



AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS NA ANÁLISE DE RISCOS MULTIDIMENSIONAIS EM GASODUTOS: VISUALIZAÇÃO DA INFORMAÇÃO COMO SUPORTE À TOMADA DE DECISÃO

Cristina Pereira Medeiros

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
cpmedeiros2@gmail.com

Marcelo Hazin Alencar

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
marceloalencar@cdsid.org.br

Adiel Teixeira de Almeida

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
almeida@cdsid.org.br

RESUMO

Avaliação de risco multidimensionais em gasodutos de gás natural tem mostrado a importância desta abordagem na priorização de seções de risco e consequentemente na alocação de recursos para mitigação de riscos. Contudo, a incerteza inerente a este contexto na tomada de decisão necessita de avaliação adicional a fim de verificar a robustez dos resultados quando diferentes níveis de incerteza são testados. Neste contexto busca-se avaliar as incertezas utilizando métricas estatísticas e posterior análises gráficas para a geração de informação ao decisor. Por fim, mostra-se um exemplo de avaliação para diferentes níveis de incerteza e as consequências na tomada de decisão utilizando esta abordagem.

PALAVRAS CHAVE. Análise de Incertezas. Risco em Gasodutos. Análise Gráfica.

Tópicos (Avaliação de riscos em Gasodutos, Análise de incertezas, Análises gráficas)

ABSTRACT

Evaluations of multidimensional risks in natural gas pipelines has been shown the importance of this approach in the prioritization of risk sections, and then, the allocation of resources in view of risk mitigation. However, the uncertainty inherent to this context in the decision making needs of the further analysis in view of to verify the robustness of the outputs when different uncertainty level are tested. In this context, the purpose is to evaluate the uncertainties using some statistical metrics and further view analysis to generate the amount information to the decision maker. At the end, it is shown an example of the evaluation of different levels of uncertainty and the consequences in the decision making using this approach.

KEYWORDS. Uncertainty Analysis. Risk in Pipelines. View Analysis.

Paper topics Risk evaluation in pipelines, Uncertainty Analysis, View analysis)



1. Introdução

A avaliação de riscos em gasodutos deve ser realizada não somente para avaliação das consequências decorrentes da falha e identificação das principais áreas de risco, mas principalmente estabelecer planos de ação que proporcionem a mitigação dos riscos. Diretamente ligado a estas ações está a manutenção do gasoduto, que pode ser fator determinante para a redução dos riscos. A falta de manutenção periódica nos gasodutos pode causar acidentes [The New York Times 2014; Zhao and Song 2016] causando mortes, destruição ambiental, de casas, de patrimônio e principalmente a vidas. Além disso, deve-se ressaltar também que cuidados devem também ser mantidos sempre que qualquer intervenção seja feita em torno do gasoduto, além da própria manutenção, visto que estes fatores também podem induzir a falhas [The New York Times 2010]. Neste sentido, avaliação de riscos multidimensionais em gasodutos tem sido abordados na literatura [Brito e de Almeida 2009; Alencar e de Almeida 2010; Brito et al 2010; Lins e de Almeida 2012] como uma forma eficiente de priorização das seções do gasoduto e posterior alocação de recursos humanos, de materiais e de manutenção com o objetivo de mitigar riscos. Considera-se que uma análise posterior de incertezas pode afetar a recomendação final ao decisor, sobre a qual diversas configurações de priorização podem ser mais viáveis do que a recomendação inicial dada por estes modelos.

Tendo em vista estes aspectos, a análise de Sensibilidade é conduzida baseada em simulações, sobre as quais são comparadas com o resultado obtido nestes modelos de priorização de riscos. Mais precisamente, a problemática de ordenação [Brito e de Almeida 2009] é utilizada para exemplificar a análise de incertezas e posterior análise sobre as mudanças de priorização das seções.

Considera-se ainda que a análise gráfica contribui significativamente para a geração de informação sobre a incerteza do modelo [de Almeida et al. 2015], bem como para a priorização e gerenciamento das seções de risco pelo decisor. A seção 2 detalha a contribuição da análise gráfica, seguida pela aplicação numérica realizada na seção 3, cujos resultados e análises gráficas são discutidos na seção 4.

