limitações do projeto e apresentam-se de acordo com o esperado.

4.9 RESULTADOS E RECOMENDAÇÃO

Chega-se o momento de efetuar uma recomendação as opções de escolhas presentes na análise. O critério desenvolvido na seção 4.3 será aplicado para cada uma das opções de escolha. Comparando-se cada efeito entre as tubulações A e B, a tubulação a qual possuir uma quantidade de pontos menor que a outra, dentre os três efeitos listados, será a melhor opção de escolha. Sendo assim, temos que:

Tabela 31: Critério de comparabilidade dos efeitos do calor irradiado entre as tubulações A e B

Tipo do Efeito do Calor Irradiado	Comparação da Probabilidade do Efeito <i>P</i> (%)
Queimadura de 1º Grau	$P_A=25,331 < P_B=26,402$
Queimadura de 2º Grau	$P_A=6,033 > P_B=5,550$
Morte	$P_A=4,006 > P_B=3,858$

Fonte: O Autor

Tabela 32: Critério de pontuação dos efeitos do calor irradiado entre as tubulações A e B

Tipo de Efeito do Calor Irradiado	Tubulação A	Tubulação B
Queimadura de 1º Grau	1	0
Queimadura de 2º Grau	0	1
Morte	0	1
Pontuação Total	1	2

Fonte: O Autor

Desse modo, a tubulação B, dada a falha de vazamento e ignição, terá uma expectativa de lesões e óbitos de menor que a tubulação A. Sendo assim, o segmento que deve ser trocado primeiro é a tubulação A.

5 CONCLUSÃO

Os riscos e incertezas de nossas escolhas sempre estarão inerentes as decisões realizadas tanto no nosso cotidiano como em nossa vida profissional. Em ambientes de trabalho com sistemas com risco de explosão por vazamento inerente as atividades, as possíveis decisões a serem tomadas tornam-se cada vez mais amplas e difíceis, devido a necessidade de incorporar um maior número de incertezas e qualquer tipo de variável que possa afetar o resultado esperado.

O método desenvolvido para análise de risco deste trabalho é, em um certo nível simples, contudo, pode alcançar diversos níveis de complexidade, somente dependendo da quantidade e qualidade de informações disponíveis e coletadas nas etapas de descrição do cenário e afirmação da problemática e na etapa de entradas e variáveis do sistema. Nos parâmetros do método proposto, a recomendação, através dos resultados obtidos e do critério de escolha desenvolvido, de priorizar a troca da tubulação A foi satisfatória, mesmo que por uma diferença pequena nos efeitos de queimaduras de 2º grau e mortes. E caso outras variáveis, mais difíceis de quantificar, como qualidade do conteúdo de estudo, o qual pode sofrer variações em suas propriedades, ou até mesmo quantificar a chance de falha e o custo financeiro nas vizinhanças de uma instalação de processamento de petróleo previamente estabelecida, tivessem sido adotadas como critério para formulação, ou até mesmo para enriquecimento das opções de escolha, a opção de escolha poderia ter sido outra.

A já mencionada simplicidade do método está intrinsicamente ligada as suas limitações. A etapa de estabelecimento das condições da problemática são essenciais para a produção de um resultado ao menos factível. O desenvolvimento do método mostrou a voraz necessidade de crescimento teórico e empírico do tema. Aspectos como o fator de vista e até o momento em que se inicia o incêndio são cruciais na modelagem. E visto a falta de modelos que respondam aos cálculos de fluxo de calor e os efeitos do calor irradiado com variável no tempo, faz-se necessário a implementação de condições que, de certo modo, não representam a realidade em sua plenitude.

Contudo, deve-se atentar que mesmo com condições necessárias para modelagem do cenário e certas limitações, o método de apoio à decisão desenvolvido nos traz resultados significativos a problemática estabelecida. A esperança matemática obtida nada mais é do que uma conjectura dos valores de probabilidade dos efeitos calculados para as possibilidades estabelecidas das opções de escolha.

Deste modo, o método de apoio à decisão desenvolvido mostrou-se suficiente para o nível de complexidade do cenário proposto, assim como dentro de suas limitações, podendo ainda envolver problemáticas ainda mais específicas, somente dependendo da disponibilidade de dados que o cliente pode fornecer e que o analista pode estimar, e dos critérios que serão adotados pelo decisor.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Mesmo que resultados satisfatórios tenham sido obtidos, devido a generalidade do método desenvolvido, o modelo acaba tendo dificuldades com problemas mais específicos. Deste modo, podemos listar algumas proposições para trabalhos futuros:

- Desenvolvimento do método aliado a um banco de dados de confiabilidade, reduzindo os erros por estimação e sua propagação;
- Desenvolvimento do modelo da função de risco de equipamentos presentes em sistema com risco de incêndio por vazamento, o qual amplia o foco do estudo reduzindo o escopo do trabalho, contudo, baseando o método a ser desenvolvido através do ciclo de análise de decisão.
- Desenvolvimento do método, baseado no ciclo de decisão de análise, através da mensuração financeira do cenário, necessitando a correlação monetária de todos os aspectos do sistema para com o modelo.
- Obtenção de um modelo para o cálculo do fluxo de calor mais realístico, através do desenvolvimento de um fator de vista mutável, onde a geometria da chama estaria em função do tempo e da combinação de uma ou mais fontes de calor.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **RP 581**: risk-based inspection technology. Washington, D.C: API Publishing Services, 2008.

ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações**: construindo modelos de decisão multicritério. São Paulo, Editora Atlas, 2013.

ASSAEL, Marc J.; KAKOSIMOS, Konstantinos E. **Fires, explosions, and toxic gas dispersions**: effects calculation and risk analysis. Boca Ratón: Taylor And Francis Group, Llc, 2010. 329 p.

AVEN, Terje. **Foundations of risk analysis**: a knowledge and decision-oriented perspective. Stavanger: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (Org.). **Making acute risk decisions**: with chemical process safety applications. New York: CCPS, 1994. 472 p.

DOUMPOS, Michael; ZOPOUNIDIS, Constantin. **Multicriteria analysis in finance**. Chania: Springer, 2014.

ENVIRONMENTAL SCIENCE FOR EUROPEAN REFINING. **Performance of european cross-country oil pipelines**: statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971. Concawe, 2018

GRINSTEAD, Charles M.; SNELL, J. Laurie. **Introduction to probability**. 2. ed. Providence: American Mathematical Society, 1998.

LOPES, Yuri Gama. **Sistema de apoio a decisão multicritério no gerenciamento de riscos em instalações de gasodutos**. 2009. 109 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5161>>. Acesso em: 9 mar. 2018.

MORGAN, M. Granger; HENRION, Max. **Uncertainty**: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

PETROBRAS. **Terminal São Sebastião**. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-sao-sebastiao.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ROY, Bernard. **Multicriteria methodology for decision aiding**: nonconvex optimization and it's applications. Lamsade: Springer-science+business Media, 1996.

APÊNDICE A1

Os anexos do tipo A irão dispor ao leitor os passos dos cálculos do fluxo de calor, das probabilidades dos efeitos do calor irradiado e da esperança das probabilidades para a gasolina, conteúdo de trabalho da tubulação A. O anexo A1 irá demonstrar os cálculos para o fluxo de calor.

Primeiramente, usaremos os dados da Tabela 13 sobre a vazão mássica média para cada tipo de furo e da tabela 6 para o tempo médio do vazamento para cada tipo de furo para podermos calcular o diâmetro da poça através de seu volume. Dessa forma, para o furo pequeno, temos que:

$$V_{pp} = \dot{m} t_{vaz} / \rho_{gas} = 0,25 \times 2400 \times \frac{1}{723}$$

$$V_{pp} = 0,829 \text{ m}^3$$

Visto que o volume ocupado pela poça sempre será um cilindro de altura 0,02m, podemos simplificar a fórmula do volume para encontrar o diâmetro da poça.

$$V_{pp} = \text{área da seção transversal} \times \text{altura}$$

$$V_{pp} = \frac{\pi \times D_{pp}^2}{4} \times h$$

$$d_{pp} = \sqrt{\frac{V_{pp} \times 4}{\pi \times h}}$$

$$d_{pp} = \sqrt{63,7 \times V_{pp}} \quad \rightarrow \quad d_{pp} = 7,270 \text{ m}$$

De modo análogo, obtemos os valores para os diâmetros das poças médias e grandes.

$$d_{pm} = 16,516 \text{ m} \quad , \quad d_{pg} = 38,692 \text{ m}$$

Para obtermos o valor da potência máxima de emissividade da superfície precisamos obter outros três valores. A taxa de queima, o a proporção do tamanho da labareda e do diâmetro da poça e o a velocidade do vento. Sendo assim, primeiramente calculemos a taxa de queima:

$$m' = \frac{C_1 \Delta H_c}{\Delta H_v + C_p (T_b - T_a)}$$

$$m' = \frac{0,001 \times 43.700}{370 + 2,23 \times (403 - 298,15)} \rightarrow m' = 0,072 \frac{kg}{m^2 s}$$

Velocidade do vento para a poça pequena:

$$u_{pp}^* = u_w \times \left(\frac{g \times m' \times d_{pp}}{\rho_{ar}} \right)^{-1/3}$$

$$u_{pp}^* = 5 \times \left(\frac{9,81 \times 0,072 \times 7,270}{1,184} \right)^{-1/3} \rightarrow u_{pp}^* = 3,060 \frac{m}{s}$$

De modo análogo, os valores para as velocidades do vento para as poças média e grande:

$$u_{pm}^* = 2,328 \frac{m}{s} \quad , \quad u_{pg}^* = 1,753 \frac{m}{s}$$

Agora a proporção do tamanho da chama e do diâmetro da poça:

$$\frac{L_{pp}}{D_{pp}} = 10,615 \times \left[\frac{m'}{\rho_{ar} \times \sqrt{g \times d_{pp}}} \right]^{0,305} \times (u_{pp}^*)^{-0,03}$$

$$\frac{L_{pp}}{D_{pp}} = 10,615 \times \left[\frac{0,072}{1,184 \times \sqrt{9,81 \times 7,270}} \right]^{0,305} \times (3,060)^{-0,03} \rightarrow \frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 2,283$$

De modo análogo, os valores para as proporções para poça média e grande da altura da chama e diâmetro da poça:

$$\frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 2,031 \quad , \quad \frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 1,799$$

