



IBP1080_06 APOIO MULTICRITÉRIO A DECISÃO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RISCOS DE TRECHOS DE GASODUTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS NATURAL

Anderson J. Brito¹, Cristiano V. Cavalcante², Adiel T. de Almeida³

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Embora gasodutos sejam considerados um dos mais seguros meios de transporte de substância perigosas, acidentes com estas estruturas podem apresentar severas consequências de dimensões econômicas, ambientais e sobretudo, humanas, de forma que a avaliação de riscos considerando apenas probabilidades ou apenas aspectos monetários pode fornecer uma visão incompleta ou distorcida desta realidade. Ao mesmo tempo, a expansão das malhas dos gasodutos de distribuição de gás natural no Brasil têm tornado cada vez mais relevante o gerenciamento dos riscos de acidentes associados a essas redes. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo multicritério de apoio a decisão para classificação de trechos de gasodutos de distribuição segundo níveis hierárquicos de risco, ajustando-se à existência de múltiplas dimensões ou critérios nos quais riscos devem ser avaliados. Para isso, foi utilizada uma adaptação do método PROMETHEE II para problemas de classificação, através do qual se pode realizar designação de trechos de gasodutos a classes pré-estabelecidas, colaborando com que medidas e ações específicas sejam direcionadas a estas categorias a fim de reduzir ao máximo possível os riscos inerentes aos gasodutos.

Abstract

Although pipelines are taken as one of the safest transportation means of dangerous substances, pipeline accidents may present severe economic, environmental and above all, human consequences, so that risk assessment taking into account only probabilities or monetary aspects may yield an incomplete or misshaped view of that reality. At the same time, the expansion of natural gas distribution pipeline network in Brazil is making increasingly relevant the accident risks management related to those networks. In this context, this paper aims to present a Multicriteria Decision Aid model for classification of distribution pipeline sections according to hierarchical levels of risk, taking into consideration the existence of multiple dimensions or criteria by which risks must be assessed. A PROMETHEE II method adaptation to sorting problems has been used, through which it has been performed an allocation of pipeline sections to pre-defined categories, helping specific measures and actions to be directed to those categories in order to reduce, as far as possible, pipeline inherent risks.

1. Introdução

Embora reconhecidos como um dos mais seguros e econômicos meios de transporte de substâncias perigosas, gasodutos trazem consigo, mesmo sob baixa probabilidade, riscos de acidentes que não podem ser negligenciados (Papadakis, 2000). Vazamentos de gás natural podem provocar, mesmo sob incerteza, severas consequências ao meio ambiente, à população atingida e ao desempenho financeiro das companhias responsáveis pela operação desses dutos, o que pode ser exemplificado por ocorrências históricas, mais comuns em países onde as redes de gasodutos são mais extensas e onde o tempo de operação dessas estruturas não é recente (Bartenev et al., 1996).

Não obstante essa realidade, muitas empresas fazem uso de abordagens determinísticas para garantir a segurança da operação dessas estruturas (Papadakis, 2000), sem lançar mão de avaliações de risco que considerem as

¹ Mestrando, Engenheiro de Produção – UFPE

² Doutor, Engenheiro Mecânico – UFPE

³ PhD, Engenheiro Eletrônico – UFPE

incertezas e as múltiplas dimensões dos impactos de possíveis acidentes. Por sua vez, há na literatura abordagens que consideram apenas probabilidades relacionadas aos eventos que desencadeiam um vazamento de gás (Cagno et al., 2000), sem levar em conta, porém, as consequências associadas, um componente fundamental do risco no que concerne à sua definição clássica proveniente da Teoria da Decisão (Souza, 2002). Há também trabalhos como Jo & Ahn (2005) que abordam a avaliação de riscos enfocando fatalidades humanas, sem considerar outras possíveis naturezas de consequências, como impactos ambientais decorrentes de queimadas, e impactos financeiros decorrentes de multas, indenizações e faturamento cessante.

Nesse contexto, decisões envolvendo riscos em gasodutos são complexas, apresentam resultados de longo prazo, envolvem distintos aspectos e não raramente são tomadas diante de informações ausentes. Com o objetivo de colaborar com a elaboração de ações que visem a uma redução dos efeitos de potenciais acidentes em pessoas, propriedades e no meio ambiente, este artigo propõe um modelo multicritério de apoio a decisão que se ajuste à existência de múltiplas dimensões nas quais os riscos de vazamentos de gás natural em redes de distribuição podem ser avaliados. Fazendo uso de uma adaptação do método PROMETHEE II (Brans & Mareschal, 2002) para problemáticas de classificação proposta por Cavalcante (2005), o modelo realiza a alocação de trechos de gasodutos a classes pré-estabelecidas que correspondam a categorias hierárquicas de riscos, favorecendo a tomada de ações e medidas específicas direcionadas a estas categorias a fim de mitigar os riscos associados aos gasodutos de distribuição de gás natural. Para ilustrar o modelo proposto, será apresentada uma aplicação numérica que se propõe a ilustrar a aplicação do modelo em casos reais.

