

AValiação DE RISCO MULTIDIMENSIONAL DE SISTEMAS SUBTERRÂNEOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Thalles Vitelli Garcez

Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
tvgarcez@gmail.com

Adiel Teixeira de Almeida

Universidade Federal de Pernambuco
Caixa Postal 7462
almeidaatd@gmail.com

RESUMO

Embora os sistemas subterrâneos de distribuição de energia elétrica serem mais seguros comparados aos sistemas do tipo aéreo, com aumento do seu uso conjuntamente com o envelhecimento da mesma, a falta de adequada manutenção e a interferência de outros sistemas subterrâneos, tem causado muitos acidentes em áreas urbanas, pondo assim em risco a vida humana e gerando consequências à comunidade, à distribuidora e aos 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 propõe um modelo multicritério de avaliação de risco, baseado na teoria da decisão e teoria da utilidade multiatributo (MAUT).

PALAVRAS CHAVE. Avaliação de Risco, Multicritério, Sistema Subterrâneo.

ADM - Apoio à Decisão Multicritério

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 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 proposes a multicriteria model for risk assessment based on decision theory and multi-attribute utility theory (MAUT).

KEYWORDS. Risk Assessment. Multicriteria, Underground Systems.

ADM - Multicriteria Decision Support

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 incorrendo em maiores custos associados à manutenção, maiores dificuldade de detecção e localização de falhas, acessos às redes subterrâneas, upgrade 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 são mais seguras para a população, ficam menos expostas aos intempéries da natureza e causam menor impacto estético ao ambiente.

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 (Brasil), nos anos de 2010 e 2011, ocorreram cerca de 70 eventos em câmaras/caixas subterrâneas.

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 e Carpentier, 1992; Walsh e Black, 2002; 2005).

O modo de falha arco elétrico, que é uma condição perigosa associada à liberação de grande quantidade de energia, 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 e Charytoniuk, 2000).

Koch e Carpentier (1992) observaram que, mesmo em redes secundárias de baixa tensão, onde as falhas de arcos são geralmente consideradas auto extinguíveis, 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; e, etc.

Diante do requerimento para um maior nível de segurança, o envolvimento de um grande número (centenas, ou até milhares) de câmaras/caixas subterrâneas tendo cada uma características particulares, a falta de dados históricos sobre os modos de falha e eventos 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 ainda mais uma tarefa 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 e Almeida (2010); Apostolakis e Lemon (2005); Brito e Almeida (2009); Brito et al. (2010); Lins e 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 realizadas 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 e 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 (na qual forma o conjunto de alternativas), como uma ferramenta de apoio à decisão. Portanto, como contribuição deste trabalho, propõe-se uma nova forma de avaliação de risco, sob uma visão multidimensional (multicritério), na qual gera 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, implementação de ações preventivas e mitigadoras, modernização dos subsistemas (upgrade), etc. Ainda, serão propostas análises mais aprofundadas das medidas de riscos que podem ser geradas pela avaliação das diferenças de riscos.

2. Tomada de Decisão Multicritério

Em circunstâncias simples, 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 MCDA (*Multiple Criteria Decision Aid*) 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 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 (Roy, 1996; Vincke, 1992) e na América do Norte é amplamente usado o termo MCDM (*Multiple Criteria Decision Making*).

Para Keeney e Raiffa (1976), o principal objetivo do MCDM é auxiliar o decisor na tomada de decisão, que pode ser definida como a escolha, para aquele decisor, 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 e 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 e Raiffa, 1976).

Neste contexto, destaca-se a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Ela é derivada dos conceitos da Teoria da Utilidade e da Teoria da Decisão. No MAUT encontram-se os fatores básicos tratados pela teoria da decisão, tal como: os estado da natureza (θ), ações (alternativas) que o decisor pode adotar (a), consequências (c), que pode ser estimada através de uma função 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 sobre 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 e Raiffa (1976), na qual podem ser resumido em cinco principais etapas:

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

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 *tradeoffs* dos valores de consequências definidos em Keeney e Raiffa (1976).

3. Avaliação de Risco

Existem na literatura diversas definições para o conceito de risco. Aven (2012) analisou o desenvolvimento dos diversos conceitos de risco ao longo dos últimos 15 à 20 anos. 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.

Atualmente, de acordo com Aven (2012), a perspectiva de definição (conceito) mais adequada de risco envolve a determinação de consequências (C) e incertezas (U) ($R = C \& U$), 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 as consequências (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.

