

GASODUTOS DE GÁS NATURAL: APLICAÇÃO DE MODELO PARA AVALIAÇÃO MULTIDIMENSIONAL DOS RISCOS

Mônica Frank Marsaro

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
mmarsaro@gmail.com

Eduardo Morgon Krym

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
eduardo.krym@gmail.com

Marcelo Hazin Alencar

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
marcelohazin@gmail.com

Adiel Teixeira de Almeida

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
almeidaatd@gmail.com

RESUMO

Apesar dos gasodutos serem bastante seguros, alguns acidentes têm ocorrido ao longo dos anos, gerando diferentes tipos de danos, muitas vezes catastróficos. Neste contexto, com base no trabalho de Brito & Almeida (2009), o presente artigo utiliza a Teoria da Utilidade Multiatributo como forma de agregar diferentes critérios de avaliação de risco em gasodutos de transporte de gás natural, levando em conta três diferentes dimensões: humana, ambiental e financeira. Um modelo de decisão multicritério é utilizado, incluindo a incerteza atrelada à ocorrência de acidentes neste tipo de modal de transporte. O objetivo final é fornecer uma ordenação das seções dos gasodutos em termos de risco. Com base nas seções dos gasodutos analisadas, uma forma mais completa de análise, através da realização da comparação de incrementos de risco entre as seções consideradas, é disponibilizada ao decisor, propiciando uma gama de informação mais completa, utilizada para o gerenciamento e mitigação dos riscos.

PALAVRAS CHAVE. Análise de risco, MAUT, Gasodutos.

Área principal: ADM - Apoio à Decisão Multicritério; P&G - PO na Área de Petróleo e Gás.

ABSTRACT

Although pipelines are quite safe, some accidents have occurred over the years, resulting in different types of damage, which has very often been catastrophic. In this context, based on Brito and Almeida (2009), this paper uses Multi-Attribute Utility Theory as a way to aggregate different criteria for evaluating risk in natural gas pipelines, taking into account three different dimensions: the human, the environmental and the financial. A multicriteria decision model is applied, including the uncertainty related to the occurrence of accidents in this kind of transportation mode. The goal is to provide an ordering of the sections of the pipeline in terms of risk. Based on the pipeline sections analyzed, a more complete form of analysis, which compares

increments in risk between the sections considered, is made available to the decision maker, thus providing a range of more complete information so as to manage and mitigate risks.

KEYWORDS. Risk Analysis. MAUT. Pipelines.

Main area: ADM – Multicriteria Decision Support; P&G – OR in Oil & Gas.

1. Introdução

Nos últimos anos, o que se observa mundialmente é um aumento na preocupação pela preservação do meio ambiente dada as condições ambientais atuais. Nesse sentido, Marquart-Pyatt (2012) argumentam que essas condições tem sido um dos problemas mais importantes que o mundo enfrente atualmente.

De acordo com Haris (2012), a política energética tem sido considerada uma questão prioritária entre governantes de vários países, levando em consideração a crescente demanda mundial por energia, a segurança em relação ao abastecimento, e as constantes flutuações do preço dos combustíveis. Dessa forma, a pesquisa e o uso de combustíveis menos poluentes é uma realidade. Neste contexto, dentre os combustíveis fósseis, o gás natural tem sido apontado como uma alternativa, sendo cada vez mais utilizado como fonte de energia em todo o mundo (Woldeyohannesa e Majidb, 2011).

Han e Weng (2012) apontam que o gás natural é hoje uma das mais importantes fontes de energia, sendo responsável por 20% do consumo total de energia na União Europeia. No Brasil, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2013), de toda a matriz energética do país, 10,36% é proveniente de gás, sendo esse, portanto, um setor de possível crescimento e desenvolvimento.

Para o transporte de grandes quantidades de combustíveis, Medina et al. (2012) afirmam o transporte por dutos é o mais eficiente, possuindo menor custo e maior capacidade, além de ser mais seguro. Porém apesar de serem bastante seguro, alguns acidentes têm ocorrido ao longo dos anos neste tipo de modal de transporte, causando diferentes tipos de danos, muitas vezes críticos. Por exemplo, de acordo com o Departamento de Transportes dos EUA, de 1993 até março de 2013 ocorreram 1.892 acidentes, ocasionando 42 mortes e 209 feridos (PHMSA, 2013).