2. Riscos em Gasodutos

Segundo Yuhua & Datao (2005), embora a maioria dos gasodutos esteja enterrada abaixo do solo e supostamente livre da ação de fatores externos atuantes na superfície, os mesmos estão sujeitos a vários fatores deteriorantes, tais como interferência de terceiras partes, corrosão, defeitos mecânicos e de construção, mal-funcionamento de equipamentos associados, erros humanos e desastres naturais. Dentre estes, destacam-se a interferência externa, que se apresenta como mecanismo dominante na geração de falhas tanto em gasodutos como em oleodutos, e a corrosão, principal causa de danos em gasodutos de ferro à medida que estes envelhecem (Papadakis, 2000).

Mesmo sob baixa probabilidade, a ação de tais fatores em dutos de gás natural pode resultar, de forma imediata ou não, em falhas. Falhas em gasodutos que ocasionem vazamentos e liberação de gás natural podem causar expressivas perdas econômicas, danos ecológicos (Zúñiga-Gutiérrez et al., 2002) decorrentes de queimadas e, sobretudo, ferimentos a seres humanos nas proximidades do local da falha, podendo provocar, não raramente, fatalidades (Jo & Ahn, 2005). Nesse sentido, Bartenev et al. (1996) salientam que à medida que o tempo de operação aumenta e a área ao redor dos gasodutos fica mais densamente povoada, mais necessário se faz o desenvolvimento de métodos para avaliação das probabilidades e das consequências de acidentes relativos à ruptura de dutos que transportam gás natural.

Além disso, uma importante consideração quanto à realidade das falhas em gasodutos é feita por Jo & Ahn (2005). Segundo estes autores, as probabilidades de falha em gasodutos, e conseqüentemente o risco de acidentes, variam em função de diferentes fatores ao longo da rota das tubulações, tais como as características do solo, do revestimento polimérico dos dutos, diâmetro, pressão, extensão, a presença e qualidade da proteção catódica, a idade do gasoduto etc. Adiciona-se a isso a heterogeneidade das condições de seu entorno (dinâmica populacional, edificações, vegetação, relevo etc.) ao longo das diversas localidades pelas quais um gasoduto passa. Diante disso, medidas uniformes para mitigação de riscos tomadas ao longo de todo o trajeto de um gasoduto podem se apresentar ineficientes e ineficazes, o que implicaria, com grande probabilidade, em um emprego de recursos também ineficiente. Além disso, adicionam-se a isso restrições de orçamento, tempo e mão-de-obra por parte de companhias distribuidoras de gás natural, em menor ou maior intensidade.

Dessa forma, Jo & Ahn (2005) afirmam que, para avaliação de risco em gasodutos, é útil que estes últimos sejam divididos em seções à medida que variem as condições ao longo do seu trajeto. A designação ou alocação de cada trecho a uma categoria ou classe, tomando como referência os riscos de acidentes com vazamento de gás, favorecem com que conjuntos categorizados de ações sejam tomados por empresas de transporte e de distribuição de gás a fim de que esses riscos sejam minimizados, como por exemplo, políticas orientadas de prevenção, supervisão e manutenção.

Nesse sentido, um ponto importante a ser observado por essas empresas é a abordagem destes riscos considerando as dimensões humana, ambiental e financeira dos seus impactos. Em um contexto marcado pela competição, pelo aumento da rigidez da legislação ambiental, e pela crescente conscientização da população quanto às questões de segurança relacionadas a este tipo de acidentes, as empresas não podem mais conceber o risco apenas sob o

aspecto unidimensional de gastos financeiros ou fatalidades humanas. Precisam atender, concomitantemente aos seus objetivos, os interesses de segurança humana e preservação ambiental tanto da sociedade como do Estado.

Uma aparente dificuldade diante deste problema, por parte destas organizações, seria classificar trechos de gasodutos agregando simultaneamente riscos sobre seres humanos, riscos ambientais e riscos financeiros. Por outro lado, nem sempre haverá trechos de gasodutos que apresentem simultaneamente elevados níveis de riscos em todas estas dimensões, de forma que comparar-se-ão trechos com riscos mais elevados em uma dimensão, e menores nas outras, fazendo com que o processo de classificação torne-se ainda mais complexo.