Sob a visão da tomada de decisão, para Berger (1985), 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.

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

$$L(c) = -u(c) \quad (1)$$

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

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, que é estimada de acordo com o domínio das consequências (Keeney e Raiffa, 1976).

Então, a função utilidade pode ser calculada por:

$$u(\theta, V_q) = \int_c u(c)P(c|\theta, V_q)dc \quad (2)$$

Uma vez tendo o conhecimento sobre a distribuição de probabilidade a priori dos estados da natureza, $\pi(\theta)$, como aplicado em (Alencar e De Almeida, 2010; A.J. Brito e de Almeida, 2009; Anderson J. Brito et al., 2010; Lins e de Almeida, 2012), pode-se calcular o risco associado a cada câmara subterrânea, utilizando a perspectiva de risco como consequência/dano/severidade mais a incerteza ($R = C \& U$).

Neste estudo, por suposição, 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:

$$U(c_H, c_F, c_O, c_T) = k_H U(c_H) + k_F U(c_F) + k_O U(c_O) + k_T U(c_T) \quad (3)$$

onde os k são as constantes de escala para cada dimensão de risco analisada, 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, conceitos de teoria da decisão e considerando a independência probabilística das consequências, a medida de risco é expressa por:

$$r(V_q) = \sum_i \left(\sum_{\theta} \left(\pi(\theta) \left(- \int_c u(c)P(c|\theta, V_q)dc \right) \right) \right) + (-1)\pi(\theta_N) \quad (4)$$

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 (θ); o estado da natureza θ_N representa o cenário de normalidade do sistema, na qual não existem consequências (justificando, assim, o valor da função perda ser 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 (θ), e combina ambas as incertezas associadas com: (i) as consequências $P(c|\theta, V_q)$, e (ii) os cenários de perigos $\pi(\theta)$.

Em adição à medida de risco utilizada, considera-se a estrutura de preferência do decisor no conjunto das consequências esperadas, através da função utilidade $u(c)$, e assim, ela 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.

4. Levantamento das dimensões do risco multidimensional

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

Na literatura, algumas dimensões (consequências) consideradas foram: a segurança humana, financeira, propriedades, ambiental, impacto nos *stakeholders*, impacto de imagem externa pública, etc. (Alencar e Almeida, 2010; Apostolakis e Lemon, 2005; Brito e Almeida, 2009; Brito et al., 2010; Haimes, 2011; Hämäläinen et al., 2000; Linkov et al., 2006; Lins e 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 (c_H), os impactos financeiros (c_F), os impactos operacionais (c_O) e transtornos no tráfego local de veículos (c_T).

A dimensão consequência ambiental adotada em diversos estudos anteriores em diferentes contextos (Alencar e Almeida, 2010; Brito e Almeida, 2009; Brito et al., 2010; Lins e 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. Talvez, devido algumas particularidades de um outro sistema em específico, essa dimensão torna-se relevante para o decisor considerá-la.

5. Funções 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 acidentais. 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 (θ) em uma câmara/caixa subterrânea (V_q), que é representado por $P(c|\theta, V_q)$.

No entanto, podem haver casos em que algumas dessas dimensões, na qual a consequência “certamente” ocorrerá caso um cenário acidental aconteça (sob uma visão determinista). Essa suposição, também, pode ser justificada como uma forma de simplificar a modelagem de consequências. Assim, neste caso a função consequência será $P(c|\theta, V_q) = 1$.

Para determinar os impactos de um cenário de perigo (θ) que 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. A zona de perigo pode ser formada por duas áreas principais:

1. A área que compreende 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;
2. A área de perigo que consiste na área externa (acima do solo) em que as perdas estão relacionadas com os impactos sobre a sociedade, os seres humanos, os propriedades de terceiros, e 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. Este trabalho focará apenas sobre as consequências da área externa à câmara subterrânea.

O tamanho da zona de perigo referente à queda da tampa é baseado no estudo realizado por (Walsh e Black, 2002, 2005). Um modo alternativo para avaliar a altura de deslocamento da tampa é usando o conhecimento *a priori* de especialistas, ou, ainda, esta pode basear-se na base de dados de acidentes já ocorridos. Quanto à área referente à energia incidente é baseado no standard IEEE1984 (IEEE1584, 2002), na qual determina a distância máxima (D_B) a partir do qual, as consequências geradas pela energia incidente geram danos à saúde (ao menos queimaduras de segundo grau).

