

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL  
EM SISTEMAS ELÉTRICOS BASEADO NO MAUT**

TESE SUBMETIDA À UFPE  
PARA OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR  
POR

THALLES VITELLI GARCEZ

Orientador: Prof. Adiel Teixeira de Almeida, PhD

RECIFE, MAIO / 2013

Catalogação na fonte

Bibliotecário Marcos Aurélio Soares da Silva, CRB-4 / 1175

G215m	<p>Garcez, Thalles Vitelli. Modelo de avaliação de risco multidimensional em sistemas elétricos baseado no MAUT / Thalles Vitelli Garcez. - Recife: O Autor, 2013. xi, 105 folhas, il., gráf., tabs.</p> <p>Orientador: Profº. Drº. Adiel Teixeira de Almeida. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2013. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia de Produção. 2. Análise de Risco Multidimensional. 3. Câmaras Subterrâneas. 4. Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). 5. Sistema Elétrico – Avaliação. I. Almeida, Adiel Teixeira de (Orientador). II. Título.</p>
658.5 CDD (22. ed.)	UFPE BCTG/2013-146



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DE TESE DE  
DOUTORADO DE

**THALLES VITELLI GARCEZ**

***"MODELO DE AVALIAÇÃO DE RISCO MULTIDIMENSIONAL EM SISTEMAS  
ELÉTRICOS BASEADO NO MAUT"***

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência  
do(a) primeiro(a), considera o candidato **THALLES VITELLI GARCEZ APROVADO**.

Recife, 15 de maio de 2013.

---

Prof. ADIEL TEIXEIRA DE ALMEIDA, PhD (UFPE)

---

Prof. D'ANIELLE COSTA MORAIS, Doutor (UFPE)

---

Profa. ANA PAULA CABRAL SEIXAS COSTA, Doutor (UFPE)

---

Prof. MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, PhD (UFPE)

---

Prof. ANDRÉ MÁRQUES CAVALCANTI, Doutor (UFPE)

## AGRADECIMENTOS

Obrigado a Deus, a Quem devo tudo, por Suas bênçãos, pela oportunidade de concluir mais essa etapa em minha vida.

Sempre serei grato ao meu orientador, Prof. PhD Adiel Teixeira de Almeida pelo suporte e por dividir seu conhecimento comigo durante meu doutorado.

Obrigado à minha família Thais, Hermílio, Júnior e Luana, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em cada etapa dos meus estudos e da minha vida. Também a minha segunda família Urtiga, pelo carinho e acolhida.

Especialmente, à minha querida Marcella Maia, pelo amor, paciência, dedicação, entusiasmo e companheirismo, que sempre me deu força, mesmo nos momentos mais difíceis.

Gostaria de agradecer a todos os amigos que participaram dessa jornada, mesmo à distância, pela convivência enriquecedora e por tornarem minhas horas de estudo mais produtivas e agradáveis.

Sou também profundamente grato a todo corpo de profissionais que compõe o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFPE, desde os professores, a banca da defesa da tese, aos funcionários e colaboradores por contribuírem diretamente na minha formação e pela dedicação em melhorar constantemente o Programa, dando a oportunidade a tantos alunos de estudar em uma pós-graduação reconhecida.

## RESUMO

Embora os sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica sejam mais seguros comparados aos sistemas do tipo aéreo, com aumento do uso de sistemas subterrâneos e o seu envelhecimento, a falta de adequada manutenção e a interferência de outros sistemas subterrâneos próximos, tem causado muitos acidentes em áreas urbanas, pondo assim em risco a vida humana e gerando consequências à comunidade, à companhia distribuidora e às propriedades de terceiros. Normalmente, em abordagens tradicionais de avaliação de risco, o risco é avaliado em apenas uma dimensão, sob a perspectiva de impactos sobre os seres humanos. Como complemento a isso, sob o ponto de vista operacional, financeiro e de gerenciamento de risco, é importante avaliá-lo em outras dimensões, a fim de obter uma avaliação mais realista dos cenários de perigo. Neste contexto, este trabalho explora a avaliação de risco multidimensional de eventos acidentais em câmaras/caixas de sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica. Outro ponto importante a ser considerado em uma “racional” tomada de decisão é a incorporação das preferências do decisor e as incertezas inerentes a este tipo de contexto, especialmente quando o que se quer é avaliar (escolher, classificar ou ordenar) centenas ou milhares de câmaras/caixas subterrâneas. Portanto, este estudo propõe um modelo multicritério de avaliação de risco, baseado na teoria da decisão e teoria da utilidade multiatributo (MAUT), tendo como objetivo a sua utilização como uma ferramenta de tomada de decisão, que pode auxiliar o gerenciamento de risco, planejamento da manutenção ou o desenvolvimento de ações de melhorias (*upgrades*) e modificações do sistema. Foi gerada uma aplicação numérica do modelo demonstrando os possíveis resultados e suas análises. Conclui-se, neste contexto, que uma hierarquia de risco é uma importante ferramenta para a definição de prioridades. Além disso, a análise das razões das diferenças dos valores de risco permitiu ao decisor visualizar o quanto uma alternativa ou um grupo de alternativas possui maior risco do que outra, e, ainda sob a análise intra-critério permitiu ao decisor visualizar em específico qual dimensão de risco deverá ser tratada de forma a reduzir o valor de risco multidimensional comparado às demais alternativas. Desta forma, auxiliou-se ao decisor a fazer uma análise aprofundada da gama de possibilidades sobre quais alternativas podem ser escolhidas de modo a desenvolver ações preventivas e de mitigação.

**Palavras-chaves:** Análise de risco multidimensional, Eventos em câmaras subterrâneas, Sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica, MAUT.

## ABSTRACT

*Although the underground systems of electric power distribution are safer than overhead distribution systems, and with the increasing the distribution network together with its aging, lack of appropriate maintenance and interference from other nearby underground systems, has caused many accidents in urban areas, putting thus in danger the human life, generating consequences to society, distribution company and third parties. Typically, in traditional approaches to risk assessment, the risk is assessed in only one dimension, the perspective of impacts on humans. As a complement to this, from the point of view of operational and risk management, it is important to evaluate the risk in other dimensions in order to obtain a more realistic assessment of the hazard scenarios. In this context, this study explores the multidimensional risk assessment of accidental events in vaults underground of the electric power distribution system. Another important point to be considered in a "rational" decision-making is to incorporate the decision maker's preferences and the uncertainties inherent in this kind of context, especially when what one want is to assess (choose, classify or sort) hundreds or thousands of vaults underground. Therefore, this study proposes a multicriteria model for risk assessment based on Decision Theory and Multiattribute Utility Theory (MAUT), aiming its use as a tool for decision making, which can help the risk management, maintenance management and in the improvement actions (upgrades) system. One numerical application of the model was generated to demonstrating the applicability of the model and its potential outcomes generated. It is concluded, in this context, that a risk hierarchy is an important tool for prioritization. Furthermore, the analysis of the difference of risk allows the decision maker see as an alternative or alternatives set has a greater increase of risk than others, and, also, in the intra-criterion analysis allows to view in which risk dimensions should be treated aiming reduce the value of the multidimensional risk compared to the other alternative. Thus, helping the decision maker to make a thorough examination of the range of possibilities about what alternatives can be chosen to implement preventative and mitigation actions.*

**Key-words:** *Multidimensional Risk Analysis, Manhole Events, Underground Systems of Electric Power Distribution, MAUT*

# SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>VI</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>XII</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Relevância e contribuição do estudo	2
1.2 Objetivos do Trabalho	4
1.2.1 Objetivos Gerais	4
1.2.2 Objetivos Específicos	4
1.3 Estrutura do Trabalho	5
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>6</b>
2.1 Fundamentação Teórica	6
2.1.1 Conceitos em Análise de Riscos	6
2.1.2 Decisão Multicritério e Teoria da Utilidade Multiatributo	9
2.1.3 Teoria das filas	16
2.1.4 Elicitação do conhecimento a priori de especialistas	21
2.2 Revisão Bibliográfica	26
2.2.1 Contextualização	26
2.2.2 Dados sobre ocorrências de incidentes em redes subterrâneas	33
2.2.3 Incidentes nas Redes subterrâneas e identificação dos cenários de perigo	39
2.2.4 Avaliação de risco em câmaras subterrâneas	47
2.2.5 Medidas de prevenção e mitigação	54
2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho	60
<b>3 MODELOS PROPOSTOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO</b>	<b>63</b>
3.1 Avaliação de Risco com Base na Função Utilidade Unidimensional	63
3.1.1 Zona de perigo externa associada ao local de queda da tampa	64
3.1.2 Zona de perigo externa associada à energia incidente gerada pela falha com arco elétrico	67
3.1.3 Função consequência sobre os seres humanos	68
3.2 Modelo de Decisão para Avaliação de Risco Multidimensional com base no MAUT	
74	
3.2.1 Levantamento das dimensões de risco multidimensional	74
3.2.2 Função Probabilidade das consequências	76
3.2.3 Modelo de decisão para avaliação de risco multidimensional e ordenamento	80

3.3	Descrição dos dados de entrada do modelo	81
3.4	Aplicação Numérica	83
3.5	Discussão de Resultados	90
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>95</b>
4.1	Conclusões	95
4.2	Trabalhos Futuros	97
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>99</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – CAMINHOS DO DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE RISCO COM RELAÇÃO AO TEMPO (FONTE: AVEN (2012)) .....	7
FIGURA 2.2 – ESPAÇO CONSEQUÊNCIA PARA DOIS ATRIBUTOS ( $X_1, X_2$ ) (FONTE: ADAPTADO DE KEENEY & RAIFFA, 1976) .....	13
FIGURA 2.3 – ATITUDE DO DECISOR COM RESPEITO AO DECISOR (FONTE: ADAPTADO DE KEENEY & RAIFFA, 1976) .....	14
FIGURA 2.4 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA LOTERIA ( $\hat{x}_1, \hat{x}_2$ ) ~ $[(x'_1, x'_2), p, (x''_1, x''_2), (1-p)]$ .....	15
FIGURA 2.5 – ESPAÇO CONSEQUÊNCIA AVALIADA (ESQUERDA) E LOTERIAS PARA ANÁLISE DA INDEPENDÊNCIA ADITIVA (DIREITA) (FONTE: ADAPTADO DE KEENEY & RAIFFA, 1976) .....	16
FIGURA 2.6 – REPRESENTAÇÃO SIMPLIFICADA DO SISTEMA DE FILAS (FONTE: ADAPTADO DE HILLIER & LIEBERMAN (1980)) .....	17
FIGURA 2.7 – ESTRUTURA DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA SUBTERRÂNEA. (FONTE: LIGHT, 2011A) .....	28
FIGURA 2.8 – DANOS AO PATRIMÔNIO CAUSADO POR TIROS (FONTE: LIGHT, 2008) .....	32
FIGURA 2.9 – DIFICULDADE DE ACESSIBILIDADE PARA SERVIÇOS DE MANOBRA E MANUTENÇÃO, DESVIOS DE TRÂNSITO, ETC. (FONTE: LIGHT, 2008) .....	32
FIGURA 2.10 – CÂMARAS SUBTERRÂNEAS COM ALTA DENSIDADE DE CABOS (ESQUERDA) E FALHAS NO ISOLAMENTO (DIREITA) (FONTE: STONE & WEBSTER, 2001) .....	32
FIGURA 2.11 – ACUMULO DE SUJEIRA, ESGOTO E ALAGAMENTO NAS CÂMARAS SUBTERRÂNEAS (FONTE: LIGHT, 2008; STONE & WEBSTER, 2001) .....	32
FIGURA 2.12 – SOBRECARGA DA REDE LOCAL DEVIDO A LIGAÇÕES DE “GATOS” (FONTE: LIGHT, 2011B) .....	33
FIGURA 2.13 – INTERVENÇÃO DE SISTEMAS DE TERCEIROS NA REDE DA LIGHT (FONTE: RANGEL JÚNIOR, 2011) ..	33
FIGURA 2.14 – MAPA COM A LOCALIZAÇÃO DOS INCIDENTES (EXPLOSÕES) EM BUEIROS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO NO ANO DE 2004 A 2011 (FONTE: ADAPTADO DE GOOGLEMAPS (2011) E O GLOBO (2011)) .....	37
FIGURA 2.15 – ACIDENTE EM UM BUEIRO OCORRIDO EM ABRIL DE 2011 NO BAIRRO DE COPACABANA (DESTAQUE PARA A TAMPA DA CÂMARA SUBTERRÂNEA) (FONTE: ADAPTADO DE GLOBO, 2011) .....	38
FIGURA 2.16 – NÚMERO TOTAL DE EVENTOS (EXPLOSÃO, INCÊNDIO, E FUMAÇA), PERCENTAGEM DO NÚMERO DE EXPLOSÕES SOBRE O TOTAL DE INCIDENTES E RELAÇÃO DO NÚMERO DE EXPLOSÕES EM CÂMARAS SUBTERRÂNEAS COM TAMPA SÓLIDA E TAMPA COM ABERTURAS (FONTE: ADAPTADO DE PSCDC, 2011) .....	39
FIGURA 2.17 – ÁRVORE DE EVENTOS CAUSADO PELA FALHA COM ARCO ELÉTRICO .....	46
FIGURA 2.18 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA, CONSIDERANDO QUE A TAMPA SEJA DESLOCADA (PROJETADA) DURANTE A EXPLOSÃO (ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)) .....	48
FIGURA 2.19 – ALTURA VERTICAL E VELOCIDADE DE SUBIDA DA TAMPA DE FERRO DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA (ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)) .....	48

FIGURA 2.20 – RELAÇÃO DA PRESSÃO (ESQUERDA), VELOCIDADE E ALTURA DA TAMPA (DIREITA) RESULTANTE PARA EVENTOS DE ARCO EM CÂMARA SUBTERRÂNEA PARA DIÂMETROS DIFERENTES DA TAMPA (DC – DIÂMETRO DA TAMPA) (FONTE: ADAPTADO DE WALSH & BLACK, 2005).....	49
FIGURA 2.21 – RELAÇÃO DA PRESSÃO (ESQUERDA), VELOCIDADE E ALTURA DA TAMPA (DIREITA) RESULTANTE PARA EVENTOS DE ARCO EM CÂMARA SUBTERRÂNEA COM VOLUMES INTERNOS PARA DIÂMETROS DIFERENTES DA TAMPA (Vv – VOLUME DA CÂMARA) (FONTE: ADAPTADO DE WALSH & BLACK, 2005)....	50
FIGURA 2.22 – RELAÇÃO DA PRESSÃO (ESQUERDA), VELOCIDADE E ALTURA DA TAMPA (DIREITA) RESULTANTE PARA EVENTOS DE ARCO EM CÂMARA SUBTERRÂNEA COM VOLUMES INTERNOS PARA DIÂMETROS DIFERENTES DA TAMPA (Vv – VOLUME DA CÂMARA) (FONTE: ADAPTADO DE WALSH & BLACK (2005)) ...	50
FIGURA 2.23 – CURVAS DE ENERGIA PARA UM PAINEL/MCC 480V ATERRADO SOLIDAMENTE (FONTE: ADAPTADO DE PARSONS ET AL. (2008)) .....	53
FIGURA 2.24 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO EM UMA EXPLOSÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA, COM OU SEM FIXAÇÃO DA TAMPA (ESQUERDA); E ALTURA E VELOCIDADE DE SUBIDA DA TAMPA DE FERRO DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA (DIREITA) (FONTE: ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)). .....	57
FIGURA 2.25 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO EM UMA EXPLOSÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA, COM PESOS DE TAMPAS DIFERENTES (ESQUERDA); E, ALTURA E VELOCIDADE DE SUBIDA DA TAMPA DE FERRO E UMA TAMPA MAIS LEVE DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO DENTRO DE UMA CÂMARA SUBTERRÂNEA (DIREITA) (FONTE: ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)).....	58
FIGURA 2.26 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO INTERNA DA CÂMARA SUBTERRÂNEA PADRÃO PARA UMA TAMPA SÓLIDA E UMA TAMPA COM 60 POR CENTO DA ÁREA ABERTA DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO (FONTE: ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)).....	58
FIGURA 2.27 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO DENTRO DA CÂMARA PADRÃO PARA TAMPA DE FERRO NÃO AFIXADA E TAMPA MAIS LEVE, VENTILADA E AMARRADA DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO (ESQUERDA); E, ALTURA DE SUBIDA DA TAMPA DE FERRO NÃO AFIXADA E UMA TAMPA DE MATERIAL MAIS LEVE, VENTILADA E AMARRADA DURANTE UMA EXPLOSÃO DE GÁS PADRÃO (DIREITA) (ADAPTADO DE SNODGRASS & BLACK (2005)). .....	59
FIGURA 2.28 – COBERTOR PROTETOR DE JUNÇÕES E CONECTORES (FONTE: HAMEL ET AL. (2005)) .....	60
FIGURA 2.29 – COMO FORMA DE PROTESTO, A REPRESENTAÇÃO DAS TAMPAS DE BUEIROS COMO FOSSEM BOMBAS, OU ALERTAS DE PERIGO DE EXPLOSÃO (FONTE: FIGURA ESQUERDA (TERRA, 2011), CENTRAL (24HORAS, 2011) E DIREITA (EXTRA GLOBO, 2011))......	60
FIGURA 3.1 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RAIOS DA ZONA DE PERIGO DEVIDO O ARREMESSO DA TAMPA DO BUEIRO .....	66
FIGURA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DA TAMPA DO BUEIRO (CÂMARA/CAIXA SUBTERRÂNEA) .....	67
FIGURA 3.3 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO RAIOS DA ZONA DE PERIGO DEVIDO A ENERGIA INCIDENTE DE UM ARCO ELÉTRICO .....	68
FIGURA 3.4 – DIAGRAMA DE CONSEQUÊNCIA SOBRA A DIMENSÃO HUMANA.....	69
FIGURA 3.5 – DIAGRAMA DE CONSEQUÊNCIA SOBRE A DIMENSÃO DE PERTURBAÇÕES NO TRÂNSITO.....	80
FIGURA 3.6 – DIAGRAMA DAS ETAPAS DO MODELO PROPOSTO .....	84

FIGURA 3.7 – MECANISMO DE FORMAÇÃO DE ENGARRAFAMENTO DE VEÍCULOS .....	87
FIGURA 3.8 – ANÁLISE DAS RAZÕES DAS DIFERENÇAS DE RISCOS ENTRE AS CÂMARAS/CAIXAS SUBTERRÂNEAS ANALISADAS .....	92
FIGURA 3.9 – ANÁLISE INTRA-CRITÉRIO DAS DIFERENÇAS DE RISCO DAS ALTERNATIVAS NO TOPO DO ORDENAMENTO EM HIERARQUIA DE RISCO .....	93

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – PERCENTIS DA ELICITAÇÃO DO CONHECIMENTO A PRIORI DO ESPECIALISTA(FONTE: ADAPTADO DE RAIFFA (1968)).....	26
TABELA 2.2 – NÚMERO DE INCIDENTES EM COMPARTIMENTOS SUBTERRÂNEOS (ADAPTADO DE LIGHT, 2011A; STONE & WEBSTER, 2001) .....	34
TABELA 2.3 – DESCRIÇÃO E CONSEQUÊNCIAS DE ACIDENTES OCORRIDOS EM BUEIROS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO DO ANO DE 2004 A 2011 (FONTE: ADAPTADO DE GOOGLEMAPS (2011) E O GLOBO (2011)).....	34
TABELA 2.4 – EXPOENTE DA DISTÂNCIA DEFINIDA PELA TABELA 4 DA NORMA IEEE 1584 (FONTE: IEEE1584 (2002)) .....	51
TABELA 3.1 – PARÂMETROS DE ENTRADA DOS MODELOS PROPOSTOS.....	82
TABELA 3.2 – CARACTERÍSTICAS DAS CÂMARAS/CAIXAS ANALISADAS E SEU ENTORNO EXTERNO .....	85
TABELA 3.3 – CARACTERÍSTICAS DAS CÂMARAS/CAIXAS ANALISADAS E SEU ENTORNO EXTERNO (CONTINUAÇÃO) .....	85
TABELA 3.4 – RAIO DA ZONA DE PERIGO, LOCALIZAÇÃO DA ZONA DE PERIGO E ÁREA DA ZONA DE PERIGO CONSIDERANDO AS CONSEQUÊNCIAS ADVINDAS DA PROJEÇÃO DA TAMPA DA CÂMARA/CAIXA SUBTERRÂNEA .....	86
TABELA 3.5 – RAIO DA ZONA DE PERIGO, LOCALIZAÇÃO DA ZONA DE PERIGO E ÁREA DA ZONA DE PERIGO CONSIDERANDO AS CONSEQUÊNCIAS ADVINDAS DA ENERGIA INCIDENTE DO ARCO ELÉTRICO.....	87
TABELA 3.6 – CARACTERÍSTICAS DOS DISTÚRBIOS NO TRÂNSITO LOCAL DE VEÍCULOS.....	88
TABELA 3.7 – RESULTADO DO ORDENAMENTO DOS RISCOS DA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DOS RISCOS .....	91
TABELA 3.8 – RESULTADO DO ORDENAMENTO DOS RISCOS APÓS MODIFICAÇÃO NO PARÂMETRO DOWNTIME DA ALTERNATIVA $V_3$ .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

A rede de distribuição de energia elétrica é um segmento do sistema elétrico, que é constituído de redes primárias e secundárias. Essas redes podem ser do tipo aéreo ou subterrâneo, sendo esta última, normalmente, com uma infraestrutura mais complexa, requerendo maior investimento inicial e maior dificuldade de detecção e localização de falhas, acessos às redes, desenvolvimento de ações de melhorias (atualizações) do sistema, operação e manutenção de sistemas auxiliares de ventilação, etc.

Desta forma, as redes subterrâneas são somente viáveis em áreas urbanas com média ou alta densidade populacional, ou quando o uso do tipo de rede aérea não é aplicável, ou, ainda, por razões técnicas ou regulamentadoras que é imposto o uso de um sistema subterrâneo.

Em contra partida, as redes subterrâneas possuem diversos benefícios, tais como:

- Maior segurança aos pedestres e população;
- Proteção da rede contra tempestades e fenômenos naturais (intempéries naturais), resultando em um menor número de falhas;
- Menor impacto estético, tendo uma maior Integração com o meio ambiente, pois não há necessidade de podas e pela baixa poluição visual;
- Valorização da região, e, consequentemente, maior valorização dos imóveis;
- Redução da gravidade de acidentes envolvendo veículos;
- Melhora significativa da acessibilidade das Pessoas Portadoras de Necessidades Especiais (PPNEs), devido a ausências de postes.

Apesar da maior segurança, têm ocorrido diversos eventos em câmaras/caixas subterrâneas nas cidades. Por exemplo, em Nova York, centenas de eventos acidentais em bueiros ocorrem todos os anos, tais como incêndios, explosões, fumaças, etc. (Rudin *et al.*, 2010; 2011; 2012). Na cidade do Rio de Janeiro, nos anos de 2010 e 2011, ocorreram cerca de 70 eventos em câmaras/caixas subterrâneas (Globo, 2011; Light, 2011), conforme detalhado na Seção 2.2.2.

Além disso, estes sistemas de distribuição são considerados como uma infraestrutura crítica, o que, de acordo com Apostolakis & Lemon (2005), esses sistemas são complexos, interdependentes e, consequentemente, qualquer interrupção podem causar falhas em cascata, com consequências graves.

Com o envelhecimento da rede, a falta de manutenção adequada e interferências de outros sistemas subterrâneos circunvizinhos (tais como, sistema de esgotamento sanitário ou

---

de distribuição de gás natural, etc.) têm causado diversos acidentes em áreas urbanas, e, assim, colocando em risco à vida humana (Koch & Carpentier, 1992; Walsh & Black, 2002; 2005).

A falha com arco elétrico, que é uma condição perigosa associada à liberação de grande quantidade de energia, e é acreditado ser umas das principais causas de diversos incêndios e explosões em câmaras subterrâneas em um sistema secundário de distribuição da concessionária *Consolidated Edison of New York* (Cultrera & Charytoniuk, 2000).

Koch & Carpentier (1992) observaram que, mesmo em redes secundárias de baixa tensão, onde as falhas com arcos são geralmente consideradas auto extingüíveis, vários arcos elétricos ocorreram causando explosões no sistema subterrâneo da Hydro-Québec, no centro de Montreal. Além disso, Hamel *et al.* (2004) observaram que, apesar de sistemas de proteção estarem instalados, danos consideráveis, ou até mesmo explosões podem ocorrer em um sistema de 347/600V.

Os eventos acidentais podem causar várias consequências e em diferentes perspectivas, tais como, mortes e lesões de pedestres, decorrentes da queda da tampa do bueiro ou pela exposição à energia incidente; sustos à população local; incêndios em locais próximos; distúrbios no tráfego de veículos local; prejuízo à imagem da empresa; perda financeira e operacional; queda nos índices de disponibilidade e confiabilidade do sistema, etc.

## 1.1 Relevância e contribuição do estudo

Diante da crescente pressão por parte da sociedade, em geral, para um maior nível de segurança, o envolvimento de um grande número (centenas, ou até milhares) de câmaras/caixas subterrâneas com particulares características, a ausência ou incompletos dados históricos sobre os modos de falha e eventos acidentais já ocorridos, a raridade da ocorrência destes cenários acidentais, a magnitude de suas consequências e o complexo ambiente circundante inserido na zona de perigo externa torna-se o gerenciamento de risco uma tarefa árdua, complexa e incerta.

Portanto, este estudo possui uma grande relevância à sociedade, ao setor público e às companhias distribuidoras de energia elétrica, uma vez que os impactos causados pelos acidentes podem atingir as três esferas, diretamente ou indiretamente. A importância de avaliar os riscos de forma abrangente e realista gera conhecimento que pode ser aplicado para

auxiliar na escolha de ações preventivas e mitigadoras executadas pela companhia distribuidora.

Como evidenciado em vários estudos, tais como em Alencar & Almeida (2010); Apostolakis & Lemon (2005); Brito & Almeida (2009); Brito *et al.* (2010); Lins & Almeida (2012); Morgan *et al.* (2000); e, Willis *et al.* (2005), uma abordagem de avaliação de risco que utiliza apenas uma única dimensão de risco (considerando somente danos aos seres humanos, como atendida pelas tradicionais metodologias de análises de risco), pode não ser suficientemente abrangente para fazer da forma mais realista e eficiente a avaliação de risco. No entanto, para Brito & Almeida (2009), mesmo que outras consequências não sejam tão importantes como os riscos sobre os seres humanos, eles também demandam atenção substancial dos decisores.

Além disso, uma vez que os recursos disponíveis (monetários, tempo, equipes de trabalho, tecnologia, etc.) das companhias distribuidoras de energia elétrica são limitados e escassos, e a demanda exigida pelos órgãos reguladores dos sistemas de energia elétrica por uma maior disponibilidade e confiabilidade do sistema, faz-se necessário o uso de ferramentas de tomada de decisão que agreguem as consequências e incertezas para que os riscos sejam avaliados em conjunto com a estrutura de preferência da empresa, resolvendo assim o problema de forma mais adequada.

Desta forma, visualiza-se a necessidade de gerar uma hierarquia de risco das diversas câmaras/caixas subterrâneas do sistema de distribuição de energia elétrica. Portanto, como contribuição deste trabalho, propõe-se uma nova forma de avaliação de risco, sob uma visão multidimensional (multicritério), na qual se geram medidas de risco, que podem ser ordenadas com o intuito de gerar uma prioridade na alocação de recursos adicionais de prevenção e mitigação de riscos, tais como: realização de inspeções e manutenções, modificação de projetos com o intuito de aumentar a segurança, desenvolvimento de ações preventivas e mitigadoras, modernização e melhorias dos subsistemas (*upgrade*), etc. Ainda, serão propostas análises mais aprofundadas das medidas de riscos que podem ser geradas pela avaliação das razões das diferenças de riscos, melhor detalhada na Seção 3.5.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

### 1.2.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem o objetivo de propor um modelo de avaliação multicritério de risco multidimensional em câmaras/caixas da rede de distribuição de energia elétrica subterrânea, com o objetivo de auxiliar o decisor na tomada de decisão para alocar recursos adicionais em medidas preventivas e mitigadoras de acordo com os objetivos (estratégias) da empresa, devidamente representado pelas preferências do decisor.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Especificamente, este trabalho se propõe a atingir as seguintes metas:

1. Realizar uma contextualização do problema, apresentando as particularidades dos sistemas de distribuição de energia elétrica subterrânea, identificando suas principais falhas e consequências;
2. Fazer uma breve revisão de cunho conceitual sobre os temas correlatos ao estudo, tais como: avaliação de riscos, apoio multicritério à decisão, teoria da utilidade multiatributo, elicitação do conhecimento *a priori* de especialistas e teoria das filas;
3. Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais estudos na área acerca de incidentes ocasionados em redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica, gerando como resultado uma árvore de eventos com os principais cenários de perigos;
4. Realizar o levantamento das dimensões de riscos a serem consideradas, e determinando as funções de probabilidade de consequências para cada dimensão avaliada;
5. Agregar as consequências e incertezas dos cenários de perigos, somada à estrutura de preferência do decisor sobre o conjunto das consequências esperadas, através da teoria da decisão e da teoria da utilidade.
6. Propor uma metodologia de ordenamento, através do método MAUT, em hierarquia de risco, das diversas câmaras/caixas subterrâneas.
7. Realizar uma aplicação numérica do modelo, em um cenário hipotético, para ilustrar os resultados e interpretações advindas do modelo proposto.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado como segue:

- O Capítulo I, a Introdução, apresentou as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho, juntamente com os objetivos e contribuições aos quais se quer atingir;
- No Capítulo II, desenvolve-se a fundamentação teórica consistente de conceitos de análise de riscos, teoria da decisão e teoria da utilidade multiatributo. Ainda, realiza-se a revisão bibliográfica para a contextualização do problema, sobre o cenário atual e avaliações de risco disponíveis na literatura, entendimento de como se formam os cenários acidentais em câmaras/caixas subterrâneas, gerando, como resultado, uma árvore de eventos, iniciado pela falha com arco elétrico até a formação dos cenários de perigo. Outros pontos são explanados, tais como elicitação do conhecimento *a priori*, teoria das filas que dão aporte teórico à modelagem das consequências;
- No Capítulo III são propostos dois modelos de avaliação de risco. O primeiro sob uma visão de perda humana, e o segundo, de forma complementar, sob uma visão multidimensional do risco. Ainda, desenvolve-se uma aplicação numérica do modelo proposto.
- Por último, no Capítulo IV, serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fundamentação Teórica

A base conceitual utilizada para trabalho é apresentada a seguir e consiste em análise de riscos e teoria da utilidade multiatributo.

#### 2.1.1 Conceitos em Análise de Riscos

Existem na literatura diversas definições para o conceito de risco. Aven (2012) realizou um trabalho, na qual ele analisou o desenvolvimento dos diversos conceitos de risco ao longo dos últimos 15 à 20 anos. Como pode ser visto, alguns conceitos de risco são baseados na probabilidade, chance ou valores esperados, outros em eventos indesejáveis ou perigosos, ou ainda sobre incertezas. Diversos consideram o risco como subjetivo e epistêmico, dependente da avaliação de conhecimento.

Desta forma, resumidamente, Aven (2012) elaborou um sistema de classificação dos conceitos de riscos em nove diferentes categorias, que são:

- 1) Risco = valor esperado (perda) ( $Risk = E$ );
- 2) Risco = Probabilidade de um (indesejável) evento ( $Risk = P$ );
- 3) Risco = Incerteza objetiva ( $Risk = OU$ );
- 4) Risco = Incerteza ( $Risk = U$ );
- 5) Risco = Potencial/possibilidade de uma perda ( $R = PO$ );
- 6) Risco = Probabilidade e consequências/severidade ( $Risk = C \& P$ );
- 7) Risco = Evento ou consequência ( $R = C$ );
- 8) Risco = consequência/dano/severidade + incerteza ( $R = C \& U$ );
- 9) Risco é o efeito da incerteza nos objetivos ( $R = ISO$ ).

De forma complementar, Aven (2012) identificou seis possíveis caminhos do desenvolvimento do conceito de risco com relação ao tempo, conforme mostrada na Figura 2.1.

Atualmente, de acordo com Aven (2012), a perspectiva de definição (conceito) “mais adequada” de risco envolve a determinação de consequências e incertezas ( $R = C \& U$ ), que pode ser descrito pelos seguintes fatores ( $C', Q, K$ ), na qual  $C'$  é a especificação de

eventos/consequências  $C$ ,  $Q$  é a medida de incertezas  $U$ , e  $K$  é o conhecimento *background* na qual  $Q$  é baseado. Isto é, esse conceito exige a identificação de um conjunto de eventos de interesse, que caracterizam a consequência ( $c$ ), conjuntamente com uma medida de incerteza ( $U$ ), na qual pode ser descrito como uma probabilidade, ou outras representações de incertezas, como a probabilidade imprecisa (em intervalos), ou a probabilidade *fuzzy*, etc.