3. O Apoio Multicritério a Decisão

O Apoio Multicritério à Decisão (AMD), também denominado internacionalmente por *MultiCriteria Decision Aid* (MCDA), consiste em um conjunto de métodos e técnicas para auxiliar pessoas ou organizações a tomarem decisões sob influência de uma multiplicidade de critérios ou objetivos, buscando o estabelecimento de uma relação subjetiva de preferências entre as alternativas que estão sendo avaliadas (Almeida & Costa, 2003).

3.1. O Método PROMETHEE II

Dentre os diversos métodos do AMD, o PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) faz parte de um conjunto de metodologias propostas pela primeira vez em 1982 (Brans & Mareschal, 2002). Este método tem se mostrado adequado à consideração simultânea de critérios de natureza social, econômica e ambiental em processos decisórios, e tem se destacado dos demais por envolver conceitos e parâmetros com alguma interpretação física ou econômica, de fácil compreensão por um decisor (Almeida & Costa, 2003).

O PROMETHEE II pode ser caracterizado basicamente por duas etapas: na primeira, realiza-se a construção de relações de *sobreclassificação* ou prevalência, agregando-se informações entre as alternativas e os critérios de um problema; na segunda, procede-se a uma exploração destas relações para apoio à decisão (Almeida & Costa, 2003).

Neste método, o decisor deve estabelecer para cada critério um peso w_j , que aumenta com a importância do critério. É introduzida também uma função de preferência, aqui representada por $P_j(a,b)$, que fornece o grau de preferência de a sobre b em função de $g_j(a)-g_j(b)$. Assumindo valores entre 0 e 1, a função de preferência $P_j(a,b)$ representa o comportamento ou atitude do decisor frente às diferenças $g_j(a)-g_j(b)$ provenientes da comparação par-a-par entre alternativas em cada critério, permitindo também a eliminação dos efeitos de escala das unidades em que os critérios são expressos (Almeida & Costa, 2003). O PROMETHEE apresenta seis formas clássicas para o decisor representar esse comportamento (Brans & Mareschal, 2002), não necessariamente utilizando a mesma forma para todos os critérios. Para algumas destas formas, o mesmo deve informar parâmetros como:

- q_j : denominado de limiar de indiferença, expressa o maior valor para $g_j(a)-g_j(b)$ abaixo do qual o decisor é indiferente entre os desempenhos de a e b .
- p_j : denominado de limiar de preferência, expressa o menor valor para $g_j(a)-g_j(b)$ acima do qual o decisor apresenta uma preferência estrita pelo desempenho de a em relação ao de b .

Estabelecida a intensidade das preferências entre os pares de alternativas em cada critério, a fim de que se obtenha uma relação de sobreclassificação geral entre duas alternativas a e b levando-se em conta todo o conjunto de critérios, define-se o grau de preferência global $\pi(a,b)$ de uma alternativa sobre outra, conforme a expressão (1):

$$\pi(a,b) = \frac{1}{W} \cdot \sum_{j=1}^k w_j P_j(a,b) \quad \text{onde } W = \sum_{j=1}^k w_j \text{ e } w_j \geq 0 \quad (1)$$

Em seguida, as alternativas são ordenadas pela ordem decrescente de seus *fluxos líquidos de sobreclassificação* $\Phi(a)$, cujo cálculo é realizado conforme a expressão (2):

$$\Phi(a) = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \pi(a,b) - \sum_{\substack{b=1 \\ b \neq a}}^n \pi(b,a) \right] \quad (2)$$

Se for positivo, o fluxo líquido indica que a alternativa a prevalece ou sobreclassifica mais as demais alternativas do que é sobreclassificada por elas; se for negativo, o raciocínio é análogo: a é mais sobreclassificada do que “sobreclassificadora”. Dessa forma, quanto maior o valor de $\Phi(a)$, melhor é a alternativa. Através desse processo, o PROMETHEE II permite uma ordenação das alternativas, da mais preferida para a menos preferida, seguindo a ordem decrescente dos fluxos líquidos associados às mesmas (Brans & Mareschal, 2002).

Embora esta metodologia de apoio a decisão tenha um uso mais conhecido pelas inúmeras aplicações que consistem no estabelecimento de uma ordem, existem outros problemas em que alternativas ou ações (candidatos, projetos, rotas, etc., a depender do contexto), descritas pelo seu desempenho em diversos critérios de avaliação, devem

ser designadas a um conjunto de classes ou categorias pré-definidas (Zopounidis & Doumpos, 2002). Tais problemas, comuns em diversas áreas do conhecimento, estão inseridos no contexto de uma problemática de classificação.

