

APLICAÇÃO DE MODELAGEM MULTICRITÉRIO PARA ANÁLISE DE RISCOS MULTIDIMENSIONAIS EM GASODUTOS DE GÁS NATURAL

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

Este artigo tem como objetivo, a partir da aplicação de um modelo multicritério, realizar uma avaliação multidimensional dos riscos característicos envolvidos nos diversos trechos de um gasoduto de gás natural, no caso de ocorrência um acidente de vazamento de gás. Através do uso do MAUT, os julgamentos de valor e preferências do decisor são incorporados ao modelo considerado. Os resultados obtidos podem ser utilizados para um melhor direcionamento da destinação de recursos e priorização da atuação nos trechos que possuam maiores níveis de riscos característicos associados.

PALAVRAS CHAVE. MCDA, Risco, Gasodutos.

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

ABSTRACT

This paper sets out to make a multidimensional assessment of the risks involved in several sections of a natural gas pipeline, should an accident be caused by a leakage of gas. To do so, it uses a multicriteria model, MAUT, in which the decision maker's value judgments and preferences are incorporated. The results obtained can be used to improve how resources are allocated and to prioritize action in the sections which have the highest levels of risk associated with such an accident.

KEYWORDS. MCDA. Risk. Gas pipelines.

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

1. Introdução

Numa realidade de aumento populacional, na qual o homem muda gradativamente seus hábitos de consumo, adquirindo mais bens duráveis, observa-se como consequência a necessidade de progresso tecnológico para o acompanhamento dessas mudanças, provocando um grande impacto sobre os recursos presentes na Terra, principalmente nos recursos definidos como não renováveis. Adicionalmente, existe uma cobrança da sociedade sobre governos e empresários, para que os mesmos utilizem fontes de energia menos nocivas ao meio ambiente. Desta forma, o manuseio e a manutenção referente à estes recursos são pontos-chave na análise de muitos estudiosos na área da pesquisa operacional, onde recursos como o gás natural possuem grande importância devido a amplitude de sua utilização. O gás natural é o menos poluente dentre as fontes energéticas fósseis. Apresenta como grande vantagem a facilidade de distribuição a pequenas pressões bem como sua manipulação, tornando-o ideal para utilização como combustível doméstico e industrial além da produção de eletricidade.

Afgan et al. (2007) ressaltam que o gás natural é uma fonte de energia extremamente importante. Através da sua utilização crescente em substituição a outros combustíveis fósseis, verifica-se a redução da emissão de poluentes, ocasionando significantes benefícios para o meio ambiente.

Quanto aos meios de transporte do gás natural, destacam-se os gasodutos. De acordo com Chebouba et al. (2009), os gasodutos são sistemas complexos com centenas e até milhares de quilômetros, destinados ao transporte de gás natural por meio de dutos. Embora seja observado que os gasodutos são modais de transporte bastante seguros, Papadakis et al. (1999) ressaltam que apesar do baixo índice de ocorrência de acidentes em gasodutos seja observado, eles podem sim ocorrer, dando origem a resultados com consequências catastróficas.

Neste contexto, um limitador de um gerenciamento de risco eficiente está vinculado às características físicas deste sistema. Uma rede de gasodutos, na sua maioria, contempla milhares de quilômetros de extensão, o inviabilizando a análise homogênea de todos os trechos. Assim, verifica-se a necessidade da definição de prioridades com o intuito de se antever todo o processo de planejamento e estruturação de políticas de manutenção. Desta forma, a priorização de seções de gasoduto quanto ao nível de risco associado a elas se torna fundamental. Por consequência, diferentes políticas podem ser implementadas às seções dos dutos de acordo com os diferentes tipos de risco. Diante deste cenário, é de suma importância o desenvolvimento de modelos para avaliação e apoio ao gerenciamento dos riscos, para que a mitigação das consequências seja realizada de maneira mais eficiente.