Agora podemos calcular a potência máxima de emissividade da superfície com os dados obtidos.

$$SEP_{max} = F_s \times \frac{1}{1 + 4 \times (L_{pp}/d_{pp})} \times m' \times \Delta H_c$$

$$SEP_{max,pp} = 0,2 \times \frac{1}{1 + 4 \times (2,283)} \times 0,072 \times 43.700 \rightarrow SEP_{max,pp} = 62,427 \frac{kW}{m^2}$$

De forma análoga, os valores para a potência máxima de emissividade da superfície para as poças média e grande:

$$SEP_{max,pm} = 69,321 \frac{kW}{m^2} \quad , \quad SEP_{max,pg} = 77,172 \frac{kW}{m^2}$$

Com os valores de potência máxima de emissividade da superfície, e do valor da potência de emissividade da fuligem, podemos calcular os valores reais para a potência de emissividade da superfície.

$$SEP_{act,pp} = SEP_{max,pp} \times (1 - s) + SEP_{soot} \times s$$

$$SEP_{act,pp} = 62,427 \times (1 - 0,2) + 20 \times 0,2 \quad , \quad SEP_{act,pp} = 28,485 \frac{kW}{m^2}$$

De modo análogo, os valores reais da potência de emissividade da superfície para as poças média e grande:

$$SEP_{act,pm} = 29,864 \frac{kW}{m^2} \quad , \quad SEP_{act,pg} = 31,434 \frac{kW}{m^2}$$

Agora devemos calcular o fator de vista da superfície da chama, a qual é uma forma cilíndrica inclinada. Em primeira mão, devemos calcular o ângulo de inclinação do cilindro, indicado na figura 3. Para isso devemos encontrar o número de Froude e o número de *Reynolds*.

$$F_{r,pp} = \frac{u_w^2}{g \times D_{pp}} \rightarrow F_{r,pp} = \frac{5^2}{9,81 \times 7,270} \rightarrow F_{r,pp} = 0,350$$

$$Re_{pp} = \frac{u_w \times \rho_{ar} \times D_{pp}}{\eta_{ar}} \rightarrow Re_{pp} = \frac{5 \times 1,184 \times 7,270}{0,0167} \rightarrow Re_{pp} = 2.577,398$$

Agora podemos calcular o valor da razão da tangente do ângulo pelo cosseno do ângulo.

$$\frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 0,666 \times F_{r,pp}^{0,333} \times Re_{pp}^{0,117}$$

$$\frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 0,666 \times 0,350^{0,333} \times 2.577,398^{0,117} \rightarrow \frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 1,177$$

Para o cálculo do valor do ângulo iremos usar algumas identidades geométricas e uma substituição de variáveis para a resolução de uma equação do 2º grau. Sendo assim, temos que:

$$\tan(\theta) = \frac{\text{sen}(\theta)}{\cos(\theta)} \text{ e } \text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$$

$$\frac{\text{sen}(\theta)}{\cos^2(\theta)} = 1,177 \rightarrow \text{sen}(\theta) = 1,177 \times \cos^2(\theta)$$

$$\text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1 \rightarrow (1,177)^2 \times \cos^4(\theta) + \cos^2(\theta) - 1 = 0$$

Substituindo $\cos^2(\theta)$ por x , obtemos uma equação do 2º grau. Somente iremos utilizar a parte positiva da solução desta equação, visto que x é a representação de $\cos^2(\theta)$, o qual só pode gerar valores positivos.

$$(1,177)^2 x^2 + x - 1 = 0$$

Resolvendo a equação para x e atentando-se que $1,177 = \tan(\theta)/\cos(\theta)$, obtemos que:

$$\cos(\theta)_{pp} = 0,749$$

Similarmente, obtemos o cosseno dos ângulos para as poças média e grande, assim como o ângulo em si:

$$\cos(\theta)_{pm} = 0,789 \quad , \quad \cos(\theta)_{pg} = 0,827$$

$$\theta_{pp} = 41,43^\circ \quad , \quad \theta_{pm} = 37,89^\circ \quad , \quad \theta_{pg} = 34,17^\circ$$

Com os valores desses ângulos, poderemos começar a calcular os fatores de vista. Contudo, o fator de vista depende da distância do observador ao centro da poça de incêndio. Sendo assim, usando as equações (9) a (15), iremos listar fatores de vista para distâncias da superfície da chama de 1 centímetro (superfície), 10 metros, 15 metros e 20 metros.

Tabela 33: Fator de vista por distância do observador e tipo de diâmetro - gasolina

Tipo de Diâmetro	Distância X 0,01 m	Distância X 10 m	Distância X 15 m	Distância X 20 m
Pequeno	0,903	0,330	0,229	0,150
Médio	0,892	0,499	0,408	0,340
Grande	0,879	0,638	0,567	0,510

Fonte: O Autor

Finalmente, o último termo necessário para o cálculo do fluxo de calor é a transmissividade atmosférica. Utilizando as equações (22) e (23) obtemos que:

$$\tau_{a_{pp}} = C_4 \times [RH \times P_w^0 \times (X - R)]^{-0,09}$$

$$\tau_{a_{pp}} = 2,02 \times [0,7 \times 2.320 \times (X - 3,635)]^{-0,09}$$

A transmissividade atmosférica também depende da distância do observador a superfície da chama. Como realizado para o fator de vista, a tabela 34 foi construída com seus valores para distâncias da superfície da chama de 1 centímetro (superfície), 10 metros, 15 metros e 20 metros.