5.1. Dimensão de perda humana

A localização da câmara subterrânea, o raio da zona de perigo, a existência de calçadas e ruas perto da câmara influenciam diretamente no impacto na consequência na dimensão humana. O número de pessoas dentro da zona de perigo pode ser modelado pela Teoria das Filas. 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 (λ), e que os tempos de atendimento são exponenciais (μ), já que são independentes um dos outros. O 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 aumente o tempo de atendimento (demora) das pessoas em um determinado local.

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, podemos aplicar o modelo M/M/s definido pela Teoria das Filas no contexto analisado.

5.2. Dimensão de perda Financeira

Neste estudo específico, como simplificação, se o estado da natureza (θ) acontece, então, é “quase certo” que as consequências ocorrem na dimensão financeira, assim é considerado $P(c_F | \theta, V_q) = 1$.

Assim, as consequências financeiras podem ser estimadas por:

$$c_F(\theta_i, V_q) = \sum_i Revenue(V_q) \left(\begin{array}{l} FineIndemnity(V_q) + Performance(V_q) + \\ + RepairCost(V_q) + FineMinistPublic(V_q) \end{array} \right) \quad (5)$$

onde:

- $Revenue(q)$: corresponde a receita de cada câmara subterrânea, que pode ser estimada por uma porcentagem do total de receitas do sistema. Normalmente, essa porcentagem é influenciada diretamente pelo tipo de rede, magnitude de distribuição e pelo tipo de clientes atendidos;
- $FineIndemnity(q)$: correspondente às multas aplicadas pela agência regulamentadora ANEEL;
- $Performance(q)$: correspondente às multas por perda de performance (qualidade) do fornecimento de energia, aplicada pela agência regulamentadora;
- $RepairCost(q)$: corresponde à porcentagem 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,
- $FineMinistPublic(q)$: 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.

5.3. Dimensão de perda Operacional

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 lognormal pode ser utilizada para o cálculo da função consequência, que representa a capacidade de manutenção do sistema (Almeida e Souza, 2001).

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 reduzidas.

5.4. Dimensão de distúrbios no Trânsito local

Dependendo da localização da tampa do bueiro, se na calçada ou na via de transporte e do raio da zona de perigo, a função de consequência sobre a dimensão de perturbações no trânsito local pode existir ou não.

A dimensão consequência sobre perturbações no trânsito pode ser mensurada utilizando também os conceitos da Teoria das Filas. A depender das características e suposições do trânsito local, 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 (μ), tem-se um modelo específico aplicado à teorias de filas, como, por exemplo, um modelo ($M/M/s$) ou ($D/D/1$).

6. Estudo Numérico

Foi elaborado um estudo numérico hipotético com o objetivo de avaliar os riscos das câmaras/caixas subterrâneas e, conseqüentemente, ordená-las. Como em todos os modelos de decisão, é necessário, primeiramente, identificar quem é o decisor. Neste caso, pode-se considerar o decisor como gerente sênior de segurança, de manutenção ou de operação da concessionária distribuidora.

A hierarquia de risco obtida pelo modelo deve obrigatoriamente refletir à estrutura de preferência do decisor, na qual considera-se que ele reflita racionalmente à estrutura de preferência da empresa a qual ele representa.

Neste estudo foram analisadas 10 câmaras subterrâneas ($V_1, \dots, V_q, \dots, V_{10}$), que representarão uma vasta gama de possíveis cenários encontrados em redes de distribuição reais. As principais características destas câmaras estão resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Descrição das câmaras subterrâneas analisadas