Este artigo apresenta uma aplicação de um modelo de decisão multicritério para ordenamento dos riscos dos trechos do gasoduto com o objetivo de proporcionar ao gerente uma ferramenta auxiliar de gerenciamento do risco em gasodutos de gás natural.

2. Análise de riscos em gasodutos

Os cenários acidentais e suas ocorrências de caráter probabilístico bem como os diferentes tipos de consequências que resultam destes cenários caracterizam os riscos envolvidos nos gasodutos de gás natural. Estas observações ressaltam a importância de se estruturar a análise de risco deste modal de transporte, contemplando a incerteza inerente ao problema e a subjetividade na estimação e análise das diferentes dimensões de risco contempladas.

Vários estudos são observados na literatura a fim de estimar riscos em gasodutos: Jo e Ahn (2005) apresentam um método de avaliação quantitativa de riscos em gasodutos de gás natural, considerando fatalidades, que podem ser estimadas utilizando-se informações como a geometria do gasoduto e a densidade populacional da área. Dziubinski et al. (2006) utilizam uma combinação de métodos qualitativos e quantitativos para avaliação de riscos em gasodutos, considerando uma sequência de análises e cálculos para

determinação das razões básicas de falhas em gasodutos e prováveis consequências, levando em consideração o risco individual e social. Outros autores, como Sklavounos e Rigas (2006) apresentam um estudo para determinar a distância de segurança de um gasoduto, caso haja algum acidente, determinando as possíveis consequências de um evento acidental associado a liberação de gás armazenado em um sistema de transmissão pressurizado. Cagno et al. (2000) propõem um modelo de suporte para decisões envolvendo a substituição de gasodutos de baixa pressão feitos de ferro fundido, usado na distribuição de gás nas cidades. Para isso o modelo conta com a utilização do conhecimento *a priori* dos especialistas e elicitación da função de distribuição de probabilidade relacionada à falhas em gasodutos. Shahriar et al. (2012) aplicam a lógica fuzzy para estimar as probabilidades das consequências relacionadas à acidentes envolvendo gasodutos, fazendo uma relação entre a árvore de falhas, que representa as causas dos acidentes, e a árvore de eventos, que representa as consequências do acidente. Zhao et al. (2007) analisam o efeito do vazamento de gases em acidentes envolvendo gasodutos, tomando-se em consideração equações diferenciais que guiam o comportamento do gás e elementos como efeito do tamanho do buraco no gasoduto, tempo para parar o fornecimento do gás, velocidade do vento etc.

3. Modelo de decisão multicritério

Problemas de decisão são questões frequentes no dia a dia de qualquer pessoa. Especialmente em se tratando de organizações, tomadas de decisões têm influência direta na eficiência e competitividade das empresas, cabendo aos seus gerentes e executivos uma boa base no que se refere a decisões envolvendo múltiplos critérios.

Neste contexto, segundo Almeida (2011), modelos de decisão são utilizados para representar, de maneira simplificada, os elementos considerados relevantes para a situação em questão, muitas vezes utilizando um método de apoio a decisão, mais especificamente um método multicritério de apoio a decisão (MCDA). Munda (2008) afirma que a força maior dos métodos de decisão multicritério, do ponto de vista operacional, está na habilidade da análise sob os diferentes pontos de vista, muitas vezes conflitantes entre si, permitindo uma avaliação integrada do problema em questão.

O modelo a ser aplicado neste trabalho toma como base o trabalho proposto por Brito e Almeida (2009), onde o modelo desenvolvido utiliza um método multicritério de apoio a decisão (MCDA), utilizando a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), que, segundo Almeida (2011), possui uma estrutura axiomática sólida e consistente para decisão multicritério envolvendo riscos.