Tabela 34: Transmissividade atmosférica por tipo de diâmetro e distância ao observador - gasolina

Tipo de Diâmetro	Distância X 0,01 m	Distância X 10 m	Distância X 15 m	Distância X 20 m
Pequeno	1,572	0,844	0,814	0,793
Médio	1,572	0,844	0,814	0,793
Grande	1,572	0,844	0,814	0,793

Fonte: O Autor

Percebemos que o expoente de -0,09 é um fator muito mais decisivo que as diferenças nos raios das poças pequena, média e grande. Disposto desses valores, podemos obter os valores desejados para o fluxo de calor das poças de gasolina através da equação (3):

$$q' = SEP_{act} \times F_v \times \tau_a$$

Segue a tabela 35 com os valores encontrados por tipo de vazamento e distância.

Tabela 35: Fluxo de calor pelo tipo de diâmetro e distância ao observador - gasolina

Diâmetro do Vazamento	Fluxo de Calor (kW/m ²) – superfície	Fluxo de Calor (kW/m ²) 10 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 15 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 20 metros
Pequeno	40,460	7,946	5,315	3,401
Médio	41,903	12,603	9,826	8,059
Grande	43,458	16,930	14,517	12,727

Fonte: O Autor

APÊNDICE A2

Neste segmento do apêndice A, estão os cálculos para as probabilidades dos efeitos do calor irradiado, lesões e mortes, para o vazamento de gasolina para os tipos de diâmetro pequeno médio e grande, além da esperança matemática para seus valores em relação a tubulação A. Estes cálculos irão adotar um observador fixado a 15 metros de distância da superfície.

Primeiramente precisamos encontrar o tempo de exposição do observador para a poça pequena. Utilizando a equação (25) com os valores de velocidade de escape, tempo de reação e distância do observador até a chama adotados, temos que:

$$t_{eff,pp} = 5 + \frac{(x_0 - 15)}{4}$$

Para encontrarmos x_0 , a distância necessária para que o fluxo de calor recebido pelo observador seja menor ou igual a $1\text{kW}/\text{m}^2$, foi desenvolvido um algoritmo no Excel que, através de entradas manuais, nos devolvesse um valor de fluxo de calor de $1\text{kW}/\text{m}^2$. É o mesmo algoritmo exibido na seção 4.4 deste trabalho.

$$x_{0,pp} = 23,31\text{m} \quad , \quad x_{0,pm} = 49,74\text{m} \quad , \quad x_{0,pg} = 111,04\text{m}$$

Com esses valores, seguem os resultados para o tempo de exposição para as poças pequena, média e grande.

$$t_{eff,pp} = 7,077\text{s} \quad , \quad t_{eff,pm} = 13,685\text{s} \quad , \quad t_{eff,pg} = 29,01\text{s}$$

Com estes valores, utilizando a equação (24) e utilizando os valores encontrados para o fluxo de calor distante de 15 metros da superfície da chama para poça pequena, calculamos a dose térmica de radiação.

$$D_{pp} = t_{eff,pp} \times (q')^{4/3} \quad \rightarrow \quad D_{pp} = 7,077 \times (5,315)^{4/3} \quad \rightarrow \quad D_{pp} = 0,656 \frac{\text{kW}^{4/3} \cdot \text{s}}{\text{m}^{8/3}}$$

De forma similar, obtemos os valores para as poças média e grande.

$$D_{pm} = 2.880,141 \frac{kW^{4/3} \cdot s}{m^{8/3}} \quad , \quad D_{pg} = 10.027,346 \frac{kW^{4/3} \cdot s}{m^{8/3}}$$

Com os valores de dose térmica de radiação, podemos encontrar os valores da função probit P_r , utilizando os valores da tabela (3) para os coeficientes relacionados com o tipo de efeito a ser calculado. Primeiramente, os efeitos de queimadura de 1º grau:

$$P_{r,pp_1} = -39,83 + 3,0186 \times \ln(D) \quad \rightarrow \quad P_{r,pp_1} = 0,603$$

Similarmente, os valores para as poças média e grande:

$$P_{r,pm_1} = 5,067 \quad , \quad P_{r,pg_1} = 8,905$$

Da mesma forma como calculado para a poça pequena, ajustando os valores dos coeficientes c_1 e c_2 e da dose térmica de radiação, obtemos os valores das funções probit P_r para a poça média e grande, para os efeitos de queimaduras de 2º grau e mortes.

$$P_{r,pp_2} = -2,707 \quad , \quad P_{r,pm_2} = 1,757 \quad , \quad P_{r,pg_2} = 5,595$$

$$P_{r,pp_m} = -2,089 \quad , \quad P_{r,pm_m} = 1,710 \quad , \quad P_{r,pg_m} = 4,951$$

Agora iremos calcular a probabilidade de cada efeito do calor irradiado através da equação (#):

$$P_{pp_1} = \frac{2}{5} \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_{r,pp_1} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

De modo similar serão os cálculos para as poças média e grande, para todos os tipos de efeitos do calor irradiado. A tabela A4 a seguir contém seus respectivos valores