3.2. A problemática de Classificação

Formalmente, a problemática de classificação refere-se à designação de um conjunto finito $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ de n alternativas a q diferentes classes pré-definidas ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_q$), a partir da descrição e caracterização dessas alternativas por um conjunto $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_m\}$ de m diferentes critérios. Para efeitos de nomenclatura, a performance ou desempenho da alternativa a_i no critério g_j pode ser denotada por g_{ji} , o que conseqüentemente permite considerar cada alternativa como um vetor $a_i = (g_{1i}, g_{2i}, g_{3i}, \dots, g_{mi})$. Cada categoria ou classe C_k ($k = 1, 2, 3, \dots, q$) é definida através de dois perfis de referência: r_k , que delimita a categoria superiormente; e r_{k-1} , que delimita a categoria inferiormente. Esses perfis de classe correspondem a ações (no caso do problema em questão, trechos de gasodutos) virtuais ou hipotéticas que representam um padrão de entrada em uma determinada classe. Assim, é necessário que o decisor estabeleça os perfis de referência $r_0, r_1, r_2, \dots, r_q$, tais que, com exceção do primeiro e do último, cada um constitua o limite superior de uma categoria e o limite inferior da categoria subsequente (Zopounidis & Doumpos, 2002). Com isso, para o contexto onde as preferências crescem com o aumento da ordem das classes, r_0 deve ser em todos os critérios pior do que qualquer alternativa a classificar, r_q deve ser melhor do que qualquer alternativa, e cada referência r_k deve ser melhor do que a referência r_{k-1} anterior.

3.3. Um Procedimento de Classificação com PROMETHEE II

Para alocação de alternativas a categorias ou classes pré-definidas, com uso do PROMETHEE II, faz-se, segundo Cavalcante (2005), a comparação de cada alternativa separadamente com os perfis-padrão ou perfis de referência. Os perfis-padrão a serem considerados, diz ele, são alternativas reais ou fictícias que representem bem os limites de uma determinada classe através de seus desempenhos em relação aos critérios de avaliação. Comparam-se estes perfis às alternativas, uma a uma, através dos seus fluxos líquidos [expressão (1)], a fim de se realizar a alocação de cada alternativa a uma categoria, determinando-se a sua classe. Dessa forma, para o exemplo da Figura 1 tem-se:

Se $\Phi(r_{q-1}) \leq \Phi(a_i) < \Phi(r_q) \Rightarrow$ A alternativa a_i faz parte da classe C_q ;

Se $\Phi(r_2) \leq \Phi(a_i) < \Phi(r_3) \Rightarrow$ A alternativa a_i faz parte da classe C_3 ;

Se $\Phi(r_1) \leq \Phi(a_i) < \Phi(r_2) \Rightarrow$ A alternativo a_i faz parte da classe C_2 etc.

Pode-se perceber que esse procedimento é consistente no atendimento à problemática de classificação, visto que nenhuma alternativa, no contexto do problema, nenhum trecho de gasoduto, deixará de ser designada a uma classe de risco, e cada alternativa pertencerá, no máximo, a uma categoria.

4. O Modelo de Decisão

O modelo de decisão em questão é proposto para apoiar um decisor ou um grupo de decisores de uma companhia de distribuição de gás natural na designação de trechos de gasodutos a categorias hierárquicas de riscos. Neste problema, conforme sugerem Jo & Ahn (2005), o conjunto discreto de alternativas $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$ é formado por todos os trechos ou segmentos em que um gasoduto possa ser dividido, ou em que uma rede de gasodutos possa ser teoricamente seccionada. Estes segmentos devem apresentar características uniformes no que tange a aspectos como, diâmetro, pressão, área de localização e outros aspectos que sejam considerados relevantes pela companhia de gás. A cada mudança em qualquer um destes fatores, de maneira que se configurem novas circunstâncias operacionais, estruturais ou ambientais (o que traria como conseqüência diferentes riscos de impacto em relação aos demais trechos da tubulação), um novo trecho de gasoduto deve ser individualizado.

Uma análise ampla do problema em questão, auxiliada por um conjunto de publicações abordando riscos em gasodutos de transporte e distribuição de gás natural, corrobora a existência de diversas dimensões nas quais riscos de acidentes com vazamento de gás podem ser avaliados. Estas avaliações podem ser agrupadas em três principais dimensões ou critérios de riscos delineados na literatura (Yuhua & Datao, 2005), a saber:

- Riscos sobre Seres Humanos;
- Riscos Ambientais e
- Riscos Financeiros.