MAUT consiste na formulação de uma função utilidade multiatributo, que é obtida agregando-se funções utilidade de várias dimensões independentes. Cavalcante *et al.* (2008) ressaltam que MAUT expande o número de axiomas da Teoria da Utilidade a fim de tratar-se com mais de um critério. Cavalcante *et al.* (2008) lembram ainda que a idéia básica da Teoria da Utilidade é a de quantificar os desejos do decisor, relacionando os ativos para os valores que representam uma regra de escolha para o decisor. Segundo Sola e Mota (2012), a determinação das utilidades está relacionada a uma estrutura axiomática sólida com o objetivo de elicitación das preferências do decisor. O procedimento para a elicitación da função utilidade multiatributo utilizada neste trabalho é definida em Keeney e Raiffa (1976).

De forma mais específica, observa-se no trabalho de Brito e Almeida (2009) que se deve atentar para uma questão referente à maioria dos estudos verificados na literatura: um acidente em um gasoduto envolve consequências em várias dimensões, que são raramente exploradas em sua totalidade. Brito e Almeida (2009) ressaltam a importância da avaliação de riscos em gasodutos, tomando-se em consideração três dimensões: humana, ambiental e financeira.

De uma forma geral, a dimensão humana diz respeito às fatalidades ocorridas por

conta de um acidente em gasoduto, e é analisada como questão crítica no processo, recebendo assim maior importância na literatura, como relatam Erkut e Verter (1998). Faber e Stewart (2003) explicam que essa relevância da dimensão humana vem do fato de que para estimar esses danos advindos de mortes ou injúrias humanas, é necessário mais do que uma tentativa de medir estas perdas em termos monetários, necessitando discussões éticas a respeito. No modelo adotado neste trabalho, na dimensão humana, as consequências são mensuradas através de uma estimativa de pessoas em exposição a um nível mínimo de radiação que possa gerar tipos de queimaduras de primeiro e segundo grau, bem como ferimentos.

A dimensão ambiental envolve os danos provocados ao meio ambiente decorrente dos possíveis cenários acidentais em uma situação de vazamento em gasodutos, normalmente limitada aos incêndios e queimadas em áreas de vegetação. Semelhante a dimensão humana, a ambiental, também não pode ser valorada em meio apenas a termos monetários, pois há questões envolvidas como vegetação queimada, integridade de animais, desequilíbrio da biodiversidade etc. No modelo presente é considerado como medida para as consequências relacionadas ao meio ambiente, a área de vegetação exposta dentro da zona de perigo.

Por fim, despesas monetárias decorrentes dos prejuízos de um acidente no gasoduto (perdas diretas, perdas de terceiros e indenizações) são consideradas na dimensão financeira.

Além disto, os autores destacam também que problemas que consideram apenas a dimensão humana, ou tão somente a financeira, tornam-se incompletos e inadequados, devido à complexidade das questões envolvidas. Outro ponto levado também em consideração é a presença de um decisor, que fará julgamentos de valor e terá suas preferências incorporadas ao problema. Devido à existência de um decisor, há a necessidade de incorporar ao modelo as preferências do mesmo, e seu comportamento quanto a incertezas. As discussões quanto ao modelo será retomada na aplicação numérica.

4. Cenários de perigo

Mesmo com o avanço tecnológico e evolução das medidas de segurança tomadas para prevenção de acidentes em gasodutos, os mesmos encontram-se sujeitos à falhas. Alguns trabalhos como o de Sklavounos e Rigas (2006) e Brito e Almeida (2009) utilizam uma técnica formal para a avaliação de riscos em gasodutos: a Análise da Árvore de Eventos (*Event Tree Analysis*) (ETA). Os cenários acidentais adotados nesta aplicação podem ser observados na Figura 1.