Tabela 36: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado por tipo de diâmetro - gasolina

Tipo de Diâmetro	Probabilidade dos Efeitos do Calor Irradiado (%)		
	Queimadura de 1º Grau	Queimadura de 2º Grau	Morte
Pequeno	0	0	0
Médio	42,127	0,047	0,038
Grande	79,996	57,940	38,449

Fonte: O Autor

Agora, faz-se possível o cálculo da esperança matemática da tubulação A em relação as probabilidades dos efeitos do calor irradiado. Para isso, disposto dos valores da Tabela 36, da Tabela 12, com a proporção de ocorrência de cada tipo de furo, e da equação (1) para o cálculo da esperança. Para os efeitos de queimadura de 1º grau temos que:

$$E_{A_1} = \sum_i^n x_i \times P_1$$

$$E_{A_1} = (0 \times 0,4920) + (42,127\% \times 0,4042) + (79,996\% \times 0,1038)$$

$$E_{A_1} = 25,331\%$$

De modo similar, calculamos os valores da esperança para as probabilidades dos efeitos de queimaduras de 2º grau e mortes.

$$E_{A_2} = 6,033\% \quad , \quad E_{A_m} = 4,006\%$$

APÊNDICE B1

Os anexos do tipo B irão dispor ao leitor os passos dos cálculos do fluxo de calor, das probabilidades dos efeitos do calor irradiado e da esperança das probabilidades para o querosene, conteúdo de trabalho da tubulação B. O anexo B1 irá demonstrar os cálculos para o fluxo de calor.

Primeiramente, usaremos os dados da Tabela 13 sobre a vazão mássica média para cada tipo de furo e da tabela 6 para o tempo médio do vazamento para cada tipo de furo para podermos calcular o diâmetro da poça através de seu volume. Dessa forma, para o furo pequeno, temos que:

$$V_{pp} = \dot{m} t_{vaz} / \rho_{qrs} = 0,31 \times 2400 \times \frac{1}{810}$$

$$V_{pp} = 0,918 \text{ m}^3$$

Visto que o volume ocupado pela poça sempre será um cilindro de altura 0,02m, podemos simplificar a fórmula do volume para encontrar o diâmetro da poça.

$$V_{pp} = \text{área da seção transversal} \times \text{altura}$$

$$V_{pp} = \frac{\pi \times d_{pp}^2}{4} \times h$$

$$d_{pp} = \sqrt{\frac{V_{pp} \times 4}{\pi \times h}}$$

$$d_{pp} = \sqrt{63,7 \times V_{pp}} \quad \rightarrow \quad d_{pp} = 7,649 \text{ m}$$

De modo análogo, obtemos os valores para os diâmetros das poças médias e grandes.

$$d_{pm} = 16,614 \text{ m} \quad , \quad D_{pg} = 39,316 \text{ m}$$

Para obtermos o valor da potência máxima de emissividade da superfície precisamos obter outros três valores. A taxa de queima, o a proporção do tamanho da labareda e do diâmetro da poça e o a velocidade do vento. Sendo assim, primeiramente calculemos a taxa de queima:

$$m' = \frac{C_1 \Delta H_c}{\Delta H_v + C_p (T_b - T_a)}$$

$$m' = \frac{0,001 \times 43.200}{250 + 2,01 \times (453 - 298,15)} \rightarrow m' = 0,077 \frac{kg}{m^2 s}$$

Velocidade do vento para a poça pequena:

$$u_{pp}^* = u_w \times \left(\frac{g \times m' \times d_{pp}}{\rho_{ar}} \right)^{-1/3}$$

$$u_{pp}^* = 5 \times \left(\frac{9,81 \times 0,077 \times 7,649}{1,184} \right)^{-1/3} \rightarrow u_{pp}^* = 2,948 \frac{m}{s}$$

De modo análogo, os valores para as velocidades do vento para as poças média e grande:

$$u_{pm}^* = 2,276 \frac{m}{s} \quad , \quad u_{pg}^* = 1,708 \frac{m}{s}$$

Agora a proporção do tamanho da chama e do diâmetro da poça:

$$\frac{L_{pp}}{D_{pp}} = 10,615 \times \left[\frac{m'}{\rho_{ar} \times \sqrt{g \times d_{pp}}} \right]^{0,305} \times (u_{pp}^*)^{-0,03}$$

$$\frac{L_{pp}}{D_{pp}} = 10,615 \times \left[\frac{0,077}{1,184 \times \sqrt{9,81 \times 7,649}} \right]^{0,305} \times (2,948)^{-0,03} \rightarrow \frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 2,311$$

De modo análogo, os valores para as proporções para poça média e grande da altura da chama e diâmetro da poça:

$$\frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 2,069 \quad , \quad \frac{L_{pp}}{d_{pp}} = 1,830$$

Agora podemos calcular a potência máxima de emissividade da superfície com os dados obtidos.

$$SEP_{max} = F_s \times \frac{1}{1 + 4 \times (L_{pp}/d_{pp})} \times m' \times \Delta H_c$$

$$SEP_{max,pp} = 0,2 \times \frac{1}{1 + 4 \times (2,311)} \times 0,077 \times 43.200 \rightarrow SEP_{max,pp} = 64,917 \frac{kW}{m^2}$$