V_q	Descrição	Loc. da câmara subterrânea	Diâmetro da tampa da câmara (m)	kV do barramento	Corrente Total de falha (kA)	λ Taxa de chegada de pessoas (pessoas./s)	% da receita local	Down time (h)	Núm. de vias da Rua/Av.	λ_T Taxa de chegada de veículos (veíc./h)
1	Área Industrial 1	Rua/Av.	1,5	0,48	25,93	0,05	5,0%	4	2	2200
2	Área Industrial 2	Rua/Av.	1,0	0,48	25,93	0,10	2,5%	4,5	2	400
3	Área Industrial 3	Calçada	1,5	0,48	25,93	0,10	1,5%	2	2	600
4	Área Resid. 1	Calçada	1,0	0,48	7,28	0,05	0,5%	5	2	200
5	Área Resid. 2	Calçada	1,0	0,48	7,75	0,05	0,5%	5	0	0
6	Área Resid. 3	Rua/Av.	1,5	0,48	9,86	0,15	0,5%	5	2	300
7	Área Comercial 1	Calçada	1,5	0,48	10,66	0,35	2,0%	4	0	0
8	Área Comercial 2	Rua/Av.	1,5	0,48	11,85	0,20	0,5%	4	2	550
9	Área Comercial 3	Calçada	1,0	0,48	25,93	0,15	1,0%	2	0	0
10	Área Comercial 4	Rua/Av.	1,0	0,48	13,82	0,30	1,5%	3	2	1600

Diante dos impactos do cenário de perigo de explosão interna com deslocamento da tampa da câmara subterrânea causado por um arco elétrico são estimadas as zonas de perigo. Utilizando a matriz de consequência para cada dimensão de risco, é elicitadas as funções utilidades unidimensionais ($U(c_H), U(c_F), U(c_O), U(c_T)$) e suas respectivas constantes de escala ($k_{c_H}, k_{c_F}, k_{c_O}, k_{c_T}$). Mais detalhes sobre estes procedimentos são mostrados em Keeney e Raiffa (1976). Considera-se que o decisor tenha um comportamento avesso ao risco para a dimensão humana, e para as demais um comportamento de propensão ao risco. Os valores das constantes de escala consideradas foram $k_{c_H} = 0,432$; $k_{c_F} = 0,3123$; $k_{c_O} = 0,158$; e, $k_{c_T} = 0,0977$.

As funções de utilidade multiatributo são combinadas com as funções de consequências e com a distribuição de probabilidade dos cenários acidentais. Assim, uma medida de risco multidimensional é estimada, sob a perspectiva da teoria da decisão e teoria da utilidade (Equação 4).

Os valores de riscos resultantes são mostrados na Tabela 2. Os valores de risco próximos ao valor “-1” indicam a maior contribuição do cenário do funcionamento normal (θ_N), uma vez que a ocorrência de eventos em câmaras/caixas subterrâneas são raros, de modo que a probabilidade de cenário

de operação de normalidade $\pi(\theta_N)$ é muito próximo de 1, e sua função de perda é -1 (sem consequências).

Tabela 2. Resultado do ordenamento dos riscos da avaliação multidimensional dos riscos

Ordenamento	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_9	-0,97729	0,014538	42,63
2º.	V_5	-0,99183	0,000341	0,83
3º.	V_7	-0,99217	0,000412	1,58
4º.	V_4	-0,99259	0,000261	0,12
5º.	V_3	-0,99285	0,002118	77,71
6º.	V_8	-0,99496	0,000027	0,19
7º.	V_6	-0,99499	0,000142	2,06
8º.	V_{10}	-0,99513	0,000069	0,21
9º.	V_2	-0,99520	0,000331	0,00
10º.	V_1	-0,99553	0,000000	0,00

7. Discussões e conclusões

Sob a análise dos resultados, conclui-se que a câmara subterrânea V_9 está no topo da lista de ordenamento, pois possui maior valor de risco (Tabela 2 – Coluna 3). Por conseguinte, esta câmara subterrânea deve receber a maior atenção, principalmente quando recursos adicionais estiverem disponíveis para tratar de ações de segurança (preventivas ou mitigadoras) e melhorias do sistema.

Além disso, a metodologia permite fazer comparações dos incrementos de riscos (Tabela 2 – Coluna 4), uma vez que os resultados são dados numa escala intervalar. Por essa análise (ver Figura 1), conclui-se que a diferença entre os valores de risco das câmaras V_9 e V_5 correspondem cerca de 80% da amplitude total dos valores de risco $\left(\frac{V_9 - V_5}{V_9 - V_1} = 79,71\%\right)$, o que indica um aumento significativo no risco entre essas câmaras. O mesmo acontece com o incremento de risco das alternativas V_3 para V_8 de aproximadamente 12%.