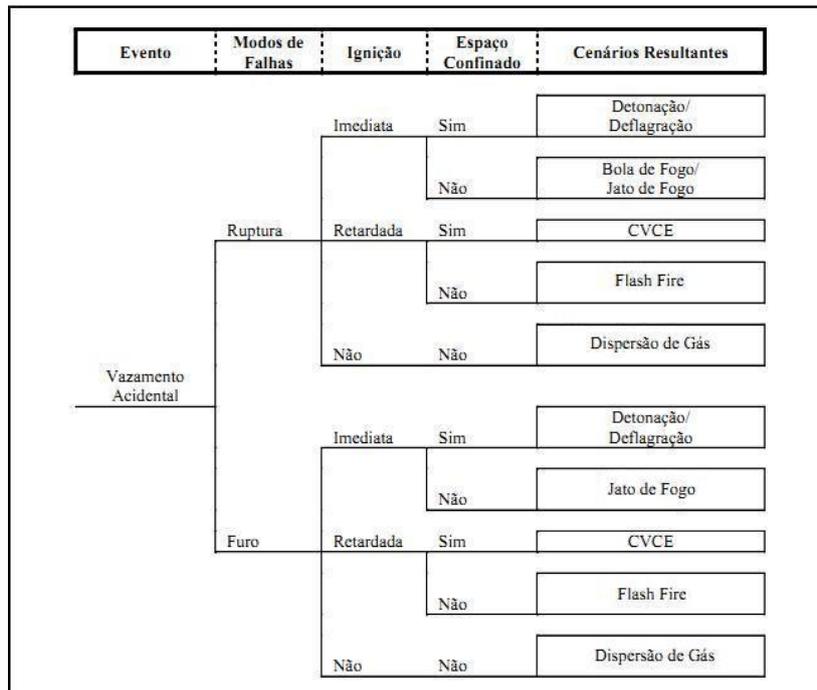


Figura 1 – Árvore de eventos para vazamento de gás natural em gasodutos (Brito e Almeida,2009)

5. Aplicação Numérica

Como já mencionado, o modelo abordado neste artigo conta com a presença de um decisor, que por apresentar papel fundamental no processo decisório de avaliação dos riscos nos trechos dos gasodutos, deve ser uma pessoa que tenha visão ampla da organização a qual pertence e que tenha em mente os objetivos aos quais pretende atingir.

A etapa inicial do modelo compreende a divisão do gasoduto em seções ou trechos. Isto deve ser feito com base na uniformidade de características como, por exemplo, aspectos técnicos, econômicos e ambientais de cada trecho, resultando em um conjunto discreto de elementos $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ referente às diversas seções. A Tabela 1 ilustra a divisão:

Tabela 1 – Divisão do Gasoduto em seções

Seções (X)	Descrição da Seção	Comprimento (m)
x_1	Área Comercial	2900
x_2	Área Residencial	3500
x_3	Distrito Industrial	4000
x_4	Distrito Industrial/Comercial	3300
x_5	Área Residencial/Comercial	2900
x_6	Área de Vegetação Branda	3000
x_7	Área Residencial/Ambiental	1900
x_8	Área Residencial	4680

Logo após a divisão do gasoduto, é necessária a identificação dos cenários de perigo, que é o conjunto formado pelos possíveis cenários resultantes de um vazamento acidental de gás no gasoduto, obtendo assim uma série de estados da natureza “ θ ”.

A definição da probabilidade a priori, $\pi(\theta)$, leva em conta a experiência de um especialista. A próxima etapa refere-se à determinação da probabilidade das consequências

de cada par cenário e trecho do gasoduto, de acordo com o trabalho de Brito e Almeida (2009), sendo as probabilidades estimadas por $f(h|\theta, x_i)$, $f(m|\theta, x_i)$ e $f(n|\theta, x_i)$. No modelo, essas probabilidades são representadas pelas respectivas funções de densidade de probabilidade: $g(h|\theta, x_i)$, $g(m|\theta, x_i)$ e $g(n|\theta, x_i)$. Finalmente, para estimar-se o risco envolvido em cada trecho do gasoduto, é necessário a elicitación da função utilidade multiatributo, $U(h, m, n)$, junto ao decisor, agregando suas preferências ao problema. Como explanado, esse procedimento segue um método estruturado definido por Keeney e Raiffa (1976). Ao executar este método no modelo, a função utilidade multiatributo é assumida como aditiva, que implica na independência de preferência do decisor em relação as dimensões assumidas: humana, ambiental e financeira. Assim, ao final do processo, teremos uma função de acordo com a equação (1):

$$U(h, m, n) = K_h U(h) + K_m U(m) + K_n U(n) \quad (1)$$

Onde K_h, K_m e K_n são as constantes de escala referentes respectivamente às dimensões: humana, ambiental e financeira, onde $K_h + K_m + K_n = 1$.