Estas dimensões distintas de risco correspondem aos critérios à luz dos quais os trechos de uma rede de gasodutos em estudo serão avaliados e designados a categorias. O primeiro critério corresponde a riscos de ferimentos ou fatalidades que podem ocorrer, em maior ou menor grau, à população residente, transeunte, aos trabalhadores que realizam a operação ou manutenção do gasoduto, e às demais pessoas que estejam na área circunvizinha ao ponto de

ruptura ou de furo do trecho em que ocorra um vazamento de gás natural (Jo & Ahn, 2005). Visto que deve ser evitado qualquer tipo de dano físico à população, as consequências associadas a cada trecho nesta categoria podem ser estimadas pelo número de pessoas atingidas fisicamente, seja resultando em morte ou mesmo ferimentos, uma estimativa conservadora que é satisfatória quando os objetos de impacto são seres humanos.

Os riscos ambientais estão associados aos danos ao meio ambiente provocados por todos os possíveis cenários de acidentes decorrentes de um vazamento de gás natural (Zúñiga-Gutiérrez et al., 2002). Assim como os riscos humanos, os efeitos de possíveis queimadas sobre a vegetação, sobre a integridade de espécies animais e sobre o equilíbrio da biodiversidade de uma região são praticamente inexprimíveis por cifras monetárias. Uma medida para a avaliação do desempenho de cada alternativa (trecho) neste critério é a extensão em hectares de vegetação destruída, que está relacionada à profundidade dos impactos ambientais provocados por esse tipo de acidente (Zúñiga-Gutiérrez et al., 2002). Deve-se observar que a fiscalização com respeito aos aspectos ambientais está cada vez mais rigorosa, e nesse sentido, acidentes de grandes proporções podem impossibilitar a instalação de novos trechos, o que é extremamente negativo especialmente no contexto brasileiro, onde a expansão da rede de gasodutos faz-se necessária para atender a uma demanda energética crescente.

O terceiro e último critério do modelo proposto corresponde aos riscos financeiros (Yuhua & Datao, 2005), que podem sofrer estimativa monetária direta. Estes estão associados a perdas esperadas de receita por interrupção do fornecimento, gastos esperados com a substituição e com a instalação de novas tubulações, prejuízos associados com a recuperação de edificações, indenizações, multas por danos ambientais etc.

Embora a probabilidade de falha em cada trecho de um gasoduto seja função de um conjunto de fatores tais como, diâmetro, pressão operacional, profundidade e grau de corrosão (Jo & Ahn 2005), conforme esclarecem Merad et al. (2004), riscos apenas surgem quando e onde pessoas e ativos estão sujeitos a perigos. Definindo-se risco como a “perda potencial esperada devido a um particular perigo em uma dada área e em um específico período de tempo” (UN, 1992 apud Merad et al., 2004), definição que está mais próxima dos conceitos fundamentados na Teoria da Decisão (Souza, 2002), o uso de apenas probabilidades pode levar a uma compreensão distorcida da verdadeira natureza destes riscos.

Diante desses aspectos, o cálculo dos riscos associados a cada trecho de gasoduto, em cada critério, pode ser realizado como se segue: Assumindo que uma companhia de gás esteja interessada em avaliar estes riscos em uma situação presente, para a qual podem ser razoavelmente desconsideradas mudanças nas taxas de falha das tubulações em função do tempo, e que valores específicos de consequências, por simplificação, estão associados a um conjunto finito de cenários de acidentes cogitados por uma companhia de distribuição, o risco em cada critério e para cada trecho poderá ser estimado por (4):

$$R_{ng} = \sum_{i=1}^s p(S_{ni}) \times C_{ngi} \quad (4)$$

Onde:

- $p(S_{ni})$ corresponde à probabilidade de ocorrência do cenário de acidente S_i no trecho n ;
- C_{ngi} às consequências humanas, ambientais ou financeiras decorrentes da ocorrência do cenário S_i no trecho n do gasoduto;
- s corresponde ao número de cenários considerados pelo decisor;
- e R_{gn} ao risco humano, ambiental ou financeiro devido a um vazamento de gás no trecho n .

No contexto do modelo ora proposto, a determinação de categorias ou classes de risco ($C_1, C_2, C_3, \dots, C_q$), para a classificação de trechos de gasodutos deve depender fundamentalmente da percepção que o decisor ou que os decisores possuem dos diferentes níveis de risco associados aos seus gasodutos, da disponibilidade de recursos, bem como do número de diferentes estratégias, políticas e medidas que a companhia possui para designar entre as categorias. Dessa forma, trechos de gasodutos podem ser divididos em classes de risco como “risco crítico, alto risco, médio risco, e baixo risco”, ou outras variantes de classes hierárquicas, conforme as necessidades e o contexto de cada companhia e de cada rede de gasodutos.