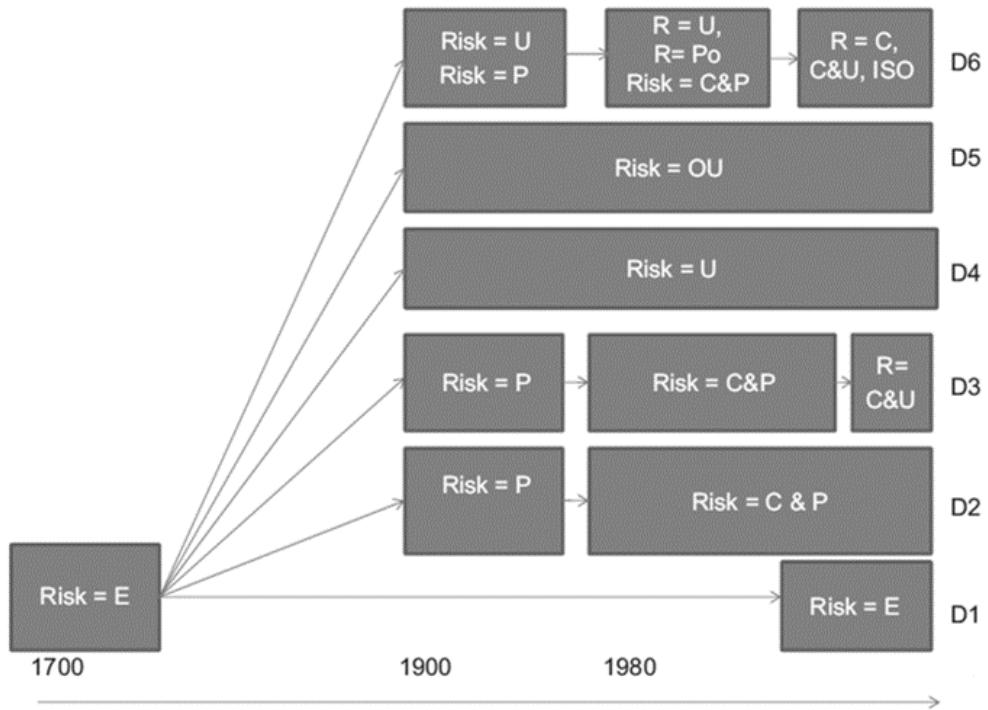


Figura 2.1 – Caminhos do desenvolvimento do conceito de risco com relação ao tempo (Fonte: Aven (2012))

Sob a visão da tomada de decisão, para Souza (2005, p. 28): “uma boa decisão deve ser uma consequência lógica daquilo que se quer, daquilo que se sabe e daquilo que se pode fazer”. De tal modo que o decisor escolha uma ação de maneira a tornar as consequências as mais favoráveis possíveis para ele.

A Teoria da Decisão é a formalização matemática desse paradigma. Ela permite a tomada de decisões racionais em situações de incerteza. A teoria baseia-se em hipóteses exaustivas sobre os estados do mundo (cenários de perigos), de experiências relativas a essas hipóteses, de um conjunto de ações permissivas e conjunto das consequências (perda ou ganho) decorrentes da execução dessas ações. Segundo Berger (1985) e Souza (2005), a teoria da decisão envolve os seguintes aspectos:

- Análise das informações passadas e presentes do sistema em estudo, com base nas informações objetivas e/ou subjetivas disponíveis;
- Elicitação das distribuições de probabilidade que modelem as incertezas;
- Elaboração de um modelo matemático que descreve o sistema e seu nível de revisão a um nível de precisão requisitada;
- Elicitação de preferências e valores dos decisores quanto à problemática;
- Identificação ou concepção das alternativas de ação que direcionam aos objetivos desejados;
- Combinação lógica matemática das alternativas de ação, das utilidades e das probabilidades com o modelo matemático do sistema, objetivando identificar o melhor curso de ação para o decisor;
- Execução da ação escolhida na etapa anterior;
- Reiteração ao primeiro passo e reinício do processo para correção de erros e distorções quanto aos dados, probabilidades, utilidades e alternativas de ação.

Pela Teoria da Decisão, a função perda pode ser definida como o negativo da função utilidade da consequência esperada (Berger, 1985), expressa por:

$$[L(c) = -u(c)] \quad (2.1)$$

Pode-se considerar que as consequências são resultados de uma dada dimensão do impacto acidental, na qual podem ser estimadas através de uma função distribuição de probabilidade  $P(c|\theta, V_q)$ , onde  $\theta$  são os estados da natureza (cenários de perigo);  $c$  é a consequência; e,  $V_q$  é a câmara/caixa subterrânea analisada (em inglês, *underground vault*).

A função utilidade,  $u(c)$ , é definida numa escala intervalar entre os extremos  $[0;1]$ , na qual o valor “0” está associado a “menos preferida” consequência e o valor “1” está associado “mais preferida” consequência (sem danos), que é estimada de acordo com o domínio das consequências (Keeney & Raiffa, 1976).

Então, a função utilidade pode ser calculada por:

$$u(\theta, V_q) = \int_c u(c) P(c|\theta, V_q) dc \quad (2.2)$$

Uma vez tendo o conhecimento sobre a distribuição de probabilidade *a priori* dos estados da natureza,  $\pi_{V_q}(\theta)$ , que dependerá das características/condições de cada câmara/caixa subterrânea analisada, tais como: tensão do barramento, intensidade da corrente

de falha, condições de conservação e manutenção do sistema, etc.; e, baseado na similaridade do estudo realizado por Brito & Almeida (2009), pode-se calcular o risco associado a cada câmara subterrânea, utilizando a perspectiva de risco como consequência/dano/severidade mais a incerteza ( $R = C \& U$ ), como segue:

$$r(V_q) = \sum_{\theta} \left( \pi_{V_q}(\theta) \left( - \int_c u(c) P(c|\theta, V_q) dc \right) \right) + (-1) \pi_{V_q}(\theta_N) \quad (2.3)$$

onde o estado da natureza  $\theta_N$  representa o cenário de normalidade do sistema, na qual não existem consequências (justificando, assim, o valor da função perda igual a  $-1$ ), isto é, a operação de distribuição de energia é normal, sem a ocorrência de nenhum cenário acidental. Esses valores de riscos encontram-se no intervalo  $[-1;0]$ , onde o valor “ $-1$ ” está relacionado ao menor risco e o valor “ $0$ ” com o maior risco.

Desta forma, o conceito de risco utilizado, baseado na Teoria da Decisão, avalia as consequências ( $c$ ) dos cenários de perigo ( $\theta$ ), e combina ambas as incertezas associadas com: (i) as consequências ( $P(c|\theta, V_q)$ ), e (ii) os cenários de perigos ( $\pi_{V_q}(\theta)$ ).

Em adição, a medida de risco utilizada considera a estrutura de preferência do decisor no conjunto das consequências esperadas, através da função utilidade  $u(c)$ , e assim, representa a “desejabilidade” que o decisor tem sobre a perda dos bens (neste específico caso, as consequências da ocorrência de um cenário acidental) e permite uma avaliação probabilística das consequências sob incerteza.

## 2.1.2 Decisão Multicritério e Teoria da Utilidade Multiatributo

### 2.1.2.1 Decisão Multicritério

A tomada de decisão depende da natureza do problema, da política adotada pelo decisor e do objetivo global da decisão. A natureza do problema é definida pelos tipos de problemáticas. Para Roy (1996), podem se destacar as problemáticas de escolha ( $P\alpha$ ), de classificação ( $P\beta$ ), de ordenamento ( $P\gamma$ ) e de descrição ( $P\delta$ ).

Em circunstâncias simples de decisão, o processo de identificação de objetivos e critérios podem sozinhos fornecer informações suficientes para os tomadores de decisão. No entanto, quando um nível de detalhamento é mais amplo (múltiplos atributos e com grande

quantidade de alternativas) e complexo, as metodologias de auxílio à tomada de decisão multicritério oferecem uma série de formas de agregação de dados e informações sobre os diversos critérios para fornecer sugestões de decisão sob o conjunto das alternativas analisadas.

Os problemas de decisão podem ser classificados como problemas discretos ou contínuos. No problema contínuo considera-se um número infinito de alternativas. Neste caso, o espaço de decisão é representado pela região de soluções viáveis, na qual qualquer ponto pertencente a esta região corresponde a uma alternativa específica.

Os métodos de tomada de decisão multicritérios pertencem à família de métodos não-monetários de avaliação (Munda, 1995). Na literatura, termos similares são usados para representar este tipo de “auxílio” à tomada de decisão: na Europa usa-se o termo MCDA (*Multiple Criteria Decision Aid*) (Roy, 1996; Vincke, 1992) e na América do Norte é amplamente usado o termo MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*).

MCDM é um conjunto de métodos de pesquisa operacional que lida com problemas de decisão na presença de múltiplos objetivos (normalmente conflitantes entre si), cujo principal finalidade é transformar o problema mais claro para o decisor (Belton & Stewart, 2002; Vincke, 1992).

Para Keeney & Raiffa (1976), o principal objetivo do MCDM é auxiliar o decisor na tomada de decisão, que pode ser definida como a escolha do “melhor” conjunto finito de alternativas a partir de um conjunto de alternativas possíveis, sob a presença de múltiplos (dois ou mais) critérios (atributos), que normalmente, podem ser conflitantes.

O uso de metodologias MCDM permite ao decisor sentir-se que todos os critérios importantes, para ele, foram devidamente contabilizados, dando-o mais confiança na tomada de decisão, o que deve ajudar a reduzir a possibilidade de arrependimento pós-decisão (Belton & Stewart, 2002). Além do mais, a transparência do processo de decisão é importante para a aceitação da decisão.

Idealmente, os métodos MCDM auxiliam os decisores a compreender e identificar os critérios fundamentais no problema de decisão e evitar tomar decisões importantes somente pelo hábito (Chen *et al.*, 2008).

Entretanto, uma premissa básica para o uso de MCDM é que se espera que os decisores tenham comportamento coerente e racional com a sua estrutura de preferência, ou seja, que os decisores não tomem decisões que se contradizem umas com as outras (Keeney & Raiffa, 1976).

De uma forma geral, as metodologias MCDM seguem os seguintes procedimentos comuns (Keeney & Raiffa, 1976):

1. Definição e estruturação do problema;
2. Determinação de um conjunto viável de alternativas (discreto ou contínuo);
3. Determinação de um conjunto de critérios (atributos), que refletem as múltiplas preocupações e objetivos do decisor;
4. Estimação do conjunto consequência para cada alternativa em cada critério formando a matriz de decisão;
5. Especificação (elicitação) da estrutura de preferência do decisor;
6. Agregação (processamento) dos dados da matriz de decisão com o objetivo de avaliar as alternativas;
7. Realizar a análise de sensibilidade com o objetivo de suprir as imprecisões, incertezas e inexatidão dos resultados;
8. Indicar uma final recomendação da tomada de decisão aos olhos do decisor.

A lógica das metodologias de agregação de múltiplos critérios pode ser compensatória ou não entre os critérios. Na abordagem compensatória há um equilíbrio de desempenho entre os critérios. Deste modo, um desempenho ruim num critério pode ser compensado por um excelente desempenho em outros critérios.

No entanto, a abordagem não compensatória está relacionada com a ideia de *Condorcet*, na qual constrói uma relação de preferência global. Ele consiste em definir o que se entende por "*A é mais importante (preferível) a B*" ( $A > B$ ), obtendo do decisor informações sobre a importância relativa de alguns subconjuntos de alternativas, e, consequentemente, formando a estrutura de preferência do decisor (Vansnick, 1986).

Nas abordagens compensatórias, os "pesos" são chamados de constantes de escala. Eles são dependes das escalas da matriz de consequência, e correspondem ao valor das taxas de substituição, assim, eles não caracterizam a importância intrínseca relativa dos atributos. Já na abordagem não-compensatória, a interpretação dos pesos é simplesmente uma medida da importância relativa dos atributos envolvidos (Rogers & Bruen, 1998).

Neste contexto, como uma metodologia multicritério compensatória, destaca-se a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), que será mais bem detalhado na próxima seção.

### 2.1.2.2 Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)

A Teoria da Utilidade Multiatributo (em inglês, *MultiAttribute Utility Theory – MAUT*) é derivada dos conceitos da Teoria da Utilidade e da Teoria da Decisão (Keeney & Raiffa, 1976).

No MAUT encontram-se os fatores básicos tratados pela teoria da decisão, tais como: os estado da natureza ( $\theta$ ), ações (alternativas) que o decisor pode adotar ( $a$ ), consequências ( $c$ ), que podem ser estimadas através das funções probabilidade da consequência. Ela também trata de incertezas inerentes aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento *a priori* de especialistas (Almeida, 2011, 2013).

Almeida (2011, 2013) destaca que nos problemas que envolvem uma modelagem probabilística, o tratamento das incertezas está inserido dentro da estrutura axiomática do MAUT, que permite, assim, uma abordagem mais consistente para problemas multicritérios de decisão sob incerteza.

O MAUT permite lidar com problemáticas de ordenamento. Os detalhes do processo de avaliação da função de utilidade multiatributo podem ser encontrados em Keeney & Raiffa (1976). Segundo Keeney & Raiffa (1976), MAUT pode ser resumido em cinco principais etapas:

- i. Introdução da terminologia e da ideia;
- ii. Identificação dos pressupostos relevantes de independência;
- iii. Avaliação das funções de utilidade condicionalmente;
- iv. Avaliação das constantes de escala, e;
- v. Verificação de consistência dos resultados encontrados.

A função utilidade multiatributo  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$  obtém um índice que combina os diversos atributos  $X_1, X_2, \dots, X_n$  em um índice de valor, na qual é definida sobre o espaço de consequência, e, necessariamente, tem que atender às propriedades da teoria da utilidade.

Pode-se representar o espaço consequência conforme mostrado na Figura 2.2 (como forma de ilustração, no presente texto será considerado somente dois atributos  $X_1$  e  $X_2$ , podendo ser aplicado igualmente para mais de dois atributos). Os valores de  $x_1^*$  e  $x_2^*$  representam os valores mais desejáveis para cada atributo, ou seja,  $u(x_1^*, x_2^*) = 1$ , enquanto os valores de  $x_1^0$  e  $x_2^0$  representam os valores menos desejáveis  $u(x_1^0, x_2^0) = 0$ , segundo a estrutura de preferência do decisor.

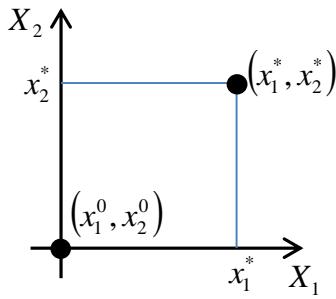


Figura 2.2 – Espaço consequência para dois atributos  $(X_1, X_2)$  (Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa, 1976)

Dado  $P$ , ser um conjunto convexo de uma distribuição de probabilidade simples ou loterias  $\{p, q, r, \dots\}$ , em um conjunto não-vazio  $X$  de resultados. Para as loterias  $p, q, r$  e para todo  $0 < \lambda < 1$ , os axiomas da utilidade esperada são (Keeney & Raiffa, 1976):

1. (Ordenamento): a relação de preferência forma uma ordem fraca, que está associada a relações de preferência fraca e indiferença, então:
  - a. A relação de preferência estrita ( $\succ$ ) é transitiva, ou seja, se  $x \succ y$  e  $y \succ z$ , então  $x \succ z$ ;
  - b. A relação de indiferença ( $\sim$ ) é transitiva, reflexiva ( $x \sim x$  para todo  $x$ ); e simétrica ( $x \sim y$  implica  $y \sim x$ );
  - c. Exatamente uma das relações  $x \succ y$ ,  $y \succ x$  ou  $x \sim y$  é válida para o par de alternativas  $x$  e  $y$ ;
  - d. A relação de preferência fraca ( $\preceq$ ) é transitiva e completa (para um par  $x$  e  $y$ , ou  $x \preceq y$  ou  $y \preceq x$ ).
2. (Independência): se  $p \succ q$  então  $(\lambda p + (1-\lambda)r) \succ (\lambda q + (1-\lambda)r)$  para todo  $r$  em  $P$ ;
3. (Continuidade): se  $p \succ q \succ r$  então existe algum valor de  $\alpha$  e  $\beta$  (sendo  $0 < \alpha < 1$  e  $0 < \beta < 1$ ) tal que  $\alpha p + (1-\alpha)r \succ q \succ \beta p + (1-\beta)r$

Segundo os conceitos de von Neumann-Morgenstern, a utilidade esperada assegura os axiomas mencionados anteriormente, se e somente, existir uma função  $u$  tal que para todo  $p, q$  em  $P$ ,  $p \succ q$  se e somente se (Keeney & Raiffa, 1976):

$$\sum_{x \in X} p(x)u(x) \geq \sum_{x \in X} q(x)u(x) \quad (2.4)$$

Desta forma, segundo Keeney & Raiffa (1976), o modelo de utilidade esperada de von Neumann-Morgenstern pode também ser usado para caracterizar uma atitude de risco de um indivíduo, ou seja, implica-se na adopção de risco sob forma de loterias simples (conforme mostrado na Figura 2.4).

Portanto, caso a função utilidade do indivíduo é côncava ( $u[E(\tilde{x})] > E[u(\tilde{x})]$ ), linear ( $u[E(\tilde{x})] = E[u(\tilde{x})]$ ) ou convexa ( $u[E(\tilde{x})] < E[u(\tilde{x})]$ ), então o decisor é avesso ao risco, neutro ao risco ou propenso ao risco, respectivamente (vide Figura 2.3).

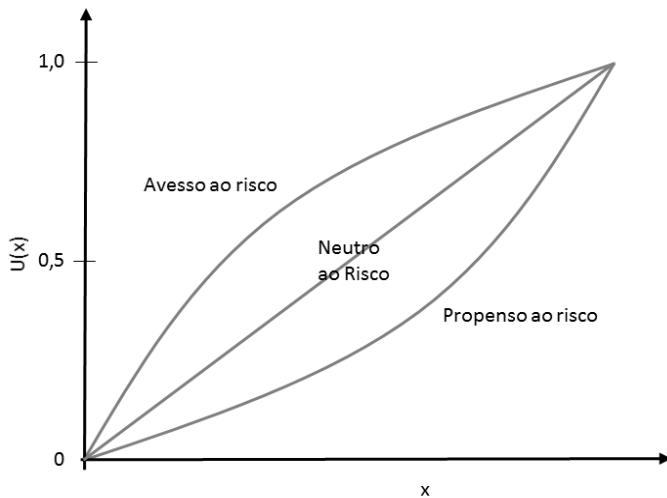


Figura 2.3 – Atitude do decisor com respeito ao decisor (Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa, 1976)

A loteria indicada por  $[(x'_1, x'_2), p, (x''_1, x''_2), (1-p)]$  (Figura 2.4), permite ao decisor determinar as consequências de maior ou menor preferência com determinada probabilidade  $p$  por uma consequência certa  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$ , chamada de opção de certeza ou “equivalente certo”, desta forma, o decisor ficará indeciso entre as consequências  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2)$  e a loteria  $[(x'_1, x'_2), p, (x''_1, x''_2), (1-p)]$ .

Dentro da estrutura de preferência do decisor, pode-se ter as características de independência em preferência. Um atributo  $X_i$  é dito ser independente em utilidade dos demais atributos se as preferências sobre as loterias em diferentes níveis de  $X_i$  não dependam de um nível fixo nos atributos restantes, isto é, se as escolhas do decisor para diversas loterias  $\{(x'_1, x'_2, x_3), p, (x''_1, x''_2, x_3), (1-p)\}$  não dependam de valores comuns do um terceiro atributo ( $x_3$ ), então, os atributos  $X_1, X_2$  serão independentes em utilidade do atributo  $X_3$ . Os

atributos  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são mutualmente independentes em utilidade se todos os subconjuntos desses atributos são independentes em utilidade de seus subconjuntos complementares.

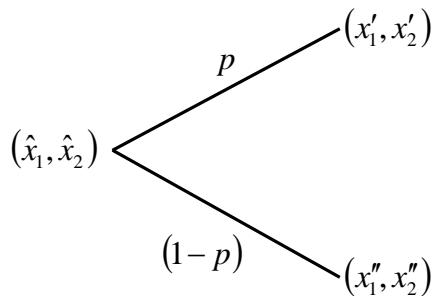


Figura 2.4 – Representação gráfica de uma loteria  $(\hat{x}_1, \hat{x}_2) \sim [(x'_1, x'_2), p, (x''_1, x''_2), (1-p)]$

Para Figueira *et al.* (2005), quando um conjunto de atributos  $X = \prod_{i=1}^n X_i$ , sob a perspectiva do modelo de utilidade de von Neumann-Morgenstern, e, ainda, as preferências do decisor são consistentes com as condições de independência em utilidade, então  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$  pode ser decomposto em relações aditivas, multiplicativas ou outra estrutura bem determinada com o objetivo de simplificar a avaliação das mesmas.

A função multiatributo  $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$  pode ter a forma aditiva, quando a condição de marginalidade de preferência é verificada, na qual as preferências do decisor por qualquer loterias  $p, q \in P$  devam depender apenas das probabilidades marginais dos valores dos atributos, e não de suas distribuições de probabilidades conjuntas, então o decisor deve ser indiferente entre duas loterias como mostrado na Figura 2.5, e para todas outras permutações de valores de atributos que mantém a mesma probabilidade marginal para cada.

Dessa forma, pode-se expressar a utilidade multiatributo na forma aditiva, se somente se, os atributos  $X_1, X_2, \dots, X_n$  são mutualmente independentes em utilidades e é constatada a independência aditiva entre os atributos, então:

$$u = \sum_{i=1}^n k_i u_i(x_i) \quad (2.5)$$

onde  $u_i$  são funções utilidades unidimensionais  $[0,1]$ ; e,  $k_i$  são constantes de escala  $[0,1]$ ,

sendo  $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ .

As constantes de escala correspondem à utilidade do ponto, na qual se tem a melhor condição para aquele atributo e pior para os demais (Keeney & Raiffa, 1976), ou seja,  $k_1 = u(x_1^*, x_2^0)$  e  $k_2 = u(x_1^0, x_2^*)$  (Similarmente ocorre quando se tem mais de dois atributos).

Segundo Almeida (2011, 2013), normalmente tem-se o equívoco de determinar os valores das constantes de escala como grau de importância dos atributos. De fato, as constantes de escala trazem alguma informação sobre a importância entre atributos, mas apenas em parte. As constantes de escala estão associadas à taxa de substituição, que traduz a ideia de compensação de ganho de um critério, quando se perde em outro. Consequentemente, elas dependem diretamente da faixa de valores considerados no espaço de consequência.

Uma forma de estimar as constantes de escala é através dos procedimentos de *trade-off* dos valores de consequências definidos em Keeney & Raiffa (1976).

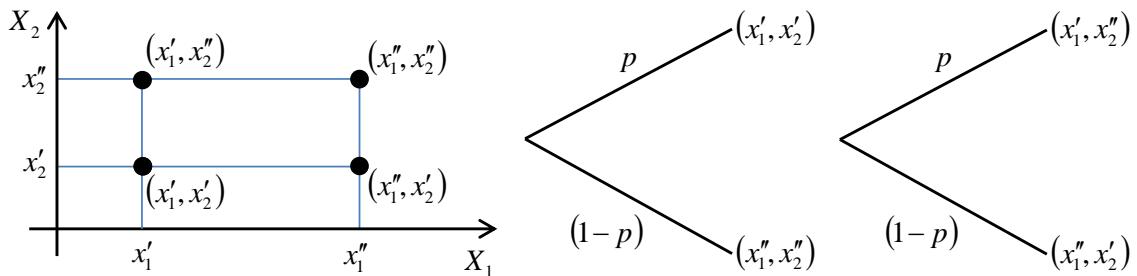


Figura 2.5 – Espaço consequência avaliada (esquerda) e loterias para análise da independência aditiva (direita) (Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa, 1976)

### 2.1.3 Teoria das filas

Este item dará aporte teórico à modelagem do número de pessoas que se encontram dentro da zona de perigo e pela modelagem das consequências sobre os distúrbios no tráfego local de veículos, decorridos de um acidente em uma câmara subterrânea. Na Seção 3.1 e Seção 3.2.2.4, será mais bem detalhada a relação do uso da Teoria das Filas com o contexto analisado.

A Teoria das Filas tem como processo de fila básico representado pela Figura 2.6. De forma padrão, clientes que precisam de atendimento chegam ao decorrer do tempo por uma fonte de entrada. Esses clientes entram no sistema de filas e pegam uma fila. Em um determinado momento, um cliente na fila é selecionado, seguindo alguma regra de atendimento, conhecida como disciplina da fila. O atendimento, então, é realizado pelo

mecanismo de atendimento, e quando finalizado o cliente deixa o sistema de filas (Hillier & Lieberman, 1980).

- Fonte de entradas: representa o número total de clientes que precisam ser atendidos em um determinado tempo. Pode-se considerar que a fonte de entradas seja limitada ou ilimitada. É necessário, também, determinar o padrão estatístico pelos quais os clientes chegam ao longo do tempo;
- Fila: é caracterizada pelo número máximo de clientes permitidos a aguardar na fila, finito ou infinito.
- Disciplina da fila: refere-se à ordem na qual os membros das filas são selecionados para o atendimento.
- Mecanismo de atendimento: é formado pelos canais de atendimento (número de atendentes). O tempo de atendimento possui uma distribuição de probabilidade a ser considerada.

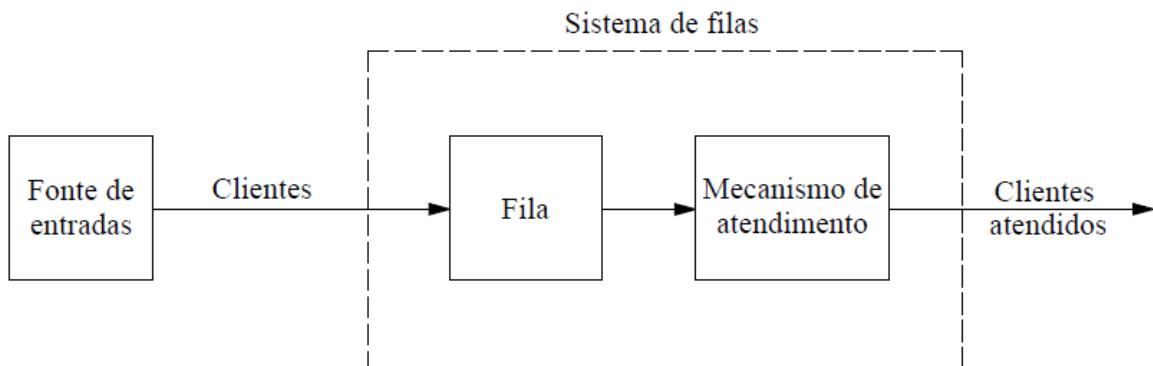


Figura 2.6 – Representação simplificada do sistema de Filas (Fonte: Adaptado de Hillier & Lieberman (1980))

Dessa forma, a depender das características das distribuições de probabilidade entre atendimento e tempo de atendimento teremos diversos modelos de teorias de filas. Por padronização, utiliza-se a seguinte nomenclatura para identificar qual o tipo das filas a ser analisada ( $A/B/C$ ), onde a letra “ $A$ ” representa a distribuição de tempos entre atendimentos, a letra “ $B$ ” representa a distribuição de tempos de atendimento e a letra “ $C$ ” representa o número de atendentes existentes no sistema.

Para facilitar o entendimento e a padronização da modelagem da teoria das filas é adotada a seguinte terminologia:

- *Estado do sistema* é igual ao número de clientes no sistema de filas;

- *Comprimento da fila* é igual ao número de clientes aguardando que o atendimento se inicie, ou seja, é o *Estado do sistema* menos número de clientes que estão sendo atendidos;
- $N(t)$  é o número de clientes no sistema de filas no instante  $t$  ( $t \geq 0$ );
- $P_n(t)$  é a probabilidade de exatamente  $n$  clientes se encontrarem no sistema de filas no instante  $t$ , dado o número no instante 0;
- $s$  é o número de atendentes (canais de atendimento paralelos) no sistema de filas;
- $\lambda_n$  é a taxa média de chegada (número de chegadas esperado por unidade de tempo) de novos clientes quando  $n$  clientes se encontram no sistema. Quando  $\lambda_n$  for uma constante para todo  $n$ , essa constante é representada por  $\lambda$ ;
- $\mu_n$  é a taxa média de atendimento para o sistema global (número de clientes esperado completando o atendimento por unidade de tempo) quando  $n$  clientes se encontram no sistema. Quando a taxa média de atendimento por atendente ocupado for uma constante para todo  $n \geq 1$ , é representada por  $\mu$ . Nesse caso,  $\mu_n = s\mu$  quando  $n \geq s$ , isto é, quando todos os  $s$  atendentes estiverem ocupados;
- $\rho = \lambda/(s\mu)$  é o fator de utilização para a instalação de atendimento, isto é, a fração de tempo esperada em que atendentes individuais se encontram ocupados;
- $P_n$  é a probabilidade de exatamente  $n$  clientes se encontrarem no sistema de filas, quando o sistema atingiu a condição de estado estável;
- $w$  é o tempo de espera no sistema (inclui o tempo de atendimento) para cada cliente individual  $W = E(w) = W_q + \frac{1}{\mu}$ ;
- $w_q$  é o tempo de espera na fila (exclui o tempo de atendimento) para cada cliente individual  $W_q = E(w_q)$ ;
- $L$  é o número de clientes esperado no sistema de filas, quando o sistema atingiu a condição de estado estável, representado por:

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \lambda W \quad (2.6)$$

- $L_q$  é o comprimento esperado da fila (exclui clientes que estão sendo atendidos), expressado pela seguinte equação, conhecida como fórmula de Little:

$$L_q = \sum_{n=s}^{\infty} (n-s)P_n = \lambda W_q \quad (2.7)$$

O processo de Nascimento-e-Morte é descrito probabilisticamente como  $N(t)$ , que muda à medida que  $t$  aumenta, de forma que os nascimentos e mortes individuais ocorram aleatoriamente, e que suas taxas médias de ocorrência dependem apenas do estado atual do sistema, seguindo um conjunto de hipóteses:

- *Hipótese 1:*

- Dado  $N(t)=n$ , a distribuição probabilística atual do tempo remanescente até o próximo nascimento (chegada) é exponencial com parâmetro  $\lambda_n$  ( $n = 0,1,2,\dots$ );

- *Hipótese 2:*

- Dado  $N(t)=n$ , a distribuição probabilística atual do tempo remanescente até a próxima morte (término do atendimento) é exponencial com parâmetro  $\mu_n$  ( $n = 0,1,2,\dots$ );

- *Hipótese 3:*

- A variável aleatória da hipótese 1 (o tempo remanescente até o próximo nascimento) e a variável aleatória da hipótese 2 (o tempo remanescente até a próxima morte) são mutuamente independentes. A próxima transição no estado do processo é  $n \rightarrow n+1$  (um único nascimento), ou então,  $n \rightarrow n-1$  (uma única morte), dependendo de se a primeira ou a última variável aleatória for menor.

### 2.1.3.1 Modelo M/M/s

O modelo M/M/s parte do pressuposto de que possuem uma entrada de Poisson e tempos de atendimento exponenciais, e que o número de atendentes seja  $s$  um inteiro positivo. Consequentemente, esse modelo é simplesmente o caso especial do processo de nascimento-e-morte (cadeia de Markov de tempo contínuo) em que a taxa média de chegada e a taxa média de atendimento por atendente ocupado do sistema de filas são constantes ( $\lambda$  e  $\mu$ , respectivamente) independente do estado do sistema.

Para sistemas com vários atendentes ( $s > 1$ ), quando  $s\mu$  excede a taxa média de chegada  $\lambda$ , isto é, quando  $\rho = \lambda/(s\mu) < 1$  um sistema de filas que se ajusta a esse modelo vai, finalmente, atingir uma condição de estado estável.

Para o caso específico com um único atendente,  $s = 1$ , os fatores  $C_n$  para o processo de nascimento-e-morte se reduz a:

$$C_n = \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n = \rho^n, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

portanto,

$$P_n = \rho^n P_o = (1 - \rho) \rho^n \quad (2.9)$$

consequentemente,

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (2.10)$$

e

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (2.11)$$

Quando ocorre que  $\lambda \geq \mu$ , a fila “explodiria” e cresceria sem limites. Mesmo quando  $\lambda = \mu$ , o número de clientes esperado no sistema de filas cresce lentamente sem limites ao longo do tempo, pois, embora um retorno temporário para nenhum cliente presente sempre é possível, as probabilidades de números imensos de clientes presentes se torna significativamente maior ao longo do tempo.

Para o caso  $\lambda < \mu$ , pode-se obter a distribuição probabilística do tempo de espera no sistema para uma chegada aleatória quando a disciplina da fila é aquela nos quais os primeiros que chegam serão os primeiros a ser atendidos. Se essa chegada encontrar  $n$  clientes já no sistema, então a chegada terá de esperar ao longo dos  $n+1$  tempos de atendimento exponenciais, inclusive o seu próprio. Para esses casos o tempo de espera no sistema (inclui o tempo de atendimento) para cada cliente individual é expresso por:

$$P\{W > t\} = e^{-\mu(1-\rho)t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (2.12)$$

Logo,

$$W = E(W) = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (2.13)$$

Considerando o tempo de espera na fila (excluindo o tempo de atendimento) ( $W_q$ ) para uma chegada aleatória quando a disciplina da fila for aquela em que os primeiros que chegam

serão os primeiros a ser atendidos. Se essa chegada não encontrar nenhum cliente já no sistema, então a chegada será atendida imediatamente, de modo que:

$$P\{W_q = 0\} = P_0 = 1 - \rho \quad (2.14)$$

Se, ao contrário, essa chegada encontrar  $n > 0$  clientes já na fila, então a chegada tem de esperar por  $n$  tempos de atendimento exponenciais até que seu atendimento comece, de forma que:

$$P\{W_q > t\} = \rho e^{-\mu(1-\rho)t} \quad (2.15)$$

obtendo a média da distribuição de:

$$W_q = E(W_q) = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (2.16)$$

Para o caso em que existe mais de um atendente,  $s > 1$ , o fator  $P_n$  para o processo de nascimento-e-morte se reduz a:

$$P_n = \begin{cases} P_0 & \text{se } n = 0 \\ \frac{P_0(\lambda/\mu)^n}{n!} & \text{se } s \geq n \\ \frac{P_0(\lambda/\mu)^n}{s!s^{n-s}} & \text{se } s < n \end{cases} \quad (2.17)$$

onde  $P_n$  corresponde a probabilidade de exatamente  $n$  clientes estarem na fila de espera, quando o sistema atinge a condição de estado estável;  $\lambda$  é a taxa de chegada de clientes;  $\mu$  é a taxa de atendimento de clientes; e,  $P_0$  é a probabilidade de nenhum cliente encontrar-se na fila de espera, que é expresso por:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \frac{1}{1 - \lambda/(s\mu)}} \quad \text{se } \lambda < s\mu \quad (2.18)$$

#### 2.1.4 Elicitação do conhecimento *a priori* de especialistas

Como já mencionado anteriormente, considerando que acidentes em câmaras/caixas subterrâneas são eventos raros, conjuntamente com a falta de banco de dados consolidados sobre as falhas, modos de falhas e eventos acidentais, exigem dos gestores meios alternativos de aquisição de conhecimento sobre o contexto. Objetivando minimizar esse entrave, na literatura existem as metodologias voltadas à elicitação do conhecimento *a priori* de especialistas, onde elas dão todo o apporte teórico e experiência no contexto analisado. Desta

forma, esta seção fará um breve foco no contexto, abordando as principais características do uso do conhecimento de especialistas.