Inserido neste contexto, com base no trabalho de Brito & Almeida (2009), o presente estudo utiliza a Teoria da Utilidade Multiatributo como forma de agregar diferentes critérios de avaliação de risco em gasodutos de transporte de gás natural, levando em conta três diferentes dimensões: humana, ambiental e financeira. Um modelo de decisão multicritério é utilizado, incluindo a incerteza atrelada a ocorrência de acidentes nessa área. O objetivo final é fornecer uma ordenação das seções dos gasodutos em termos de risco, a fim de proporcionar ao decisor informação para a tomada de decisão quanto ao gerenciamento e mitigação dos riscos.

2. Causas de falhas em gasodutos e cenário de perigo

Gasodutos podem ser instalados em diferentes locais, podendo ser subterrâneos ou não e até mesmo aéreos, passando por cidades com grande concentração de pessoas, vegetação, rios, túneis e até ferrovias (Liang et al., 2012). Desta forma Papadakis (1999) e Sklavounos e Rigas (2006) afirmam que os acidentes em gasodutos podem ser classificados em seis categorias de acordo com a análise das causas do acidente: interferência externa ou atividade de terceiros; corrosão; defeito de construção; movimentação de terra ou associados a riscos naturais em geral; erro operacional; e por fim, outras causas ou causas desconhecidas.

Grandes liberações de gases inflamáveis no ambiente representam um risco significativo devido a alta capacidade de explosão e inflamabilidade. Neste contexto, Sklavounos e Rigas (2006) analisam todos os resultados possíveis quando da liberação de gás combustível levando em consideração o tempo de ignição e o grau de confinamento do gás. Brito e Almeida (2009) apresentam uma árvore de cenários de perigo (Figura 1) para o gás natural e levam em consideração que, sendo o gás natural menos denso que o ar, tenderá a se espalhar rapidamente, não ocorrendo acúmulo de gás próximo à superfície em ambiente aberto. Além disso, pelo fato do gás natural ter baixa concentração de gás sulfídrico, ou outro componente tóxico, o cenário de acúmulo e dispersão de gás tóxico é considerado desprezível.

A partir de uma ignição imediata, é possível verificar a formação de cenários distintos em que uma nuvem de gás misturada com o oxigênio entra em ignição iniciada pela camada mais externa da nuvem, permanecendo com uma concentração de gás no interior. Quando a nuvem

começa a tomar um formato mais esférico, devido a flutuação do ar quente, há a formação de uma bola de fogo (*fireball*). Nos casos em que essa bola é dispersa rapidamente, formando um jato de gás em chama, forma-se o cenário conhecido como jato de fogo (*jet fire*) (Brito e Almeida, 2009).

Havendo confinamento do gás que teve ignição imediata, ocorre um aumento imediato da pressão do gás, produzindo um fenômeno denominado deflagração (*deflagration*). Quando se verifica aumento expressivo na velocidade de propagação das chamas desenvolve-se uma forte onda de choque dentro da nuvem, produzindo o cenário de detonação (*detonation*) (Sklavounos e Rigas, 2006).

No caso de não haver ignição imediata, três cenários podem ser produzidos, *Confined Vapor Cloud Explosion (CVCE)*, *flash fire* e dispersão do gás (*gas dispersion*). O cenário CVCE é formado quando o gás permanece sem ignição e confinado até que a nuvem de gás formada atinja seu limite de inflamabilidade (Brito e Almeida, 2009). O cenário de *flash fire* é considerado na árvore de cenários, porém de acordo com Jo e Ahn (2005) a ocorrência desse cenário possui baixa probabilidade de ocorrência, tendo consequências pequenas. Este cenário é formado quando há formação de chamas que se propagam lentamente devido à dispersão rápida do gás. A dispersão do gás ocorre quando, além de não haver ignição imediata, também não há acúmulo do gás, dispersando rapidamente pelo ambiente. A Figura 1 apresenta a árvore de eventos referente ao vazamento de gás natural.