Nesta aplicação o decisor apresentou um comportamento avesso ao risco quando se trata de perdas envolvendo vidas humanas, um comportamento avesso com relação a dimensão ambiental e um comportamento propenso ao risco com relação a dimensão financeira.

Em posse das distribuições de probabilidades de cada dimensão, que são representadas pelas respectivas funções densidades de probabilidade $g(h|\theta, x_i)$, $g(m|\theta, x_i)$ e $g(n|\theta, x_i)$ e da função utilidade multiatributo elicitada $U(h, m, n)$, é possível entrar na fase final do modelo com o cálculo dos riscos associados a cada trecho, podendo assim, ordená-los.

A função perda $P(\theta|x_i)$ para cada par cenário de perigo e trecho do gasoduto, é obtida combinando-se as funções citadas anteriormente, como mostra a equação (2):

$$P(\theta|x_i) = - \int_h \int_m \int_n g(h, m, n|\theta, x_i) U(h, m, n) dn dm dh \quad (2)$$

Por fim, o risco total, envolvendo as três dimensões em todos os cenários acidentais, referentes a cada trecho do gasoduto, pode ser calculado pela equação (3):

$$r(x_i) = -\pi_i(\theta) \int_h \int_m \int_n g(h, m, n|\theta, x_i) U(h, m, n) dn dm dh + (-1)\pi_i(\theta_N) \quad (3)$$

Onde $\pi_i(\theta_N)$ representa a probabilidade de ocorrência do cenário de normalidade nas operações do gasoduto.

Com os valores obtidos, uma ordenação decrescente é realizada com relação aos riscos associados às seções do gasoduto, como mostra a tabela 2:

Tabela 2 – Ordenação dos trechos do gasoduto em função dos riscos associados

Posição	Seção	$r(x_i)$
1	Seção 7	-0,9991118
2	Seção 4	-0,9991183
3	Seção 6	-0,9991327
4	Seção 8	-0,9991400
5	Seção 1	-0,9991686
6	Seção 3	-0,9992099
7	Seção 2	-0,9992836
8	Seção 5	-0,9992865

De acordo com o resultado exposto pela Tabela 2, é evidente que a seção x_7 , Área Residencial/Ambiental, deve ser priorizada no que se diz respeito à quantidade de recursos

disponibilizados, além de priorização de ações com o objetivo de reduzir o risco relativo a acidentes neste trecho do gasoduto. Observa-se nesta seção uma densidade populacional considerável, com fluxo de pessoas e deslocamento de veículos. Além disso a presença de instalações subterrâneas como telefonia, TV a cabo, água e esgoto expõem o gasoduto a interferência de terceiros.

A tabela 3 apresenta os valores de incremento dos riscos multidimensionais e a razão de incremento das diferenças.

Tabela 3 – Comparação dos valores dos riscos e razões de incremento de riscos entre seções priorizadas dos dutos.

Posição	Seção	$r(x_i) - r(x_{i+1})$	Razão
1	Seção 7	0,048 E-05	0,033
2	Seção 4	1,445 E-05	1,989
3	Seção 6	0,726 E-05	0,253
4	Seção 8	2,865 E-05	0,693
5	Seção 1	4,132 E-05	0,56
6	Seção 3	7,366 E-05	25,865
7	Seção 2	0,284 E-05	-
8	Seção 5	-	-

O intervalo de escalas da função utilidade permite uma análise mais completa das seções consideradas no estudo. Desta forma, o modelo possibilita ao decisor a comparação de incrementos de risco entre as seções dos dutos. Desta forma, o decisor pode observar de uma melhor forma a situação quanto ao risco, permitindo um melhor planejamento de ações e alocação de recursos.