Segundo Walley (2002), teorias sobre a inferência estatística podem ser divididas em duas grandes classes: aquelas que satisfazem os princípios da probabilidade e aquelas em que as inferências têm uma base na interpretação da repetição de eventos e dados históricos de amostragens.

A abordagem frequentista trata de uma sistemática que pode ser muito útil para a resolução dos problemas de decisão, como o próprio nome sugere, ela utiliza dados históricos ou dados obtidos por experimentações para basear suas afirmações.

Na análise de risco pode-se utilizar a abordagem frequentista de análise das falhas ou modos de falhas. Entretanto, o conceito puramente frequentista de probabilidade nem sempre pode ser aplicado ao contexto, devido ao fato de que existem alguns eventos, cuja repetição torna-se impraticável de se observar, especialmente em companhias de distribuição de energia que possui uma pequena rede ou tem poucos dados acumulados. Desta forma, torna-se impraticável estabelecer uma probabilidade baseada na experiência passada da companhia, devido à ausência e da coleta desses dados acidentais (Garcez *et al.*, 2010).

Uma maneira de suprir a falta de dados internos é aproveitar-se dos bancos de dados externos (banco de dados de companhias ou entidades internacionais). Entretanto, a simples utilização de dados estatísticos externos como parâmetro de referência pode ser um erro, pois algumas características que influenciam diretamente nessa probabilidade, tais como regulamentações, estruturas operacionais, níveis de tecnologia empregada, fiscalização, etc. podem não refletir na empresa a ser analisada, gerando assim diferenciações nas estatísticas (Garcez *et al.*, 2010).

Entretanto, a ausência de qualquer base de conhecimento através de dados, modelos, analogias, teorias, princípios físicos, etc. para auxiliar os especialistas, podem resultar em julgamentos que são meras "suposições" (Garcez *et al.*, 2011).

Portanto, se faz necessário correlacionar os fatores que influenciam as taxas acidentais com as características técnicas do sistema de distribuição e suas áreas circunvizinhas. Para isso é preciso utilizar toda a experiência obtida pelo especialista em campo, usando seu conhecimento técnico e também o conhecimento acerca do operacional da rede, provendo informações valiosas (Clemen & Winkler, 1999).

A análise dos dados através de banco de dados permite ter uma melhor visão da estatística histórica e suas relações de acidentais. Enquanto a abordagem Bayesiana permite

ter uma representação realista do conhecimento do especialista sobre a dinâmica de operação e modos de falhas nos sistemas analisados (O'Hagan, 1998).

Como uma forma alternativa de determinar a taxa de falha acidental pode-se utilizar a metodologia, definida em (Raiffa, 1968) (ver Seção 2.1.4.2), de elicitação do conhecimento *a priori* (hipótese Bayesiana) junto com uma análise de dados históricos de acidentes e falhas, advindos de bancos de dados externos (nacional ou internacional), dados internos da própria companhia ou similares, e, portanto, aproveitar as vantagens de cada abordagem.

#### 2.1.4.1 Utilização do conhecimento *a priori* de especialistas

Segundo Berger (1985), um elemento importante de muitos problemas de decisão é a informação *a priori* relativa ao estado da natureza  $\theta$ . Um meio conveniente para quantificar cada informação se dá através da distribuição de probabilidade  $\pi_{V_q}(\theta)$ , também conhecida como distribuição de probabilidade *a priori*.

A experiência que um especialista adquire sobre a variável  $\theta$  pode ser utilizada na forma de uma distribuição de probabilidade  $(\pi_{V_q}(\theta))$ , que corresponde à descrição do conhecimento *a priori* do especialista sobre o estado da natureza representado pela variável analisada (Martz & Waller, 1982).

Sendo assim, a proposta da elicitação do conhecimento *a priori* é capturar as principais características da opinião do especialista, integrando sua experiência e seu conhecimento da literatura sobre o assunto tratado (Kadane & Wolfson, 1998).

Para O'Hagan & Oakley (2004), a inferência frequentista permite somente a interpretação de probabilidade, enquanto que os métodos estatísticos Bayesianos são baseados na interpretação pessoal (ou subjetiva) da probabilidade.

A probabilidade subjetiva representa o grau de crença do especialista sobre a chance de ocorrer um determinado evento, ou seja, não há uma probabilidade certa, existe sim uma distribuição de probabilidade que se atribui para um evento, seguindo todos os postulados básicos da teoria da probabilidade (Berger, 1985).

O uso da probabilidade subjetiva permite lidar não somente com eventos, mas também com proposições e hipóteses. Para Martz & Waller (1982), uma proposição é considerada como uma coleção de eventos que não pode ser interpretada por uma série de repetições de um experimento, ou seja, sob uma abordagem frequentista.

Para Keeney & Winterfeldt (1991), o processo formal de elicitação de probabilidade de especialista consiste de sete etapas:

- Identificação e seleção de problemática;
- Identificação e seleção de especialistas;
- Discussão e refinamento da problemática;
- Treinamento para a elicitação;
- Processo de elicitação;
- Análise, agregação e resolução de desacordos;
- Documentação e comunicação dos resultados.

Já para Garthwaite *et al.* (2005), o procedimento de elicitação do conhecimento *a priori* do especialista pode ser separada em quatro estágios: a primeira etapa de ajuste (*setup*), seleção e treinamento de especialistas, além da identificação dos aspectos da problemática a ser elicitada; a segunda é o estágio da elicitação, interação com os especialistas; a terceira refere-se ao ajuste de uma distribuição de probabilidades ao resultado da elicitação; a última etapa está vinculada a avaliação da adequabilidade da elicitação.

Para uma correta elicitação do conhecimento *a priori* do especialista, alguns pontos importantes da elicitação são visto em Kadane & Wolfson (1998), que apresentam um consenso sobre como se deve proceder a elicitação: a opinião do especialista é a que deve ser elicitada; os especialistas devem ser questionados somente sobre quantidades observáveis, condicionada somente a covariáveis (que também devem ser observáveis) ou outras quantidades observáveis; os especialistas não devem ser questionados para estimar momentos de distribuição (em primeiro momento), eles devem ser questionados a avaliar *quantis* ou probabilidades da distribuição preditiva; os *feedbacks* frequentes devem ser dados aos especialistas durante o procedimento da elicitação; os especialistas devem ser questionados para avaliar dados hipotéticos observáveis incondicionais e condicionais.

#### 2.1.4.2 Método dos Intervalos Equiprováveis

Para elicitação do conhecimento *a priori* será utilizada a metodologia definida em Raiffa (1968), que utiliza o método dos Intervalos Equiprováveis. A probabilidade subjetiva alude-se ao grau de crença em uma proposição.

Em um extremo tem-se  $P(A)=1$ , se  $A$  é confiado ser verdadeiro; e no outro extremo tem-se  $P(A)=0$ , se  $A$  é confiado ser falso, assim os pontos no intervalo  $(0,1)$  expressam

crenças intermediárias entre a  $P(A)=1$  e  $P(A)=0$ , ou seja, respectivamente, verdadeiro e falso.

Desta forma, este método é baseado nas subdivisões sucessivas de intervalos equiprováveis, ou seja, em percentis, através de entrevista com o especialista. Tal metodologia segue o seguinte procedimento de entrevista:

- 1) Expor o processo ao especialista de forma geral, advertindo-o para o fato de que o objetivo consiste em estimar o valor mais provável para  $\theta$  e não o seu valor real exato;
- 2) Estabelecer uma faixa dos possíveis valores de  $\theta$ . Definindo o valor mínimo de  $\theta_{0,01}$  e o valor máximo  $\theta_{0,99}$  esperados;
- 3) Iniciar a subdivisão em intervalos equiprováveis, obtendo inicialmente o valor de  $\theta_{0,5}$ , para o qual  $P(\theta_{0,5})=0,5$ ;
- 4) Dividir o intervalo entre  $\theta_{0,01}$  e  $\theta_{0,5}$ , obtendo o  $\theta_{0,25}$ , onde  $P(\theta_{0,25})=0,25$ ;
- 5) Dividir o intervalo entre  $\theta_{0,5}$  e  $\theta_{0,99}$ , obtendo o  $\theta_{0,75}$ , onde  $P(\theta_{0,75})=0,75$ ;
- 6) Repetir o procedimento de divisão para os demais percentis ( $\theta_{0,125}, \theta_{0,375}, \theta_{0,625}, \theta_{0,875}$ ), obtendo ao final a Tabela 2.1 com os percentis;
- 7) Em etapa final, aplicar um teste de consistência ao especialista, perguntando ao mesmo: Qual o intervalo é mais provável de  $\theta$  acontecer, dentro ou fora do intervalo  $\theta_{0,25}$  e  $\theta_{0,75}$ ? A frente dessa pergunta tem-se somente três respostas: dentro, fora ou indiferente. Neste caso, a resposta correta seria indiferente, pois, caso haja consistência nos valores elicitados, a probabilidade de estar dentro ou fora é de 0,5. No caso do especialista responder alguma das duas primeiras respostas, é preciso reavaliar os pontos com o especialista, pois se verifica incoerência, ou seja, provavelmente houve alguma inconsistência.

Uma vez determinados os pontos e verificado a consistências dos mesmos, procede-se uma análise estatística com o objetivo de ajustar os pontos a uma distribuição de probabilidade.

*Tabela 2.1 – Percentis da elicitação do conhecimento a priori do especialista (Fonte: Adaptado de Raiffa (1968))*

$\theta$	$P(\theta)$
$\theta_{0,01}$	0,010
$\theta_{0,125}$	0,125
$\theta_{0,250}$	0,250
$\theta_{0,375}$	0,375
$\theta_{0,500}$	0,500
$\theta_{0,625}$	0,625
$\theta_{0,750}$	0,750
$\theta_{0,875}$	0,875
$\theta_{0,990}$	0,990

## 2.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção será apresentada a contextualização sobre redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica e seus possíveis incidentes. Posteriormente, é realizada uma revisão bibliográfica da avaliação de risco, determinando alguns cenários acidentais, e, em seguida, estima-se a energia incidente emitido pelo arco elétrico.

Serão descritas algumas medidas de prevenção e mitigação de riscos apresentados pela literatura.

### 2.2.1 Contextualização

Nesta seção serão descritos detalhes sobre as redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica, sua história e contexto atual no Brasil, e sua composição física padrão. Ainda, será contextualizado o sistema da concessionária Light, que é a detentora do maior sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica do Brasil, mostrando suas capacidades e principais dificuldades encontradas nesse contexto.

#### 2.2.1.1 Rede subterrânea de distribuição elétrica

A rede de distribuição de energia elétrica é o segmento do sistema elétrico, composto pelas redes elétricas primárias (média tensão – MT) ( $\geq 1\text{kV}$  e  $\leq 69\text{kV}$ ), e redes secundárias (baixa tensão – BT) ( $\leq 1\text{kV}$ ). No Brasil, essas redes estão sob responsabilidade das

companhias distribuidoras de energia elétrica, que são regulamentadas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

As redes primárias são circuitos elétricos que estão diretamente ligadas às subestações de distribuição. Já as redes secundárias são derivadas de transformadores abaixadores e estão ligados aos consumidores de baixa tensão. As redes de distribuição podem ainda ser classificadas conforme sua configuração na forma radial (em anel) ou reticulado.

As redes distribuidoras subterrâneas possuem maior complexidade, com maior investimento e maior custo associados à instalação, comparada a uma rede de distribuição aérea. Segundo relatório da Light (2008), geralmente, o tipo do sistema subterrâneo eleva o custo entre dez a vinte vezes o valor se comparado ao de uma linha de distribuição aérea convencional, e, com o custo médio das obras de instalação é estimado em cerca de R\$ 2 milhões por quilômetro enterrado (Burgardt, 2012), tornando-se viável somente em redes urbanas com média e alta densidade de carga, ou quando a utilização da rede aérea torna-se tecnicamente inviável, ou por motivações regulatórias. Em contra partida, o sistema subterrâneo possui maior segurança às pessoas, menor interferência das intempéries da natureza e menor impacto sobre a paisagem estética da região.

Historicamente, no final do século XIX, em áreas urbanas densamente povoadas foram utilizados cabos elétricos isolados enterrados. Logo após, diversos países adotaram o sistema de distribuição elétrica subterrânea por uma questão de maior segurança e preservação estética da paisagem. No início eram utilizados cabos isolados a óleo fluído (na Europa) e cabos isolados em papel impregnados em óleo sob alta pressão, dentro de tubos de aço (na América do Norte). Posteriormente, com o avanço tecnológico foram utilizados cabos extrudados com isolamento polimérico, materiais termoplásticos e termofixos.

Os sistemas subterrâneos em malha reticulada no Brasil foram adotados somente a partir dos anos 50 (século 20). Mesmo com todo esse tempo, as redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica brasileira, atualmente, não ultrapassam 2% (cerca de 12 mil km de linhas subterrâneas) do total das redes urbanas de MT e BT.

Em torno de 45% dessa rede subterrânea encontra-se no Estado do Rio de Janeiro, com uma malha de 5.600 km de cabeamento subterrâneo (Light, 2011b). Segundo Granata *et al.* (2001), cerca de 95% do sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica da concessionária Light é formada por cabos OF (*Oil Filled*).

A estrutura padrão de instalações da rede subterrânea é formada basicamente por Câmaras Transformadoras (CTs), Caixas de Inspeção (CIs) e Caixas de Passagens (CPs), conforme mostrado na Figura 2.7 (Granata *et al.*, 2001; Light, 2011a):

- *Câmaras Transformadoras* (CTs): construídas com concreto armado, situadas em vias públicas (ruas ou calçadas), providas de tampas para inspeção e acesso, em ferro fundido ou concreto, janelas para ventilação forçada e circuito interno exclusivo para iluminação. Nelas abrigam-se equipamentos de transformação, chaves de seccionamento e equipamentos de proteção.
- *Caixas de Inspeção* (CIs): são compartimentos subterrâneos para facilitar a passagem de cabos e a confecção de emendas. As CIs são menores do que as CTs e auxiliam na inspeção e na manutenção das redes subterrâneas. As CIs não são hermeticamente fechadas para propiciar a saída de gases, em contrapartida permitem a entrada de água.
- *Caixas de Passagens* (CPs): são as instalações subterrâneas para derivação dos ramais que atendem os clientes.

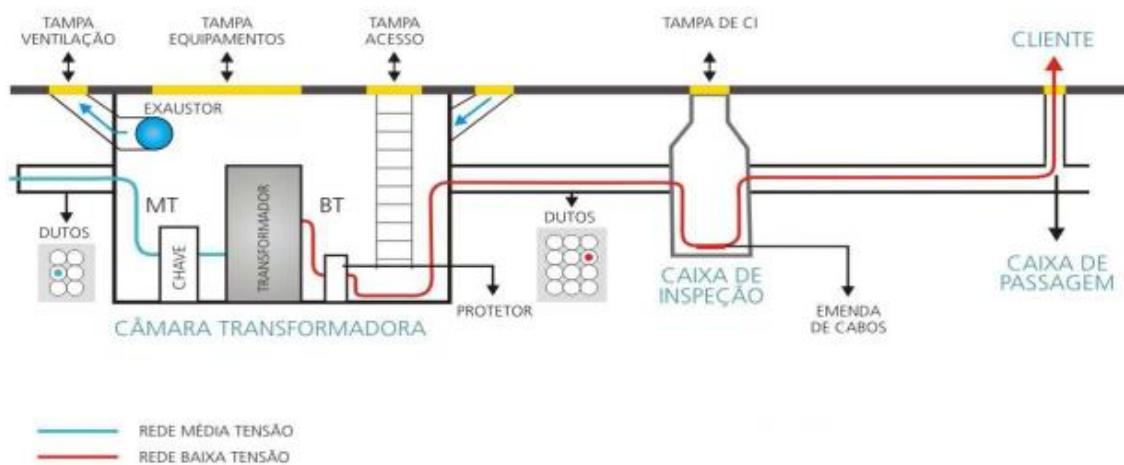


Figura 2.7 – Estrutura de rede de distribuição de energia elétrica subterrânea. (Fonte: Light, 2011a)

Devido à grande extensão da malha subterrânea sob responsabilidade da concessionária Light, como mencionado anteriormente (ela é detentora de 35% (baixa tensão), 58% (média tensão) e 45% (alta tensão) de toda rede subterrânea brasileira), e a quantidade de ocorrências de incidentes em câmaras subterrâneas na cidade do Rio de Janeiro, na próxima seção, a contextualização das dimensões e dificuldades encontradas pela concessionária Light serão apresentados.

### 2.2.1.2 Contextualização da Light como concessionária de distribuição subterrânea de energia elétrica

A companhia Light, responsável pela distribuição de energia para parte do Estado do Rio de Janeiro, dispõe de um sistema elétrico composto por, no ano de 2011, de 194 subestações transformadoras e uma malha de cabos aéreos e subterrâneos de mais de 57,3 mil km, sendo 51,7 mil km de rede aérea (cerca de 90%) e 5,6 mil km de rede subterrânea (cerca de 10% do total) (Light, 2011b).

Da rede subterrânea tem-se cerca de 2400 km de baixa tensão (BT), 3200 km de média tensão (MT) e 164 km de alta tensão (AT) ( $> 69\text{kV}$ ), que atende cerca de 530 mil clientes (cerca de 10% de todos os clientes atendidos pela empresa). O sistema subterrâneo é composto por 3891 câmaras transformadoras; 11500 caixas de inspeção, 10750 transformadores, 4000 chaves, 2560 protetores de rede e atende a uma carga de 1688 MVA, com um valor atual de ativos de R\$ 4,4 bilhões (Light, 2011b).

Segundo a Light, umas principais causas de falhas e dificuldades são causadas por (Light, 2008):

- Furtos de cabos (No ano de 2006, foram detectados cerca de 660 furtos de cabos/cordoalhas na Regional Metropolitana, sendo 10512 m de cabos e 3447 m de cordoalhas, gerando um custo de R\$ 781 mil);
- Envelhecimento do sistema instalado;
- Danos causados por tiros (vide Figura 2.8);
- Difícil acessibilidade a determinados locais (devido à favelização, falta de segurança, etc.) para serviços de manobras e manutenção, complexidade de acesso às câmaras subterrâneas, desvios de trânsito, etc. (vide Figura 2.9);
- Ocupação não ordenada de residências (às vezes, até clandestina), com ligações de “gatos” (vide Figura 2.12);
- Uso compartilhado, desordenado e altamente congestionado do solo com outras concessionárias de serviços públicos e privados (água, esgoto, telefone, TVs a cabo, gás, sinalização luminosa etc.); agravado pela falta de um cadastro integrado da ocupação do subsolo, envolvendo Prefeitura e os vários agentes e companhias de serviços públicos (vide Figura 2.13);

- Condições climáticas (as câmaras subterrâneas transformadoras devem possuir ventilação permanente para que possam manter uma temperatura interna, nos quais os equipamentos que nelas estejam instalados possam operar sem que haja perda de sua vida útil e envelhecimento precoce, o que aumentariam os graus de intervenção e investimento);
- Peculiaridades nos procedimentos para localização de falhas em redes subterrâneas, exigindo maior complexidade, custo, tecnologia e pessoal especializado, comparado a uma rede aérea;
- Decorrência da inundação do subsolo e do despejo clandestino de esgoto (média de 30 ocorrências no ano). Essa situação atinge cerca de 6500 caixas de inspeção localizadas nos bairros ao nível do mar, sendo mais crítica no centro da cidade (esgotamento de uma caixa requer-se entre 1,5 e 4 horas, dependendo do volume da caixa e das condições locais para escoamento da água retirada) (vide Figura 2.11);

A inspeção em câmaras transformadoras impõe a abertura e fechamento das mesmas que envolvem necessidades de sinalização de emergência, desvio de trânsito, esgotamento d'água etc., passando também pela medição física de corrente e providências para a substituição dos circuitos encontrados interrompidos.

Já nos circuitos de média tensão, os trabalhos de localização do ponto da falha, para imediato reparo, requerem preliminarmente a abertura de todos os protetores e o desligamento de todos os transformadores através da operação dos respectivos acessórios desconectáveis cujo manuseio refere-se a uma operação de risco e de cuidado com os acessórios que não podem ser contaminados (Light, 2008).

Em 2010 foram realizados 14243 inspeções em câmaras transformadoras subterrâneas e 11217 inspeções em caixas de inspeção subterrânea, tendo 326 trocas de transformadores e reposição de 22 km da malha Terra e 29 km da malha de baixa tensão. Para 2011, foram previstos 14500 inspeções em câmaras transformadoras, 16000 inspeções em caixas de inspeção, com cerca de 500 trocas de transformadores, e reposição de 12 km da malha terra e 28 km de malha de baixa tensão (Light, 2011b).

Para os anos de 2012 e 2013, a Light anunciou a antecipação de investimentos, de modo que em serão investidos cerca de R\$ 320 milhões na rede elétrica. Em 2012, foram previstos cerca de R\$ 160 milhões, o que representa 81% a mais do que em 2011.

Podem-se destacar algumas medidas com objetivo de aumentar a confiabilidade e da segurança operacional do sistema subterrâneo, direcionamento de ações preventivas quanto a riscos de falhas de equipamentos e melhoria da qualidade do fornecimento. Esses recursos abrangem mais de 60 mil inspeções em caixas subterrâneas, manutenção em mais de 6000 equipamentos e a substituição de outros 5000 equipamentos, tais como transformadores e chaves a óleo com comando a distância e protetores de rede. Ainda, haverá a reposição de 800 km de cabos subterrâneos de média e de baixa tensão. Até o final de 2011, estavam previstos a instalação de 1170 sensores relativos à detecção de gases, presença de água, e entrada de pessoas não autorizadas nas câmaras subterrâneas (Rangel Júnior, 2011).

Outra medida adotada pela concessionária Light foi a abertura de furos nas tampas das caixas de inspeção, com o objetivo de liberação de possíveis gases combustíveis que se encontram dentro das caixas subterrâneas. Segundo Rangel Júnior (2011), essas medidas tem eficiência discutível, pois além da geometria da rede poder permitir ao acúmulo de gases nos dutos, e a definição da quantidade (normalmente, a quantidade de quatro furos por tampa) e das dimensões dos furos realizados não promoverá dissipação eficaz se a taxa de emissão de gases não for previamente conhecida. Em 2012, os furos já foram adotados em cerca de 6000 tampas.

Em 2011, a prefeitura do Rio de Janeiro contratou uma empresa privada para realizar o monitoramento independente em bueiros na cidade, prevendo-se um total de 10 mil inspeções em caixas e câmaras subterrâneas por mês. Houve um investimento de cerca de R\$ 4,242 milhões (Rangel Júnior, 2011).

O Ministério Público Estadual e a concessionária Light assinaram, 18 de julho de 2011, um Termo de Ajustamento de Conduta que estipula multas de R\$ 100 mil para cada bueiro que explodir e causar danos ao patrimônio público ou privado, ou deixar feridos na cidade do Rio de Janeiro (Estadão, 2011).

Em 2007, as concessionárias CEG (Companhia Distribuidora de Gás Natural) e a Light foram condenadas a indenizar em cerca de R\$23 mil, por danos morais, materiais e estéticos, uma pessoa queimada após a explosão de um bueiro quando caminhava pela Av. Rio Branco, na esquina com a Av. Araújo Porto Alegre, no centro do Rio de Janeiro (O Globo, 2011).



Figura 2.8 – Danos ao patrimônio causado por tiros (Fonte: Light, 2008)



Figura 2.9 – Dificuldade de acessibilidade para serviços de manobras e manutenção, desvios de trânsito, etc. (Fonte: Light, 2008)



Figura 2.10 – Câmaras subterrâneas com alta densidade de cabos (Esquerda) e falhas no isolamento (Direita) (Fonte: Stone & Webster, 2001)



Figura 2.11 – Acumulo de sujeira, esgoto e alagamento nas câmaras subterrâneas (Fonte: Light, 2008; Stone & Webster, 2001)



Figura 2.12 – Sobrecarga da rede local devido a ligações de “gatos” (Fonte: Light, 2011b)



Figura 2.13 – Intervenção de sistemas de terceiros na rede da Light (Fonte: Rangel Júnior, 2011)

### 2.2.2 Dados sobre ocorrências de incidentes em redes subterrâneas

Nesta seção serão apresentados dados de ocorrência e consequências de incidentes em redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica.

Em geral, acidentes em câmaras/caixas subterrâneas são raros. Existem cerca de 600 a 900 eventos acidentais em câmaras/caixas subterrâneas por ano em uma rede com cerca de 34000 km de malha secundária em Manhattan, que contêm aproximadamente 51 mil câmaras e caixas subterrâneas (Rudin *et al.*, 2010).

Os números de incidentes das principais concessionárias dos EUA, ocorridos no ano de 2001, e da concessionária brasileira Light (ano base 2010) (Light, 2011a; Stone & Webster, 2001) são mostrados na Tabela 2.2. Segundo Stone & Webster (2001), esses dados devem ser tratados com devido cuidado, pois podem existir possíveis divergências entre a interpretação do que se constitui um incidente, e também devido as possíveis diferenças nos números de

anos de experiência usada para gerar as estatísticas, consequentemente, esses valores podem ter pouca significância estatística.

Nos anos de 2000 à 2009, foram registradas 15 explosões em bueiros na cidade do Rio de Janeiro. No ano de 2010 ocorreram cerca de 20 explosões e no ano de 2011 cerca de 50 explosões. Esses valores foram divulgados pela mídia, o que pode não refletir fidedignamente a realidade da rede distribuidora, pois podem ter ocorrido diversos outros eventos, tais como, fumaças, incêndios, etc., durante esse período, que não foram contabilizados pela mídia.

Na Figura 2.14 é mostrado o mapa (ilustrativo) com a localização dos principais incidentes ocorridos na cidade do Rio de Janeiro no ano de 2004 a 2011 (GoogleMaps, 2011; O Globo, 2011). Na Tabela 2.3 é resumida as descrições e consequências dos diversos acidentes ocorridos nos anos de 2004 à 2011 na cidade do Rio de Janeiro (GoogleMaps, 2011).

*Tabela 2.2 – Número de incidentes em compartimentos subterrâneos (Adaptado de Light, 2011a; Stone & Webster, 2001)*

Companhia	Número de Compartimentos Subterrâneos (Câmaras transformadoras + Caixas de Inspeção)	Número de Incidentes por ano	Taxa de incidentes ao ano por 1000 compartimentos subterrâneos
Alabama Power	250	5	20
Florida Power and Light	220	3	14
Texas Utilities	3500	24	7
GPU Energy (PA)	286	2	7
Boston Edison	3000	12	4
ConEdison	275000	1219	4
NYSED	250	1	4
Tampa Electric	500	1	2
Jacksonville Electric Authority	1400	2	1,4
<b>Light S.E.S.A. (2010)</b>	<b>15391</b>	<b>17</b>	<b>1,1</b>
Pepco	57000	38	0,7
Durquesne Light	1800	1	0,6
Virgínia Power	2400	1	0,4
Southern Company	2937	1	0,3

*Tabela 2.3 – Descrição e consequências de acidentes ocorridos em bueiros na cidade do Rio de Janeiro do ano de 2004 a 2011 (Fonte: Adaptado de GoogleMaps (2011) e O Globo (2011))*

Data	Descrição/consequência
<b>Abril/2004</b>	Explosão de bueiro na esquina da Rua Joaquim Nabuco com Avenida Nossa Senhora de Copacabana. Tampa de bueiro foi arremessada a uma altura de três metros, bateu numa marquise e caiu no meio fio. Sem feridos.
<b>Junho/2004</b>	Explosão de bueiro na Avenida Henrique Dodsworth 64. Deslocamento de ar fez a tampa voar a 30 metros de altura, atingindo um prédio. Ao cair na rua, o choque foi tão forte que a tampa deixou sua marca no asfalto. Não houve feridos. Parapeito danificado na área de lazer do prédio.

<b>Data</b>	<b>Descrição/consequência</b>
<b>Outubro/2004</b>	Explosão de três bueiros na Rua Marechal Mascarenhas de Moraes, na altura do número 103. Não houve feridos.
<b>Julho/2006</b>	Duas explosões seguidas de incêndio em caixa subterrânea da Light assustam moradores de prédio do Largo do Machado de madrugada. Houve labaredas de mais de cinco metros, queimando galhos de uma árvore próxima e o letreiro de uma lanchonete. Não houve feridos.
<b>Janeiro/2007</b>	Incêndio em caixa subterrânea da Light na Lapa. Não houve feridos.
<b>Maio/2007</b>	Explosão em bueiro na Rua Visconde de Pirajá, na altura do número 550. Dois carros danificados.
<b>Maio/2007</b>	Explosão de um bueiro na esquina da Avenida Rio Branco e Rua Araújo Porto Alegre. Quatro pessoas ficaram feridas com queimaduras de primeiro e segundo graus.
<b>Dezembro/2007</b>	Explosão em galeria da Light deixa 132 lojas e 280 escritórios sem luz por 24 horas. Agência de Correios fechou as portas e um colégio precisou suspender provas.
<b>Fevereiro/2008</b>	Explosão em dois bueiros da Light na esquina da Avenida Ataulfo de Paiva com Rua Cupertino Durão. Ninguém ficou ferido.
<b>Abri/2008</b>	Explosão de três bueiros na esquina das ruas do Ouvidor e Gonçalves Dias feriu um pedestre, que ficou com queimaduras em um dos braços.
<b>Setembro/2008</b>	Explosão de um bueiro na Rua Souza Lima, ferindo três pessoas e danificando dois carros, além de uma banca de jornal.
<b>Setembro/2009</b>	Explosão de um bueiro na esquina das ruas Primeiro de Março e Buenos Aires deixou uma pessoa ferida e danificou um carro.
<b>Fevereiro/2010</b>	Explosão de bueiro e muita fumaça em um segundo, na Rua Santa Clara. Cinco prédios ficaram sem luz, além de 255 lojas.
<b>Março/2010</b>	Explosão de dois bueiros na esquina das ruas do Ouvidor e Uruguiana deixaram duas mulheres feridas.
<b>Março/2010</b>	Explosão em bueiro da Avenida Presidente Vargas, entre a Avenida Passos e Rua Uruguiana, deixa o centro financeiro do Rio sem luz por 22 horas, prejudicando cerca de 3.200 clientes.
<b>Março/2010</b>	Dois bueiros soltaram fumaça na esquina da Avenida Nossa Senhora de Copacabana e Rua Prado Júnior. Sem feridos
<b>Março/2010</b>	Bueiros soltam fumaça na esquina da Rua Ministro Viveiros de Castro e Avenida Princesa Isabel. Sem feridos.
<b>Junho/2010</b>	Dois turistas americanos ficam gravemente feridos na explosão de um bueiro na Rua República do Peru. O homem tem 30% do corpo queimados e a mulher sofre com queimaduras de segundo e terceiro graus em 80% do corpo. Após meses de internação, os dois sobrevivem.
<b>Junho/2010</b>	Um carro estacionado é atingido pela tampa de um bueiro após a explosão na Rua Figueiredo de Magalhães.
<b>Julho/2010</b>	Bueiro explode na Rua das Laranjeiras no meio da tarde. Não houve feridos.
<b>Julho/2010</b>	Bueiro explode em frente ao número 44 da Rua Visconde de Pirajá. Não houve feridos, apesar de o acidente ter ocorrido no meio da tarde.
<b>Agosto/2010</b>	Rua do Carmo fica meia hora interditada por conta de fumaça que saía de uma galeria subterrânea da Light. Não houve feridos.
<b>Agosto/2010</b>	Explosão em bueiro na Rua Henrique Dumont deixa moradores e comerciantes assustados. Não houve feridos.
<b>Agosto/2010</b>	Fumaça saindo de um bueiro da Light na Avenida Nossa Senhora de Fátima assusta moradores. Não houve feridos.
<b>Agosto/2010</b>	Fumaça saindo de bueiro da Light na esquina da Rua Figueiredo Magalhães com Avenida Nossa Senhora de Copacabana assusta moradores. Sem feridos. Mas trecho ficou interditado por meia hora.
<b>Setembro/2010</b>	Bueiros da Light explodiram na Rua Honório de Barros provocando incêndio em quadro de energia de um prédio e deixando outros seis sem luz. Sem feridos
<b>Setembro/2010</b>	Bueiros da Light explodiram na Rua Honório de Barros provocando incêndio em quadro de energia de um prédio e deixando outros seis sem luz. Sem feridos.
<b>Setembro/2010</b>	Bueiro explode nas imediações do Batalhão de Choque, na Rua Frei Caneca, lançando pesada tampa de ferro para os ares. Sem feridos.
<b>Setembro/2010</b>	Bueiro da Light estoura na Rua do Senado, levantando muita fumaça. Não houve feridos.