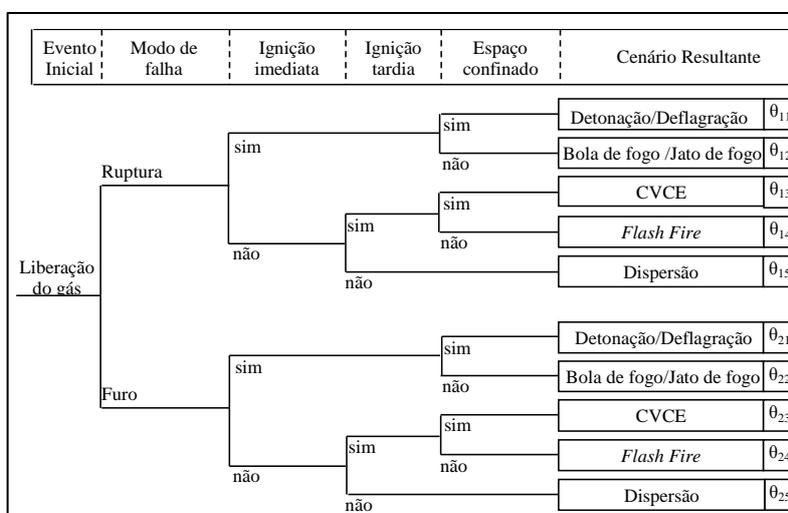


Figura 1: Árvore de eventos (vazamento de gás natural). Adaptado de Brito e Almeida, 2009.

3. Análise de risco em gasodutos

A análise de risco em gasodutos de gás natural é realizada, através da avaliação dos cenários de perigo, a ocorrência probabilística dos mesmos e as possíveis consequências que podem decorrer da existência de uma falha em gasodutos. Sendo assim, é importante estruturar a análise de risco nesse contexto, introduzindo a incerteza atrelada ao problema, e avaliando a subjetividade inerente à ocorrência de diferentes dimensões de risco que podem ser consideradas. Sob essa ótica, vários autores têm realizados estudos nessa área, sendo expostos alguns deles a seguir.

Segundo afirmam Bertucio e Moraleda (2012) a avaliação dos riscos em gasodutos tem como finalidade garantir a integridade dos dutos avaliando as incertezas relacionadas com o acontecimento de determinado evento, servindo como base para priorização de esforços quanto a tomada de ações em dutos com maior risco associado.

Alidoosti et al. (2012) asseguram que a análise de risco permite ao decisor identificar infraestruturas críticas mais propensas ao risco e tomar decisões acertadas para reduzir ou limitar o risco. No entanto, de acordo com os autores, uma técnica mais adequada deve ser admitida. Os autores mencionam ainda que a incerteza é algo presente nesse tipo de análise, principalmente de duas formas: incerteza devido a variabilidade física e devido a falta de conhecimento. Desta

forma, propuseram uma avaliação de riscos levando em consideração a incerteza, propondo a utilização de lógica *fuzzy*. Integraram a técnica de análise de risco *Risk Analysis and Management for Critical Asset Protection (RAMCAP)* e *Fuzzy Inference System (FIS)* para gerar um estrutura mais segura, implementar e controlar sistemas e subsistemas de gasodutos.

Markowski e Sam Mannan (2009) realizaram uma comparação entre abordagens clássicas de análise de risco e a lógica *fuzzy* em gasodutos de transporte de produtos inflamáveis. Jamshidi et al. (2013) também utilizaram a lógica *fuzzy* a fim de integrá-la a metodologia *Relative Risk Score (RRS)*, além de comparar a metodologia proposta com a RRS.

Simonoff et al. (2010) realizaram um estudo com outro enfoque, uma análise de risco em gasodutos levando em consideração as consequências atreladas aos custos. Através de métodos estatísticos os autores propuseram uma forma de melhor compreender como diferentes formas de acidentes podem resultar em perdas financeiras, servindo como uma fonte de informação para a tomada de decisão.

Ainda em relação a avaliação de riscos em gasodutos, Liang et al. (2012) utilizaram modelos de árvore de falhas e de redes neurais de forma a realizar uma classificação de seções de gasoduto em relação ao risco, conforme padrões estabelecidos devido a interferência de terceira parte no pleno funcionamento dos dutos.

Jo e Crowl (2008) elaboraram um método para calcular o risco individual associado ao transporte de gás natural em gasodutos. Jo e Ahn (2002, 2005) propuseram uma forma de calcular a distância de perigo associada ao transporte de gás natural, além de um modelo para avaliação de riscos nesse cenário. Sklavounos e Rigas (2006) determinaram a distancia de segurança para o caso em que haja acidente, definindo as consequências através de cenários acidentais associado à liberação de gás armazenado em um sistema de transmissão em alta pressão.