De forma análoga, os valores para a potência máxima de emissividade da superfície para as poças média e grande:

$$SEP_{max,pm} = 71,687 \frac{kW}{m^2} \quad , \quad SEP_{max,pg} = 79,924 \frac{kW}{m^2}$$

Com os valores de potência máxima de emissividade da superfície, e do valor da potência de emissividade da fuligem, podemos calcular os valores reais para a potência de emissividade da superfície.

$$SEP_{act,pp} = SEP_{max,pp} \times (1 - s) + SEP_{soot} \times s$$

$$SEP_{act,pp} = 64,917 \times (1 - 0,2) + 20 \times 0,2 \quad , \quad SEP_{act,pp} = 28,983 \frac{kW}{m^2}$$

De modo análogo, os valores reais da potência de emissividade da superfície para as poças média e grande:

$$SEP_{act,pp} = 30,337 \frac{kW}{m^2} \quad , \quad SEP_{act,pp} = 31,984 \frac{kW}{m^2}$$

Agora devemos calcular o fator de vista da superfície da chama, a qual é uma forma cilíndrica inclinada. Em primeira mão, devemos calcular o ângulo de inclinação do cilindro, indicado na figura #. Para isso devemos encontrar o número de Froude e o número de *Reynolds*.

$$F_{r,pp} = \frac{u_w^2}{g \times d_{pp}} \rightarrow F_{r,pp} = \frac{5^2}{9,81 \times 7,649} \rightarrow F_{r,pp} = 0,333$$

$$Re_{pp} = \frac{u_w \times \rho_{ar} \times D_{pp}}{\eta_{ar}} \rightarrow Re_{pp} = \frac{5 \times 1,184 \times 7,270}{0,0167} \rightarrow Re_{pp} = 2.711,558$$

Agora podemos calcular o valor da razão da tangente do ângulo pelo cosseno do ângulo.

$$\frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 0,666 \times F_{r,pp}^{0,333} \times Re_{pp}^{0,117}$$

$$\frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 0,666 \times 0,333^{0,333} \times 2.711,558^{0,117} \rightarrow \frac{\tan(\theta)_{pp}}{\cos(\theta)_{pp}} = 1,164$$

Para o cálculo do valor do ângulo iremos usar algumas identidades geométricas e uma substituição de variáveis para a resolução de uma equação do 2º grau. Sendo assim, temos que:

$$\tan(\theta) = \frac{\text{sen}(\theta)}{\cos(\theta)} \text{ e } \text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$$

$$\frac{\text{sen}(\theta)}{\cos^2(\theta)} = 1,177 \rightarrow \text{sen}(\theta) = 1,164 \times \cos^2(\theta)$$

$$\text{sen}^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1 \rightarrow (1,164)^2 \times \cos^4(\theta) + \cos^2(\theta) - 1 = 0$$

Substituindo $\cos^2(\theta)$ por x , obtemos uma equação do 2º grau. Somente iremos utilizar a parte positiva da solução desta equação, visto que x é a representação de $\cos^2(\theta)$, o qual só pode gerar valores positivos.

$$(1,164)^2 x^2 + x - 1 = 0$$

Resolvendo a equação para x e atentando-se que $1,164 = \tan(\theta)/\cos(\theta)$, obtemos que:

$$\cos(\theta)_{pp} = 0,752$$

Similarmente, obtemos o cosseno dos ângulos para as poças média e grande, assim como o ângulo em si:

$$\cos(\theta)_{pm} = 0,789 \quad , \quad \cos(\theta)_{pg} = 0,818$$

$$\theta_{pp} = 41,22^\circ \quad , \quad \theta_{pm} = 37,86^\circ \quad , \quad \theta_{pg} = 34,10^\circ$$

Com os valores desses ângulos, poderemos começar a calcular os fatores de vista. Contudo, o fator de vista depende da distância do observador ao centro da poça de incêndio. Sendo assim, usando as equações (9) a (15), iremos listar fatores de vista para distâncias da superfície da chama de 1 centímetro (superfície), 10 metros, 15 metros e 20 metros.

Tabela 37: Fator de vista por distância do observador e tipo de diâmetro - querosene

Tipo de Diâmetro	Distância X 0,01 m	Distância X 10 m	Distância X 15 m	Distância X 20 m
Pequeno	0,903	0,341	0,242	0,169
Médio	0,892	0,500	0,409	0,342
Grande	0,879	0,639	0,569	0,513

Fonte: O Autor

Finalmente, o último termo necessário para o cálculo do fluxo de calor é a transmissividade atmosférica. Utilizando as equações (22) e (23) obtemos que:

$$\tau_{app} = C_4 \times [RH \times P_w^0 \times (X - R)]^{-0,09}$$

$$\tau_{app} = 2,02 \times [0,7 \times 2.320 \times (X - 3,824)]^{-0,09}$$

A transmissividade atmosférica também depende da distância do observador a superfície da chama. Como realizado para o fator de vista, a Tabela 38 foi construída com seus valores para distâncias da superfície da chama de 1 centímetro (superfície), 10 metros, 15 metros e 20 metros.