Data	Descrição/consequência
<b>Outubro/2010</b>	Bueiro pega fogo e explode na Rua Hilário de Gouveia, deixando o prédio do SAMU sem luz. O serviço 192 ficou fora do ar boa parte do dia. Pelo menos 300 pessoas tiveram que ser retiradas do prédio.
<b>Abri/2011</b>	Explosão em bueiro na Avenida Nossa Senhora de Copacabana, esquina com Rua Bolívar, deixa cinco feridos e interdita a quatro quadras da Avenida por 24 horas. Dois veículos foram danificados.
<b>Maio/2011</b>	Em 3 de maio, uma grande quantidade de fumaça saiu de um bueiro na Rua Marquês de Abrantes, no Flamengo. Era a terceira vez em cerca de três meses que o bueiro localizado na calçada em frente ao prédio de número 177 assustou pedestres e moradores da área.
<b>Maio/2011</b>	No dia 23, uma tampa de metal foi lançada para cima e acertou um táxi que passava pela Rua do Riachuelo, no Bairro de Fátima, na esquina com a Rua Costa Barros. O veículo estava sem passageiros e foi atingido por baixo. O taxista não se feriu. Segundo a Light, não houve explosão, apesar do estrondo e da emissão de fumaça.
<b>Maio/2011</b>	No dia 29, bueiros das ruas Gustavo Sampaio e Anchieta, no Leme, soltaram uma densa fumaça acompanhada de estouros vindos do chão. Segundo comerciantes, o problema começou por volta do meio-dia e somente às 15h funcionários da empresa apareceram no local para verificar as fiações. De acordo com a concessionária, a fumaça nos bueiros não oferece risco à população. O problema seria causado pelo contato da água da chuva com a caixa de inspeção.
<b>Junho/2011</b>	Duas caixas subterrâneas da Light explodiram na esquina da Rua Constante Ramos com a Avenida Nossa Senhora de Copacabana no dia 25. A Light chamou o incidente de deslocamento de tampas. Segundo a empresa, o problema aconteceu por causa de um curto circuito num cabo de baixa tensão, mas não houve corte de energia na região e nem feridos. A Constante Ramos chegou a ser interditada
<b>Junho/2011</b>	Um bueiro da Light explodiu na esquina da Avenida Gomes Freire com a Rua da Constituição, no Centro do Rio no dia 1º. As chamas teriam chegado a seis metros de altura. Testemunhas relataram ter ouvido três estrondos, o que levou pânico a comerciantes e pedestres que passavam pelo local.
<b>Junho/2011</b>	Um bueiro explodiu na Rua Senador Vergueiro, no Flamengo, no dia 28. Apesar das evidências deixadas por um grupo de orelhões derretidos pelas chamas, a Light informou, a princípio, que era só fumaça. Partes de Botafogo e Flamengo ficaram sem luz por duas horas. Ninguém se feriu. Com sinais apagados, o trânsito virou um caos.
<b>Junho/2011</b>	No dia 19, um bueiro da Light explodiu na Rua Conde de Bonfim, próximo à Rua Uruguai, na Tijuca. Um funcionário da companhia teve 40% do corpo queimados. Depois do acidente, por volta das 4h30m, alguns moradores da região ficaram sem luz. A Light não deu detalhes sobre o que teria ocorrido, informando apenas que houve "uma ocorrência na rede subterrânea". Ainda segundo a companhia apenas quatro prédios ficaram sem luz.
<b>Julho/2011</b>	No primeiro dia do mês de julho, por volta das 8h, um bueiro soltou fumaça na Rua México, em frente ao centro administrativo do governo do estado, no Centro do Rio de Janeiro. Técnicos da Light estiveram no local. Segundo a empresa, foi detectada a presença de água na galeria, o que provocou a saída de vapor. Não foi preciso acionar os bombeiros.
<b>Julho/2011</b>	Quatro bueiros da Light explodiram por volta das 16h20m da segunda-feira (04/07), na Rua da Assembleia, próximo à esquina com a Avenida Nilo Peçanha. Duas pessoas ficaram feridas e a via foi interditada entre a Avenida Rio Branco e a Rua da Carioca para o trabalho dos bombeiros. Pessoas que passavam pelo local relataram ter ouvido um forte estrondo. Em seguida, viram as tampas dos bueiros subirem a alguns metros. Um carro foi atingido.
<b>Julho/2011</b>	Técnicos da Light isolaram uma área ao redor de um bueiro na esquina das ruas Dias da Rocha e Barata Ribeiro, em Copacabana, na Zona Sul do Rio, cuja tampa voou por volta das 12h desta terça-feira (05/07). De acordo com moradores da região, que passavam pelo local na hora do incidente, uma fumaça foi vista, e alguns prédios próximos teriam sofrido um pico de luz. Ninguém ficou ferido.

Data	Descrição/consequência
<b>Julho/2011</b>	Mais um bueiro explodiu no Centro do Rio, desta vez na Rua Sete de Setembro, na altura da Praça Tiradentes, no final da tarde desta terça-feira (05/07). Testemunhas contam que houve emissão de fumaça da galeria subterrânea, e, após a chegada dos técnicos da Light, três explosões foram ouvidas. Uma hora depois, quando os bombeiros já estavam no local, mais uma explosão deslocou a tampa do bueiro, sem causar feridos. O trânsito da via chegou a ser desviado pela Rua do Teatro, porque a esquina da Rua Sete de Setembro com a Praça Tiradentes foi interditada.



Figura 2.14 – Mapa com a localização dos incidentes (explosões) em bueiros na cidade do Rio de Janeiro no ano de 2004 a 2011 (Fonte: Adaptado de GoogleMaps (2011) e O Globo (2011))

Segundo Rangel Júnior (2011), dentre algumas consequências ocorridas têm-se o lançamento de tampas de ferro fundido, com cerca de 400 quilos, a uma altura de 4 metros, emissão de fumaça, interrupções de serviço afetando vários consumidores, interdição de vias de transporte e queimaduras graves em pedestres.

Num acidente ocorrido em junho de 2010, no bairro de Copacabana (RJ), dois turistas americanos tiveram queimaduras graves, um com cerca de 80% do corpo queimado e o outro com 35%, ficando hospitalizados 68 dias e 30 dias, respectivamente. Outro acidente no bairro

de Copacabana, em abril de 2011, deixou três pessoas feridas e atingiu um táxi que circulava na área (Figura 2.15) (Globo, 2011).

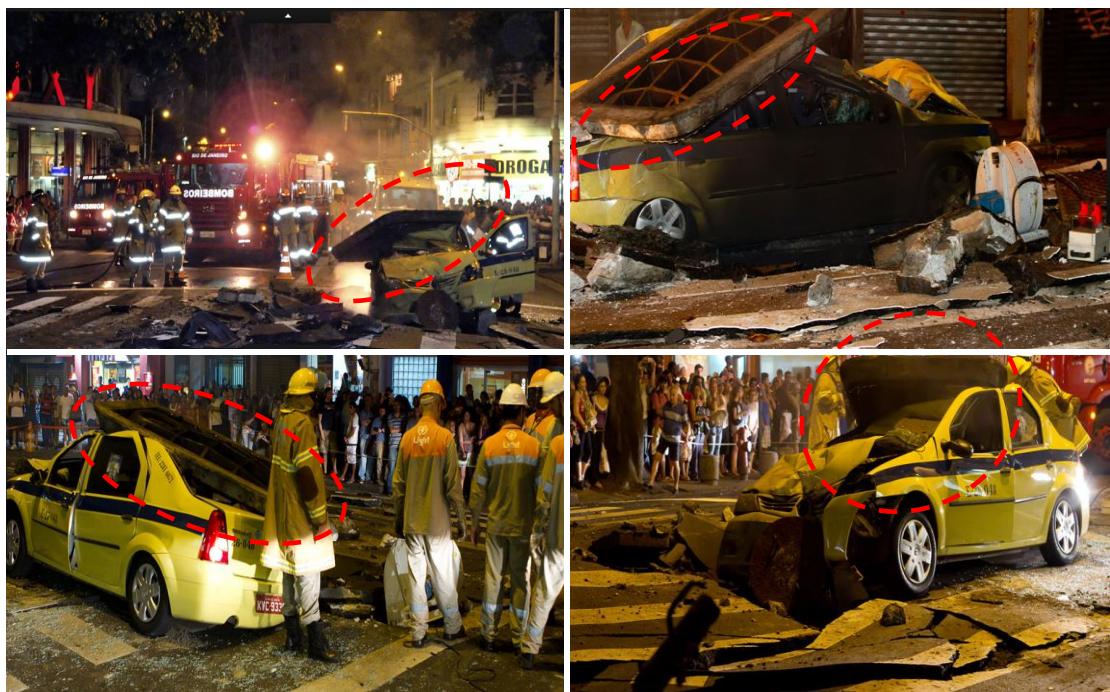


Figura 2.15 – Acidente em um bueiro ocorrido em abril de 2011 no bairro de Copacabana (Destaque para a tampa da câmara subterrânea) (Fonte: Adaptado de Globo, 2011)

Segundo relatório anual, *Report of the Public Service Commission of the District of Columbia* (PSC) – Ano 2011 (PSCDC, 2011), o número de explosões de câmaras subterrâneas com tampas sólidas de bueiros é significativamente maior do que as explosões com tampas com fendas (aberturas), conforme mostrado na Figura 2.16.

Uma maneira de obter dados de difícil acesso, ou até mesmo inexistentes, é pelo uso do conhecimento *a priori* de especialistas, na qual se pode eliciar, através de metodologias adequadas, a experiência advinda da vivência dos especialistas e também do acúmulo de conhecimento teórico dele, com o propósito de estimar a probabilidade de ocorrência de um dado cenário acidental (Garcez *et al.*, 2010). Este tema será mais bem detalhado na Seção 2.1.4.

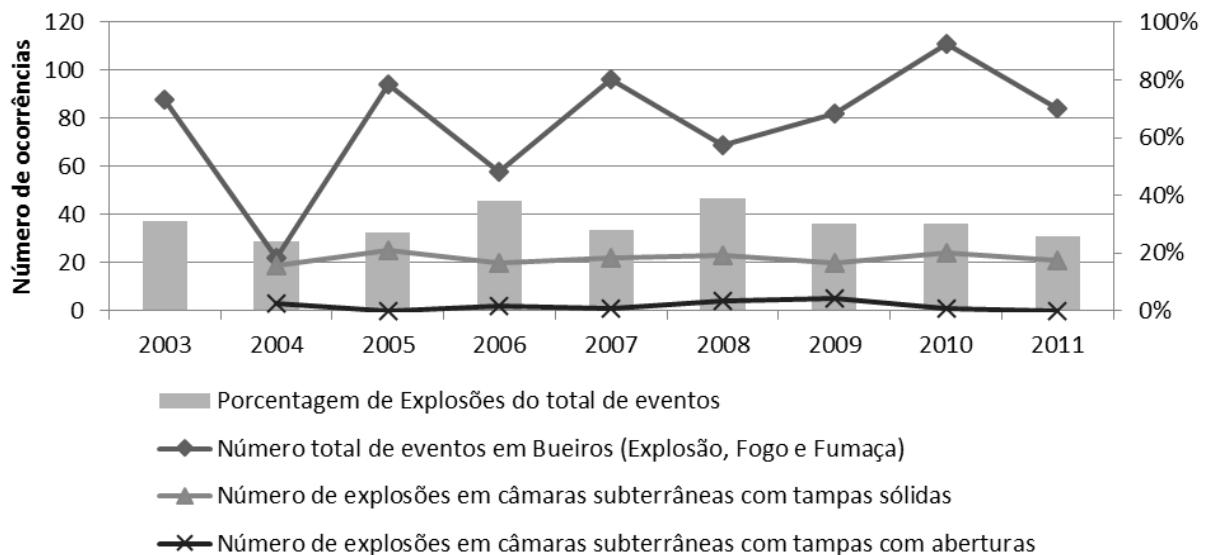


Figura 2.16 – Número total de eventos (explosão, incêndio, e fumaça), percentagem do número de explosões sobre o total de incidentes e relação do número de explosões em câmaras subterrâneas com tampa sólida e tampa com aberturas (Fonte: Adaptado de PSCDC, 2011)

### 2.2.3 Incidentes nas Redes subterrâneas e identificação dos cenários de perigo

A maioria dos eventos acidentais em câmaras subterrâneas de distribuição de energia é causada por falhas de cabos secundários não blindados, mas também podem ser provenientes dos cabos primários (Charytoniuk *et al.*, 2000; Koch & Carpentier, 1992; Zhang *et al.*, 2011).

Para Granata *et al.* (2001), a origem do envelhecimento e falhas nos cabos subterrâneos é dada principalmente por:

- Excesso no torque no aperto das abraçadeiras ( $>2\text{kgm}$ ) e/ou da manta;
- Movimentação do cabo devido, principalmente, dilatação/contração do condutor, ou vibrações impressas por máquinas elétricas, e etc.;
- Corrosão por submersão em lençóis freáticos, águas pluviais ou fluviais;
- Corrosão por circulação de correntes induzidas, corrosão eletrolítica;
- Decomposição térmica da celulose do papel, produzindo monóxido de carbono e causando a saturação do óleo;
- Variações de potências provocam variação de temperatura que criam deformações ou variações de esforços, comprometendo as blindagens metálicas do condutor.

Outro ponto chave na origem de falhas nos sistemas de distribuição subterrânea é proveniente de interferências externas, como:

- Compartilhamento do uso do subsolo e interferências com outras concessionárias de serviço público e privado, como gás canalizado, telecomunicações, distribuição de água e coleta de esgoto, TV a cabo, sistema de drenagem pluvial, rede de metrôs, e etc.;
- Alagamento de câmaras subterrâneas;
- Entupimentos e obstrução de bueiros e tampas;
- Depredação e roubo de instalações e de infraestrutura.

Segundo Snodgrass & Black (2005) e Zhang et al. (2011), pode-se dividir os eventos nos bueiros em pelos menos duas principais classes: (i) a primeira ligada diretamente a eventos predominantemente elétricos, e (ii) a segunda ligada às reações químicas exotérmicas. Walsh & Black (2002, 2005) focaram seus estudos na primeira classe de eventos. Já Zhang et al. (2011) realizaram um estudo aprofundado no segundo tipo de classe de eventos.

Nos eventos predominantemente elétricos, podemos destacar alguns modos de falhas nos sistemas de distribuição, tais como curto-círcito, sobrecarga de corrente e formação de arco elétrico (Garcez & Almeida, 2012).

A ocorrência de curto-círcito em redes de BT ou MT pode inflamar o isolamento do cabo ou equipamentos adjacentes, resultando em uma combustão autossustentada. Desta forma, pode gerar a decomposição de materiais polímeros, gerando gases combustíveis e tóxicos (Zhang et al., 2011).

Quando o tempo de ocorrência do curto-círcito é longo e/ou intermitente pode resultar no sobreaquecimento de equipamentos elétricos circunvizinhos, tais como cabos, transformadores, chaves, etc. e, consequentemente, iniciar um incêndio no local, havendo liberação de calor e fumaça.

Para Zhang et al. (2011), existe outro tipo de queima de cabeamento secundário que pode ser bastante prejudicial, chamada de queima *smoldering*. Ela é gerada através de falhas de curto-círcito contínuo ou intermitente de pequena ou média intensidade. A queima *smoldering*, em contraste à queima em chamas, ocorre internamente na fase sólida, ao invés da gasosa. Apesar da sua característica de combustão fraca, ela representa um grande perigo de incêndio, podendo ser iniciado facilmente, pois ela mantém-se latente por longos períodos e pode espontaneamente se tornar em chamas. Além disso, o *smoldering* pode gerar grande quantidade de gases tóxicos e combustíveis e uma grande quantidade de fumaça (Aldushin et al., 2006; 2009).

No modo de falha de sobrecarga de corrente, ela pode causar o sobreaquecimento e incêndio do cabeamento e do seu isolamento, podendo produzir compostos gasosos combustíveis e tóxicos. Esses gases gerados podem se acumular no ambiente confinado, e quando o nível de concentração estiver dentro dos limites de inflamabilidade, e na presença de uma fonte de ignição, pode gerar o evento explosão e liberar uma grande quantidade de energia dentro da câmara subterrânea (Koch & Carpentier, 1992).

As sobrecargas de corrente podem gerar falhas nos transformadores de potência. Os transformadores comutam energia entre circuitos, alterando a voltagem de um circuito para o outro. O aumento repentino de sobrecarga, conjuntamente com outras falhas do equipamento, pode causar uma explosão do transformador. A depender do tipo de transformador, o equipamento possui dezenas ou centenas de litros de óleo mineral, que tem a função de resfriamento e isolamento do equipamento. Entretanto, dada contínuas ou intermitentes sobrecargas, elas causam a degradação e contaminação do material isolante podendo gerar faíscas, e, consequente, incêndio do material e explosão do transformador, mas a ocorrência desse evento é rara.

O arco elétrico, que será o foco deste estudo, é basicamente um curto-circuito que ocorre no ar quando existe uma diferença de potencial no ar entre dois eletrodos. Ele move-se em alta velocidade e alta temperatura (alcançando facilmente 7700°C a 8500°C).

Deste modo, o arco libera grandes quantidades de energia (cerca de 10.000kW por ciclo), com elevadas temperaturas e alto nível de ruído. A quantidade de energia libertada durante o evento depende dos valores de voltagem, de corrente e da duração do arco. A duração depende da magnitude da corrente de falta e as configurações de dispositivos de proteção. A magnitude da corrente de falha está sujeito a muitas variáveis, e assim é difícil prevê-las perfeitamente (Gammon & Matthews, 1999; Walsh & Black, 2005).

Para Gammon & Matthews (1999), os arcos podem ser iniciados de três formas diferentes: (i) através da descarga elétrica, (ii) do contato físico, e (iii) pela transição *glow-to-arc*. A formação do arco pode ocorrer em diversos equipamentos elétricos, como dispositivos de manobra de proteção ou seccionadores, disjuntores, contactores e etc.

Ao se separar dois eletrodos (por desligamento ou seccionamento), a corrente elétrica passa a circular entre os eletrodos por uma camada metálica mais fina, formando uma ponte. Consequentemente, aquecendo-as e provocando a fusão e evaporação desse material. Uma vez desfeita a ponte, a corrente começa a circular pelo arco elétrico, aumentando-o cada vez mais

quando se afasta um eletrodo do outro, permanecendo estacionária a certa distância, e provocando nas peças de contato, uma queima.

Aumentando ainda mais a distância entre os contatos, o arco sofre um deslocamento, gerado pelo próprio campo magnético, se distanciando cada vez mais das peças metálicas de contato e aumentando seu próprio comprimento, até que em certa distância o arco se auto extingue.

A energia incidente ( $J/cm^2$ ) do arco elétrico, que é a quantidade de energia emitida em uma superfície, e a distância do limite do arco pode ser estimada pela norma IEEE 1584-2002 (IEEE1584, 2002) ou usando o modelo do estudo de Lee (Lee, 1982).

A energia gerada por um arco elétrico pode causar vários efeitos adversos. Estes incluem: produção de uma onda de pressão considerável (que pode ultrapassar à  $976\text{ kg/m}^2$ ), fazendo com que aconteça a projeção (arremesso) de equipamentos (ou partes) nas pessoas a metros de distância; pode causar queimaduras de alto grau (devido a jatos de vapores e gases ionizados em alta temperatura), pode produzir gases tóxicos, corrosivos e de combustíveis (devido à fusão e evaporação de materiais de isolamento e/ou da eletrólise, ou devido à degradação térmica – pirólise – de materiais orgânicos nas proximidades).

Além disso, a fusão e a evaporação do material do elétrodo pode produzir gotículas de metal fundido e de vapores, que podem causar queimaduras locais e incendiar roupas e outros materiais facilmente inflamáveis nas proximidades; e os raios do arco elétrico contêm raios ultravioletas intensos, e produz um nível elevado de ruído que podem causar danos à saúde humana. (Charytoniuk *et al.*, 2000; Hamel *et al.*, 2005; Hamel *et al.*, 2004; Koch *et al.*, 1993; Walsh & Black, 2002, 2005).

De acordo com Zhang *et al.*, 2006, as condições de aumento da pressão e do coeficiente de transferência térmica dependem de vários parâmetros tais como os tipos de gases de isolamento e de materiais de elétrodo, o tamanho das câmaras, bem como a densidade do gás.

Esta energia gerada tenta ser absorvida pela massa de ar, paredes e equipamentos que estão no local. No caso específico da câmara subterrânea, a quantidade de massa de ar é geralmente insuficiente para absorver toda a energia gerada pelo arco elétrico sem uma mudança brusca de temperatura e pressão do local. Estas alterações nos parâmetros de temperatura e de pressão dão origem às forças potencialmente perigosas que podem resultar em uma explosão no interior da câmara, dado que se trata de um espaço confinado, gerando calor e ondas de choque (Walsh & Black, 2002; 2005).

Além disso, a ocorrência de uma falha com arco elétrico por longos períodos e ininterruptos, ou por períodos intermitentes, pode causar a degradação térmica do cabeamento, causada principalmente pela fusão e evaporação do isolamento do polímero, o que cria, assim, uma mistura complexa de combustíveis tóxicos e gases corrosivos dependendo o tipo de polímero utilizado e da temperatura atingida (Koch & Carpentier, 1992; Snodgrass & Black, 2005).

O nível de umidade e quantidade de sujeira nos dutos e câmaras/caixas são fatores importantes que contribuem para falhas intermitentes formando arcos elétricos, mesmo em sistemas de baixa tensão e com a presença de equipamentos de proteção (Charytoniuk *et al.*, 2000; Hamel *et al.*, 2004).

Em suma, a presença de gases combustíveis na câmara subterrânea pode existir a partir de duas principais fontes: (*i*) produzidos pelos próprios modos de falha que ocorrem no interior da câmara/caixa, ou (*ii*) originados por acontecimentos externos à câmara, devido a falhas nos sistemas de terceiros.

Quanto à fonte interna (*i*), tal como indicado anteriormente, os gases combustíveis são produzidos pelo modo de falha. Eles são tipicamente gerados por longos períodos de tempo, e esta mistura complexa de gases depende do tipo de polímero e da temperatura de pirólise, entre outros fatores. Esses gases podem se acumular, pois o local pode ser considerado como um espaço confinado. Zhang *et al.* (2009) identificaram quatro gases combustíveis principais ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$  e  $C_2H_6$ ) no ar devido a decomposição de um cabo exposto a uma temperatura de 500°C.

Quanto à fonte externa (*ii*), esta pode ser a partir de falhas em sistema de terceiros, por exemplo, vazamentos no sistema de distribuição de gás natural, ou por contaminação das águas subterrâneas (por líquidos inflamáveis/combustíveis) a partir de postos de combustíveis, postos de troca de óleo, oficinas mecânicas, indústrias, etc., ou devido à decomposição de material orgânico (sujeiras) encontrado na câmara.

De acordo com Strehlow (1980), quatro fatores podem influenciar a natureza do incêndio ou de explosão, os quais são:

- Tipo de combustível;
- Fluidez do gás, as condições do vento, a topografia do terreno e do ambiente;
- Demora da fonte de ignição ficar ativa, e;
- Tipo de fonte de ignição.

Em ambos os casos, se os gases combustíveis estiverem presentes, ou não, uma vez que a estrutura da câmara subterrânea é geralmente rígida, com umas poucas aberturas estreitas (por exemplo, aberturas por onde passam o cabeamento através dos tubos), a energia gerada pela explosão não é absorvida totalmente. E, portanto, ela é liberada através dos pontos mais fracos do sistema, que geralmente são as tampas de acesso. A pressão interna gerada pode ser grande o suficiente para deslocar a tampa da câmara (ou lançá-la a alguma distância), a fim de aliviar esta pressão. Em casos mais extremos, o teto da câmara/caixa subterrânea pode ser levantado por conta do grande aumento da pressão.

A ocorrência de incêndio no interior da câmara subterrânea pode gerar uma grande quantidade de fumaça, devido à queima de equipamentos, da evaporação de água ou de esgoto no local, ou pela ocorrência da combustão incompleta (Koch & Carpentier, 1992; Zhang *et al.*, 2009).

Em situações em que existam aberturas nas câmaras subterrâneas (tampas ventiladas, sistema de escape ou grandes aberturas nos dutos de cabos), ou seja, o gás e o ar não estão totalmente confinados, e considerando a liberação (vazamento) de gases combustíveis (proveniente, principalmente, de sistemas de terceiros), pode haver misturas muito pobre ou muito rica de gás combustível com o ar, mas que ainda permaneçam dentro dos limites de inflamabilidade. Com a presença de uma fonte de ignição, dois eventos são permissíveis de ocorrer dependendo da densidade do gás combustível (Garcez & Almeida, 2012):

- (i) Se o gás combustível é mais denso do que o ar, forma-se uma nuvem de vapor que pode acumular-se perto do solo, e pode explodir quando em contato com uma fonte de ignição. Isto cenário de perigo é chamado de explosão não confinada em nuvem de vapor (em inglês, *Unconfined Vapour Cloud Explosion – UVCE*);
- (ii) Na presença de gases menos denso do que o ar pode-se haver uma dispersão destes gases, quando em contato com uma fonte de ignição pode causar um cenário de perigo *flash fire*, onde a frente da chama percorre ao longo da nuvem a uma velocidade baixa (subsônica), de que modo que as consequências por ondas de pressão são mínimas. Entretanto, a maior parte das consequências desse cenário de perigo é advinda pela alta radiação térmica em curto tempo de duração, e da ocorrência de incêndios secundários. Normalmente, seu maior impacto se dá dentro da zona de combustão. Em ambientes confinados, o *flash*

*fire* pode consumir o oxigênio do ambiente tornando-o impróprio para a manutenção da vida humana.

Como uma importante contribuição desse estudo, é utilizada uma ferramenta indutiva investigativa de incidentes, que é a metodologia de “Árvore de Eventos”, mais detalhada na próxima seção. Ela permite uma combinação lógica dos eventos e suas circunstâncias para determinar os principais cenários de perigo avaliados por um modo de falha.

#### 2.2.3.1 Análise de Árvore de Eventos (ETA – *Event Tree Analysis*)

A Análise de Árvore de Eventos é uma técnica formal e indutiva de um sequenciamento lógico (diagrama lógico) que retrata graficamente a combinação de eventos e circunstâncias em uma ocorrência de um acidente.

Inicia-se com a ocorrência de uma falha até o resultado final (a consequência), onde cada ramo da árvore de eventos representa os cenários de perigos resultantes. O procedimento geral para estabelecer a árvore de eventos inclui as seguintes etapas (Skalavounos & Rigas, 2006):

- Determinação dos eventos iniciais que pode resultar em certo tipo de acidente;
- Identificação dos fatores críticos que podem afetar a evolução do evento inicial;
- Construção da Árvore de Evento levando em consideração a interação entre os fatores críticos e o evento inicial;
- Designação e avaliação de resultantes eventos accidentais.

Os cenários de perigo são resultados dos modos de falhas e os principais fatores que afetam substancialmente a evolução do evento, tais como: o modo de falha, nível de concentração dos gases combustíveis, densidade do gás combustível, *delay* da fonte de ignição, presença de espaço confinado, e a pressão interna gerada, como anteriormente descrito na Seção 2.2.3, e resumido graficamente conforme mostrado na Figura 2.17.

Conclui-se que os incidentes perceptíveis à população em câmaras subterrâneas ou caixas de passagem de distribuição de energia se resumem em (Radeva *et al.*, 2009; Snodgrass & Black, 2005; Stone & Webster, 2001; Zhang *et al.*, 2011):

- Fumaça saindo da câmara ou caixa subterrânea: é possível ver fumaça, mas nenhuma chama visível, escapando dos furos na tampa do bueiro ou ao seu redor;
- Fogo (incêndio) na câmara: uma chama é visível nos furos ou ao redor da tampa, mas a mesma ainda permanece na sua sede;

Explosão na câmara: uma grande liberação de energia a partir da câmara subterrânea ocorre, e uma ou mais tampas podem ser desalojadas ou projetadas de suas respectivas sedes, ou, ainda, outros resíduos, como cimento ou terra podem ser projetados pelo ar.

Falha	Evento Inicial (Modo de Falha)	Nível de concentração dos gases combustíveis dentro da faixa de inflamabilidade	Densidade do gás combustível com relação ao ar	Fonte de Ignição	Espaço Confinado	Pressão interna gerada suficiente para projetar a tampa da câmara	Cenário de Perigo (0)
Eventos em câmaras/caixas subterrâneas	Arco elétrico	Sim	Menor Densidade	Imediata	Sim	Sim	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Incêndio / Luz e ruídos intensos / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
				Não	Sim	Sim	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / Flash Fire / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / Flash Fire / Incêndio / Fumaça
			Maior Densidade	Imediata	Sim	Sim	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
				Não	Sim	Sim	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / UVCE / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / UVCE / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
		Não	---	---	Sim	Sim	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça / Onda de pressão e calor
						Não	Explosão interna com projeção da tampa da câmara / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça
						Não	Explosão Interna / Luz e ruídos intensos / Incêndio / Fumaça / Onda de pressão e calor

Figura 2.17 – Árvore de eventos causado pela falha com arco elétrico

Conclui-se que os incidentes perceptíveis à população em câmaras subterrâneas ou caixas de passagem de distribuição de energia se resumem em (Radeva *et al.*, 2009; Snodgrass & Black, 2005; Stone & Webster, 2001; Zhang *et al.*, 2011):

- Fumaça saindo da câmara ou caixa subterrânea: é possível ver fumaça, mas nenhuma chama visível, escapando dos furos na tampa do bueiro ou ao seu redor;

- Fogo (incêndio) na câmara: uma chama é visível nos furos ou ao redor da tampa, mas a mesma ainda permanece na sua sede;
- Explosão na câmara: uma grande liberação de energia a partir da câmara subterrânea ocorre, e uma ou mais tampas podem ser desalojadas ou projetadas de suas respectivas sedes, ou, ainda, outros resíduos, como cimento ou terra podem ser projetados pelo ar.

#### *2.2.4 Avaliação de risco em câmaras subterrâneas*

Para Koch & Carpentier (1992), mesmo considerando que a falha com arco elétrico em condutores isolados de baixa tensão é auto extingüível, e, consequentemente, não são tão perigosos para as pessoas ou propriedades, em seu estudo, eles perceberam que diversas falhas com arco ocorreram no subsolo da rede Hydro-Québec 120/240V e nos sistemas 347/600V e causaram explosões em câmaras subterrâneas no centro de Montreal.

Para rastrear a sua provável causa Koch & Carpentier (1992) realizaram uma série de testes em laboratório. Os resultados obtidos demonstraram que em dutos molhados e sujos, uma falha com arco pode assumir a forma de um arco interrompido, que é difícil, e senão impossível detecção para sistemas de proteção de sobrecarga comuns. Dessa forma, uma falha que tenha uma longa duração produz uma quantidade significativa de subprodutos gasosos combustíveis que se acumulam no espaço confinado, podendo formar atmosferas explosivas.

Walsh & Black (2002) descreveram a análise termodinâmica e mecânica de um processo de explosão em uma câmara subterrânea considerando o evento de explosão de mistura de gases combustíveis. Eles realizaram um modelo computacional para predizer a temperatura e pressão interna da câmara decorrente desse evento.

Uma exemplificação do comportamento da pressão dentro de uma câmara subterrânea é mostrada na Figura 2.18 (conforme condições de estudo numa câmara padrão para o caso de explosão de gás padrão, elaborado no estudo de Snodgrass & Black (2005)).

Para esse exemplo, inicialmente, a tampa de aço não está afixada à câmara e ela é mantida no assento pela força da gravidade do próprio peso. Com a ocorrência da explosão pode-se atingir rapidamente a uma pressão de 111 kPa dentro da câmara, que é suficiente para levantar (deslocar) a tampa da câmara. Posteriormente, o deslocamento da tampa permite a vazão de gases de combustão para a atmosfera, e então a pressão cai momentaneamente.

Entretanto, ainda existe o aumento de pressão devido ao processo de combustão, que continua a ganhar força, atingindo um valor de pico de  $130\text{ kPa}$ , embora exista a liberação de gases para atmosfera devido ao diâmetro da tampa do bueiro, que no estudo em específico é de 1 metro de diâmetro.

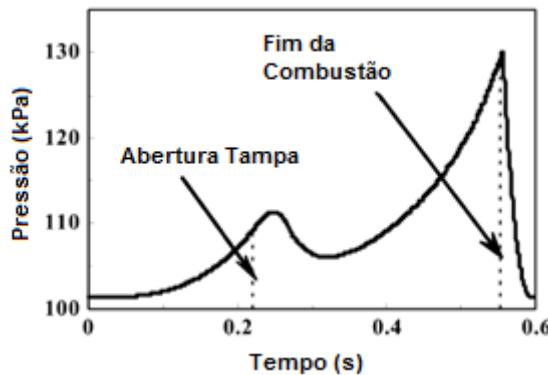


Figura 2.18 – Comportamento da pressão dentro de uma câmara subterrânea, considerando que a tampa seja deslocada (projetada) durante a explosão (Adaptado de Snodgrass & Black (2005))

Sob as mesmas condições da análise anterior, é mostrada na Figura 2.19 a velocidade calculada e a altura atingida pela tampa da câmara em função do tempo decorrido. A altura atingida pela tampa demonstra o risco potencial representado pelo evento explosivo quando a tampa é deslocada sobre um local urbano, com a presença de pedestres e veículos.

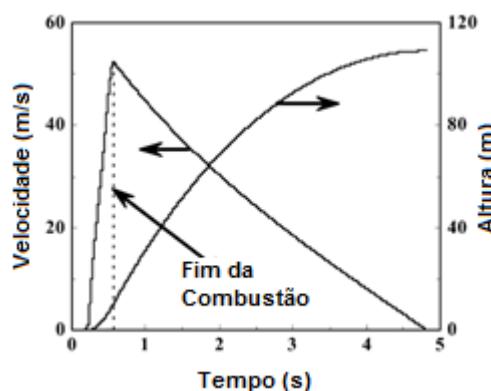


Figura 2.19 – Altura vertical e velocidade de subida da tampa de ferro durante uma explosão de gás padrão dentro de uma câmara subterrânea (Adaptado de Snodgrass & Black (2005))

Em outro estudo, Walsh & Black (2005) descreveram um modelo computacional que é capaz de calcular a pressão e a temperatura interna da câmara subterrânea causado por um evento de arco elétrico. O cálculo da pressão pode ser utilizado para antever as forças que exercerão na tampa de bueiro, para que a mesma possa ser desalojada de sua sede. Ainda, com

o conhecimento de pressão e temperatura do cenário de falha é possível avaliar modificações de projeto na tentativa de melhorar a segurança.

Walsh & Black (2005) avaliaram, de forma comparativa, alguns cenários que consideram o volume interno da câmara (pequeno ou grande), o tamanho do diâmetro da tampa do bueiro (pequeno ou grande) e características do arco elétrico que estão relacionados à magnitude da voltagem e corrente (fraco ou forte) (para maiores detalhes verificar no trabalho de Walsh & Black (2005)).

A primeira análise dos resultados para diâmetros da tampa das câmaras subterrâneas diferentes, concluiu-se que diâmetros menores têm maior restrição do fluxo de saída do ar aquecido, gerando uma maior pressão e temperatura interna e, consequentemente, a altura de subida vertical e velocidade da tampa foram maiores para diâmetros menores da tampa, conforme mostrado na Figura 2.20.