Brito e Almeida (2009) propuseram um estudo inovador na área de análise de risco para gasodutos de gás natural, incorporando múltiplos critérios (humano, ambiental e financeiro) e integrando a característica probabilística da análise à avaliação multicritério (através do MAUT). Brito et al. (2010) utilizaram o Electre TRI e o MAUT para avaliação dos riscos associados à gasodutos de gás natural. Alencar e Almeida (2010) e Lins e Almeida (2012) apresentaram a avaliação de risco utilizando decisão multicritério para gasodutos de transporte de hidrogênio.

4. Teoria da Utilidade Multiatributo

Almeida (2013) afirma que, um método de apoio à decisão pode ser utilizado para o desenvolvimento de um modelo de decisão, tendo como objetivo auxiliar o decisor a organizar e sintetizar informações importantes. No contexto da tomada de decisão, verifica-se ainda a existência de pontos de vista conflitantes e várias partes interessadas (Belton e Stewart, 2002).

Dentre estes métodos destaca-se a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT – *Multi-Attribute Utility Theory*). De acordo com Keeney e Raiffa (1976) MAUT incorpora ao modelo de decisão a avaliação de múltiplos objetivos. Almeida (2013) afirma que essa teoria inclui em um modelo de decisão a utilização de variáveis incertas, sendo de fundamental importância para a inserção de incertezas no modelo. Para Brito e Almeida (2009), MAUT é utilizado para agregar preferências e consequências quando há múltiplas dimensões, avaliando as preferências e o comportamento do decisor.

A utilização dessa teoria está atrelada a verificação dos axiomas derivados da Teoria da Utilidade e incorpora a ela o tratamento de problemas com múltiplos critérios (Alencar e Almeida, 2010). Por isso recebe o nome de teoria, uma vez que possui uma estrutura axiomática sólida e consistente (Almeida, 2013).

Por fim, a ideia de MAUT resume-se em quantificar os desejos do decisor para que seja desenvolvida uma forma de relacionar os bens e os valores que representem uma regra de escolha para os decisores (Alencar e Almeida, 2010).

5. Apresentação do modelo

O modelo apresentado a seguir utiliza avaliação de diferentes dimensões de risco em

gasodutos: humana, financeira e ambiental. Baseia-se na Teoria da Utilidade Multiatributo, tendo como finalidade gerar uma ordenação das seções de um gasoduto de transporte de gás natural com base nos valores de risco obtidos para proporcionar *insight* para o gerenciamento, a fim de definir ações que possam reduzir e mitigar os riscos associados a cada cenário avaliado. Levando isso em consideração, a seguir serão apresentadas as etapas pertinentes ao modelo de decisão para avaliação de riscos em gasodutos de gás natural.

5.1 Divisão do gasoduto em seções

Primeiramente, a partir da definição dos cenários de perigo, o gasoduto deve ser dividido em seções que apresentem características semelhantes em aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, ao final um conjunto discreto de seções $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ será formado. Isso permite que as estratégias de ações mitigadoras sejam tomadas mais eficientemente a partir do conhecimento das ameaças presentes em cada uma das seções condizentes com a realidade observada (Brito e Almeida, 2009).

5.2 Análise de exposição

É feita uma análise pra identificar a área de perigo para cada seção identificada anteriormente, relacionando a ocorrência de cenários de perigo e possíveis impactos causados nos arredores do ponto que ocorrer o acidente.

5.3 Estimação do conjunto de *payoffs*

Brito e Almeida (2009), Brito et al. (2010), Alencar e Almeida (2010), propuseram uma análise em que mais de uma dimensão de risco é levada em consideração. Lins e Almeida (2012) apresentam em seu trabalho a divisão da dimensão ambiental em duas subdimensões de risco: área de impacto ambiental e impacto na diversidade ambiental (Figura 2).

Brito e Almeida (2009) explanam que os valores adotados como *payoff* devem ser os mais pessimistas em cada uma das dimensões.

A análise de riscos na dimensão humana (h) envolve elementos subjetivos e dificilmente poderia ser mensurada em termos monetários. Jo e Ahn (2005) descrevem que esses riscos estão associados aos trabalhadores ligados ao gasoduto, a população residente nas redondezas, pessoas de passagem pelo local, etc. Sendo assim Brito e Almeida (2009) assumem nessa dimensão o número de pessoas atingidas fisicamente, apresentando ao menos queimaduras de segundo grau, tendo-se em vista que quaisquer danos à população devem ser evitados.