Tabela 38: Transmissividade atmosférica por distância do observador e tipo de diâmetro - querosene

Tipo de Diâmetro	Distância X 0,01 m	Distância X 10 m	Distância X 15 m	Distância X 20 m
Pequeno	1,571	0,844	0,814	0,793
Médio	1,572	0,844	0,814	0,793
Grande	1,572	0,844	0,814	0,793

Fonte: O Autor

Como observado no apêndice A1, o expoente de -0,09 é um fator muito mais decisivo que as diferenças nos raios das poças pequena, média e grande, resultando em valores para o querosene idênticos ao da gasolina. Isso se dá pela diferença pequena das diferenças dos diâmetros das poças de gasolina e querosene. Disposto desses valores, podemos obter os valores desejados para o fluxo de calor das poças de gasolina através da equação (3):

$$q' = SEP_{act} \times F_v \times \tau_a$$

Segue a Tabela 39 com os valores encontrados por tipo de vazamento e distância.

Tabela 39: Fluxo de calor pelo tipo de diâmetro e distância ao observador - querosene

Diâmetro do Vazamento	Fluxo de Calor (kW/m ²) – superfície	Fluxo de Calor (kW/m ²) 10 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 15 metros	Fluxo de Calor (kW/m ²) 20 metros
Pequeno	41,139	8,363	5,715	3,894
Médio	42,563	12,824	10,112	8,228
Grande	44,206	17,276	14,830	13,015

Fonte: O Autor

APÊNDICE B2

Neste segmento do apêndice B, estão os cálculos para as probabilidades dos efeitos do calor irradiado, lesões e mortes, para o vazamento de querosene para os tipos de diâmetro pequeno médio e grande, além da esperança matemática para seus valores em relação a tubulação B. Estes cálculos irão adotar um observador fixado a 15 metros de distância da superfície.

Primeiramente precisamos encontrar o tempo de exposição do observador para a poça pequena. Utilizando a equação (25) com os valores de velocidade de escape, tempo de reação e distância do observador até a chama adotados, temos que:

$$t_{eff,pp} = 5 + \frac{(x_0 - 15)}{4}$$

Para encontrarmos x_0 , a distância necessária para que o fluxo de calor recebido pelo observador seja menor ou igual a $1\text{kW}/\text{m}^2$, foi desenvolvido um algoritmo no Excel que, através de entradas manuais, nos devolvesse um valor do fluxo de calor de $1\text{kW}/\text{m}^2$. É o mesmo algoritmo exibido na seção 4.4 deste trabalho.

$$x_{0,pp} = 24,89\text{m} \quad , \quad x_{0,pm} = 51,02\text{m} \quad , \quad x_{0,pg} = 115,05\text{m}$$

Com esses valores, seguem os resultados para o tempo de exposição para as poças pequena, média e grande.

$$t_{eff,pp} = 7,472\text{s} \quad , \quad t_{eff,pm} = 14,005\text{s} \quad , \quad t_{eff,pg} = 30,12\text{s}$$

Com estes valores, utilizando a equação (#) e utilizando os valores encontrados para o fluxo de calor distante de 15 metros da superfície da chama para poça pequena, calculamos a dose térmica de radiação.

$$D_{pp} = t_{eff,pp} \times (q')^{4/3} \quad \rightarrow \quad D_{pp} = 7,077 \times (5,715)^{4/3} \quad \rightarrow \quad D_{pp} = 0,747 \frac{\text{kW}^{4/3} \cdot \text{s}}{\text{m}^{8/3}}$$

De forma similar, obtemos os valores para as poças média e grande.

$$D_{pm} = 3.062,427 \frac{kW^{4/3} \cdot s}{m^{8/3}} \quad , \quad D_{pg} = 10.935,123 \frac{kW^{4/3} \cdot s}{m^{8/3}}$$

Com os valores de dose térmica de radiação, podemos encontrar os valores da função probit P_r , utilizando os valores da Tabela 3 para os coeficientes relacionados com o tipo de efeito a ser calculado. Primeiramente, os efeitos de queimadura de 1º grau:

$$P_{r,pp_1} = -39,83 + 3,0186 \times \ln(D) \quad \rightarrow \quad P_{r,pp_1} = 1,059$$

Similarmente, os valores para as poças média e grande:

$$P_{r,pm_1} = 5,252 \quad , \quad P_{r,pg_1} = 9,094$$

Da mesma forma como calculado para a poça pequena, ajustando os valores dos coeficientes c_1 e c_2 e da dose térmica de radiação, obtemos os valores das funções probit P_r para a poça média e grande, para os efeitos de queimaduras de 2º grau e mortes.

$$P_{r,pp_2} = -2,250 \quad , \quad P_{r,pm_2} = 1,942 \quad , \quad P_{r,pg_2} = 5,784$$

$$P_{r,pp_m} = -1,703 \quad , \quad P_{r,pm_m} = 1,853 \quad , \quad P_{r,pg_m} = 5,111$$

Agora iremos calcular a probabilidade de cada efeito do calor irradiado através da equação (#) e da condição proposta no seção 4.3, onde os valores das probabilidades dos efeitos da tubulação B serão multiplicadas por 0,909. Desse modo, temos:

$$P_{pp_1} = 0,909 \times \frac{2}{5} \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_{r,pp_1} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

De modo similar serão os cálculos para as poças média e grande, para todos os tipos de efeitos do calor irradiado. A tabela B4 a seguir contém seus respectivos valores