De forma mais específica, dentre os resultados apresentados na Tabela 3, observa-se por exemplo um incremento no risco da seção x_3 para a seção x_2 que é aproximadamente 26 vezes maior que o incremento no risco da seção x_2 para a x_5 , deixando evidente a existência de um gap maior entre as seções x_3 e x_2 .

6. Conclusões

O modelo abordado neste artigo, utilizou a base conceitual de decisão multicritério, mais especificamente da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), para análise de um problema típico enfrentado por empresas de gás natural que utilizam os gasodutos como meio principal de transporte de seus recursos. A fim de apoiar essas organizações em suas decisões, o modelo tem como resultado final um ordenamento dos diversos trechos do gasoduto de acordo com os riscos envolvidos, favorecendo assim medidas mitigadoras de risco específicas para cada seção, tomando-se em consideração a posição deste trecho na ordenação resultante do modelo. Outro ponto importante é a presença de um decisor, o qual teve suas preferências e comportamento incorporados ao modelo e de um especialista que usou sua experiência de situações passadas para estimação das probabilidades *a priori* da ocorrência dos cenários acidentais.

7. Referências

- Afgan, N. H., Pilavachi, P. T. e Carvalho, M. G.** (2007), Multi-criteria evaluation of natural gas resources, *Energy Policy*, 35,704–713.
- Almeida, A. T. de.,** *O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio a Decisão*, Editora Universitária, Recife, 2011.
- Brito, A. J. e Almeida, A. T. de.** (2009), Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 187 – 198.
- Cagno, E., Caron, F. e Ruggeri, F.** (2000), Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian approach, *Reliability Engineering and System Safety*, 67, 275-284.

- Chebouba, A., Yalaoui, F., Smati, A., Amodeo L., Younsi, K. e Tairi A.** (2009), Optimization of natural gas pipeline transportation using ant colony optimization, *Computers & Operations Research*, 36, 1916-1923.
- Dziubinski, M., Fraczak, M. e Markowski, A.S.** (2006), Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19, 399-408.
- Erkut, E. e Verter, V.** (1998), Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials, *Operations Research*, 46, 625-642.
- Faber, M. H. e Stewart, M.G.** (2003), Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion. *Reliability Engineering and System Safety*, 80, 173-184.
- Ferreira, R. J. P., Almeida, A. T. de. e Cavalcante, C. A. V.** (2009), A Multi-Criteria Decision Model to Determine Inspection Intervals of Conditions Monitoring Based on Delay Time Analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 905 -912.
- Jo-Y, D. e 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 e Raiffa, H.**, *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*, Wiley, New York, 1976.
- Munda G.** *Social Multi-criteria evaluation for a sustainable economy*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- Papadakis, G.A., Porter, S. e Wettig, J.** (1999), EU initiative on the control of major accident hazards arising from pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 12, 85-90.
- Shahriar, A., Sadiq, R. e Tesfamariam, S.** (2012), Risk Analysis for Oil & Gas Pipelines: A Sustainability Assessment Approach Using Fuzzy Based Bow-Tie Analysis, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 25, 505-523.
- Sklavounos, S. e 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.
- Sola, A. V. H. e Mota, C. M. de. M.** (2012), A Multi-Attribute Decision Model for Portfolio Selection Aiming to Replace Technologies in Industrial Motor Systems, *Energy Conversion and Management*, 57, 97-106.
- Zhao, Y., Xihong, L. e Jianbo, L.** (2007), Analysis on the diffusion hazards of dynamic leakage of gas pipeline, *Reliability Engineering and System Safety*, 92, 47-53.