Já a dimensão ambiental (a) é subdividida em duas subdimensões de risco: (a1) que corresponde aos danos causados por queima da vegetação, tomando como medida o tamanho da área total de vegetação que foi destruída pelo fogo; (a2) que incorpora a diversidade ecológica na análise das consequências (Lins e Almeida, 2012). Para avaliar (a2) o índice de Margalef é utilizado.

A última dimensão considerada é a financeira (f) que constitui-se pelo desembolso financeiro que a companhia de gás terá pela ocorrência do cenário acidental. Esse desembolso é decorrente de perdas no faturamento e multas contratuais devido à interrupção do fornecimento de gás, multas por danos causados às pessoas, meio ambiente e organizações, além de gastos com manutenção na tubulação (Brito e Almeida, 2009).

5.4 Elicitação da função utilidade multiatributo

No modelo de decisão apresentado nesse trabalho, a função utilidade geral $U(h,a,f)$ é considerada aditiva:

$$U(h, a, f) = k_h U(h) + k_a U(a) + k_f U(f) \quad (1)$$

onde $U(h)$, $U(a)$ e $U(f)$ são as utilidades unidimensionais das dimensões humana, ambiental e financeira respectivamente e k_h , k_a e k_f são as constantes de escala calculadas a partir de um processo de elicitación baseado em loterias, sendo $k_h + k_a + k_f = 1$.

5.5 Cálculo das probabilidades de consequência

A determinação das probabilidades das consequências é feita através do cálculo de probabilidades envolvendo um par formado por um cenário resultante e por um trecho do gasoduto. Brito e Almeida (2009) afirmam que não há correlação estatística entre os diferentes danos atrelados aos gasodutos, e por esse motivo admite-se que as consequências ocorrerão de forma aleatória e independente e com correlação insignificante, podendo ser calculadas separadamente.

Com relação à dimensão humana, dentre vários aspectos, leva-se em conta o número de pessoas atingidas fisicamente pela ocorrência de determinado cenário acidental, o fluxo de radiação de calor (que pode ser calculado conforme Jo e Crowl (2008)) e o tempo de exposição de uma pessoa a radiação.

Quanto à dimensão ambiental, considera-se no modelo um índice de diversidade denominado Índice de Margalef, que enfatiza a riqueza da diversidade das espécies que deve ser levada em conta neste tipo de análise (Lins e Almeida, 2012). O índice é apresentado na equação (2) em que S demonstra o número de espécies e N o número total de indivíduos.

$$M = \frac{S-1}{\ln N} \quad (2)$$

A função consequência da dimensão financeira é baseada no tempo até que as chamadas sejam apagadas e no tempo considerado até que as funções de operação normal do gasoduto sejam reestabelecidas, onde procedimentos apresentados em Brito e Almeida (2009) são adotados para essa dimensão. Neste contexto, consideram-se perdas como perdas de receitas associadas a um cenário acidental de vazamento de gás em um trecho do gasoduto, perdas por ressarcimento decorrente da interrupção de produção dos clientes empresariais e perdas financeiras por danos a propriedades, multas e indenização por danos físicos.

5.6 Estimação dos riscos

A finalidade dessa etapa é o cálculo dos riscos associados a cada uma das seções do gasoduto de gás natural.

De acordo com Lins e Almeida (2012) e Alencar e Almeida (2010) o risco pode ser calculado pela equação (3) devido as propriedades de independência aditiva da função utilidade multatributo e da independência da distribuição de probabilidade sobre as consequências, somando-se as perdas associadas a cada um dos cenários e seções, multiplicadas pela probabilidade (π_i) dos cenários acidentais (θ_{jk}) e adicionado a perda associada ao cenário de normalidade (θ_N).

$$r(a_i) = \left\{ \sum_j \sum_k \left\{ - \left[\begin{array}{l} +k_h \int_h f(h|\theta_{jk}, a_i) u(h) dh \\ +k_a \int_a f(a|\theta_{jk}, a_i) u(a) da \\ +k_f \int_f f(f|\theta_{jk}, a_i) u(f) df \end{array} \right] \right\} \cdot \pi_i(\theta_{jk}) \right\} + (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (3)$$