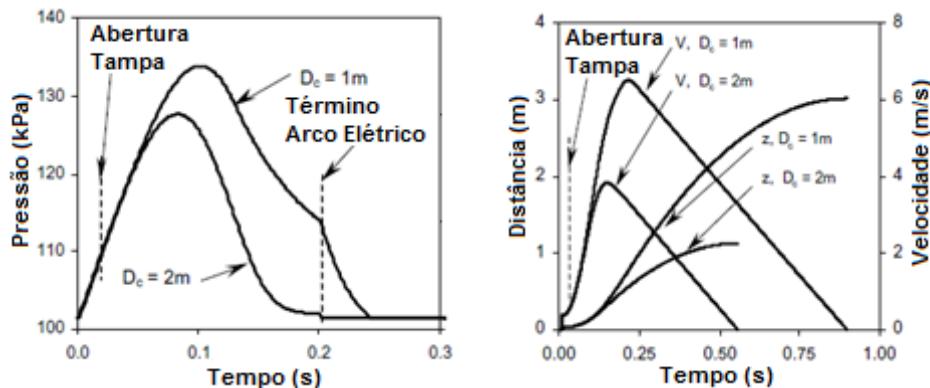


Figura 2.20 – Relação da pressão (esquerda), velocidade e altura da tampa (direita) resultante para eventos de arco em câmara subterrânea para diâmetros diferentes da tampa ( $D_c$  – Diâmetro da tampa) (Fonte: Adaptado de Walsh & Black, 2005)

Na segunda análise foram avaliadas as variações dos resultados de pressão e temperatura quando considerado volumes internos diferentes das câmaras subterrâneas. Concluíram que pico de pressão para a câmara menor é maior, devido ao fato de existir uma menor quantidade de ar interno à câmara/caixa para absorver a quantidade fixa de energia dissipada pelo arco, conforme mostrado na Figura 2.21. Mas os resultados sugerem que o efeito do volume da câmara subterrânea na altura resultante a qual a tampa é propelida é bastante pequeno.

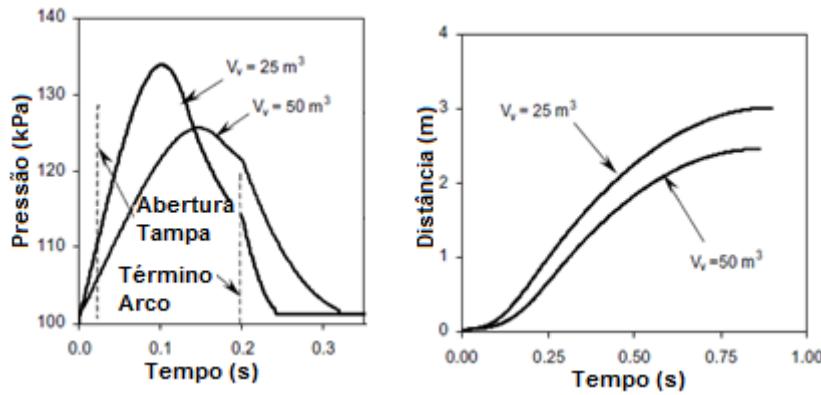


Figura 2.21 – Relação da pressão (esquerda), velocidade e altura da tampa (direita) resultante para eventos de arco em câmara subterrânea com volumes internos para diâmetros diferentes da tampa ( $V_v$  – Volume da câmara) (Fonte: Adaptado de Walsh & Black, 2005))

Na terceira, e última análise, Walsh & Black (2005) avaliaram os efeitos para diferentes intensidades do arco elétrico. Concluíram que a pressão para um arco forte é aproximadamente cinco vezes maior do que um arco fraco, conforme mostrado na Figura 2.22.



Figura 2.22 – Relação da pressão (esquerda), velocidade e altura da tampa (direita) resultante para eventos de arco em câmara subterrânea com volumes internos para diâmetros diferentes da tampa ( $V_v$  – Volume da câmara) (Fonte: Adaptado de Walsh & Black (2005))

Rudin *et al.* (2010) utilizaram a metodologia *machine learning*, com dados históricos, para classificar as instalações subterrâneas de rede elétrica de acordo com sua vulnerabilidade para eventos graves, tais como incêndio, explosões e fumaça. Em trabalho complementar, Radeva *et al.* (2009) avaliaram a eliminação de *outliers* e a eliminação de características preditivas falsas, de forma a melhorar qualidade do modelo anterior.

#### 2.2.4.1 Cálculo da energia incidente causado pelo arco elétrico

A energia incidente de um arco elétrico pode ser estimada pela norma IEEE1584 (IEEE1584, 2002) conforme expressada na Equação (2.19).

Esses cálculos são limitados as seguintes características: sistema de 208V a 15kV, trifásico, e com possíveis correntes de falhas de magnitude de 700A à 106kA. Para sistemas fora das especificações anteriores pode-se utilizar do método de Lee (Lee, 1982) para cálculo da energia incidente (Equação (2.21)):

$$E = 4,184 \cdot C_f \cdot E_n \cdot \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \quad (2.19)$$

onde  $C_f$  é o fator baseado na tensão do sistema (1,5 para voltagens menor que 1 kV e 1,0 para voltagens acima de 1 kV);  $E_n$  é a energia incidente normalizada para um arco elétrico com duração de 0,2 segundos a uma distância de trabalho de 610 mm ( $J/cm^2$ );  $t$  é o tempo de duração do arco elétrico (s);  $D$  é a distância de trabalho da fonte do arco (mm); e o expoente da distância,  $x$ , é definida pela Tabela 4 do padrão IEEE 1584 (ver, Tabela 2.4).

A energia incidente normalizada,  $E_n$ , é expressa por:

$$E_n = 10^{(k_1+k_2+1,081\log(I_a)+0,0011G)} \quad (2.20)$$

onde  $K_1$  é uma constante relacionada à configuração do equipamento (-0,792 para configurações “abertas” (*open-air*) e -0,555 para configurações enclausuradas);  $K_2$  é a constante dependente do sistema de aterramento (-0,113 para sistema aterrados e 0 para sistemas não-aterrados ou aterrados por impedância);  $I_a$  é a corrente de falha em arco (kA); e  $G$  é a distância (*gap*) entre os condutores (mm).

*Tabela 2.4 – Expoente da distância definida pela tabela 4 da norma IEEE 1584 (Fonte: IEEE1584 (2002))*

x	Tipo de Equipamento	kV
1,473	Chave Seccionadora	$\leq 1$
1,641	Painel	$\leq 1$
0,973	Chave Seccionadora	$> 1$
2	Cabo, Ambiente Aberto	

Devido a características dos dispositivos de sobrecarga, uma pequena variação na corrente de falha pode resultar em grande aumento da energia incidente devido ao longo período. Desta forma, o padrão IEEE1584 requer o cálculo da variação do tempo e da energia incidente para 85% e 100% da corrente de falha.

Para voltagens acima de 15 kV, a norma IEEE 1584 recomenda assumir que a corrente de falha do arco é igual a corrente de falha *bolted*. Já para sistemas de baixa voltagem, é possível assumir que a corrente de falha do arco seja a metade da corrente de falha direta (*bolted fault current*) disponível (Parsons *et al.*, 2008).

Para sistemas que estão fora das especificações definidas anteriormente, o cálculo da energia incidente ( $J/cm^2$ ) é baseado no método elaborado por Lee (Lee, 1982), que é expresso por:

$$E = 2,143 \cdot 10^6 \cdot V \cdot I_{bf} \cdot \left( \frac{t}{D^2} \right) \quad (2.21)$$

onde  $V$  é a voltagem do sistema (kV); e  $I_{bf}$  é a corrente de falha (kA).

O padrão IEEE1584 definiu empiricamente uma fronteira de proteção do arco-elétrico a partir das partes energizadas que são não isoladas ou expostas, dentro do qual as pessoas poderiam sofrer queimadura de segundo grau. Este limite é calculado por (IEEE1584, 2002):

$$D_B = \left[ 4.184 C_f E_n \left( \frac{t}{0.2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (2.22)$$

onde  $D_B$  é a distância do limite do ponto de arco (mm);  $C_f$  é um fator de cálculo (igual a 1,0 para tensões acima de 1 kV, e 1,5 para tensões iguais ou inferiores a 1 kV),  $E_n$  é a energia normalizada incidente;  $E_B$  é a energia incidente na fronteira limite  $J/cm^2$  (para o cálculo consultar (IEEE1584, 2002));  $t$  é o tempo (segundos);  $x$  é o expoente de distância (para detalhes, ver IEEE1584, 2002).

Segundo Lee (1982), a energia  $E_B$ , pode ser definida como 5,0  $J/cm^2$  (ou 1,2  $cal/cm^2$ ) para qual a pele nua (sem proteção) ou na classificação para o EPI (Equipamento de Proteção Individual), é a energia mínima que as pessoas poderiam receber causando uma queimadura de segundo grau (definido pela norma NFPA 70E - *National Fire Protection Association* - NFPA 70E-padrão 2004).

Desta forma, em ambientes expostos à possíveis falhas com arcos, os trabalhadores precisam utilizar adequado Equipamento de Proteção Individual (EPI). A norma NFPA 70E 2004 define cinco classes dos níveis de energia incidente de arco, que classificará os tipos de EPIs:

- Classe 0: para energia incidente acima de 1,2  $cal/cm^2$ ;

- Classe 1: para energia incidente acima de  $4 \text{ cal/cm}^2$  ;
- Classe 2: para energia incidente acima de  $8 \text{ cal/cm}^2$  ;
- Classe 3: para energia incidente acima de  $25 \text{ cal/cm}^2$  ;
- Classe 4: para energia incidente acima de  $40 \text{ cal/cm}^2$  ;

Parsons *et al.* (2008) relacionaram o tempo e a corrente de falha para definir as curvas de contorno da energia para cada uma das classes de níveis de exposição de energia definidas pelo NFPA 70E (2004), de forma a simplificar a análise e cálculos de exposição, conforme mostrado na Figura 2.23.

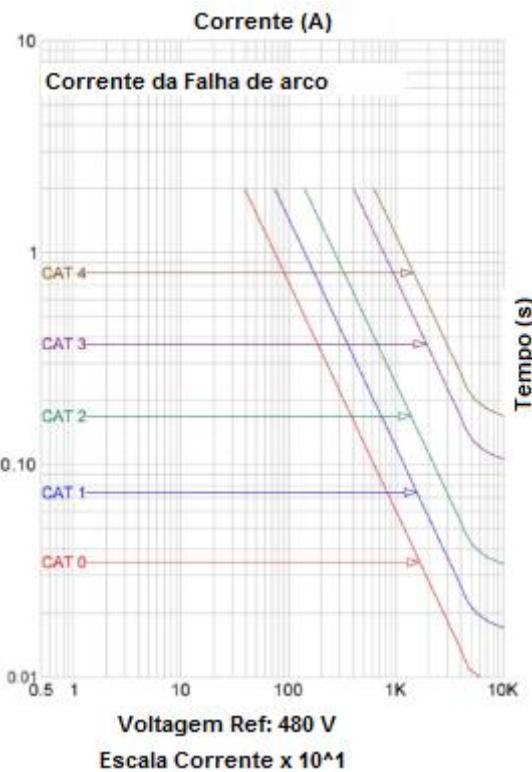


Figura 2.23 – Curvas de energia para um painel/MCC 480V aterrado solidamente (Fonte: Adaptado de Parsons *et al.* (2008))

Outro método de avaliação dos danos às instalações é o método de *Stanback*, que estabelece um limite prático para danos  $I_{arc}^{1.5}t$  de cerca de 250 vezes a taxa de *trip* do disjuntor de proteção em falhas fase-terra, que é determinado pela Equação (2.23), onde  $Y$  é a quantidade de material queimado em polegadas cúbicas (Gammon & Matthews, 1999).

$$\begin{aligned}
 Y &= 0.6564 \cdot 10^{-6} I_{arc}^{1.5} t \text{ para Barramento de ferro} \\
 Y &= 0.7230 \cdot 10^{-6} I_{arc}^{1.5} t \text{ para Barramento de Cobre} \\
 Y &= 1.519 \cdot 10^{-6} I_{arc}^{1.5} t \text{ para Barramento de Alumínio}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

## 2.2.5 Medidas de prevenção e mitigação

Segundo Snodgrass & Black (2005), existem duas principais classes de dispositivos de segurança relacionados a questões de explosões em câmaras. O primeiro está direcionado a prevenção, alertando os operadores quando as condições dentro da câmara são favoráveis à ocorrência de cenário de explosão. E o segundo objetiva a mitigação dos efeitos da explosão, considerando uma vez que o mesmo já tenha ocorrido.

Para Snodgrass & Black (2005), os critérios adotados para a concepção de um sistema de mitigação ou prevenção de explosão em uma estrutura subterrânea deve claramente considerar outros fatores, que não somente a questão de segurança, a fim de ser implementado, pois pode torná-lo financeiramente inviável, devido grande quantidade de estruturas subterrâneas.

Além disso, qualquer dispositivo que se agregue à câmara subterrânea já existente deve ser conveniente para a sua instalação, operação e não restrinja os equipamentos instalados internamente à câmara.

Finalmente, o dispositivo deve ser projetado para uma vida útil longa e exigir pouca ou nenhuma manutenção durante seus anos de serviço esperado.

### 2.2.5.1 Medidas Preventivas

Na primeira classe de dispositivos têm-se equipamentos que monitoram continuamente os níveis de concentração de gases combustíveis, para que quando atingidos os limites de inflamabilidade, formando uma atmosfera explosiva, os operadores sejam alertados, e sejam tomadas as devidas ações de prevenção.

No entanto, tais dispositivos, nada fazem para evitar a ocorrência de arcos elétricos, que é uma das principais causas de explosões em câmaras subterrâneas. Ainda assim, a utilização desses dispositivos em centenas ou milhares de câmaras e caixas de acesso torna-se impraticável ou, talvez, seja economicamente inviável.

Também uma forma preventiva é a realização de manutenções proativas na substituição de cabeamentos e equipamentos. Para isso, é essencial ter uma estratégia de gerenciamento efetivo com as seguintes características (DNV KEMA, 2009):

1. Efetiva coleta de dados e avaliação do cabeamento e equipamentos;
2. Completo relatório de falhas, detalhando o real modo de falha;
3. Desenvolvimento de modelos de taxa de falhas;
4. Desenvolvimento de modelos de confiabilidade para avaliar estratégias de manutenção proativa;
5. Programa de avaliação da condição para avaliar o risco e criticidade do cabeamento e equipamentos;
6. Efetivo teste de diagnóstico ou monitoramento contínuo;

Ainda, existem diversos dispositivos que permitem um meio de extinção de arcos elétricos, como, por exemplo: extinção a ar em condições normais; câmara de extinção a óleo; câmara de extinção a ar comprimido; sistema de extinção por sopro magnético; câmara de extinção a vácuo; sistema de extinção por areia, etc. Além disso, é possível o uso de relés de proteção na detecção da formação do arco, e, consequentemente, as consequências advindas dele.

Os relés de proteção devem ter características de rapidez na detecção do arco, de segurança e de confiabilidade, ou seja, devem detectar a formação de arco com altíssima velocidade e atuar no comando de abertura de disjuntores ou chaves para a extinção desse fenômeno e evitar consequências, mas ao mesmo tempo eles devem atuar somente nos momentos em que realmente tem-se a formação de um arco, senão torna-se inviável seu uso.

De acordo com Koch & Carpentier (1992), para alguns operadores de distribuição de energia elétrica secundária subterrânea BT, na esperança de que falhas fracas de arcos sejam auto extinguíveis e os arcos mais fortes sejam eliminados por proteções do transformador primário, muitas instalações dispensam sistemas de proteção de sobrecarga e de falta de aterramento no sistema secundário. No entanto, é provável que a falha intermediária irá se auto extinguir, mas com um período de duração maior, causando grandes danos aos isolamentos dos condutores.

Nos sistemas de distribuição subterrânea BT, os sistemas convencionais de proteção (por exemplo, fusíveis, disjuntores, circuitos de corte, etc.), às vezes, não são capazes de eliminar a falha com arco de pequenas dimensões, que frequentemente são intermitentes, ocorrendo de forma aleatória e, às vezes, ocorrendo por longos períodos de tempo (horas), o

que agrava ainda mais a degradação do isolamento dos cabos e a ocorrência de pirólise, e, consequentemente, a geração de gases combustíveis no ambiente confinado.

Outra forma de detecção da formação do arco é pela verificação da variação da intensidade de luz (considerando para esse caso um cubículo fechado) e a variação de altos níveis de corrente no sistema (Gammon & Matthews, 1999).

Para Koch & Carpentier (1992) não existem contra medidas simples para evitar os riscos da ocorrência dos arcos elétricos. Dependendo da falha e das condições ambientais, algumas medidas podem ser adotadas, como: melhorar a proteção de sobrecarga secundária; instalar proteção de falta de aterramento; limitar o comprimento dos alimentadores; uso de condutores com isolamentos neutros; fazer dutos, câmaras transformadoras e caixas de visita à prova d'água, e equipar câmaras e caixas subterrâneas com ventilação forçada permanente.

#### 2.2.5.2 Medidas Mitigadoras

Na segunda classe de dispositivos (dispositivos de mitigação), existem alguns procedimentos que minimizam as consequências do arco, mas não impedem a causa de formação do mesmo, como por exemplo, o uso de equipamentos de proteção pessoal (EPI) e coletiva (EPC), painéis mais resistentes e a utilização de manobras remotas.

Snodgrass & Black (2005) realizaram um estudo dos principais e mais promissores dispositivos de mitigação dos efeitos de uma explosão na câmara subterrânea, baseados pelo estudo técnico definido em Walsh & Black (2002; 2005).

Snodgrass & Black (2005) consideram em seu estudo os dispositivos de:

- (i) Fixação da tampa de acesso à câmara/caixa subterrânea através de parafusos;
- (ii) Tampas amarradas por cabos, correntes ou materiais elásticos;
- (iii) Tampas fabricadas com materiais mais leves;
- (iv) Tampas com ventilação;
- (v) Método de deslocamento de gás, e;
- (vi) A combinação dos procedimentos anteriores.

Nesse estudo, eles concluíram que prender (afixar) a tampa de bueiro através de parafusos não é uma prática recomendada, pois a quantidade de parafusos muitas vezes não é suficiente para suportar as altas pressões resultantes (que podem alcançar cerca de duas vezes mais, comparada a um cenário em que a tampa do bueiro não está afixada) quando a tampa é fixada e a câmara não é capaz de ventilar os gases aquecidos. No caso dos parafusos virem a falhar, haverá uma grande liberação repentina de uma altíssima pressão e a tampa estará

sujeita às forças potencialmente perigosas, deslocando-as a uma altura vertical, cerca de 2,5 vezes maior que a tampa sem fixação, conforme mostrado na Figura 2.24.

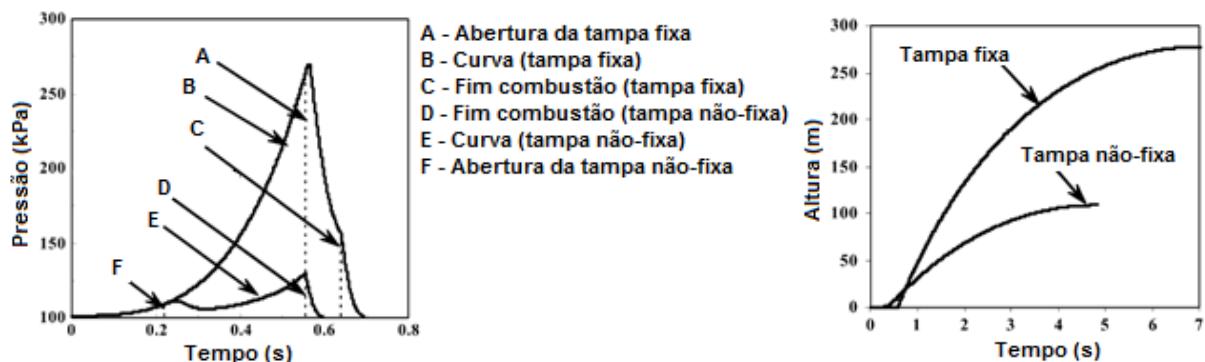


Figura 2.24 – Comportamento da pressão em uma explosão dentro de uma câmara subterrânea, com ou sem fixação da tampa (esquerda); e altura e velocidade de subida da tampa de ferro durante uma explosão de gás padrão dentro de uma câmara subterrânea (direita) (Fonte: Adaptado de Snodgrass & Black (2005)).

A ação mitigadora do uso de amarração na tampa permite a ventilação dos gases aquecidos causado pela explosão, quando a tampa é desalojada e, consequentemente, diminuindo a pressão interna, e ao mesmo tempo limitando a altura de deslocamento da tampa do bueiro. Existem diversos materiais de fabricação dessas “amarrações”, podendo ser materiais com maior rigidez ou flexibilidade. Concluíram que o uso de uma amarração rígida, como um cabo de aço ou corrente não é recomendada devido às forças excessivas que a tampa vai exercer sobre a amarração e os pontos de fixação.

Outra medida mitigadora investigada pelos autores Snodgrass & Black (2005), foi à utilização de tampas fabricadas com materiais mais leves. Uma tampa composta por um material mais leve tem duas vantagens razoáveis, que a menor força de inércia em uma amarração e, segundo, uma tampa mais leve reagiria mais rapidamente a um aumento de pressão e, portanto, tendem a reduzir a pressão máxima no interior da câmara, conforme mostrado na Figura 2.25.

O uso de tampas com ventilação (tampas vazadas) também tem vantagens, pois permitirá a redução das forças aerodinâmicas dos gases aquecidos, que fluirão nas aberturas da tampa. Outra vantagem seria a diminuição do próprio peso da tampa da câmara. O comportamento da pressão interna da câmara subterrânea na ocorrência de uma explosão no caso de ter uma tampa com ventilação é mostrado na Figura 2.26. Entretanto, esse tipo de tampa tem a desvantagem de permitir a passagem de sujeiras e água para o interior da câmara.

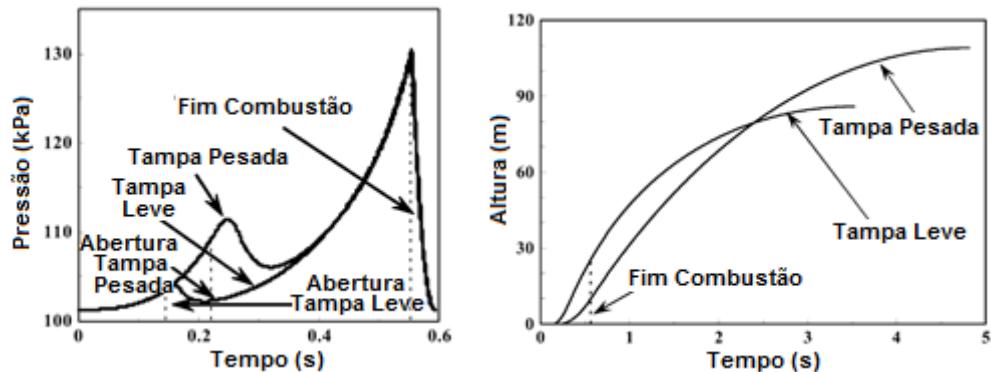


Figura 2.25 – Comportamento da pressão em uma explosão dentro de uma câmara subterrânea, com pesos de tampas diferentes (esquerda); e, altura e velocidade de subida da tampa de ferro e uma tampa mais leve durante uma explosão de gás padrão dentro de uma câmara subterrânea (direita) (Fonte: Adaptado de Snodgrass & Black (2005)).

Outro método analisado pelos autores Snodgrass & Black (2005) é a diminuição do espaço disponível para o ar dentro da câmara subterrânea, limitando assim o menor volume da quantidade de gás combustível para um evento explosivo. Isso pode ser feito, através do uso de uma membrana flexível ou balão que contenha gás inerte, preenchendo o espaço interno da câmara para reduzir o volume disponível para os gases da combustão.

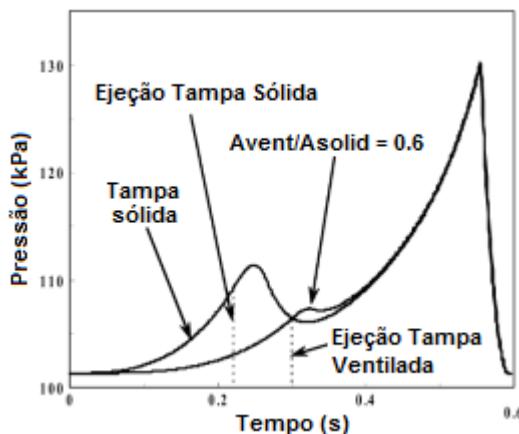


Figura 2.26 – Comportamento da pressão interna da câmara subterrânea padrão para uma tampa sólida e uma tampa com 60 por cento da área aberta durante uma explosão de gás padrão (Fonte: Adaptado de Snodgrass & Black (2005)).

Por último, os autores Snodgrass & Black (2005) analisaram a combinação dos dispositivos apresentados anteriormente, e concluíram que uma tampa fabricada com material mais leve, com ventilação e amarração elástica possuem um desempenho de segurança melhor do que as utilizando esses recursos mitigadores individualmente, conforme ilustrado na Figura 2.27.

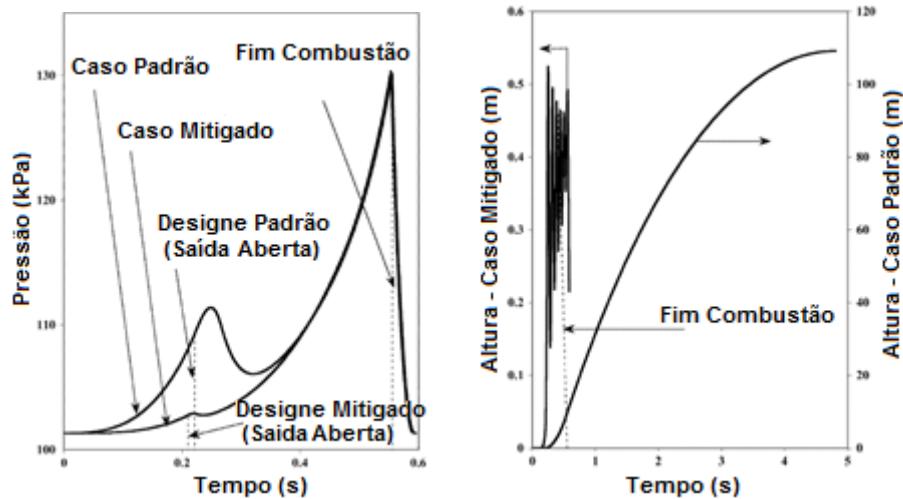


Figura 2.27 – Comportamento da pressão dentro da câmara padrão para tampa de ferro não afixada e tampa mais leve, ventilada e amarrada durante uma explosão de gás padrão (esquerda); e, altura de subida da tampa de ferro não afixada e uma tampa de material mais leve, ventilada e amarrada durante uma explosão de gás padrão (direita) (Adaptado de Snodgrass & Black (2005)).

Dessa forma, Snodgrass & Black (2005) mostraram medidas mitigadoras a um custo relativamente barato, de fácil instalação, baixa complexidade e com pouca ou nenhuma manutenção, portanto podendo ser instalados em maior número nas caixas transformadoras e caixas de inspeção, onde exista uma maior concentração de população ou instalações circunvizinhas.

Outra medida conjunta de prevenção e mitigação foi relatada em discussão no trabalho de Koch & Carpentier (1992), que seria a implementação de um dispositivo de detecção de gases combustíveis, que quando o detectado poderia liberar um gás inerte (como o dióxido de carbono ou nitrogênio) na câmara subterrânea, e, dessa forma, talvez a explosão dentro da câmara possa ser eliminada, ou pelo menos, diminuiria o impacto dos incêndios, encontrado em diversos dispositivos.

Para evitar a exposição direta dos trabalhadores podem-se utilizar cobertores que são colocados em frente das junções de cabos, como ilustrado na Figura 2.28. Segundo Hamel *et al.* (2005), essas mantas protegem os trabalhadores da radiação ultravioleta e luz intensa emitida pelo arco, mas não tem um efeito significativo sobre o nível do ruído, e também tem um efeito limitado sobre o aumento de temperatura do ar durante a falha.



Figura 2.28 – Cobertor protetor de junções e conectores (Fonte: Hamel et al. (2005))

### 2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho

Somente o uso de um sistema mais seguro de distribuição de energia elétrica, como é o caso do sistema subterrâneo, não tem sido suficiente para garantir à sociedade que acidentes não ocorram, e consequentemente, que diversas consequências possam advir desses cenários accidentais.

Nos últimos anos, no Brasil, diversos acidentes ocorreram na cidade do Rio de Janeiro, gerando um “clima” de medo nos moradores locais, pois não se sabe quando e onde ocorrerá o próximo evento acidental. Como forma ilustrativa, vide Figura 2.29, onde a tampa do bueiro é representada como uma bomba, demonstrando, assim, o apelo crítico (protesto) pela qual a sociedade enxerga o sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica.



Figura 2.29 – Como forma de protesto, a representação das tampas de bueiros como fossem bombas, ou alertas de perigo de explosão (Fonte: Figura esquerda (Terra, 2011), central (24horas, 2011) e direita (Extra Globo, 2011)).

A falta de explicações mais claras sobre as reais causas desses acidentes e a indicação que existia a possibilidade de ocorrer outros acidentes (risco de explosão) (O Globo, 2011), também, agrava mais ainda o clima de “pânico” da comunidade, logo, gerando uma perda da imagem da empresa, e, por conseguinte, provocando perda para companhia distribuidora.

Portanto, é preciso realizar ações conjuntas de manutenção, inspeção, operação, de segurança e de inovação tecnológica para garantir a confiabilidade e segurança desses sistemas.

Como, normalmente, esses sistemas possuem centenas ou milhares de subsistemas e, geralmente, os recursos disponíveis (monetário, tempo, mão-de-obra, tecnologia, etc.) das companhias distribuidoras são limitados e escassos, a tomada de decisão para escolher (classificar ou ordenar) qual alternativa (câmara/caixa subterrânea) deve ser contemplada por ações de prevenção e mitigação, torna-se uma tarefa complexa.

Primeiramente, para realizar a tomada de decisão, o decisor precisa definir uma estrutura de mensuração, para realizar a priorização de riscos dessas alternativas. Deste modo, o modelo proposto neste estudo fornece ao decisor uma medida de risco, sob a visão da teoria da decisão, que permite uma visão probabilística das consequências, na qual agrupa as consequências ( $c$ ) e incertezas  $(P(c|\theta, V_q); \pi_{V_q}(\theta))$  inerentes a este contexto avaliado.

Além disso, o modelo agrupa a estrutura de preferência do decisor no conjunto das consequências esperadas, através da função utilidade ( $u(c)$ ), e assim, refletindo os julgamentos de valor e a atitude frente ao risco do decisor, logo, formando uma relevante ferramenta para tomada de decisão.

As consequências são advindas de cenários accidentais. A literatura mostra diversos cenários de perigo que podem advir da falha com arco elétrico. Para isso, como uma importante contribuição deste estudo, utilizando-se da análise da árvore de eventos (Figura 2.17), são apresentados os mais relevantes cenários de perigo baseado nos principais fatores críticos que afetam substancialmente a evolução dos acidentes ocasionados pelo modo de falha.

A visão multidimensional de risco é um importante fator que enriquece este estudo, permitindo ao decisor ter uma visão mais realista e abrangente do conjunto de possíveis consequências, para a matriz de decisão a ser avaliada. Além disso, não foi verificada na literatura nenhuma abordagem multidimensional da avaliação de risco no contexto analisado deste trabalho.

Alguns estudos, como Brito & Almeida (2009), Brito *et al.* (2010), Alencar & Almeida (2010) e Lins & Almeida (2012), vêm tratando do contexto de análise de risco na visão multidimensional em dutos para transporte de gás natural e hidrogênio, na qual tratam as consequências sobre as dimensões de impacto sobre os seres humanos, ambiental e financeiro.

Ainda sob a visão multiatributo de risco, outros trabalhos como: Apostolakis & Lemon (2005) e Haimes (2011) têm tratado das vulnerabilidades de infraestrutura devido ao terrorismo; Linkov *et al.* (2006) discutiram a gestão de materiais contaminados, sedimentos e outras áreas; e, Hämäläinen *et al.* (2000) abordaram a gestão e planejamento de emergência nuclear.

As metodologias de MCDM tem um essencial papel nesta questão, pois permitem ter essa visão multiatributo e ainda auxilia o decisor na tomada de decisão. A escolha da metodologia MAUT, dentre diversas metodologias providas pelo MCDM, se deve ao fato do mesmo apresentar um protocolo bem estruturado, apoiado por uma estrutura axiomática bastante sólida e consistente para decisões que envolvem múltiplos critérios.

Além disso, segundo Almeida (2011, 2013), na etapa de modelagem probabilística, as incertezas são inseridas dentro da estrutura axiomática possibilitando uma abordagem mais consistente com relação à aplicação do MAUT em problemas de decisão multicritério sob situações de incerteza. Esta etapa da modelagem probabilística é um complemento à modelagem de preferências do decisor.

Como resultado final do modelo proposto é gerado uma medida de risco multidimensional, que forma um ordenamento em hierarquia de risco das diversas câmaras/caixas subterrâneas analisadas, que serve como *input* para o processo de gerenciamento de risco e recursos da companhia.

Desta forma, verifica-se a importância deste trabalho na proposição de um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para a análise de riscos em câmaras/caixas subterrâneas de um sistema de distribuição de energia elétrica subterrânea.

### 3 MODELOS PROPOSTOS DE AVALIAÇÃO DE RISCO

Nesta seção serão propostos dois modelos complementares elaborados para avaliação do risco em câmaras/caixas subterrânea do sistema de distribuição de energia elétrica, sob os aspectos da avaliação unidimensional e multidimensional do risco.

#### 3.1 Avaliação de Risco com Base na Função Utilidade Unidimensional

Normalmente, um sistema de distribuição de energia elétrica subterrânea tem centenas ou milhares de câmaras subterrâneas ou câmaras de acesso. Devido à grande variedade de ambientes interno e externos às câmaras e a ampla variedade de cenários de perigo (como mostrado na Figura 2.17), é evidente que as consequências de cenários acidentais devem ser analisadas com cuidado.

Este cuidado deve-se refletir na aplicação de metodologias de avaliação de risco e tomada de decisão, na qual mensurem as consequências e as incertezas para o decisor, tornando-as mais realistas e que facilite a alocação de recursos para a gestão de riscos e ações de manutenção.