Após a definição das classes, tomar-se-ão perfis r_k como vetores cujas coordenadas correspondem ao desempenho do perfil em cada um dos três critérios seguintes: riscos sobre seres humanos (R_h), riscos ambientais (R_a) e riscos financeiros (R_f). Tem-se, portanto, $r_k = (r_{kh}, r_{ka}, r_{kf})$, onde r_k é o limite superior da categoria C_k e o inferior da categoria C_{k+1} . Nesse sentido, os perfis r_0 e r_q correspondem à alternativa ideal e anti-ideal, respectivamente.

No tocante à determinação dos perfis, deve-se salientar que esta não deve ser realizada de maneira automática, mas deve ser feita com bastante cuidado pelo decisor visto que os procedimentos de classificação dependem grandemente destes padrões. Para o modelo proposto, os perfis de referência corresponderão a alternativas fictícias que caracterizem bem as fronteiras que dividem as categorias hierárquicas de risco. Estes perfis podem corresponder a trechos de outros gasodutos, da mesma companhia ou de outra empresa, cujos desempenhos nos três critérios são tomados como referência para a categoria.

Considerando-se o conjunto de critérios do modelo, pode-se afirmar que a preferência decresce com o aumento de valor em cada critério, conforme ilustrado na Figura 1 abaixo:

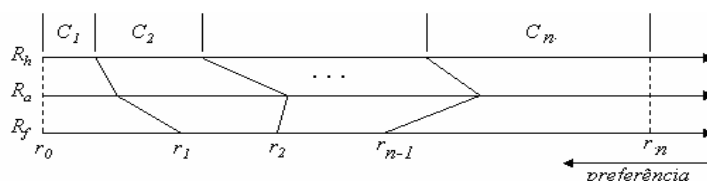


Figura 1. Esquema dos perfis e das categorias para os três critérios de avaliação (Rh, Ra, Rf) do modelo
Fonte: Adaptado de Dias & Mousseau (2002)

No que diz respeito à agregação dos desempenhos (riscos) de cada trecho nos três critérios acima, a soma ponderada dos riscos em cada critério apresenta, dentre outras desvantagens, a restrição de não se adequar a grandezas que, como consequências esperadas, apresentam unidades de medida diferentes. Além disso, esse mecanismo de agregação aditiva admitiria compensação de desempenhos extremos, podendo camuflar alternativas pouco balanceadas. Dessa forma, o uso de uma metodologia multicritério de sobreclassificação se torna útil para avaliar cada alternativa à luz dos critérios acima apresentados. Nesse sentido, a adaptação do PROMETHEE II proposta por Cavalcante (2005) e citada neste trabalho, apresenta-se como um procedimento particularmente aplicável, visto que o mesmo é apropriado para a construção e a exploração de relações não compensatórias de sobreclassificação, fornecendo, conforme apresentado na Seção 3, a designação de cada trecho de gasoduto a uma das categorias hierárquicas de risco estabelecidas *a priori*.

5. Aplicação Numérica

O problema é vivenciado por uma companhia hipotética de distribuição de gás natural, que dividiu os seus gasodutos em trechos de características homogêneas e distintas dos trechos vizinhos, e deseja classificá-los em quatro classes de risco, a fim de que ações categorizadas para a mitigação destes riscos sejam tomadas adequadamente aos riscos associados a cada categoria. Estas classes, segundo níveis decrescentes de risco, foram denominadas de: *Risco Crítico, Alto Risco, Médio Risco e Baixo Risco*.

As alternativas do problema, que correspondem aos trechos decorrentes de uma segmentação teórica dos seus gasodutos, estão ilustradas abaixo na Tabela 1, bem como os seus respectivos desempenhos nos critérios *Riscos sobre Seres Humanos, Risco Ambientais e Riscos Financeiros*:

Tabela 1. Avaliação dos Trechos nos três critérios do modelo (Valores tipicamente ilustrativos)

Alternativa	R _h	R _a	R _f
Trecho 1	3,3E-03	5,0E-04	1,2E+03
Trecho 2	4,4E-03	1,0E-03	7,4E+02
Trecho 3	6,7E-03	5,1E-04	9,6E+02
Trecho 4	3,9E-03	1,4E-04	2,3E+02
Trecho 5	4,1E-03	4,0E-04	2,9E+02
Trecho 6	5,5E-04	2,2E-03	1,3E+03
Trecho 7	2,1E-04	3,2E-04	1,6E+02
Trecho 8	9,4E-05	1,7E-04	2,6E+02
Trecho 9	3,7E-04	1,5E-04	2,2E+02
Trecho 10	1,6E-03	2,7E-04	1,7E+02

Os valores apresentados na Tabela 1 correspondem ao conjunto de três desempenhos associados a cada trecho em que foi dividida a rede de gasodutos. No critério Riscos sobre Seres Humanos, estes desempenhos correspondem ao valor esperado do número de pessoas atingidas; No critério Riscos Ambientais, ao valor esperado em hectares da área de vegetação destruída; por sua vez, no critério Riscos Financeiros, os desempenhos correspondem ao valor esperado do montante de prejuízos financeiros decorrentes de um vazamento de gás natural.