A partir do valor do risco de cada sessão analisada é possível definir valores de diferença absoluta (DA) entre os valores de risco das seções, conforme equação (4), em que x representa a posição no ranking e $r_x(a_i)$ o risco total da seção a_i . Desta forma, a razão das diferenças é definida pela equação (5), produzindo informações importantes que contribuirão para a análise do risco realizada.

$$DA = r_x(a_i) - r_{x+1} a_j \quad (4)$$

$$RD = \frac{r_x(a_i) - r_{x+1}(a_j)}{r_{x+1}(a_i) - r_{x+2}(a_j)} \quad (5)$$

6. Aplicação Numérica

Uma aplicação numérica será apresentada com o objetivo de ilustrar o modelo de decisão multicritério proposto. O gasoduto analisado está dividido em oito seções (S_1 até S_8), conforme se observa na Figura 3. A definição das seções leva em consideração características homogêneas vinculadas a aspectos sociais, ambientais, técnicos e econômicos. São considerados, ao longo do gasoduto em análise áreas como residencial, comercial, industrial, complexo turístico e área de preservação ambiental.

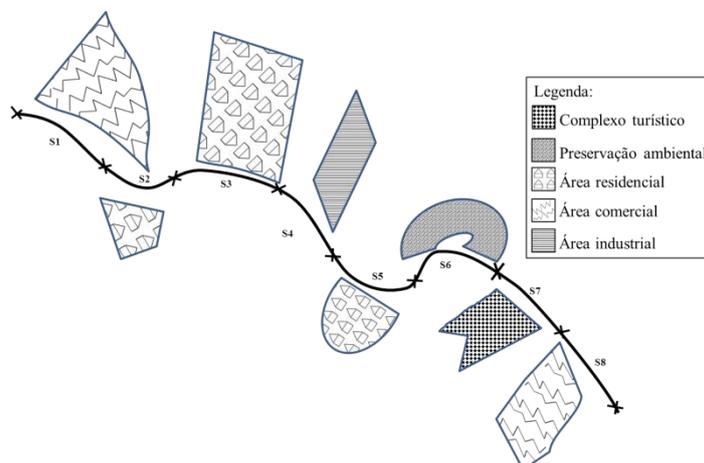


Figura 3: Layout das seções do gasoduto consideradas

A partir da consideração das três dimensões de risco consideradas, realizou-se a elicitaco da funo utilidade multiatributo com base no protocolo estruturado definido em Keeney & Raiffa (1976). O clculo do risco para cada seo  efetuado através da equao (3), considerando-se a funo utilidade multiatributo combinada com a funo densidade de probabilidade.

Como observado na tabela 1, a escala intervalar da funo utilidade permite que as sees sejam analisadas de uma forma mais completa, através da realizao da comparao de incrementos de risco entre as sees consideradas, aumentando a gama de informao disponibilizada ao decisor.

Tabela 1: Ranqueamento do risco das sees do gasoduto.

Posio no ranking (x)	Seo (a_i)	DA	RD
1	S_1	3,732	2,999
2	S_2	1,244	1,552
3	S_4	0,801	0,692
4	S_6	1,157	0,543
5	S_7	2,128	0,728
6	S_8	2,923	4,477
7	S_5	0,652	-
8	S_3	-	-

Neste sentido, um ranking decrescente dos valores  utilizado para a avaliao dos riscos. Algumas interpretaes destes resultados podem ser verificadas. Por exemplo, a seo S_1 apresenta o maior valor de risco quando comparado s demais sees analisadas. As maiores perdas so esperadas para esta seo quando se fala em provveis consequências de um possível acidente. Outra informao importante que pode ser extraída da tabela graas  escala intervalar da funo utilidade  que o incremento nos valores de risco da seo S_1 para a seo S_2  quase 3 vezes maior que o incremento nos valores de risco da seo S_2 para a seo S_4 . Da mesma forma,

o incremento nos valores de risco da seção S_8 para a seção S_5 é aproximadamente 4,5 vezes maior que o incremento nos valores de risco da seção S_5 para a seção S_3 . Com base nestas informações, o decisor pode tomar as devidas medidas para o gerenciamento e mitigação dos riscos, levando em consideração as restrições financeiras existentes na organização.