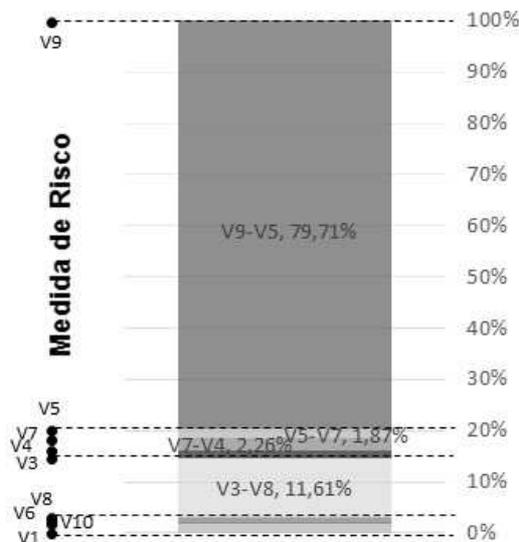


Figura 1. Análise das diferenças de riscos entre as câmaras/caixas subterrâneas analisadas

Caso seja necessário escolher outras câmaras além da primeira para serem priorizadas, as câmaras V_5, V_7, V_4 e V_3 tornam-se fortes candidatas, pois localizam-se no topo do ordenamento e o range da diferença de risco delas corresponde somente a 5,56% do range do risco total, ou seja, elas possuem valores de risco muito próximas entre si.

Além disso, o conjunto de câmaras (V_5, V_7, V_4, V_3) possui um gap no incremento do risco de aproximadamente 12% para a próxima câmara V_8 . Tal informação pode ser estratégica para o decisor, que poderá fazer uma análise mais detalhada de qual câmara gerará uma redução de risco mais eficiente, ou seja, a depender do estudo detalhado (custo-benefício ou outro), investir em qualquer uma das quatro câmaras (V_5, V_7, V_4, V_3) pode surtir efeitos similares, não indicando necessariamente a investir na segunda colocada.

Outra fonte de informação estratégica é a comparação dos incrementos de riscos intra-critério. Essa análise permite destacar qual o critério (dimensão) que maior contribui para a diferença de risco entre duas alternativas (vide Figura 2).

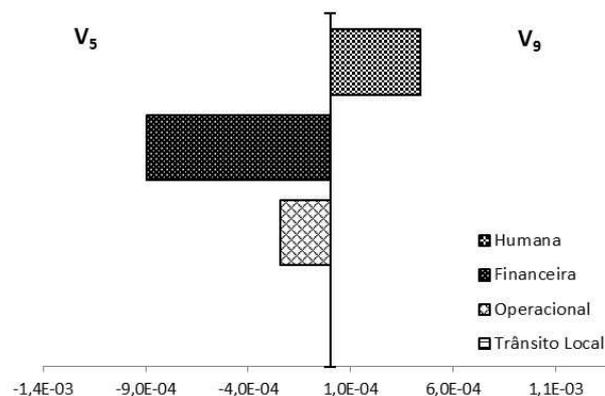


Figura 2. Análise intra-critério das diferenças de risco das alternativas V_9 and V_5

Verifica-se que a alternativa V_9 tem um maior incremento intra-critério de risco com relação à alternativa V_5 na dimensão perda humana, em contrapartida, possui incremento negativo com relação as dimensões de perda financeira e operacional. Consequentemente, indica que a realização de ações preventivas ou mitigativas relacionadas à dimensão humana na alternativa V_9 resultaria numa diminuição do gap entre essas alternativas. Já aplicando recursos sobre a dimensão de distúrbios no trânsito não surgiria efeitos significativos na diferença de risco entre essas alternativas.

Outras avaliações similares intra-critério podem ser feitas nos restantes incrementos de risco das outras alternativas. Desta forma, essas análises direcionam melhor quais ações devam ser tomadas que tornam o gerenciamento de riscos eficiente, não somente considerando o ordenamento das mesmas.

Assim, este estudo realizou um estudo multidimensional do risco em câmaras subterrâneas em um sistema de distribuição de energia, considerando diversos aspectos de consequências.

O modelo dá suporte ao decisor na priorização de alternativas (câmaras subterrâneas) a fim de gerir os recursos para o gerenciamento do risco e da manutenção ou para melhorias (upgrade) no sistema, alocando recursos adicionais, primeiramente, para aqueles que são mais críticos entre um grande universo de alternativas.

Agradecimentos

Este trabalho é parte do estudo de pesquisa financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE).