Snodgrass & Black (2008) afirmam que uma explosão de gás ou uma falha com arco elétrico que ocorra em uma câmara subterrânea pode gerar consequências catastróficas, não apenas em termos de segurança para os pedestres nas proximidades, mas também em termos de danos ao equipamento contidos na câmara subterrânea. Walsh & Black (2005) afirmam que umas das principais causas de projeção de tampas de bueiro são causadas pela liberação repentina de energia a partir de um arco elétrico. Diversas consequências já foram detalhadas na Seção 2.2.3.

Para determinar os impactos que um cenário de perigo ( $\theta$ ) (definido pela árvore de eventos – Figura 2.17) poderá causar, é necessário definir o tamanho da zona de perigo, que inclui o ambiente circunvizinho, e, portanto, determinar os bens (pedestres, instalações, equipamento do sistema de energia elétrica, sistema de terceiros, e etc.) que estão inseridos na zona e que estão propensos a sofrer impactos adversos. De forma simplificada, a zona de perigo pode ser formada por duas áreas principais:

- A área interna da câmara subterrânea em que as consequências estão diretamente associadas com perdas de equipamentos, interrupção de distribuição de energia e da sua própria estrutura, e;

- A área externa (acima do solo) em que as perdas estão relacionadas com os impactos sobre a sociedade, aos seres humanos, as propriedades de terceiros, etc. Esta área externa pode ser determinada por dois principais fatores: (i) no que diz respeito à projeção e queda da tampa, e (ii) com respeito a energia incidente do arco elétrico. Para este primeiro modelo, o trabalho focará apenas sobre as consequências da área externa à câmara subterrânea.

### 3.1.1 *Zona de perigo externa associada ao local de queda da tampa*

Os estudos de Walsh & Black (2005) e Snodgrass & Black (2005) descreveram a análise termodinâmica e mecânica de um processo de explosão em uma câmara subterrânea considerando uma explosão de uma mistura de gás combustível (reações químicas exotérmicas). Já Walsh & Black (2005) descreveram uma modelagem computacional que é capaz de calcular a pressão e a temperatura no interior da câmara subterrânea causado por uma falha com arco.

No seu estudo, Walsh & Black (2005) concluíram (conforme anteriormente descrito na Seção 2.2.3), resumidamente:

- Que quanto menor for o diâmetro da tampa, maior é a restrição do fluxo de ar interno aquecido, o que gera uma temperatura e pressão interna mais elevada e, por conseguinte, uma maior elevação vertical e velocidade, se houver uma explosão;
- Que o pico de pressão para a menor câmara subterrânea é maior, devido ao fato de que há menos ar para dentro para absorver a quantidade fixa de energia dissipada pelo arco. No entanto, os resultados sugerem que a influência do efeito do volume da câmara é bastante pequena, e;
- Que a pressão gerada por um arco de maior intensidade é aproximadamente cinco vezes maior do que um arco de menor intensidade.

Walsh & Black (2005) elaboraram um modelo matemático que determina a projeção vertical da tampa de bueiro. Os parâmetros de temperatura e pressão no interior da câmara subterrânea podem ser determinados pela aplicação da lei da conservação de energia para o ar. A análise temporal do evento bueiro tampa de projeção pode ser dividido em duas fases principais: a fase I, a qual antecede o deslocamento da tampa do bueiro, e a Fase II, que é subsequente ao deslocamento.

Durante a Fase I da massa de ar no interior da câmara é constante e, portanto, pode-se considerar como um sistema fechado. Durante a fase II, a tampa da câmara sofre pressões internas que são suficientes para movê-la (deslocá-la) a partir do seu assento, transformando assim a câmara/caixa em um sistema aberto, na qual há liberação de ar através da abertura. Na modelagem feita pelos autores, várias suposições de simplificação foram utilizadas para a análise numérica, com vista a obter resultados mais pessimistas (piores cenários acidentais).

Na Fase II, quando há deslocamento da tampa da sua sede, a tampa sofre várias forças: resultantes do seu próprio peso, de forças de arrasto e da pressão devido ao evento de arco elétrico. Estas forças podem ser determinadas uma vez que a pressão no interior da câmara e da velocidade de saída do ar na abertura são conhecidas, de modo que a projeção vertical da tampa da câmara subterrânea pode ser determinada como uma função do tempo durante a fase II (Walsh & Black, 2005):

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{C_D A_c}{2m_c} \left[ \rho_e \left( V_{cl} - \frac{dx}{dt} \right)^2 - \rho_{atm} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 \right] - g \quad (3.1)$$

onde  $x$  é a componente da projeção vertical da tampa do bueiro ( $m$ );  $C_D$  é o coeficiente de descarga (*adimensional*);  $A_c$  é a área transversal da tampa ( $m^2$ );  $m_c$  é a massa da tampa ( $kg$ );  $\rho_e$  é densidade de saída de fluxo na chaminé;  $\rho_{atm}$  é a densidade atmosférica;  $V_{cl}$  é a velocidade de saída no centro da tampa ( $m/s$ ); e,  $g$  é a aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ).

Para os cálculos, os autores usaram a rotina numérica *Runge-Kutta-Nyström* para determinar em um dado instante à localização, velocidade e aceleração da tampa do bueiro. Entretanto, neste cálculo não faz nenhuma consideração com relação à determinação de componentes horizontais das forças, na qual permite avaliar a projeção da tampa em um ângulo diferente  $90^\circ$  do solo, isto é, somente a projeção vertical da tampa é estimada.

Um modo alternativo para avaliar a altura de subida da tampa é usando o conhecimento *a priori* de especialistas, ou, ainda, esta pode considerar a base de dados de acidentes ocorridos (como visto na Seção 2.1.4).

Depois de ter determinado o comportamento de deslocamento vertical da tampa com respeito ao tempo e também ter identificado os fatores que influenciam a determinação da sua altura máxima de subida vertical,  $x_m$ , então a área da zona de perigo acima do solo pode ser estimada.

Para estimar a extensão da zona de perigo em que a tampa da câmara possa ser projetada, uma forma simplificada, proposta neste estudo, é determinar um ângulo de projeção,  $\alpha_c$ , sobre a qual a tampa da câmara possa cair, conforme mostrado na Figura 3.1.

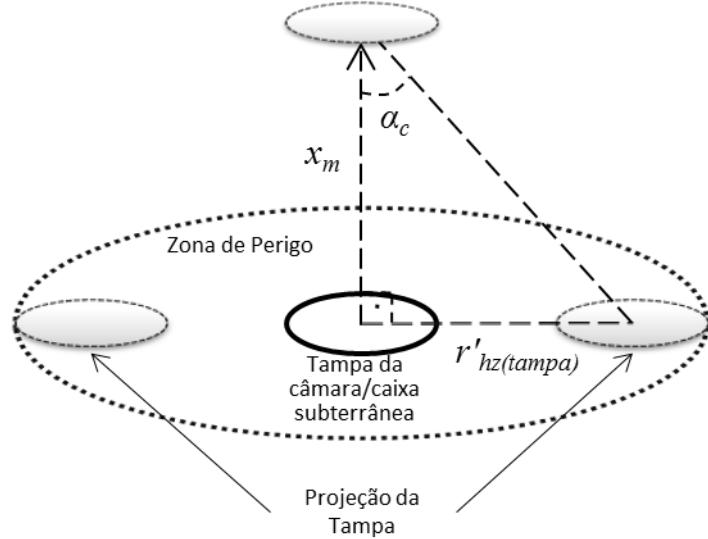


Figura 3.1 – Representação gráfica do raio da zona de perigo devido o arremesso da tampa do bueiro

O ângulo de projeção ( $\alpha_c$ ) é o resultado de diversas forças sobre o deslocamento da tampa quando esta permanece no ar, por exemplo, as forças do vento, ou da convecção de ar na chaminé, etc. Assim, o raio da zona de risco, determinado pela queda da tampa,  $r_{hz(tampa)}$  (m) é estimado por:

$$r_{hz(tampa)} = r'_{hz} + \frac{d}{2} = (x_m \cdot \tan(\alpha_c)) + \frac{d}{2} \quad (3.2)$$

onde  $d$  é o diâmetro da tampa do câmara subterrânea (m).

Além disso, como uma simplificação, supõe-se que o local da queda da tampa de bueiro dentro da zona de perigo segue uma distribuição de probabilidade uniforme, ou seja, o local em que a tampa possa cair tem a mesma probabilidade, em qualquer ponto dentro da zona de perigo.

Em um sistema de distribuição de energia urbano subterrâneo, existem duas localizações possíveis da tampa do bueiro a ser considerada (vide Figura 3.2). A primeira possibilidade é quando a tampa está localizada no passeio, e a segunda quando está localizada na rua/avenida. Ainda, considera-se que a tampa pode somente estar localizada no centro da calçada ou no centro da faixa de rua/avenida.

Além disso, neste estudo, considera-se que os pedestres transitam apenas sobre as calçadas, desta forma, desconsiderou-se os impactos sobre os seres humanos que estão fora da área da calçada, isto é, os impactos sobre as pessoas dentro dos carros não foram considerados.

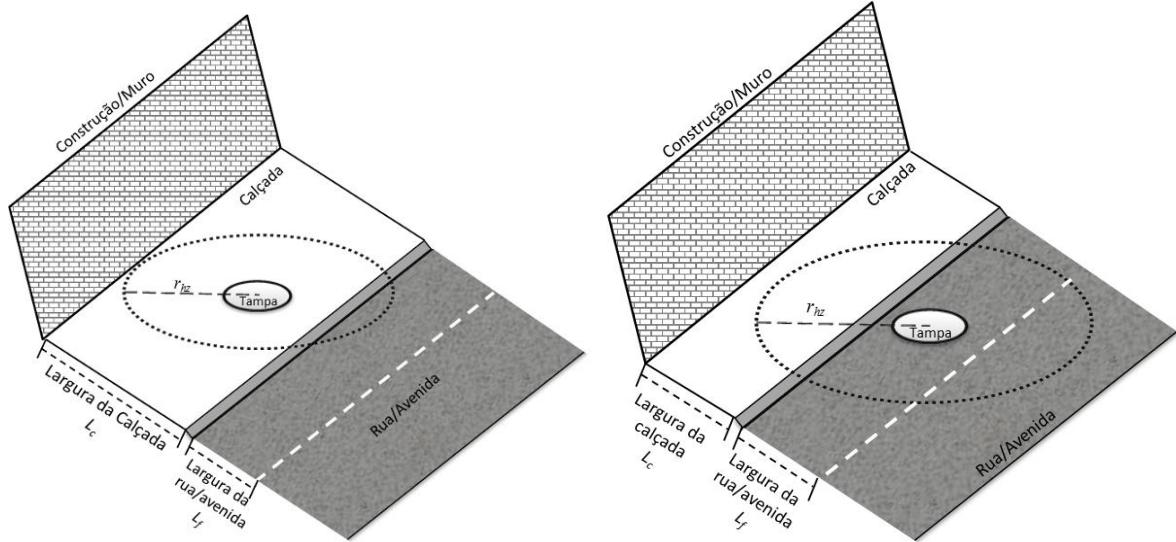


Figura 3.2 – Localização da tampa do bueiro (câmara/caixa subterrânea)

### 3.1.2 Zona de perigo externa associada à energia incidente gerada pela falha com arco elétrico

A segunda zona de perigo externa é a área afetada pela energia incidente do arco elétrico. Esta área pode ser estimada pelo padrão IEEE1584 (IEEE1584, 2002), que determina a distância máxima ( $D_B$ ), definida pela Equação (2.22), a partir do qual, as consequências geradas pela energia incidente geram danos à saúde humana (ao menos queimaduras de segundo grau).

Tendo determinado essa distância limite do ponto de arco elétrico ( $D_B$ ), é preciso determinar qual a distância na qual as pessoas externas à câmara/caixa subterrânea estão expostas a esse perigo. Considerando que o modo de falha ocorre no centro da câmara, como mostrado na Figura 3.3, a área da zona de perigo,  $r_{hz(energia)}$ , é calculada por:

$$r_{hz(energia)} = \cos\left(90 - \left(\tan^{-1}\left(\frac{d/2}{L}\right)\right)\right) \left( D_B - \sqrt{L^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2} \right) + \frac{d}{2} \quad (3.3)$$

onde  $r_{hz(energia)}$  é o raio da zona de perigo definida pelos danos causados pela energia incidente ( $m$ );  $D_B$  é a distância limite, para qual as pessoas não sofram queimaduras de

segundo grau ( $m$ );  $d$  é o diâmetro da tampa do bueiro ( $m$ ); e,  $L$  é a profundidade do local do arco elétrico para a abertura da câmara subterrânea ( $m$ ).

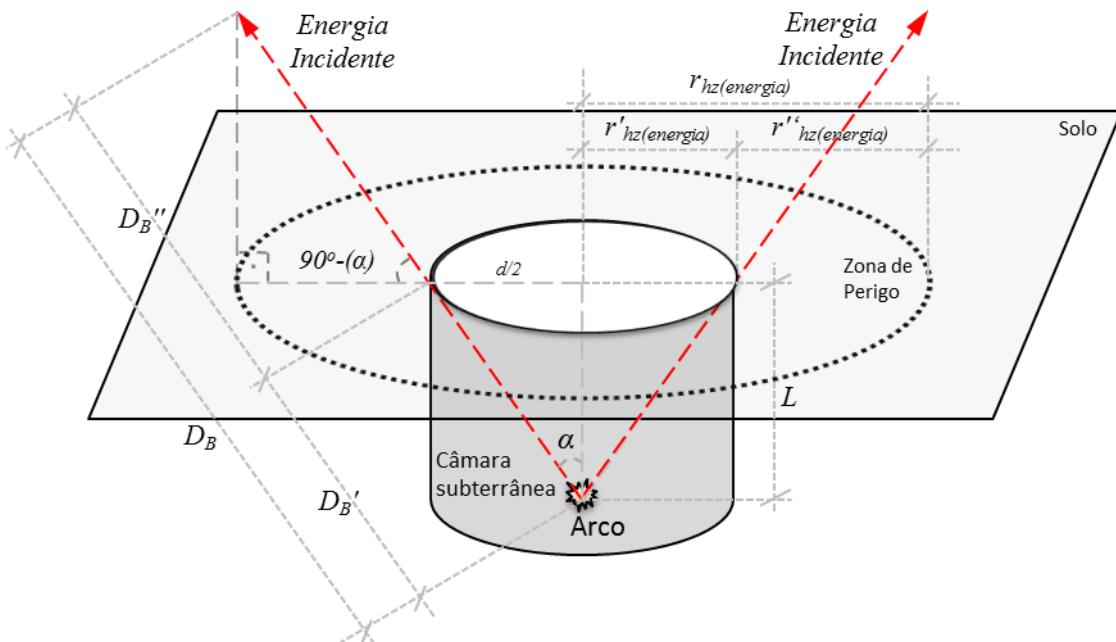


Figura 3.3 – Representação gráfica do raio da zona de perigo devido a energia incidente de um arco elétrico

### 3.1.3 Função consequência sobre os seres humanos

É necessário determinar os possíveis impactos (danos) dentro da zona de perigo, que são gerados pelo acidente. Sob uma visão unidimensional e tradicional das avaliações de risco, para esse primeiro modelo proposto serão considerados apenas as consequências sobre a dimensão humana (mais especificamente, os ferimentos, tendo uma visão mais conservadora), devido a falhas com arco elétrico, e apenas as consequências que afetam a zona de perigo externa à câmara/caixa subterrânea.

Avaliando o diagrama mostrado na Figura 3.4, os impactos sobre a dimensão humana dependem diretamente da localização e do tamanho da zona de perigo da câmara/caixa analisada.

O número de pessoas dentro da zona de perigo pode ser modelado pela Teoria das Filas (vide Seção 2.1.3). Considera-se a retenção do fluxo de pessoas em uma calçada como um processo de formação de filas, na qual a quantidade de pessoas que se encontram naquele momento é influenciada pela taxa de chegadas de pessoas e pela taxa de atendimento das mesmas.

De forma simplista, pode se partir do pressuposto que a taxa de chegada de pessoas em um determinado local da calçada segue um processo de Poisson ( $\lambda$ ), e que os tempos de atendimento são exponenciais ( $\mu$ ), já que são independentes uns dos outros. Os tempos de atendimento são influenciados pelo tipo de vizinhança a qual estar a analisar. Por exemplo, numa região comercial, é provável que a interferência das entradas de lojas e o tráfego desordenado de pessoas aumentem o tempo de atendimento (demora) das pessoas em um determinado local.

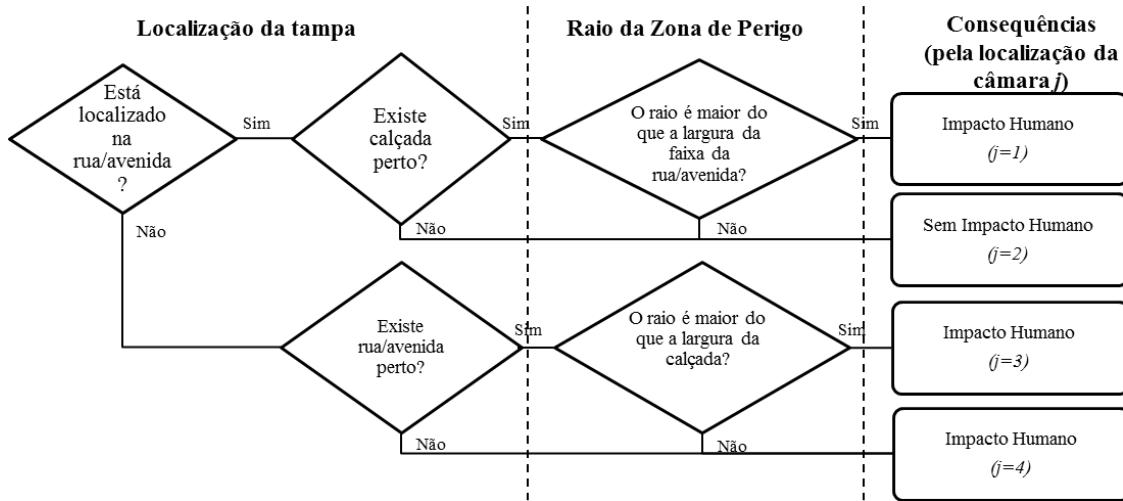


Figura 3.4 – Diagrama de consequência sobre a dimensão humana

Ainda, neste estudo, considera-se que o número de atendentes ( $s$ ) seja determinado pela largura da calçada inserida na zona de perigo ( $s \geq 1$ ). Desta forma, pode-se aplicar o modelo M/M/s definido pela Teoria das Filas no contexto analisado.

Considerando que se tem um fator de utilização  $\rho = \lambda/(s\mu) < 1$ , então se tem um número finito de pessoas na fila (região), que no caso específico se pode considerar um número finito de pessoas dentro da zona de perigo.

Como mencionado anteriormente, o número de atendentes depende da largura da zona de perigo que está inserida na área da calçada, já que se considera que as pessoas somente transitam pelas calçadas. Ela será determinada pela quantidade de pessoas que possam caminhar lado a lado. É suposto que cada pessoa ocupe uma largura mínima de 0,51 m.

Como visualizado pela Figura 3.4, o tamanho da zona de perigo será influenciada pela localidade onde o bueiro se encontra. Desta forma, o número de atendentes ( $s$ ) pode ser expresso por:

$$s = \begin{cases} \begin{cases} \frac{r_{hz} - \frac{L_f}{2}}{largura_{pessoa}} & se \frac{r_{hz} - \frac{L_f}{2}}{largura_{pessoa}} > 0 \\ 1 & se \frac{r_{hz} - \frac{L_f}{2}}{largura_{pessoa}} = 0 \end{cases} & para j = 1 \\ 0 & para j = 2 \\ \begin{cases} \frac{L_c}{largura_{pessoa}} & se \frac{L_c}{largura_{pessoa}} > 0 \\ 1 & se \frac{L_c}{largura_{pessoa}} = 0 \end{cases} & para j = 3 \\ \begin{cases} \frac{2r_{hz}}{largura_{pessoa}} & se \frac{2r_{hz}}{largura_{pessoa}} > 0 \\ 1 & se \frac{2r_{hz}}{largura_{pessoa}} = 0 \end{cases} & para j = 4 \end{cases} \quad (3.4)$$

onde  $s$  é um número positivo e inteiro de atendentes (servidores);  $L_c$  é a largura da calçada (m);  $L_f$  é a largura da faixa da rua (m);  $r_{hz}$  é o raio da zona de perigo (m); e,  $largura_{pessoa}$  é a largura da pessoa (m).

Pela Teoria das Filas, a probabilidade ( $P_n$ ) de exatamente  $c_H$  pessoas se encontrarem dentro da zona de perigo, quando o sistema atingiu a condição de estado estável, é dado por:

$$P(c_{H \text{ dentro} A_{HZ}} | \theta, r_{hz(tampa)}, V_q) = \begin{cases} P_0 & se c_H = 0 \\ \begin{cases} \begin{cases} (1-\rho)\rho^{c_H} & se s = 1 \\ \frac{P_0(\lambda/\mu)^{c_H}}{c_H!} & se s \geq c_H \\ \frac{P_0(\lambda/\mu)^{c_H}}{s!s^{c_H-s}} & se s < c_H \end{cases} & se c_H > 0 \end{cases} & se c_H > 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

onde  $\lambda$  é a taxa de chegada de pessoas na calçada (pessoas/s);  $\mu$  é a taxa de atendimento de pessoas na calçada (pessoas/s);  $V_q$  é a câmara/caixa analisada; e,  $P_0$  é a probabilidade de nenhuma pessoa encontrar-se dentro da zona de perigo, que é expresso por:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{c_H=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^{c_H}}{c_H!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \frac{1}{1-\lambda/(s\mu)}} \quad se \lambda < s\mu \quad (3.6)$$

A probabilidade de que uma ou mais pessoas sejam afetadas (sofram ferimentos) por causa de um evento acidental pode ser modelado por dois fatores:

1. Primeiro, existe o caso de algumas pessoas serem atingidas pela tampa, enquanto a tampa é projetada pelo ar e pela queda dela. Como o raio (tamanho) da tampa do bueiro é limitado, também, a possibilidade dela ferir pessoas é limitada a um determinado número de pessoas. Então, a modelagem do número de pessoas que podem sofrer ferimentos pela queda da tampa pode ser modelada como um processo de Poisson. A probabilidade de um designado número de pessoas com ferimentos é dada por:

$$P(c_H | \theta_i, r_{hz(tampa)}, V_q) = \frac{(\lambda_{Hi})^{c_H}}{c_H!} e^{-\lambda_{Hi}} \quad (3.7)$$

onde  $c_H$  é o número de pessoas com ferimentos; e,  $\lambda_{Hi}$  é o número médio de pessoas com ferimentos quando um acidente ocorre. Por suposição, é considerado que cerca de 1% das pessoas dentro da zona de perigo são feridas na ocorrência de um cenário acidental, isto é,  $\lambda_{Hi} = 0,01 \cdot nc_{\max}$ . Esse valor pode variar de acordo com o conhecimento do decisior e análise de dados históricos de eventos accidentais.

O número máximo de pessoas,  $nc_{\max}$ , dentro da zona de perigo ( $A_{hz(tampa)}$ ), pode ser estimada pela máxima densidade de pessoas agrupadas em um local. Este parâmetro é calculado pela divisão da área da zona de perigo pelo espaço mínimo ocupado por uma pessoa (é assumido ser  $0,1836 m^2$ ) ( $0,36m \times 0,51m$ ).

A área da calçada que está inserida na zona de perigo  $A_{hz}$ , que depende diretamente da localização ( $j$ ) do bueiro, pode ser expressa pela Equação 3.8.

$$(A_{hz})_j = \begin{cases} \frac{r_{hz}^2 \left( 2 \cos^{-1} \left( \frac{L_f / 2}{r_{hz}} \right) \right)}{2} - \frac{L_f^2 \tan \left( \cos^{-1} \left( \frac{L_f / 2}{r_{hz}} \right) \right)}{4} - \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 & \text{se } j = 1 \\ 0 & \text{se } j = 2 \\ \pi r_{hz}^2 - 2 * \left[ \frac{r_{hz}^2 \left( 2 \cos^{-1} \left( \frac{L_c / 2}{r_{hz}} \right) \right)}{2} - \frac{L_c^2 * \tan \left( \cos^{-1} \left( \frac{L_c / 2}{r_{hz}} \right) \right)}{4} - \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 \right] & \text{se } j = 3 \\ \pi r_{hz}^2 - \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 & \text{se } j = 4 \end{cases} \quad (3.8)$$

Portanto, a função de probabilidade da consequência que uma ou mais pessoas estejam na zona de perigo (Equação (3.5)), e que eles sejam feridos pela queda da tampa (Equação (3.7)) é dada por:

$$P_{tampa}(c_H | \theta_i, V_q) = \sum_{i=0}^{nc_{\max}} (P[N_{ferimentos} = c_H] [1 - P[N_{dentroA_{HZ}} \leq c_H]]) \quad (3.9)$$

Consequentemente, tem-se:

$$P_{tampa}(c_H | \theta_i, V_q) = \sum_{i=0}^{nc_{\max}} \left( \left( \frac{(\lambda_{Hi})^i}{i!} e^{-\lambda_{Hi}} \right) \left( 1 - \sum_{j=0}^{nc_{\max}} P(j_{ferimentoA_{HZ}} | \theta, r_{hz(tampa)}, V_q) \right) \right) \quad (3.10)$$

- Segundo, considerando-se a exposição ao acidente na zona de perigo, como uma consequência da energia incidente. Neste caso, a pessoa que está dentro da zona de perigo ( $A_{hz(Energia)}$ ) está susceptível a ter uma queimadura de segundo grau, devido ao fato do cálculo da zona de perigo já considerar essa consequência no seu resultado (mostrado na Equação (3.3)), então se tem:

$$P(c_H | \theta, r_{hz(energia)}, V_q) = 1 \quad (3.11)$$

Similarmente, a função probabilidade da consequência que uma ou mais pessoas estejam na zona de perigo (Equação (3.5)) e que elas sofram algum ferimento por causa da energia incidente é dado por:

$$P_{energia}(c_H | \theta_i, V_q) = \sum_{i=0}^{ne_{\max}} (P[N_{ferimentos} = c_H] [1 - P[N_{dentroA_{HZ}} \leq c_H]]) \quad (3.12)$$

Consequentemente, tem se:

$$P_{energia}(c_H | \theta_i, V_q) = \sum_{i=0}^{ne_{\max}} \left( 1 - \sum_{j=0}^{ne_{\max}} P(j_{ferimento} | \theta, r_{hz(energia)}, V_q) \right) \quad (3.13)$$

onde  $ne_{\max}$  é o número máximo de pessoas dentro da área de perigo ( $A_{hz(energia)}$ ), na qual é calculado de forma similar a  $nc_{\max}$ .

Como o objeto de interesse da análise de consequência é a ocorrência de ferimentos, irrestrito a qual seja a causa, então, tem-se:

$$P_{ferimentos}(c_H | \theta_i, V_q) = \sum_i \left[ \frac{\left( P_{energia}(c_H | \theta_i, V_q) + P_{tampa}(c_H | \theta_i, V_q) \right) -}{-\left( P_{energia}(c_H | \theta_i, V_q) \cdot P_{tampa}(c_H | \theta_i, V_q) \right)} \right] \quad (3.14)$$

onde  $i$  indica os diferentes cenários de perigos considerados ( $\theta_i$ ); e,  $P_{ferimentos}(c_H | \theta_i, V_q)$  é a função probabilidade de consequência de que uma ou mais pessoas estejam na zona de perigo e que sofram ferimentos, considerando qualquer umas das causas: seja pela queda da tampa do bueiro ou pela queimaduras devido a energia incidente.

Finalmente, substituindo a função de probabilidade da consequência (Equação (3.14)) na Equação (2.3), uma medida de risco de cada câmara subterrânea do sistema de distribuição de energia é obtida, uma vez que se avaliaram as consequências (sob a perspectiva de perda humana) e as probabilidades envolvidas na falha com arco elétrico, tendo:

$$r(V_q) = \sum_{\theta} \left( \pi_{V_q}(\theta) \left( - \int_c u(c) P_{ferimentos}(c_H | \theta, V_q) dc \right) \right) + (-1) \pi_{V_q}(\theta_N) \quad (3.15)$$

onde o índice  $\theta$  representa os diversos cenários de perigo considerados e  $V_q$  são as câmara/caixas subterrâneas analisadas. O valor da probabilidade do cenário de perigo ( $\pi_{V_q}(\theta)$ ) depende das características/condições de cada sistema analisado, tais como: tensão do barramento, intensidade da corrente de falha, condições de conservação do local e manutenção do sistema, etc.

A partir da medida de risco proposta é possível o decisão ranquear das diversas câmaras/caixas subterrâneas do sistema de distribuição de energia elétrica. No próximo modelo proposto será utilizada uma medida de risco multidimensional, agregando não somente as perdas sobre o homem, mas também perdas nas dimensões financeiras, operacionais, etc.

### 3.2 Modelo de Decisão para Avaliação de Risco Multidimensional com base no MAUT

Para uma alocação racional de um adicional investimento (recurso) no sistema de distribuição de energia elétrica subterrâneo, é necessário considerar diversos aspectos sob a ótica da segurança, financeiro, operacional, características externas do sistema, requisitos exigidos pelas agências reguladoras, concorrências de empresas, exigências da sociedade, etc.

Para formalizar o processo de decisão e garantir que ele é compatível com os objetivos da empresa, deve-se usar uma abordagem que permita incorporar os diversos critérios envolvidos neste processo, bem como as preferências do decisor. Para Keeney & Raiffa (1976), as metodologias MCDM são adequadas para tais situações.

Entre diversas problemáticas disponíveis (escolha, classificação, ordenamento), a necessidade de ordenamento emerge do decisor para construir uma lista das alternativas mais importantes em ordem de relevância (priorização). Neste caso particular, é uma hierarquia de risco, de modo que as alternativas são as câmaras/caixas subterrâneas do sistema, e elas serão tratadas até ao momento em que não haja mais recursos disponíveis.

Para definir uma hierarquia, em um contexto de riscos, é necessário dispor de modelos de consequência. Como mencionado anteriormente, de acordo com a Aven (2012), a definição mais adequada de risco envolve a definição das consequências e incertezas.

#### 3.2.1 Levantamento das dimensões de risco multidimensional

Como mencionado na Seção 2.1.1, o uso do risco multidimensional têm algumas vantagens, tais como a maior amplitude da análise, o que torna mais realista e completa; lida com objetivos conflitantes, de várias partes envolvidas e a incorporação de incertezas.

Na literatura, algumas dimensões (atributos) consideradas foram: a segurança humana, financeira, propriedades, ambiental, impacto para os *stakeholders*, impacto de imagem externa pública, etc. (Alencar & Almeida, 2010; Apostolakis & Lemon, 2005; Brito & Almeida, 2009; Brito *et al.*, 2010; Haimes, 2011; Hämäläinen *et al.*, 2000; Linkov *et al.*, 2006; Lins & Almeida, 2012).

Em específico, neste estudo, a avaliação das consequências (*c*) será abordada a partir de quatro dimensões diferentes de consequência: impactos sobre os humanos, os impactos financeiros, os impactos operacionais e transtornos no tráfego local de veículos.

A dimensão de consequência ambiental adotada em diversos estudos anteriores em diferentes contextos, por exemplo, na análise de risco em gasodutos de gás natural (Alencar & Almeida, 2010; Brito & Almeida, 2009; Brito *et al.*, 2010; Lins & Almeida, 2012) não será tratada neste trabalho, pois se considera irrelevante essa dimensão para a análise de riscos em um sistema de distribuição de energia elétrica urbano, ou seja, a exposição do meio-ambiente é considerada irrigária numa região urbana. Talvez, devido algumas particularidades de outro sistema em específico analisado, por exemplo, em região rural, essa dimensão torne-se relevante para o decisor considerá-la.

A dimensão humana ( $c_H$ ) é tratada pela possibilidade de ferimentos causados pela queda da tampa do bueiro ou queimaduras de segundo grau, pelo menos, devido à exposição à energia incidente do arco elétrico, conforme tratado na Seção 3.1.

A dimensão financeira ( $c_F$ ) corresponde a qualquer tipo de compensação monetária relacionada com a ocorrência de um cenário acidental. Como demonstrado por Brito & Almeida (2009), estas consequências podem ser estimativas monetárias, causados por: perda esperada na interrupção de fornecimento de energia; pelos prováveis reembolsos de clientes por causa de fornecimento interrompido; por gastos esperados em equipamentos e materiais para restaurar o sistema, custos de manutenção, etc. Há, também, outras despesas ligadas a multas estabelecidas pelos órgãos reguladores e pelo Ministério Público. Além disso, é possível considerar as despesas financeiras para compensar danos humanos ou fatalidades (indenizações), e para restaurar o sistema de terceiros, que podem ser afetados por algum cenário acidental.

A dimensão operacional ( $c_O$ ) corresponde ao impacto na operação de fornecimento de energia elétrica. Para estimar essas consequências pode ser usado o parâmetro de tempo de inatividade do sistema.

Por último, a dimensão de distúrbios no trânsito local de veículos ( $c_T$ ) é avaliada pelo processo de formação de engarrafamento na rua/avenida em torno da área do acidente, que pode ser modelado pela Teoria das Filas. Esse tipo de impacto, para o decisor, pode ser um ponto negativo para a sociedade e para a imagem da empresa. Esta dimensão pode ser medida pelo tempo médio de espera ou o número médio de veículos, durante o engarrafamento.

### 3.2.2 Função Probabilidade das consequências

Na ocorrência de um acidente em uma câmara subterrânea, nem sempre é possível antever deterministicamente quais são as consequências, em cada dimensão, causadas pelos cenários accidentais.

Dessa forma, uma avaliação probabilística das consequências é necessária, na qual determina as funções de probabilidade da consequência, ou seja, determinar a probabilidade de se obter uma dada consequência ( $c$ ) dado que ocorreu um cenário acidental ( $\theta$ ) em uma câmara/caixa subterrânea ( $V_q$ ), que é representado por  $P(c|\theta, V_q)$ .

No entanto, em determinadas circunstâncias, quando um cenário acidental ocorre, pode ocorrer que em algumas dessas dadas dimensões, as consequência “certamente” ocorreram (sob um olhar da visão determinista). Essa suposição, também, pode ser justificada como uma forma de simplificar a modelagem das consequências. Assim, neste caso a função consequência será dada por  $P(c|\theta, V_q) = 1$ .