A partir de então, a empresa procedeu à determinação dos perfis-padrão. Estes perfis representavam, para a companhia, alternativas cujos desempenhos distinguíam duas classes consecutivas. Os 3 padrões para os perfis de classe que dividiram as 4 categorias de risco estão representados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Padrões de referência para as categorias de risco

Alternativa	R_h	R_a	R_f
r_1 – distingue Baixo Risco (C_1) de Médio Risco (C_2)	9,4E-05	1,7E-04	2,6E+02
r_2 – distingue Médio Risco (C_2) de Alto Risco (C_3)	3,7E-04	1,5E-04	2,2E+02
r_3 – distingue Alto Risco (C_3) de Risco Crítico (C_4)	1,6E-03	2,7E-04	1,7E+02

A fim de realizar a agregação dos desempenhos entre os três critérios, os decisores da companhia elegeram as funções de preferência que modelam, da melhor forma, seus comportamentos frente às diferenças entre as avaliações de cada trecho e perfil em cada critério, estabelecendo também o peso destes últimos. Estas informações estão esquematizadas na Tabela 3, juntamente com o tipo da função de preferência, o parâmetro e o peso para cada critério.

Tabela 3. Padrões de referência para as categorias de risco

Critério	Tipo de Função de Preferência	Parâmetro	Peso
R_h	Tipo 1	-	0,5
R_a	Tipo 3	$p=2,0E-04$	0,15
R_f	Tipo 2	$q=1,0E+02$	0,35

Seguidas estas etapas, iniciou-se então ao procedimento de classificação propriamente dito, que consistiu na comparação dos 10 trechos, um a um, com os perfis de referência das classes, através da comparação dos fluxos líquidos obtidos com a aplicação do PROMETHEE II. Como resultado dessa etapa, os trechos ou alternativas, um a um, foram posicionados entre os perfis de referência, um procedimento suficiente para alocar cada alternativa a uma categoria, como pode ser visto abaixo.

Se $\Phi(\text{Trecho } i) \geq \Phi(r_1) \Rightarrow$ O trecho faz parte da classe C_1 : *Baixo Risco*;

Se $\Phi(r_2) \leq \Phi(\text{Trecho } i) < \Phi(r_1) \Rightarrow$ O trecho faz parte da classe C_2 : *Médio Risco*;

Se $\Phi(r_3) \leq \Phi(\text{Trecho } i) < \Phi(r_2) \Rightarrow$ O trecho faz parte da classe C_3 : *Alto Risco*;

Se $\Phi(\text{Trecho } i) \leq \Phi(r_3) \Rightarrow$ O trecho faz parte da classe C_4 : *Risco Crítico*;

Após a aplicação do PROMETHEE II, para cada trecho individual, tomado em conjunto com os perfis apresentados na Tabela 3, obtiveram-se os seguintes resultados, apresentados abaixo na Tabela 4:

Tabela 1. Avaliação dos Trechos nos três critérios do modelo

Alternativa	$\Phi(\text{Trecho})$	$\Phi(r_1)$	$\Phi(r_2)$	$\Phi(r_3)$	Classe indicada
Trecho 1	-0,51587	1	0,282538	-0,76667	Alto Risco
Trecho 2	-0,38965	1	0,333333	-0,94368	Alto Risco
Trecho 3	-0,73691	1	0,286911	-0,55	Risco Crítico
Trecho 4	0,06402	0,9359762	0	-1	Médio Risco
Trecho 5	-0,02475	0,99875	0,024875	-1	Alto Risco
Trecho 6	-0,66667	1	0,333333	-0,66667	Risco Crítico
Trecho 7	0,348009	0,980162	-0,32817	-1	Médio Risco
Trecho 8		0,608638	-0,333333	-1	Baixo Risco
Trecho 9		-1		-1	Médio Risco
Trecho 10		-1		-1	Médio Risco

Observa-se que 7 dos 10 dos trechos foram classificados em categorias intermediárias, 4 na categoria de Médio Risco e 3 na categoria de Alto Risco. Estes trechos apresentam um alto valor de risco em um ou dois critérios, mas não possuem um desempenho global mais crítico (fluxo mais negativo) que o desempenho da referência r_3 , estabelecida pelos decisores como limiar inferior da categoria Risco Crítico. Uma mudança neste perfil de referência poderia realocar estes dois trechos à categoria de Risco Crítico, mas essa é questão de percepção e preferências sob competência do decisor.