Referências

- Alencar, M. H., e De Almeida, A. T.** (2010). Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8), 3610–3619.
- Almeida, A. T.** (2011). *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão* (2. ed., rev., p. 234). Recife: Ed. Universitária da UFPE.
- Almeida, A. T. de.** (2013). *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*. (1st ed.). São Paulo/SP, Brasil: Editora Atlas.
- Almeida, A. T. de, e Souza, F. M. C.** (Eds.). (2001). *Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade*. Recife: Ed. Universitária da UFPE.
- Apostolakis, G. E., e Lemon, D. M.** (2005). 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*, 25(2), 361–76.
- Aven, T.** (2012). The risk concept—historical and recent development trends. *Reliability Engineering e System Safety*, 99(0951), 33–44.
- Belton, V., e Stewart, V. B. T. J.** (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer-Verlag GmbH.
- Berger, J.** (1985). *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis* (Springer Series in Statistics) (2nd ed.). Springer.
- Brito, A.J., e De Almeida, A. T.** (2009). Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering e System Safety*, 94(2), 187–198.
- Brito, Anderson J., De Almeida, A. T., e Mota, C. M. M.** (2010). A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, 200(3), 812–821.
- Chen, Y., Marckilgour, D., e Hipel, K.** (2008). A case-based distance method for screening in multiple-criteria decision aid. *Omega*, 36(3), 373–383.
- Cultrera, J., e Charytoniuk, W.** (2000). Arcing fault detection in underground distribution networks-feasibility study. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(6), 1756–1761.
- Haimes, Y. Y.** (2011). On the complex quantification of risk: systems-based perspective on terrorism. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 31(8), 1175–86.
- Hämäläinen, R. P., Lindstedt, M. R., e Sinkko, K.** (2000). Multiattribute risk analysis in nuclear emergency management. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 20(4), 455–67.
- Hamel, A., Gaudreau, A., e Cote, M.** (2004). Intermittent Arcing Fault on Underground Low-Voltage Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(4), 1862–1868. IEEE1584. (2002). **IEEE**. *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*. IEEE Std 1584-2002.
- Keeney, R. L., e Raiffa, H.** (1976). *Decisions with multiple objectives: Preferences and Value Trade-Offs* (p. 592). New York: John Wiley and Son.
- Koch, B., e Carpentier, Y.** (1992). Manhole explosions due to arcing faults on underground secondary distribution cables in ducts. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(3), 1425–1433.
- Linkov, I., Satterstrom, F. K., Kiker, G., Seager, T. P., Bridges, T., Gardner, K. H., ... Meyer, A.** (2006). Multicriteria decision analysis: a comprehensive decision approach for management of contaminated sediments. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 26(1), 61–78.
- Lins, P. H. C., e De Almeida, A. T.** (2012). Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(18), 13545–13554.
- Morgan, M. G., Florig, H. K., DeKay, M. L., e Fischbeck, P.** (2000). Categorizing risks for risk ranking. *Risk analysis: an official publication of the Society for Risk Analysis*, 20(1), 49–58.
- Munda, G.** (1995). *Multicriteria evaluation in a fuzzy environment: theory and applications in ecological economics*. Physica-Verlag.

- Roy, B.** (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Springer.
- Rudin, C., Passonneau, R. J., Radeva, A., Dutta, H., Ierome, S., e Isaac, D.** (2010). A process for predicting manhole events in Manhattan. *Machine Learning*, 80(1), 1–31.
- Rudin, C., Passonneau, R. J., Radeva, A., Ierome, S., e Isaac, D. F.** (2011). 21st-Century Data Miners Meet 19th-Century Electrical Cables. *Computer*, 44(6), 103–105.
- Rudin, C., Waltz, D., Anderson, R. N., Boulanger, A., Salleb-Aouissi, A., Chow, M., ... Wu, L.** (2012). Machine learning for the New York City power grid. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 34(2), 328–45.
- Vincke, P.** (1992). *Multicriteria decision-aid*. Bruxelles: John Wiley and Sons.
- Walsh, B. P., e Black, W. Z.** (2002). Thermodynamic and mechanical analysis of gas explosions in underground vaults. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17(1), 8–12.
- Walsh, B. P., e Black, W. Z.** (2005). Thermodynamic and Mechanical Analysis of Short Circuit Events in an Underground Vault. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3), 2235–2240.
- Willis, H. H., DeKay, M. L., Fischhoff, B., e Morgan, M. G.** (2005). Aggregate, disaggregate, and hybrid analyses of ecological risk perceptions. *Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis*, 25(2), 405–28.