Uma importante questão está relacionada a independência entre as variáveis aleatórias das consequências, já que os métodos compensatórios, como é o caso do método MAUT, realizam uma agregação de desempenho entre dimensões de riscos em uma medida única de risco, e precisa determinar as probabilidades conjuntas das dimensões analisadas. Conforme indicado na Equação (2.2), tem-se a função perda multidimensional dada por:

$$L(\theta, V_q) = - \int_{c \in C} P(c_H, c_F, c_O, c_T | \theta, V_q) u(c_H, c_F, c_O, c_T) dc \quad (3.16)$$

onde  $P(c_H, c_F, c_O, c_T | \theta, V_q)$  corresponde à distribuição de probabilidade conjunta sobre os valores de consequências nas dimensões adotadas ( $c_H, c_F, c_O, c_T$ ), dado que tenha ocorrido o cenário acidental ( $\theta$ ) na câmara/caixa subterrânea ( $V_q$ ).

Como mencionado em Brito (2007), quando se realiza avaliação de riscos decorrente da explosão de uma bomba atômica ou a avaliação de risco em uma plataforma de petróleo, obviamente que as variáveis aleatórias consideradas das consequências serão correlacionadas, visto que o raio da zona de perigo poderá ser extenso (por exemplo, no caso específico de uma plataforma de petróleo poderá envolvê-la como toda, ou no caso de um acidente nuclear, a zona de impacto possui centenas ou quilômetros de metros de extensão) e abrangerá distintas áreas e provocará, simultaneamente, fortes impactos em todas as dimensões

analisadas (havendo forte correlação entre os impactos), ou seja, ter-se-á uma proporcionalidade das grandezas dos impactos em todas as dimensões analisadas.

Em contraste, no estudo de Brito & Almeida (2009), na qual se avaliou os riscos de acidentes em gasodutos de distribuição de gás natural, consideraram-se as consequências nas dimensões de impactos humana, ambiental e financeira aleatórias, de maneira independente e com nenhuma correlação significante, pois os raios das zonas de perigo são na ordem de dezenas de metros, impactando somente regiões com características homogêneas.

Similarmente, no contexto de acidentes em câmaras/caixas subterrâneas tem-se as análises de impactos com zonas de perigo que atingem poucos metros de extensão, e consequentemente, impactam somente em um tipo de área externa circunvizinha (por exemplo, área residencial, ou comercial ou industrial, etc.).

Por exemplo, as consequências em uma região residencial, onde se tem poucas vias de trânsito intenso de veículos e transientes nas ruas, talvez possam acarretar em grande impacto operacional, com poucos distúrbios no trânsito e médio impacto financeiro e humano, uma vez que, o tratamento para atendimento e recuperação do sistema de distribuição de energia elétrica ao seu estado normal não demanda grande atenção (urgência) como em uma região comercial, hospitalar ou industrial.

Já um acidente ocorrido em uma região comercial, onde talvez tenha uma grande concentração de pessoas, tem-se um grande impacto humano e fortes distúrbios no trânsito local e médio impacto operacional e financeiro; ou ainda, caso ocorra um acidente em uma câmara localizada em um “calçadão” comercial (onde não existe rua ou avenida), não haverá impactos na dimensão de distúrbios no trânsito, como em uma câmara que esteja localizada no meio de uma grande avenida, o impacto sobre os pedestres possa ser nula.

Diversas outras particularidades podem ser destacadas, demonstrando que não existe uma forte correlação entre as dimensões analisadas, como, por exemplo, o tempo de indisponibilidade do sistema (dimensão operacional) nada está relacionado ao tempo de bloqueio da via de transporte (dimensão distúrbios no trânsito), já que o tempo de liberação das vias de transporte está relacionado ao impacto externo do local do acidente e não com o tempo de restauração do sistema de distribuição de energia.

Dessa forma, pode-se perceber que a agregação das consequências nas diversas dimensões consideradas ( $c_H, c_F, c_O, c_T$ ) se dá de forma aleatória e independente, em função das características das redes e das particularidades circunvizinhas à câmara/caixa subterrânea,

de forma que as funções de consequências  $P(c_H|\theta_i, V_q)$ ,  $P(c_F|\theta_i, V_q)$ ,  $P(c_O|\theta_i, V_q)$  e  $P(c_T|\theta_i, V_q)$  possam ser estimadas independentemente.

### 3.2.2.1 Função Probabilidade da dimensão humana $(P(c_H|\theta, V_q))$

A consequência humana será mensurada pelo número de pessoas com, pelo menos, ferimentos ( $c_H$ ). Como demonstrado anteriormente existem duas possibilidade de danos à saúde humana. Primeira decorrente da queda da tampa do bueiro sobre as pessoas e a outra pela exposição à energia incidente de um arco elétrico. O procedimento para determinar a função de consequência humana já foi descrita anteriormente (vide Seção 3.1).

### 3.2.2.2 Função Consequência Financeira $(P(c_F|\theta, V_q))$

Neste estudo específico, como simplificação, se o estado da natureza ( $\theta$ ) acontece, então, é “quase certo” que as consequências ocorrem na dimensão financeira ( $c_F$ ), assim é considerado  $P(c_F|\theta, V_q) = 1$ . Mas tal consideração não torna o modelo proposto limitado, já que caso seja verificado uma relação probabilística da consequência financeira, basta ser agregado ao modelo.

As consequências financeiras podem ser estimadas por:

$$c_F(\theta_i, V_q) = \sum_i \text{Receita}(V_q) \left( \text{Multas}(V_q) + \text{Performance}(V_q) + \text{CustoReparo}(V_q) + \text{MultamMinistPublico}(V_q) \right) \quad (3.17)$$

onde:

- $\text{Receita}(V_q)$ : corresponde a receita de cada câmara subterrânea, que pode ser estimada por uma percentagem do total de receitas do sistema. Normalmente, essa percentagem é influenciada diretamente pelo tipo de rede, magnitude de distribuição e pelo tipo de clientes atendidos;
- $\text{Multas}(V_q)$ : correspondente às multas aplicadas pela agência regulamentadora ANEEL devido a indisponibilidade do sistema;
- $\text{Performance}(V_q)$ : correspondente às multas por perda de performance (qualidade) do fornecimento de energia, aplicada pela agência regulamentadora ANEEL;

- $CustoReparo(V_q)$ : corresponde à percentagem da receita pelo gasto monetário para reparar o sistema a sua normalidade de fornecimento de energia elétrica novamente. Pode-se incluir o gasto monetário para recuperar sistema de terceiros; e,
- $MultaMinistPublico(V_q)$ : é devido às multas impostas pelo Ministério Público, quando existe a ocorrência de um acidente que tenha causado impactos à sociedade. Considera-se, também, como uma porcentagem da receita.

A depender da configuração física da rede de distribuição, e se houver formas alternativas de isolar o sistema afetado (acidentado) à menor região possível, é provável que as consequências financeiras sejam menores, devido ao menor impacto à receita, multas e performance do sistema.

### 3.2.2.3 Função Consequência Operacional $(P(c_O|\theta, V_q))$

A consequência operacional ( $c_O$ ) pode ser mensurada pelo parâmetro tempo de inatividade do sistema de distribuição de energia elétrica, chamado de *downtime*. Ela é medida no momento em que o sistema de distribuição de energia elétrica estará indisponível para os consumidores, até que seja restaurado com os padrões exigidos por órgãos reguladores.

A função de densidade de probabilidade log-normal pode ser utilizada para o cálculo da função consequência, que representa a capacidade de manutenção do sistema – mantinabilidade – (Almeida & Souza, 2001). A função consequência é expressa por:

$$P(c_O|\theta, V_q) = \frac{1}{\sigma \cdot t \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \text{ for } (t \geq 0) \quad (3.18)$$

onde  $t$  representa o *downtime* ( $h$ ),  $\mu$  e  $\sigma$  representam, respectivamente, a média e o desvio padrão da função *downtime*.

O *downtime* do subsistema está diretamente relacionado pelo tipo configuração da rede de distribuição que será afetada (se é radial com recurso ou reticulado). No caso de haver formas alternativas de isolar o sistema afetado, e realimentar o sistema com outro “caminho” é provável que as consequências operacionais sejam menores.

### 3.2.2.4 Função Consequência Distúrbios no trânsito de veículos $(P(c_T | \theta, V_q))$

Dependendo da localização da tampa do bueiro (como mostrado na Figura 3.5) e do raio da zona de perigo, a função de consequência sobre a dimensão de perturbações no trânsito local pode existir ou não.

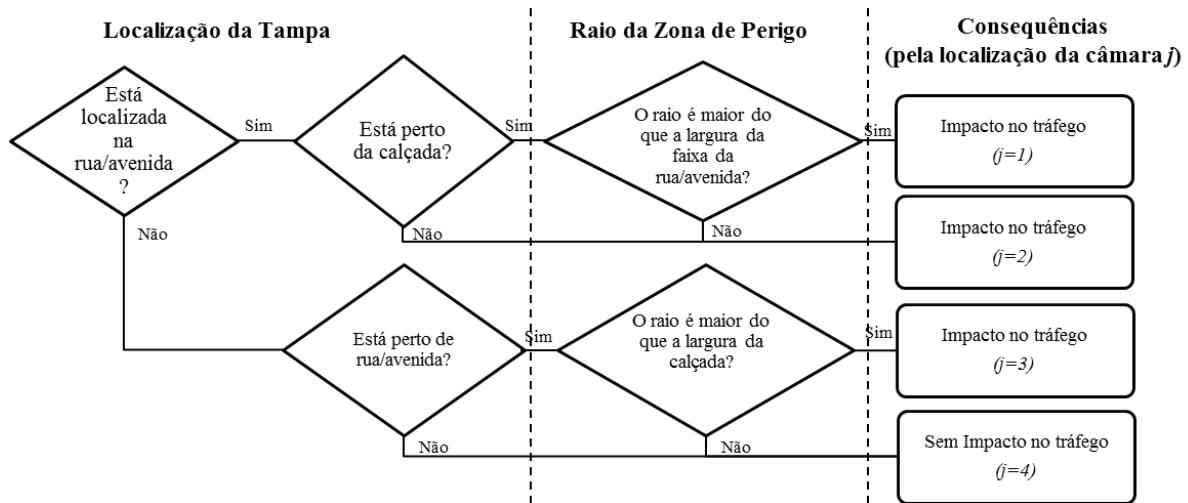


Figura 3.5 – Diagrama de consequência sobre a dimensão de perturbações no trânsito.

A dimensão consequência sobre perturbações no trânsito ( $c_T$ ) pode ser mensurada utilizando também os conceitos da Teoria das Filas.

A depender das características locais do trânsito, tais como, as distribuições de probabilidade de chegada de carros; da distribuição de probabilidade do tempo de atendimento dos carros (tempo de demora de passagem do carro pelo “gargalo” criado pelo evento acidental); e do número de atendentes ( $s$ ) (servidores), que corresponde o número de vias (faixas) não afetadas pelo evento acidental ( $\mu$ ), tem-se um modelo específico aplicado à teorias de filas  $(-/-/-)$ , como por exemplo, um modelo  $(M/M/s)$  ou  $(D/D/I)$ .

### 3.2.3 Modelo de decisão para avaliação de risco multidimensional e ordenamento

Conforme exposto na Seção 2.1.1, a função perda pode ser definida como o negativo da função utilidade de uma consequência esperada. A medida do risco é o valor esperado  $L(\theta, V_q)$  como mostrado na Equação (2.1).

A metodologia MAUT permite a agregação de valores de preferências do decisor (através da função de utilidade) de vários atributos, juntamente com as incertezas inerentes às

consequências ( $P(c|\theta, V_q)$ ) e cenários de perigo ( $\pi_{V_q}(\theta)$ ), em uma função única de síntese (Keeney & Raiffa, 1976).

Neste estudo é considerado que a função de utilidade multiatributo seja aditiva, o que implica na independência de preferência aditiva do decisor entre os atributos. Por conseguinte, a função de utilidade multiatributo pode ser obtida por:

$$U(c_H, c_F, c_O, c_T) = k_H U(c_H) + k_F U(c_F) + k_O U(c_O) + k_T U(c_T) \quad (3.19)$$

onde os  $k$  são as constantes de escala, sendo  $k_{c_H} + k_{c_F} + k_{c_O} + k_{c_T} = 1$ , e  $U(c)$  são as funções de utilidade unidimensional para cada atributo considerado.

Usando os conceitos da metodologia MAUT e os conceitos de teoria da decisão (Equação (2.3)), e considerando a independência probabilística das consequências, conforme indicado na Seção 3.2.2, a medida de risco é expressa por:

$$r(V_q) = \sum_i \left( \sum_{\theta} \left( \pi_{V_q}(\theta) \left( - \int_c u(c) P(c|\theta, V_q) dc \right) \right) \right) + (-1) \pi_{V_q}(\theta_N) \quad (3.20)$$

onde os  $i$  representam as diversas dimensões (atributos) da análise, isto é, as dimensões de consequência ( $c_H, c_F, c_O, c_T$ ), uma vez considerado a ocorrência do cenário de perigo ( $\theta$ ); e,  $V_q$  são as câmara/caixas subterrâneas analisadas. Como comentado anteriormente, o valor de  $\pi_{V_q}(\theta)$  depende das características/condições de cada sistema analisado.

Estas medidas de riscos formam uma hierarquia decrescente de risco das câmaras/caixas subterrâneas avaliadas ( $V_q$ ). Consequentemente, eles servem como uma ferramenta de apoio para a tomada de decisão e gerenciamento de riscos.

Devido à diversidade dos parâmetros utilizados nos modelos, na próxima seção serão descritos quais dados serão necessários para a aplicabilidade do modelo. Posteriormente, na Seção 3.4 será feito uma aplicação do segundo modelo proposto, mostrando possíveis resultados e suas interpretações.

### 3.3 Descrição dos dados de entrada do modelo

A aplicação do modelo exige do decisor uma vasta gama de informações e parâmetros de entrada. Para isso, nessa seção, serão explanadas as principais descrições de cada parâmetro.

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada dos modelos propostos

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Unidade
Id	Número	
Descrição	Descrição detalhada da câmara/caixa subterrânea analisada (formato, dimensões, características, descrição dos acessos, tampa, etc.). Composição dos equipamentos instalados internamente. Sistemas de proteção. Descrição do ambiente circunvizinho à área externa à câmara (qual o tipo de ambiente externo, densidade de pessoas, residencial, comercial, etc.), etc.	
Localização	Localização da câmara/caixa subterrânea (Calçada ou rua)	
Voltagem	Voltagem do barramento analisado	kV
Corrente de Falha	Máxima corrente de falha	kA
Corrente no Dispositivo de Proteção	Máxima corrente de falha que pode passar pelo dispositivo de proteção	kA
Trip Time	Quando da existência de Relay ou disjuntor com <i>integral trips</i> , indicar o <i>Trip Time</i>	s
Total Clearing Time	Para relay operado por disjuntor, indicar o tempo de abertura ( <i>Opening Time</i> ). No caso de fusíveis, indicar o <i>total clearing time</i>	s
Trip Time	<i>Trip Time</i> em Corrente reduzida	s
Classe	Classe do Equipamento:	
Equipamento	(1 - Open Air 2 - Cable 3 - Switchgear 4 - MCCs, Panels)	
Aterramento	Tipo de aterramento: (1 - Solid Grounded 2 - Ungrounded, Resistance Grounding, Other Impedance Grounding)	
Dispositivo de Proteção	Tipo do Dispositivo de Proteção: (0 - Other 1 - RK1-100 2 - RK1-200 3 - RK1-400 4 - RK1-600 5 - L-800 6 - L-1200 7 - L-1600 8 - L-2000 9 - MCCB-100-400 10 - MCCB-600-1200-M 11 - MCCB-600-1200-LI 12 - MCCB-1600-6000 13 - LVPCB-800-6300-LI 14 - LVPCB-800-6300-LS)	
Corrente do Disjuntor	Corrente do disjuntor	kA
Dimensão tampa	Dimensões da tampa	m
Ângulo de projeção	Ângulo de projeção da tampa	Graus
Taxa pessoas	Taxa de passagem média de pessoas na calçada	pessoas/s*m <sup>2</sup>
Velocidade Pessoas	Velocidade média de caminhada dos pedestres	m/s
Largura calçada	Largura da calçada	m
Largura da rua/avenida	Largura da via de transporte	m
Distância tampa	Caso a tampa esteja localizado na rua, indicar a distância do centro da tampa para a calçada. Caso a tampa esteja localizado na calçada, indicar a distância do centro da tampa para a rua.	m

Parâmetro	Descrição do parâmetro	Unidade
Distância Arco elétrico	Distância da possível falha de arco elétrico para a superfície	m
Taxa de falha	Taxa falha em câmaras/caixas subterrâneas	
Receita	Estimativa de perda de receita considerando a paralização do fornecimento de energia	R\$.s
Multa Aneel – Não fornecimento	Porcentagem da multa aplicada pela ANEEL decorrente da paralização do fornecimento de energia elétrica	%
Multa Aneel – Perda de Desempenho	Porcentagem da multa aplicada pela ANEEL decorrente da queda no padrão de desempenho	%
Custo de reparo	Porcentagem com relação à receita do custo de reparo decorrente de uma falha de arco elétrico	%
Downtime	Tempo de downtime do sistema decorrente do evento acidental	s
Taxa de veículos	Taxa de chegada de veículos	veículos.h
Capacidade de veículos	Capacidade de fluxo de veículos da rua/avenida	veículos.h
Tempo de bloqueio	Tempo estimado de bloqueio total das vias de transporte decorrente de um cenário acidental	h
Tempo para liberação	Tempo estimado para liberação das vias de transporte	h
Faixas rua/avenida	Número de faixas da via de transporte	

### 3.4 Aplicação Numérica

A aplicação numérica do modelo de decisão multicritério é apresentada com o objetivo de avaliar os riscos das câmaras/caixas subterrâneas e ordená-las. Este é um estudo hipotético, embora sejam utilizados dados realísticos, baseado em uma rede de distribuição subterrânea de energia elétrica.

Para auxiliar o processo de aplicação do modelo proposto, o decisor e/ou analista pode seguir o diagrama com a identificação das diversas etapas do modelo, conforme mostrado na Figura 3.6. O uso de softwares de sistemas de apoio à decisão (SAD) pode auxiliar no encaminhamento entre as etapas, de forma a torna o processo mais dinâmico e permitir ao decisor um estudo mais aprofundado de todas as etapas de análise de risco, que vão desde o levantamento de dados técnicos do sistema subterrâneo, caracterização do ambiente, definição dos cenários de perigo e a elicitação da estrutura de preferência do decisor, até a correta interpretação dos valores de riscos na forma de ranking e seus resultados.

Inicialmente, como em todos os modelos de decisão, é necessário identificar quem é o decisor. Neste caso, pode-se considerar o decisor como o gerente sênior de segurança, de manutenção ou de operação da concessionária distribuidora. Também, pode-se destacar que o decisor pode ser o gestor de planejamento ou de projetos, quando na criação ou execução de novas redes de distribuição subterrânea. Assim, os modelos propostos podem ser aplicados às redes que ainda não estão em funcionamento ou que serão criadas, e consequentemente,

determinar quais câmaras demandará mais atenção na criação ou execução do projeto, de forma que se tomem medidas preventivas e mitigadoras que minimizem os riscos em nível de projeto.

Os resultados (*ranking* das câmaras subterrâneas) devem refletir as preferências do decisor. Consequentemente, acredita-se que esta estrutura de preferência do decisor deva refletir a estrutura de preferência da empresa a qual ele representa. Além disso, o decisor deve ter alguma experiência e conhecimento deste tipo de análise, caso contrário, ele deve ser apoiado por uma equipe de especialistas sobre o contexto.

Para este estudo, 10 câmaras subterrâneas ( $V_1, \dots, V_q, \dots, V_{10}$ ) serão analisadas, representando uma ampla gama de possíveis cenários encontrados em empresas de distribuição de energia elétrica. É considerado que cada uma das câmaras subterrâneas analisadas tem o mesmo volume padrão de  $25 m^3$  (baseado no estudo de Walsh & Black (2005)). As principais características destas câmaras estão resumidas na Tabela 3.2 e na Tabela 3.3.

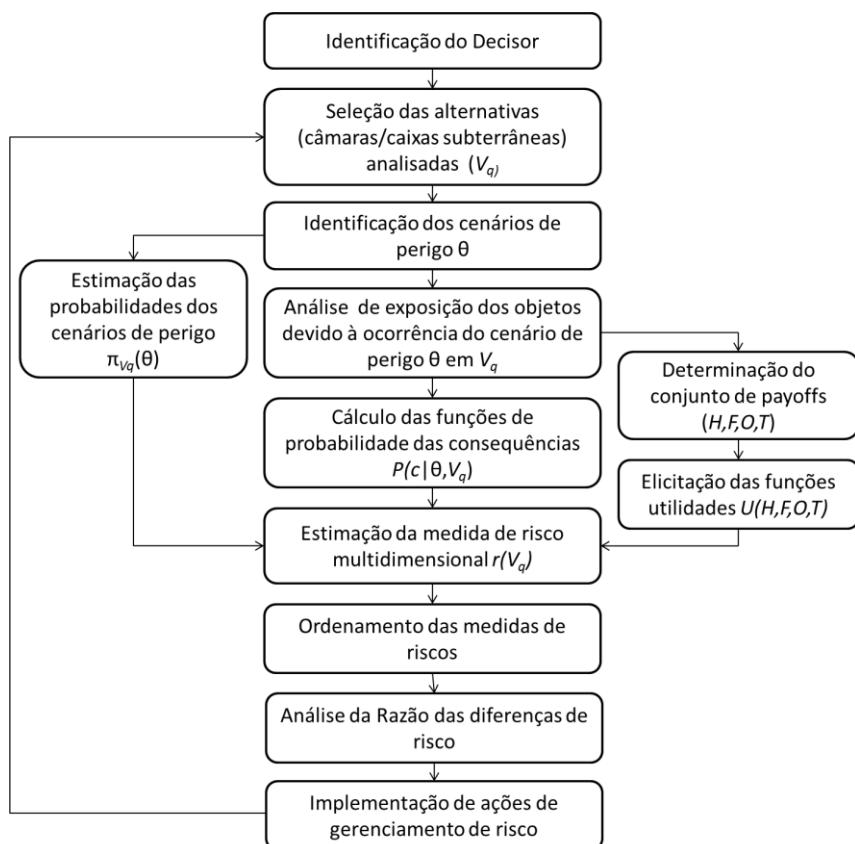


Figura 3.6 – Diagrama das etapas do modelo proposto

O estudo utilizou-se de ferramenta computacional, tal como o software matemático Matlab. Simulações foram realizadas e quatro dimensões de consequências foram consideradas, que são: impacto sobre os seres humanos ( $c_H$ ), impactos financeiros ( $c_F$ ), impactos operacionais ( $c_O$ ) e impactos sobre o trânsito local ( $c_T$ ).

Tabela 3.2 – Características das câmaras/caixas analisadas e seu entorno externo

Câmaras Subterrâneas ( $V_q$ )	Descrição da área em torno da câmara/caixa subterrânea	Localização da tampa da câmara/caixa subterrânea	Diâmetro da tampa (m)	kV do barramento	Corrente total da falha com arco (kA)
$V_1$	Área comercial 1	Calçada	1,0	13,8	10,66
$V_2$	Área comercial 2	Rua/Avenida	1,5	0,48	11,85
$V_3$	Área comercial 3	Calçada (Existência de somente calçada)	1,5	0,48	25,93
$V_4$	Área residencial 1	Calçada	1,0	0,48	25,93
$V_5$	Área residencial 2	Rua/Avenida	1,0	0,48	25,93
$V_6$	Área residencial 3	Calçada (Existência de somente calçada)	1,5	0,48	25,93
$V_7$	Área Industrial 1	Rua/Avenida	1,0	0,48	13,82
$V_8$	Área Industrial 2	Rua/Avenida	1,5	0,48	7,75
$V_9$	Área comercial com intenso fluxo de veículos 1	Rua/Avenida	1,0	0,48	9,86
$V_{10}$	Área comercial com intenso fluxo de veículos 2	Rua/Avenida	1,0	0,48	7,28

Para este estudo, conservadoramente, somente um cenário acidental foi considerado: explosão interna causada por um arco elétrico e que cause projeção da tampa da câmara subterrânea, e que os mecanismos de probabilidade da ocorrência desse cenário de perigo  $\pi_{V_q}(\theta)$  sejam o mesmo para as diversas câmaras/caixas subterrâneas analisadas.

Tabela 3.3 – Características das câmaras/caixas analisadas e seu entorno externo (continuação)

Câmaras Subterrâneas ( $V_q$ )	$\lambda$ Taxa de chegada de pedestres (pessoas/h)	% da receita de distribuição de energia elétrica local	Downtime (h)	Número de faixas na rua/avenida
$V_1$	0,25	1,0%	4	2
$V_2$	0,30	1,0%	4	2
$V_3$	0,25	1,0%	4	0
$V_4$	0,05	0,5%	5	2
$V_5$	0,05	0,5%	5	2
$V_6$	0,15	0,5%	5	0
$V_7$	0,05	1,0%	2	2
$V_8$	0,10	1,5%	2,5	2
$V_9$	0,25	1,5%	4	3
$V_{10}$	0,20	1,0%	3	2

Estimar a projeção da tampa da câmara subterrânea é uma tarefa árdua, pois este envolve vários parâmetros complexos. No entanto, no presente estudo, uma abordagem complementar é usada, na qual combina as principais características que influenciam na projeção da tampa, conforme definido pelo estudo de Walsh & Black (2005), juntamente com o conhecimento *a priori* de especialista.

O método de elicitação do conhecimento *a priori*, chamado Intervalos Equiprováveis, foi utilizado. Este método foi definido por Raiffa (1968), e ele é expresso como uma distribuição de probabilidade *a priori* usando probabilidades subjetivas (vide Seção 2.1.4.2).

O valor estimado da projeção vertical da tampa, através do método de elicitação, foi utilizado para calcular o raio da zona de perigo ( $r_{hz(tampa)}$ ), conforme mostrado na Tabela 3.4.

Além disso, estimou-se o raio da zona de perigo ( $r_{hz(energia)}$ ), causado pela energia incidente, utilizando os resultados da norma *IEEE Standard 1584* (IEEE1584, 2002), conforme mostrado na Tabela 3.5.

*Tabela 3.4 – Raio da zona de perigo, localização da zona de perigo e área da zona de perigo considerando as consequências advindas da projeção da tampa da câmara/caixa subterrânea*

Câmaras Subterrâneas ( $V_i$ )	$r_{hz(tampa)}$ Raio da zona de Perigo considerando a queda da tampa do bueiro (m)	$j_{tampa}$ Consequência pela localização da zona de perigo considerando a queda da tampa do bueiro (Figura 3.4 e Figura 3.5)	$(A_{hz})_{jtampa}$ Área da zona de perigo devido a queda da tampa do bueiro (m)
$V_1$	1,774	3	8,397
$V_2$	1,551	2	0
$V_3$	1,733	3	7,119
$V_4$	1,483	4	6,121
$V_5$	2,138	1	0,206
$V_6$	1,733	4	7,665
$V_7$	1,191	2	0
$V_8$	1,400	2	0
$V_9$	1,300	2	0
$V_{10}$	1,155	2	0

Depois de estimada as áreas de perigo  $(A_{hz})_{jtampa}$  e  $(A_{hz})_{jenergia}$ , é preciso calcular as consequências, que são estimadas através de funções de probabilidade  $P(c|\theta_i, V_i)$ .

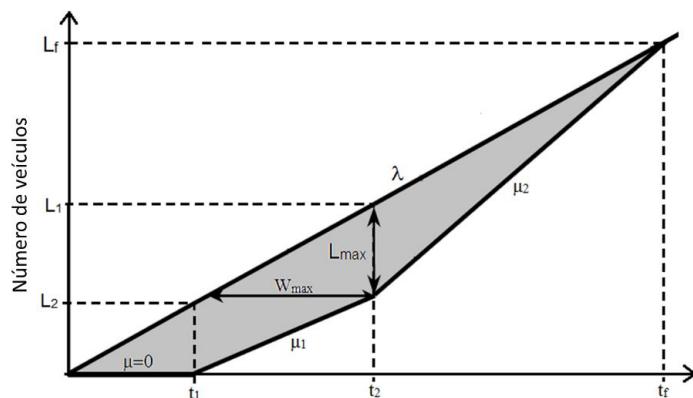
No estudo particular, para estimar as consequências para a dimensão de impacto sobre os distúrbios no trânsito local de veículos, é suposto que a taxa de chegada de carros ( $\lambda_T$ ) e o

tempo de atendimento (serviço) ( $\mu_T$ ) são constantes, e que exista somente um atendente (servidor) ( $s_T = 1$ ), de tal modo, que se possa modelar o número de carros no engarrafamento pela teoria das filas do tipo D/D/1.

**Tabela 3.5 – Raio da zona de perigo, localização da zona de perigo e área da zona de perigo considerando as consequências advindas da energia incidente do arco elétrico**

Câmaras Subterrâneas ( $V_g$ )	$r_{hz(energia)}$	Consequência pela localização da zona de perigo considerando a queda da tampa do bueiro (Figura 3.4 e Figura 3.5)	$j_{energia}$	$(A_{hz})_{jenergia}$
			Área da zona de perigo devido a energia incidente (m)	
$V_1$	0,788	4	1,160	
$V_2$	1,415	2	0	
$V_3$	1,021	4	1,507	
$V_4$	0,568	4	0,227	
$V_5$	0,754	2	0	
$V_6$	1,242	4	3,081	
$V_7$	1,198	2	0	
$V_8$	0,992	2	0	
$V_9$	0,696	2	0	
$V_{10}$	0,628	2	0	

Considera-se que no instante da ocorrência do acidente ( $t_0 = 0$ ) a via de trânsito torna-se completamente bloqueada. Passado algum tempo ( $t_1$  horas) de ocorrido o acidente, as faixas não afetadas pelo acidente são liberadas, e somente  $t_2$  horas depois de ocorrido o acidente, libera-se completamente a via para o tráfego de veículos, conforme representado na Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Mecanismo de formação de engarrafamento de veículos**

Desta forma, usando os conceitos da teoria das filas, o número médio de veículos na fila (engarrafamento) é dado por:

$$L_{V_q} = \frac{W_T}{W} \quad (20)$$

onde  $W_T$  é o tempo total de espera (*veículos.h*), na qual é estimada pela área formada entre as curvas de chegada e a curva de atendimento; e,  $W$  é o tempo esperado na fila (*h*) por cada carro individualmente. Os valores de taxa de chegada e capacidade para cada faixa de veículos adotados são mostrados na Tabela 3.6.

*Tabela 3.6 – Características dos distúrbios no trânsito local de veículos*

Câmaras Subterrâneas ( $V_q$ )	$\lambda_T$ Taxa de chegada de veículos ( <i>veículos/h</i> )	$\mu_T$ Taxa de atendimento (capacidade) de veículos por faixa ( <i>veículos/h</i> )
$V_1$	500	500
$V_2$	650	500
$V_3$	0	0
$V_4$	200	200
$V_5$	200	200
$V_6$	0	0
$V_7$	900	750
$V_8$	100	750
$V_9$	3200	1200
$V_{10}$	1800	1200

As demais funções de consequências são obtidas conforme indicado na Seção 3.2.2. Concomitante, é feita a elicitação da função de utilidade multiatributo do decisor  $U(c_H, c_F, c_O, c_T)$ . Keeney & Raiffa (1976) descreveram o procedimento de elicitação da função utilidade multiatributo em cinco estágios:

- Introdução a terminologias e ideias;
- Identificação das suposições de independência;
- Avaliação das funções utilidades condicionais;
- Avaliação das constantes de escala; e
- Verificação da consistência e reiteração.

A elicitação da função utilidade ocorre sobre um intervalo fechado de consequências, onde o valor máximo limita-se a uma consequência nula (não haver impactos acidentais) e o valor mínimo pela maior das consequências estimadas (pior perda possível). Vale ressaltar que, embora se possam ter valores discretos e enumeráveis (número de pessoas vitimadas) na

consequência humana, os conjuntos das consequências nas três dimensões podem ser considerados contínuos para fins da estimação da função utilidade.

Como é suposto que a estrutura de preferência do decisor é independentemente aditiva entre os critérios, assim, as funções de utilidade do ponto de vista de utilidade unidimensional ( $U(c_H), U(c_F), U(c_O), U(c_T)$ ) podem ser elicitadas separadamente. Keeney & Raiffa (1976) descreveram os procedimentos para elicitação da função utilidade unidimensional, como:

- Preparação para a avaliação;
- Identificação de características qualitativas relevantes;
- Especificação de restrições quantitativas;
- Escolhendo a função utilidade, e;
- Checando a consistência.

Supondo também, que o decisor tenha um comportamento de aversão ao risco na dimensão de perda humana, ou seja, o mesmo tem um comportamento conservador quando se trata de questões relacionadas às perdas humanas, e propenso ao risco nas demais dimensões analisadas, as funções de utilidades unidimensionais são dadas por, respectivamente:

$$u(c_H) = 1 - \left( \frac{c_H}{\max(c_H)} \right)^{\tau_H} \quad (3.21)$$

$$u(c_{F,O,T}) = e^{-(\tau_{F,O,T})(c_{F,O,T})} \quad (3.22)$$

onde  $c_{H,F,O,T}$  são as consequências avaliadas em cada dimensão de risco; e,  $\tau_{H,F,O,T}$  são os parâmetros de ajuste das funções utilidades unidimensional, que podem ser determinado através do uso de loterias ou pelo ajuste das funções utilidades computacionalmente.

Da mesma forma, utilizando a matriz de consequência, e o método de *trade-off*, as constantes de escala ( $k_{c_H}, k_{c_F}, k_{c_O}, k_{c_T}$ ) são obtidas. Mais detalhes sobre estes procedimentos também são mostrados em Keeney & Raiffa (1976). Os valores das constantes de escala consideradas foram  $k_{c_H} = 0,3386$ ;  $k_{c_F} = 0,4423$ ;  $k_{c_O} = 0,0944$ ; e,  $k_{c_T} = 0,1247$ .