Por sua vez, o Trecho 8 é o único que, segundo as preferências e a percepção da companhia, enquadra-se na classe de *Baixo Risco*. Relativamente às demais, as medidas a serem tomadas para redução de riscos neste trecho são as mais brandas e menos custosas. Por fim, os trechos classificados como de *Risco Crítico* (3 e 6) são aqueles que oferecem os mais altos riscos de impacto, para os quais medidas mais severas e que geralmente demandam altos investimentos precisam ser tomadas, a fim de minimizarem-se para patamares aceitáveis os riscos nos três aspectos considerados.

6. Agradecimentos

À FINEPE e à Petrobrás, pelo apoio fornecido a este trabalho.

7. Conclusões

Com a expansão das redes de transporte e distribuição de gás natural, cada vez mais latente, na avaliação de riscos em gasodutos, fica a necessidade do uso de abordagens que considerem as incertezas relacionadas às falhas e as múltiplas dimensões que os riscos apresentam, envolvendo aspectos de natureza humana, ambiental e financeira. Nesse ambiente de problemas sócio-técnicos complexos, o uso de abordagens multicritério para auxiliar decisões no gerenciamento de riscos em gasodutos mostra-se bastante adequado no que concerne, dentre outras coisas, à decisão de quais gasodutos ou trechos de gasodutos priorizar, e quais classes de trechos associar a conjuntos de ações e medidas específicos, orientados para maximização da segurança de forma proporcional aos riscos associados a estas classes.

Nesse sentido, o modelo multicritério apresentado neste trabalho se mostrou eficaz em sua proposta de alocar cada alternativa a uma categoria, embora análises de sensibilidade sobre os limiares e os pesos sejam úteis para auxiliar os decisores de cada companhia a compreender melhor a dinâmica da conjugação dos múltiplos riscos associados a cada trecho de gasoduto, e a avaliar a robustez dos resultados que vierem a ser obtidos.

6. Referências

- ALMEIDA, A.T., COSTA, A.P.C.S. *Aplicações com métodos multicritério de apoio a decisão*. Recife, Ed. Universitária, 2003
- BARTENEV, A. M., GELFAND, B.E., MAKHVILADZE, G.M., ROBERTS, J. P. Statistical analysis of accidents on the Middle Asia-Centre gas pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, v.46, p.57-69, 1996.
- BRANS, J.P., MARESCHAL, B. *Promethee-Gaia, une methodologie d'aide à la décision en présence de critères multiples*. Bruxelles, Édition Éllipses, 2002.
- CAGNO, E., CARON, F., MANCINI, M., RUGGERI, F. Using AHP in determining the prior distributions on gas pipeline failures in a robust Bayesian Approach. *Reliability Engineering & System Safety*, v.67, p.275-284, 2000.
- CAVALCANTE, C.A.V. *Modelagem de decisão multicritério no planejamento da manutenção abordando problemáticas de escolha e classificação*. Tese de Doutorado –UFPE, 136p., 2005.
- JO, Y.D., AHN, B. J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas. *Journal of Hazardous Materials*, v. A123, p. 1-12, 2005.
- PAPADAKIS, G. A. Assessment of requirements on safety management systems in EU regulations for the control of major hazards pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, v. 78, p. 63-89, 2000.
- SOUZA, F.M.C. *Decisões racionais em situações de incerteza*. Recife, Ed.Universitária, 2002.
- YUHUA, D., DATAO, YU. Estimation of failure probability of oil and gas transmission pipelines by fuzzy fault tree analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.18, p.83-88, 2005.
- ZOPOUNIDIS, C., DOUMPOS, M. Multicriteria classification and sorting methods: A literature review. *European Journal of Operational Research*, v.138, p.229-246, 2002.
- ZUÑIGA-GUTIÉRREZ, G., ARROYO-CABRALES, J., LECHUGA, C., ORTEGA-RUBIO, A. Environmental quantitative assessment of two alternative routes for a gas pipeline in Campeche, Mexico. *Landscape and Urban Plannig*, v.59, p.181-186, 2002.
- MERAD, M.M., VERDEL, T., ROY, B., KOUNIALI, S. Use of multicriteria decision-aids for risk zoning and management of large area subjected to mining-induced hazards. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v.19, p.125-138, 2004.