Tabela 40: Probabilidade dos efeitos do calor irradiado por tipo de diâmetro - querosene

Tipo de Diâmetro	Probabilidade dos Efeitos do Calor Irradiado (%)		
	Queimadura de 1º Grau	Queimadura de 2º Grau	Morte
Pequeno	0	0	0
Médio	43,592	0,080	0,060
Grande	72,718	56,972	39,579

Fonte: O Autor

Agora, faz-se possível o cálculo da esperança matemática da tubulação B em relação as probabilidades dos efeitos do calor irradiado. Para isso, disposto dos valores da Tabela 40, da Tabela 12, com a proporção de ocorrência de cada tipo de furo, e da equação (1) para o cálculo da esperança. Para os efeitos de queimadura de 1º grau temos que:

$$E_{B_1} = \sum_i^n x_i \times P_1$$

$$E_{B_1} = (0 \times 0,4590) + (43,592\% \times 0,4442) + (72,718\% \times 0,0968)$$

$$E_{B_1} = 26,402\%$$

De modo similar, calculamos os valores da esperança para as probabilidades dos efeitos de queimaduras de 2º grau e mortes.

$$E_{B_2} = 5,550\% \quad , \quad E_{B_m} = 3,858\%$$

APÊNDICE C

Neste apêndice será demonstrado os passos tomados para obter-se uma estimativa factível para a vazão mássica para os três tipos de furos presentes na análise, furos pequeno, médio e grande.

Primeiramente, deve-se estabelecer que o vazão mássica é um dado intrinsecamente complexo, dependente das condições de operação do equipamento, da viscosidade do fluido, do valor do coeficiente de descarga, o qual é função da forma do furo, da densidade do fluido, entre outras variáveis. Sendo assim, iremos estimar a vazão mássica para cada tipo de furo utilizando a formula de vazão mássica, com a condição de que a área em questão será a área do furo.

$$\dot{M}_{fpg} = A_{fp} \times v_{fp} \times \rho_{gas}$$

Além disso, a velocidade de escape do fluido no furo, para o vazamento do tipo pequeno, terá uma velocidade mais elevada que a velocidade de transporte do fluido, que é de 3 metros por segundo. Isso se dá devido a relação proporção inversa entre as variáveis de velocidade e área quando compara-se vazões de mesmos valores, que é o caso para a vazão antes do vazamento e depois do vazamento. Toda a massa de fluido na vazão antes do vazamento, deve ser igual a massa de fluido vazada somada com a vazão após o vazamento. E dessa forma, com o aumento do tamanho do furo, tipos médio e grande, ocorrerá uma queda na velocidade de escape, devido a perda de pressão na tubulação. Para o nosso cálculo, o valor da vazão mássica para o furo grande, o maior possível, não deve ultrapassar 1,5% da vazão mássica da tubulação.

Para isso, foram realizadas simulações com valores para a velocidade de escape da gasolina no furo pequeno e seguindo diminuições de 45% a 50% para as velocidades dos furos médio e grande. Sendo assim, utilizando uma velocidade de 10,75 m/s para o furo pequeno, temos que:

$$\dot{M}_{fpg} = \pi \times \frac{d_{fp}^2}{4} \times v_{fp} \times \rho_{gas}$$

$$\dot{M}_{fpg} = 3,14 \times \frac{0,0064^2}{4} \times 10,75 \times 723$$

$$\dot{M}_{fpg} = 0,25 \frac{kg}{s}$$

Fazendo diminuições 45% para as velocidades de escape dos furos médio e grande, temos que:

$$v_{fm} = 4,85 \frac{m}{s} \quad , \quad v_{fg} = 2,40 \frac{m}{s}$$

Dessa forma, suas vazões mássicas serão:

$$\dot{M}_{fmg} = 1,72 \frac{kg}{s} \quad , \quad \dot{M}_{fgg} = 14,16 \frac{kg}{s}$$

O valor de vazão mássica para o maior furo foi de 14,16 kilogramas por segundo. A vazão mássica da tubulação é:

$$\dot{M}_{tg} = \pi \times \frac{d_t^2}{4} \times v_t \times \rho_{gas}$$

$$\dot{M}_{tg} = 3,14 \times \frac{0,8^2}{4} \times 3 \times 723$$

$$\dot{M}_{tg} = 1.089,7 \frac{kg}{s}$$

$$\frac{\dot{M}_{fgg}}{\dot{M}_{tg}} = \frac{14,16}{1.089,7} = 1,35\%$$

O valor está dentro do limite estabelecido.

De modo análogo para o querosene, encontraremos que:

$$\dot{M}_{fpq} = 0,31 \frac{kg}{s} \quad , \quad \dot{M}_{fmq} = 1,95 \frac{kg}{s} \quad , \quad \dot{M}_{fgq} = 16,38 \frac{kg}{s}$$

$$\frac{\dot{M}_{fgq}}{\dot{M}_{tq}} = \frac{16,38}{1.089,7} = 1,5\%$$

O valor está no limite estabelecido.

As condições propostas são estabelecidas pelo o autor no intuito de encontrar valores factíveis ao estudo. Os valores encontrados não são exagerados. Pelo contrário, são conservadores dado o cenário. Desse modo, para o presente estudo, os dados para as vazões mássicas para cada tipo de furo encontrados são críveis no cenário de trabalho.