As funções de utilidade multiatributo são combinadas com a função de densidade de probabilidade das consequências (Equação (3.20)), obtendo a Equação (3.23). Assim, uma medida de risco multidimensional é estimada, sob a perspectiva da teoria da decisão e teoria da utilidade.

$$r(V_q) = \sum_i \left( \sum_{\theta} \pi_{V_q}(\theta) \left( \begin{array}{c} \left[ \int_c u(c_H) P(c_H | \theta, V_q) dc_H \right] \\ + \int_c u(c_F) P(c_F | \theta, V_q) dc_F \\ + \int_c u(c_O) P(c_O | \theta, V_q) dc_O \\ + \int_c u(c_T) P(c_T | \theta, V_q) dc_T \end{array} \right) \right) + (-1) \pi_{V_q}(\theta_N) \quad (3.23)$$

onde os  $i$  representam as diversas dimensões (atributos) da análise, isto é, as dimensões de consequência ( $c_H, c_F, c_O, c_T$ ), considerando a ocorrência do cenário de perigo ( $\theta$ ); e,  $\theta_N$  representa o cenário de normalidade do sistema.

A posterior etapa é a análise das razões das diferenças de riscos e a implementação de ações de prevenção e mitigação do risco, naquelas alternativas que se encontram no topo da lista de ordenamento dos riscos.

Na última etapa, que na realidade gera uma retroalimentação do modelo, é a reavaliação dos resultados após o desenvolvimento das ações. As ações de gerenciamento de risco, normalmente, atacam diretamente a probabilidade de ocorrência de um cenário de perigo ou o nível de impacto que um cenário de perigo pode causar. Dessa forma, o processo de avaliação das medidas de risco é dinâmico.

### 3.5 Discussão de Resultados

Os valores de riscos resultantes são mostrados na Tabela 3.7. Percebe-se que os valores de risco estão próximos ao valor  $-1$ , isto é devido que a maior contribuição é do cenário do funcionamento normal ( $\theta_N$ ), uma vez que a ocorrência de eventos em câmaras/caixas subterrâneas é rara, de modo que a probabilidade de cenário de operação de normalidade  $\pi(\theta_N)$  é próximo de 1, e sua função de perda é  $-1$  (sem consequência).

Sob a análise dos resultados, conclui-se que a câmara subterrânea  $V_3$  está no topo da lista de ordenamento, pois possui maior valor de risco (Tabela 3.7 – Coluna 3). Por conseguinte, ela deve receber a maior atenção quando recursos adicionais estiverem disponíveis para tratar de ações de segurança e melhorias do sistema, ou seja, esta câmara deve receber uma maior prioridade na alocação de recursos.

Uma vez tratada à câmara subterrânea  $V_3$  e, quando houver mais recursos disponíveis, então se aplicam esses recursos nas demais câmaras subterrâneas seguindo a ordem decrescente do risco definido na Tabela 3.7 (Coluna 1).

Tabela 3.7 – Resultado do ordenamento dos riscos da avaliação multidimensional dos riscos

Ordenamento (i)	Câmaras Subterrâneas ( $V_q$ )	$r'(V_q)$	$(r'_i(V_q) - r'_{i+1}(V_q)) \cdot 10^{-3}$	$\frac{r'_i(V_q) - r'_{i+1}(V_q)}{r'_{i+1}(V_q) - r'_{i+2}(V_q)}$
1º.	$V_3$	-0,992216311068	0,002815717	0,020
2º.	$V_1$	-0,992219126785	0,140572479	0,229
3º.	$V_6$	-0,992359699264	0,614307571	0,478
4º.	$V_4$	-0,992974006835	1,284773812	2,430
5º.	$V_5$	-0,994258780647	0,528685978	19,728
6º.	$V_7$	-0,994787466625	0,026799320	0,909
7º.	$V_{10}$	-0,994814265944	0,029488969	26,449
8º.	$V_2$	-0,994843754913	0,001114958	0,013
9º.	$V_8$	-0,994844869871	0,087553269	
10º.	$V_9$	-0,994932423140		

Além disso, a metodologia permite fazer comparações dos incrementos de riscos (Tabela 3.7 – Coluna 4), ao examinar a diferença entre os riscos, uma vez que os resultados são dados numa escala intervalar (devido à função de utilidade).

Usando uma escala de razão, determinada pela análise das diferenças entre os riscos (ver Figura 3.8), conclui-se que a razão da diferença entre os valores de risco das câmaras  $V_4$

e  $V_5$  correspondem cerca de 47% da amplitude total dos valores de risco  $\left( \frac{V_4 - V_5}{V_3 - V_9} = 47,3\% \right)$ ,

o que indica um aumento significativo no risco entre essas câmaras. O mesmo acontece com os incrementos de risco das alternativas  $V_4$  para  $V_6$  e de  $V_7$  para  $V_5$ , aproximadamente, 20% cada.

Portanto, os recursos (ou ações) adicionais aplicados a qualquer uma das três primeiras câmaras ( $V_3; V_6; V_1$ ) do topo do ordenamento, que somados os incrementos de risco corresponde à 5,279% do range do risco, pode gerar resultados tão eficientes (redução do risco) quanto fossem aplicados à primeira alternativa  $V_3$ , sob uma visão geral do sistema.

Da mesma forma, deve ser mais eficiente tratar os riscos oferecidos pelas três primeiras câmaras subterrâneas ( $V_3; V_6; V_1$ ) do que com os riscos provenientes de  $V_4$ , pois existe um “gap” de risco de 22,62%, mas ao mesmo tempo o risco de  $V_4$  é significativamente maior do que  $V_5$ . Isto é, quando se reduz os riscos provenientes de  $V_4$ , este é provável gerar maiores

benefícios do que aqueles que vêm da redução dos riscos de  $V_5$ . Este tipo de informação pode ser estratégico para a gestão de recursos e de gerenciamento de risco da concessionária distribuidora de energia elétrica.

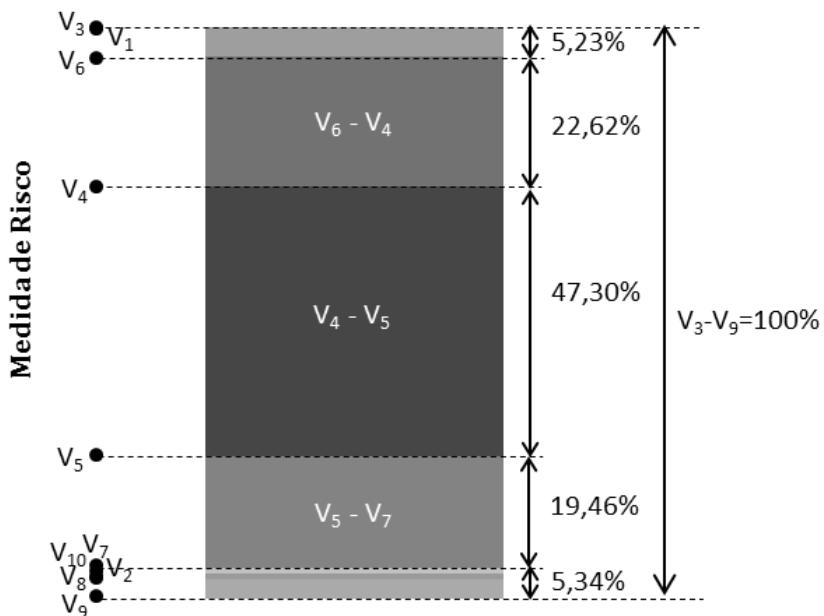


Figura 3.8 – Análise das razões das diferenças de risco entre as câmaras/caixas subterrâneas analisadas

Outra fonte de informação estratégica é a comparação dos incrementos de riscos intra-critério. A Figura 3.9 provê a comparação intra-critério entre as alternativas que se encontram no topo do ordenamento de risco.

Verifica-se que a alternativa  $V_3$  tem um maior incremento intra-critério de risco com relação à alternativa  $V_1$  na dimensão de perda operacional. Já a diferença de risco intra-critério é positivo para a dimensão perda operacional da alternativa  $V_1$  em relação à alternativa  $V_6$ , mas em compensação a alternativa  $V_6$  tem uma maior diferença de risco intra-critério na dimensão financeira do que a alternativa  $V_1$ .

Essa análise indica que a realização de ações preventivas ou mitigativas relacionadas à dimensão operacional na alternativa  $V_3$  resultaria numa diminuição do *gap* do risco entre  $V_3$  e  $V_1$ . Já aplicando recursos sobre a dimensão de distúrbios no trânsito não surgiria efeitos significativos na diferença de risco entre essas alternativas.

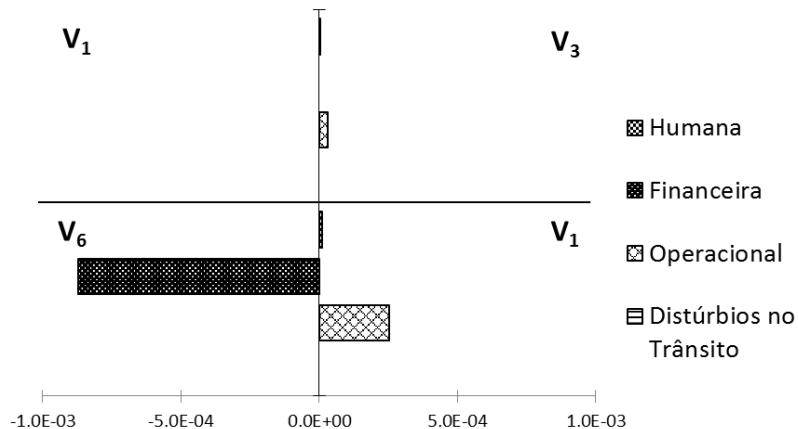


Figura 3.9 – Análise intra-critério das diferenças de risco das alternativas no topo do ordenamento em hierarquia de risco

Outras análogas avaliações intra-critério podem ser feitas nos restantes incrementos de risco. Essas informações auxiliam ao decisor visualizar qual(is) dimensão(s) de risco impacta(m) diretamente no incremento de risco entre duas alternativas analisadas, e, desta forma, auxiliando o foco da tomada de decisão para a alocação de ações/recursos de prevenção ou mitigação de risco que atuam especificamente na dimensão de maior diferença de risco.

Por exemplo, almejando-se reduzir o valor de risco da alternativa  $V_3$  (que se encontra no topo do ordenamento). Percebe-se pela análise intra-critério das diferenças de riscos, que é provável que ao implementar-se ações que impactem (melhorem) diretamente na perda na dimensão operacional, ou seja, diminuindo o tempo de *downtime* dessa câmara subterrânea, é possível que se tenha uma redução de risco com relação à alternativa  $V_1$ . Essa diminuição do *downtime* pode dar-se, por exemplo, pela implementação de um sistema mais ágil de atendimento aos incidentes. Em contrapartida, aplicando recursos sobre a dimensão de distúrbios no trânsito não surgiria efeitos significativos na diferença de risco entre essas alternativas.

Através de uma simulação, diminuiu-se o valor do tempo de *downtime* de 1,45h para 1,35h da alternativa  $V_3$ , e mantendo os demais valores de consequências iguais, o que resultou numa inversão de ordem de risco das alternativas “*tops*”. Tem-se agora que a alternativa  $V_1$  encontra-se no topo da lista de risco com uma diferença de risco multidimensional com relação à alternativa  $V_3$ , correspondendo agora à 0,00475% do range total do risco, conforme mostrado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Resultado do ordenamento dos riscos após modificação no parâmetro downtime da alternativa  $V_3$ 

Ordenamento (i)	Câmaras Subterrâneas ( $V_q$ )	$r'(V_q)$	$(r'_i(V_q) - r'_{i+1}(V_q)) \cdot 10^{-3}$	$\frac{r'_i(V_q) - r'_{i+1}(V_q)}{r'_{i+1}(V_q) - r'_{i+2}(V_q)}$
1º.	$V_1$	-0.9922191268	0.000128	0.000918481
2º.	$V_3$	-0.9922192558	0.140443	0.228620794
3º.	$V_6$	-0.9923596993	0.614307	0.478144530
4º.	$V_4$	-0.9929740068	1.284774	2.430126513
5º.	$V_5$	-0.9942587807	0.528686	19.72758954
6º.	$V_7$	-0.9947874666	0.026799	0.908791335
7º.	$V_{10}$	-0.9948142659	0.029489	26.448511961
8º.	$V_2$	-0.99484375491	0.001115	0.012734620
9º.	$V_8$	-0.99484486987	0.087553	
10º.	$V_9$	-0.99493242314		

Outra importante análise proveniente dos resultados decorre de existirem câmaras subterrâneas com características diferentes e áreas distintas (tais como, da área comercial ( $V_3; V_1$ ) e da área residencial ( $V_6$ )) no topo da lista de ordenamento de risco. Desta forma, conclui-se que, simplesmente, designar uma área comum (área comercial, residencial ou industrial) para ser a mais crítica, pode não refletir com precisão a hierarquia de risco, de acordo com as preferências do decisor.

## 4 CONCLUSÕES

### 4.1 Conclusões

Apesar do sistema subterrâneo de distribuição de energia elétrica ser mais seguro do que do tipo aéreo, vários acidentes tem ocorrido nesses sistemas, e tem gerado repercussões e consequências, não só para as companhias distribuidoras de energia, mas também para a sociedade. Assim, torna-se evidente a necessidade de avaliar os principais eventos acidentais e suas consequências resultantes deste tipo de acidentes.

Como um dos resultados do estudo, através do uso da metodologia da análise da árvore de eventos, foram apresentados os mais relevantes cenários de perigo baseado nos fatores críticos que afetam substancialmente a evolução dos acidentes ocasionados pela falha com arco elétrico.

Normalmente, estas redes de distribuição são grandes e complexas. Avaliar o risco de cada câmara/caixa subterrânea torna-se uma tarefa árdua e complexa sem a ajuda de uma ferramenta computacional de auxílio à tomada de decisão, pois requer uma grande quantidade de dados, informações e tempo disponíveis.

Além disso, dada uma grande variabilidade de ambientes externos e internos às câmaras/caixas subterrâneas, e, por conseguinte, da existência de uma vasta gama de possíveis consequências quando ocorre um acidente, exige a necessidade de uma abordagem de avaliação de risco sob o ponto de vista multidimensional do risco.

Portanto, para essa necessidade, este estudo propôs uma medida de risco, usando conceitos da teoria da decisão, que avalia as consequências dos cenários de perigo, e agrupa tanto as incertezas associadas às consequências (através das funções de probabilidade das consequências  $(P(c|\theta_i, V_i))$ ) quanto às incertezas relacionadas aos cenários de perigo  $(\pi_{V_q}(\theta_i))$ .

Ainda, o modelo considerou a estrutura de preferência do decisão sobre o conjunto das consequências esperadas, através da teoria da utilidade, permitindo, então, uma modelagem mais abrangente e completa, e, sobretudo, considerando que essa medida satisfaça as características de comportamento do decisão frente ao risco.

Como em qualquer problema de tomada de decisão, é necessário levar em consideração as particularidades do problema, do decisão, das redes distribuidoras e das companhias

distribuidoras. Desta forma, o modelo proposto é passível de adaptações (modificações ou melhorias) que podem torná-lo abrangente a outros problemas. Essas adaptações podem ser visualizadas pela escolha de qual conjunto de atributos e cenários de perigo a serem considerados, quais metodologias de cálculo das funções de consequência adotadas, qual comportamento de risco adotado pelo decisor, utilização de ferramentas auxiliares de uso de conhecimento a priori de especialistas, etc.

Deste modo, este trabalho realizou um estudo de riscos multidimensionais de câmaras/caixas subterrâneas em um sistema de distribuição de energia elétrica, em vários aspectos de consequências: impactos sobre os humanos, impactos financeiros, impactos operacionais e impactos sobre distúrbios no tráfego local de veículos.

Quando é necessário fazer alocações de recursos (investimentos) adicionais, a problemática de ordenamento das diversas alternativas torna-se a mais adequada. Aplicado ao contexto, o modelo proposto permite que o decisor faça uma lista hierárquica de riscos do conjunto formado pelas câmaras/caixas subterrâneas, e, assim, alocar recursos adicionais disponíveis para aquelas que se encontram no topo da lista até que todos os recursos sejam consumidos.

Isto é, o modelo dá suporte ao decisor para priorizar as alternativas de forma a gerir os recursos do gerenciamento de risco, do planejamento da manutenção ou de melhorias (*upgrade*) no sistema, alocando primeiramente recursos àquelas mais críticas, dentre um grande universo de alternativas.

A aplicação numérica demonstrou a aplicabilidade do modelo e os possíveis resultados gerados. Conclui-se que o uso da hierarquia de risco é uma importante ferramenta para a definição de prioridades.

Sob a perspectiva da análise da razão das diferenças de riscos permite ao decisor visualizar o quanto uma alternativa ou um grupo de alternativas possui maior risco do que outro, em vez de uma simples análise de ordenamento das alternativas, ou seja, permite ao decisor visualizar as alternativas que têm valores próximos de risco entre si e, assim, determinar à alternativa ou o conjunto de alternativas que se encontra no topo da lista. Desta forma, o modelo auxilia ao decisor fazer uma análise aprofundada da gama de possibilidades sobre as quais as alternativas podem ser escolhidas de modo a implementar ações preventivas.

Ainda, com a análise intra-critério de risco, pode-se visualizar quais dimensões de risco devem ser tratadas (priorizadas) primeiramente, de forma a diminuir o valor da medida risco total daquela câmara analisada com relação à outra câmara subterrânea com valor de risco

adjacente, gerando assim um foco de ataque para prevenção e mitigação do risco, e não somente considerando o critério de ordenamento de risco das câmaras subterrâneas.

Portanto, de frente com estas informações, o decisor pôde realizar estudos mais detalhados sobre os recursos (monetários, tempo, mão de obra, equipamentos, tecnologia, etc.) disponíveis pela concessionária distribuidora para que possam ser alocadas ações preventivas e mitigadoras para um conjunto de alternativas próximas ao topo da lista, com vista ao cumprimento das metas em cada critério (dimensão) de consequência para cada alternativa, na qual traz um melhor retorno sobre a redução do risco multidimensional. Portanto, essas considerações tornam este modelo uma importante ferramenta para a tomada de decisão.

Além disso, os modelos propostos atendem ao planejamento e gerenciamento de risco no horizonte de curto e médio prazo. É preciso sempre realimentar os parâmetros de entrada, devido ao fato de o ambiente externo ter grande dinâmica de mudança, ou seja, estar em constante modificação, tornando mutáveis diversos fatores importantes para o modelo, como a taxa de falhas, características do entorno da câmara/caixa subterrânea, densidade demográfica, características técnicas, etc.; ou modificações nos sistemas devido a realizações de ações preventivas ou mitigadoras já realizadas no sistema.

## 4.2 Trabalhos Futuros

Diante das várias considerações, algumas sugestões para futuros trabalhos podem ser feitas, destacando-se algumas:

- Incorporação de novos modos de falhas ao modelo e aprofundamento para proposição de diferentes cenários de perigos;
- Agregação de diferentes dimensões de risco que possam ser tratadas no modelo, e que atendam as expectativas do decisor;
- Desenvolvimento de novas e mais complexas hipóteses probabilísticas para a formulação das funções consequências das dimensões de risco já consideradas;
- Desenvolvimento de uma ferramenta computacional SAD (Sistema de Apoio à Decisão), para gerir informações e gerar conhecimento para o processo de tomada de decisão, tornando o modelo mais dinâmico para acompanhar as mudanças nas características envoltas das câmaras/caixas subterrâneas e realimentando (obtendo *feedback*) das ações preventivas e mitigadoras já

implementadas, fomentando para o melhoramento contínuo do gerenciamento de risco;

- Aplicação do modelo em um caso real, para verificação da sua aplicabilidade e robustez, através de análise de sensibilidade, visualizando possíveis entraves e melhorias para o modelo, e;
- Análise de decisão sob a visão de múltiplos decisores, podendo agregar diferentes perspectivas do problema, considerando as entidades externas, tais como órgãos reguladores, representantes da comunidade, e investidores; ou ainda, diferentes áreas internas à companhia distribuidora, tais como, área financeira, operacional, de manutenção, de segurança, etc.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 24HORAS. *Jornalismo 24Horas: Bueiros do RJ viram “bombas” com adesivos de protesto bem humorado.* Disponível em: <<http://jornalismo24horas.blogspot.com.br/2011/07/bueiros-do-rj-viram-bombas-com-adesivos.html>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- ALDUSHIN, A. P.; BAYLISS, A.; MATKOWSKY, B. J. On the transition from smoldering to flaming. *Combustion and Flame*, v. 145, n. 3, p. 579-606, maio. 2006.
- ALDUSHIN, A. P.; BAYLISS, A.; MATKOWSKY, B. J. Is there a transition to flaming in reverse smolder waves?. *Combustion and Flame*, v. 156, n. 12, p. 2231-2251, dez. 2009.
- ALENCAR, M. H.; ALMEIDA, A. T. DE. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 8, p. 3610-3619, abr. 2010.
- ALMEIDA, A. T. *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. 2. ed., re ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011. p. 234
- ALMEIDA, A. T. DE. *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*. 1. ed. São Paulo/SP, Brasil: Editora Atlas, 2013.
- ALMEIDA, A. T. DE; SOUZA, F. M. C. (EDS.). *Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade*. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001.
- APOSTOLAKIS, G. E.; LEMON, D. M. A screening methodology for the identification and ranking of infrastructure vulnerabilities due to terrorism. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 25, n. 2, p. 361-76, abr. 2005.
- AVEN, T. The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 99, n. 0951, p. 33-44, mar. 2012.
- BELTON, V.; STEWART, V. B. T. J. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer-Verlag GmbH, 2002.
- BERGER, J. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis (Springer Series in Statistics)*. 2nd. ed. Springer, 1985.
- BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T. DE. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 94, n. 2, p. 187-198, fev. 2009.
- BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T. DE; MOTA, C. M. M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 3, p. 812-821, fev. 2010.

- BRITO, A. J. DE M. Avaliação Multicritério de Riscos em Gasodutos de Gás Natural: Uma Abordagem de Classificação com o ELECTRE TRI. Recife. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2007.
- BURGARDT, L. Infraestrutura. Disponível em: <<http://www.infraestruturaurbana.com.br/solucoes-tecnicas/7/artigo235532-1.asp>>. Acesso em: 6 nov. 2012.
- CHEN, Y.; MARCKILGOUR, D.; HIPEL, K. A case-based distance method for screening in multiple-criteria decision aid. *Omega*, v. 36, n. 3, p. 373-383, jun. 2008.
- CLEMEN, R. T.; WINKLER, R. L. Combining Probability Distributions From Experts in Risk Analysis. *Risk Analysis*, v. 19, n. 2, p. 187-203, abr. 1999.
- CULTRERA, J.; CHARYTONIUK, W. Arcing fault detection in underground distribution networks-feasibility study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 36, n. 6, p. 1756-1761, 2000.
- DNV KEMA. *A white paper on underground distribution cable reliability improvement*, 2009. Disponível em: <<http://www.kema.com/papers/reliability-cables.aspx?lang=en>>. Acesso em: 17 out. 2011
- ESTADÃO. *Comissão da Alerj promete ação contra TAC firmado entre Light e MP - brasil – Rio de Janeiro - Estadão*. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/cidades,comissao-da-alerj-promete-acao-contra-tac-firmado-entre-light-e-mp,747256,0.htm>>. Acesso em: 21 nov. 2012.
- EXTRA GLOBO. *Leitor registra “bueiro vulcão” nas ruas do Rio* - Extra Online. Disponível em: <<http://extra.globo.com/noticias/extra-extra/leitor-registra-bueiro-vulcatildeo-nas-ruas-do-rio-2225321.html#axzz2CrgkWJze>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (EDS.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston, Dordrecht, London: Springer Verlag, 2005.
- GAMMON, T.; MATTHEWS, J. *The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems*. IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1999. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=787220>>. Acesso em: 27 fev. 2011
- GARCEZ, T.; ALMEIDA-FILHO, A. DE; ALMEIDA, A. DE. Procedures for aggregating experts' knowledge and group decision model approaches. In: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*. CRC Press, 2011. p. 2176-2182.

- GARCEZ, T. V. et al. Experts' elicitation of prior knowledge on accidental releases in a natural gas pipeline. *ESREL'10 Conference*. Anais...Rodhes - Greece: 2010
- GARCEZ, T. V.; ALMEIDA, A. T. DE. Multiple Dimension Manhole Explosion in an Underground Electrical Distribution System. *11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference* 2012. Anais...Helsinki, Finland: Curran Associates, Inc. ( Dec 2012 ), 2012
- GARTHWAITE, P. H.; KADANE, J. B.; O'HAGAN, A. Statistical Methods for Eliciting Probability Distributions. *Journal of the American Statistical Association*, v. 100, n. 470, p. 680-701, jun. 2005.
- GLOBO. *Leitores fotografam explosão de bueiro em Copacabana*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/vc-no-g1/fotos/2011/04/leitores-fotografam-explosao-de-bueiro-em-copacabana.html>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- GOOGLEMAPS. Mapa das explosões - Google Maps. Disponível em: <<https://maps.google.com.br/maps/ms?hl=pt-br&ie=UTF8&msa=0&msid=20577841552344339013.0004a01cae33fa4d37ff6&ll=-22.962819,-43.212662&spn=0.067491,0.110378&t=h&z=13>>. Acesso em: 21 nov. 2012.
- GRANATA, C. A. V; MACEDO, A. B. R.; NOGUEIRA, M. M. Inovações Tecnológicas na Manutenção de Sistemas de Transmissão Subterrânea. Brasília, Brasil: *1º. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica*, 2001.
- HAIMES, Y. Y. On the complex quantification of risk: systems-based perspective on terrorism. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 31, n. 8, p. 1175-86, ago. 2011.
- HÄMÄLÄINEN, R. P.; LINDSTEDT, M. R.; SINKKO, K. Multiattribute risk analysis in nuclear emergency management. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 20, n. 4, p. 455-67, ago. 2000.
- HAMEL, A.; GAUDREAU, A.; BRISSETTE, Y. Attenuation of Sound and Temperature Caused by Faulted Distribution Cable Joints. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 2327-2333, jul. 2005.
- HAMEL, A.; GAUDREAU, A.; COTE, M. Intermittent Arcing Fault on Underground Low-Voltage Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n. 4, p. 1862-1868, out. 2004.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to operations research*. Holden-Day, 1980.

- IEEE1584. *IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. IEEE Std 1584-2002*, 2002.
- KADANE, J.; WOLFSON, L. J. Experiences in elicitation. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, v. 47, n. 1, p. 3-19, mar. 1998.
- KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. *Decisions with multiple objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. New York: John Wiley and Son, 1976. p. 592
- KEENEY, R. L.; WINTERFELDT, D. VON. Eliciting probabilities from experts in complex technical problems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, v. 38, n. 3, p. 191-201, 1991.
- KOCH, B.; CARPENTIER, Y. Manhole explosions due to arcing faults on underground secondary distribution cables in ducts. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 3, p. 1425-1433, jul. 1992.
- KOCH, B.; CHRISTOPHE, P. Arc voltage for arcing faults on 25(28)-kV cables and splices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 3, p. 779-788, jul. 1993.
- LEE, R. H. The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-18, n. 3, p. 246-251, maio. 1982.
- LIGHT. *2a Revisão Tarifária Periódica. Audiência Pública no. 056/2008: Contribuição da Light à proposta da ANEEL*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2008/056/contribuicao/1\\_anexo\\_i\\_-nota\\_tecnica\\_2a\\_revisao\\_tarifaria\\_light.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2008/056/contribuicao/1_anexo_i_-nota_tecnica_2a_revisao_tarifaria_light.pdf)>. Acessado em: 2 fev. 2011
- LIGHT. Rede de Distribuição Subterrânea. Disponível em: <<http://www.light.com.br/web/relatorio-sistema-distribuicao-subterraneo.pdf>>. Acessado em: 2 Out. 2010
- LIGHT. Apresentação – Comissão de Minas e Energia Câmara dos Deputados. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cme/audiencias-publicas/anos-anteriores/2011/08-06-2011-discussao-sobre-a-situacao-em-que-se-encontra-a-rede-subterranea-da-light-s.a/light>>. Acessado em: 2 fev. 2012.
- LINKOV, I. et al. Multicriteria decision analysis: a comprehensive decision approach for management of contaminated sediments. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 26, n. 1, p. 61-78, fev. 2006.
- LINS, P. H. C.; ALMEIDA, A. T. DE. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 18, p. 13545-13554, set. 2012.

- MARTZ, H. F.; WALLER, R. A. *Bayesian Reliability Analysis*. John Wiley & Sons, 1982.
- MORGAN, M. G. et al. Categorizing risks for risk ranking. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 20, n. 1, p. 49-58, fev. 2000.
- MUNDA, G. *Multicriteria evaluation in a fuzzy environment: theory and applications in ecological economics*. Physica-Verlag, 1995.
- O GLOBO. *Mulher queimada após explosão de bueiro no Centro do Rio será indenizada pela CEG e Light* - Jornal O Globo. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/mulher-queimada-apos-explosao-de-bueiro-no-centro-do-rio-sera-indenizada-pela-ceg-light-2758801>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- O GLOBO. *Bueiros explodem na Rua da Assembleia, no Centro do Rio* - Jornal O Globo. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/bueiros-explodem-na-rua-da-assembleia-no-centro-do-rio-2720327>>. Acesso em: 21 nov. 2012.
- O GLOBO. *Após acidente em Copacabana, Light afirma que Rio ainda tem 130 bueiros com risco de explosão* - Jornal O Globo. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/apos-acidente-em-copacabana-light-afirma-que-rio-ainda-tem-130-bueiros-com-risco-de-explosao-2801699>>. Acesso em: 22 nov. 2011.
- O'HAGAN, A. Eliciting expert beliefs in substantial practical applications. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, v. 47, n. 1, p. 21-35, mar. 1998.
- O'HAGAN, A.; OAKLEY, J. E. Probability is perfect, but we can't elicit it perfectly. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 85, n. 1-3, p. 239-248, jul. 2004.
- PARSONS, A. C.; LEUSCHNER, W. B.; JIANG, K. X. Simplified Arc-Flash Hazard Analysis Using Energy Boundary Curves. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 44, n. 6, p. 1879-1885, 2008.
- PIETSCH, G.; GOCKENBACH, E. Fundamental investigation on the thermal transfer coefficient due to arc faults. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v. 34, n. 3, p. 1038-1045, jun. 2006.
- PSCDC. Annual report 2011. *Public Service Commission of the District of Columbia. Safe, Reliable, & Quality Services*. District of Columbia:. Disponível em: <[http://www.dcpsc.org/pdf\\_files/reports/AnnualReport2011.pdf](http://www.dcpsc.org/pdf_files/reports/AnnualReport2011.pdf)>. Acesso em: 12 nov. 2012.
- RADEVA, A. et al. Report Cards for Manholes: Eliciting Expert Feedback for a Learning Task. 2009 *International Conference on Machine Learning and Applications. Anais*. IEEE,

- dez. 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5381331>>. Acesso em: 27 fev. 2013
- RAIFFA, H. *Decision analysis: introductory lectures on choices under uncertainty*. Addison-Wesley, 1968.
- RANGEL JÚNIOR, E. Riscos de explosão nas redes subterrâneas. *V Seminário Internacional da Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho (ESW Brasil 2011). Anais*. São Paulo/SP, Brasil: 2011.
- ROGERS, M.; BRUEN, M. A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III. *European Journal of Operational Research*, v. 107, n. 3, p. 552-563, 16 jun. 1998.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Springer, 1996.
- RUDIN, C. et al. A process for predicting manhole events in Manhattan. *Machine Learning*, v. 80, n. 1, p. 1-31, 28 jan. 2010.
- RUDIN, C. et al. 21st-Century Data Miners Meet 19th-Century Electrical Cables. *Computer*, v. 44, n. 6, p. 103-105, 1 jun. 2011.
- RUDIN, C. et al. Machine learning for the New York City power grid. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, v. 34, n. 2, p. 328-45, fev. 2012.
- SKLAVOUNOS, S.; RIGAS, F. Estimation of safety distances in the vicinity of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 18, p. 83-88, 2006.
- SNODGRASS, R. E.; BLACK, W. Z. Mitigating the Effects of Explosions in Underground Electrical Vaults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 1767-1774, abr. 2005.
- SNODGRASS, R. E.; BLACK, W. Z. Design of Safety Devices to Mitigate Explosions in Underground Vaults and Manholes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 2262-2269, out. 2008.
- SOUZA, F. M. C. *Decisões racionais em situações de incerteza*. 2. ampl. ed. Recife: Livro Rápido, 2005.
- STONE & WEBSTER. *Assessment of the Underground Distribution System of the Potomac Electric Power Company*. Formal Case No. 991 - Investigation into Explosions Occurring in or Around the Underground Distribution System of the Potomac Electric Power Company, 2001.
- STREHLOW, R. Accidental explosions. *American Science*, v. 68, p. 420-428, 1980.

- TERRA. *População do Rio adota bom humor com adesivo de “bueiro-bomba”*. Disponível em: <<http://noticias.terra.com.br/brasil/noticias/0,,OI5235871-EI8139,00-Populacao+do+Rio+adota+bom+humor+com+adesivo+de+bueirobomba.html>>. Acesso em: 21 nov. 2011.
- VANSNICK, J.-C. On the problem of weights in multiple criteria decision making (the noncompensatory approach). *European Journal of Operational Research*, v. 24, n. 2, p. 288-294, fev. 1986.
- VINCKE, P. *Multicriteria decision-aid*. Bruxelles: John Wiley and Sons, 1992.
- WALLEY, P. Reconciling frequentist properties with the likelihood principle. *Journal of Statistical Planning and Inference*, v. 105, n. 1, p. 35-65, 15 jun. 2002.
- WALSH, B. P.; BLACK, W. Z. Thermodynamic and mechanical analysis of gas explosions in underground vaults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 1, p. 8-12, 2002.
- WALSH, B. P.; BLACK, W. Z. Thermodynamic and Mechanical Analysis of Short Circuit Events in an Underground Vault. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 3, p. 2235-2240, jul. 2005.
- WILLIS, H. H. et al. Aggregate, disaggregate, and hybrid analyses of ecological risk perceptions. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, v. 25, n. 2, p. 405-28, abr. 2005.
- ZHANG, L. et al. The electro-chemical basis of manhole events. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 25, n. 5, p. 25-30, set. 2009.
- ZHANG, L.; BOGGS, S.; MURRAY, G. Effect of limiting airflow in mitigating combustion-driven manhole events. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 27, n. 6, p. 37-44, nov. 2011.