Conclusões

O uso de modelos de decisão multicritério para a análise de riscos em gasodutos (através da aplicação do MAUT), adiciona aspectos importantes a este tipo de estudo como: estudo considerando 3 dimensões associadas ao risco; comportamento do decisor quanto ao risco e suas preferências; uso da escala intervalar na avaliação quantitativa dos riscos. Desta maneira aspectos como questões ambientais podem ser retratadas no modelo. A consideração de um índice de diversidade e a área de vegetação danificada pelo fogo busca contemplar aspectos vistos como muito importantes no contexto moderno, dado que a sociedade cada vez mais está atenta a acidentes significantes que impactem diretamente sobre o meio ambiente. Por fim, o modelo permite que o decisor, com base nos resultados obtidos, possa visualizar um contexto melhor definido e tomar medidas preventivas cabíveis para mitigação e gerenciamento dos riscos.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio parcial do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

Referências Bibliográficas

- Alencar, M. H., 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, 3610-3619.
- Alidoosti, A., Yazdani, M., Fouladgar, M. M., Basiri, M. H.,** (2012), Risk assessment of critical asset using fuzzy inference system, *Risk Management*, 14, 77-94.
- Almeida, A. T.,** Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério. São Paulo: Atlas, 2013.
- ANEEL.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Matriz de Energia Elétrica, 6 fev. 2013. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em 10 fev. 2013.
- Belton, V., Stewart, T. J.,** Multiple Criteria Decision Analysis, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Bertuccio, I. M., Moraleda, M. V. B.,** (2012), Risk assessment of corrosion in oil and gas, *Corrosion engineering science and technology*, 47 (5), 553-558.
- Brito, A. J., Almeida, A. T.,** (2009), Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipeline, *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 187-198.
- Brito, A. J., Almeida, A. T., 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, 812-821.
- Han, Z.Y., Weng W.G.** 2012. Comparison study on qualitative and quantitative risk assessment methods for urban natural gas pipeline network. *Journal of Hazardous Materials*, 189, 509-518.
- Haris, D.,** (2012), Modelling of linguistic variables in multicriteria energy policy support, *European Journal of Operational Research*, 227 (2), 227-238.
- Jamshidi, A., Yazdani-Chamzini, A., Yakhchali, S. H., Khaleghi, S.,** (2013), Developing a new fuzzy inference system for pipeline risk assessment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26, 197-208.

- Jo, Y. D., Crowl D. A.,** (2008), Individual risk analysis of high-pressure natural gas pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 28, 589-595.
- Jo, Y. D., Ahn, B. J.,** (2002) Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural gas pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15, 179-186.
- Jo, Y. D., Ahn, B. J.,** (2005), A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas, *Journal of Hazardous Materials*, A123, 1-12.
- Keeney, R. L., Raiffa, H.,** Decision with Multiple Objectives: Preferences and value trade-offs, John Wiley & Sons, 1976.
- Liang, W., Hu, J., Laibin, Z., Guo, Z., Lin, W.,** (2012), Assessing and classifying risk of pipeline third-party interference based on fault tree and SOM, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 594-608.
- Lins, P. H. C., Almeida, A. T.,** (2012), Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines based on multiattribute utility function, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, I3545-I3554.
- Markowski, A. S., Sam Mannan M.,** (2009) Fuzzy logic for piping risk assessment (pfLOPA), *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22 (6), 921-927.
- Marquart-Pyatt, S.T.** (2012). Contextual influences on environmental concerns cross-nationally: A multilevel investigation. *Social Science Research*, 41, 1085-1099.
- Medina, H., Arnaldos, J., Casal, J., Bonvicini, S., Cozzani, V.,** (2012), Risk-based optimization of the design of on-shore pipeline shutdown systems, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25 (3), 489-493.
- Papadakis, G. A.,** (1999), Major hazard pipelines: a comparative study of onshore transmission accidents, *Journal of loss prevention in the process industries*, 12 (1), 91-107.
- Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration, 2013.** All Reported Pipeline Incidents. Disponível em http://primis.phmsa.dot.gov/comm/reports/safety/AllPSI.html?nocache=3200#_ngtrans. Acesso em: 15 de mar 2013.
- Simonoff, J. S., Restrepo, C. E., Zimmerman, R.,** (2010), Risk management of cost consequences in natural gas transmission and distribution infrastructures, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23, 269-279.
- Sklavounos, S., Rigas, F.,** (2006), Estimation of safety distances in the vicinity of fuel gas pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 24-31.
- Woldeyohannes, A. D., Majid, M. A. M.** (2011). Simulation model for natural gas transmission pipeline network system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19, 196-212.