2. Contribuições da Análise gráfica para a avaliação de risco

Análises gráficas são geralmente usadas para indicar situações de risco e são amplamente utilizadas na análise de risco de desastres ambientais, tais como terremotos, inundações, etc. [Patel et al 2014]. No entanto, vale ressaltar que ela vai além da simples visualização e delimitação de regiões de risco, uma vez que ela influencia na tomada de decisão gerencial e na avaliação de risco. A quantidade de informação e a forma como ela é apresentada irá influenciar um decisor [Al-Kassab et al. 2014] nas suas escolhas e por isso, deve-se considerar que os dados apresentados sejam claros, concisos para que a disposição dos dados não apresente nenhum viés na avaliação [de Almeida et al. 2015]. Além disso, o esforço cognitivo desempenhado pelo decisor deve ser o menor possível e formas alternativas de avaliação de risco devem ser consideradas, sempre que possível. Neste sentido, a ferramenta computacional utilizada deve ser capaz de possuir diferentes gráficos para uma mesma análise, bem como gráficos com informações mais detalhadas a fim de serem resgatadas sempre que necessário. O analista tem nessa fase um papel crucial na condução de avaliação de riscos, onde ele irá perceber as dificuldades e/ou oportunidades de análise das preferências do decisor [Medeiros et al 2016] a partir da interação entre o decisor, analista e a ferramenta gráfica [Ackermann et al. 2014].

O caminho percorrido para a análise final, ou seja, até recomendação para o decisor, depende da avaliação de incertezas que são inerentes aos parâmetros de decisão. A forma como estes são estimados podem afetar o resultado (Bedford et al 2014; Bedford et al 2015) e diferentes níveis de incerteza podem gerar resultados distintos. Em vista disso, a problemática abordada por [Brito e de Almeida 2009] hierarquiza as seções do gasoduto em prioridade de risco, gerando uma ordenação a qual será tratada neste artigo como ordenação original e esta



pode sofrer alterações em sua ordem de priorização quando submetida a avaliação de diferentes níveis de incerteza.

A avaliação das incertezas mostrará ao decisor fatores importantes que geram maior desordem nas seções e posterior dificuldade de pensar a respeito sobre a decisão mais assertiva quanto a sua real priorização, ou seja, aquela que será mais efetiva na mitigação de riscos. A análise de incertezas pode considerar uma avaliação global [Homma e Saltelli 1996] de seus parâmetros, bem como um conjunto destes [Medeiros et al 2017], identificando um conjunto de parâmetros sensíveis, e a sensibilidade da recomendação [Senouci et al 2014]. Esta última pode ser medida a partir da avaliação de correlação entre a ordenação original e os resultados obtidos a partir da Simulação Monte Carlo (SMC) considerando um certo nível de incerteza. Para este fim, o coeficiente de correlação τ de Kendall [Kendall 1970] é utilizado permitindo avaliações a um nível de significância conhecido.

3. Aplicação numérica de avaliação de risco multidimensionais em gasodutos

Considera-se um gasoduto de gás natural dividido em 8 seções (número de seções $n=8$) para avaliação de riscos multidimensionais, onde as perspectivas financeira, humana e ambiental são consideradas. A avaliação de riscos é realizada individualmente para cada seção, uma vez que estas compõem um conjunto discreto de alternativas do problema multicritério. A avaliação de preferências é realizada com base na estrutura axiomática da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) [Keeney e Raiffa 1976]. Para cada uma das dimensões de risco, considera-se a perda estimada mediante a avaliação das consequências decorrentes da falha do gasoduto. Estas falhas são responsáveis pelos chamados cenários de ocorrência que correspondem ao escape do gás, e posterior ocorrência de dispersões do gás, bolas de fogo, jatos de fogo, entre outros [Jo e Ahn 2002], e estão associados às probabilidades de ocorrência para estimação das perdas.

Para cada um desses cenários, consequências nas três dimensões de risco são estimadas dentro de um raio (r) de perigo estabelecido. Para cada uma das dimensões, diferentes parâmetros são estimados, e estes estão relacionados às características físico-químicas do gasoduto, tais como comprimento da seção, as condições de operação (pressão, volume, etc.) além da avaliação referente ao suprimento do gás tais como a distância da ocorrência do cenário, a o preço de venda do gás, multas e ressarcimentos ocorridos a montante da falha do duto, entre outros. Sob a perspectiva humana verifica-se o número de pessoas presentes no entorno de cada seção do duto. As perdas são estimadas considerando um raio de abrangência em cada seção do gasoduto, sobre o qual as consequências são estipuladas e posteriormente calculados o risco para cada seção, conforme Eq 1. O risco é calculado considerando a soma das consequências em cada dimensão de risco (p), multiplicada pela probabilidade de ocorrência $\pi_i(\theta_{jl})$ dos cenários acidentais l (bola de fogo, jato de fogo, dispersão do gás, etc), para cada modo de falha j , onde k_p representa a constante de escala e $\pi_i(\theta_N)$ a probabilidade de que o gasoduto opere em condições normais. Ao final, as seções são ordenadas em prioridade de risco e os resultados são apresentados ao decisor para uma avaliação inicial. A avaliação de risco é resumida na Figura 1.

$$r_{a_i} = \left\{ \pi_i(\theta_{jl}) \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{l=1}^L \left\{ - \left[\int_p f(p | \theta_{jl, \alpha_i}) k_p u(p) dp \right] \right\} \right\} - \pi_i(\theta_N) \quad (1)$$

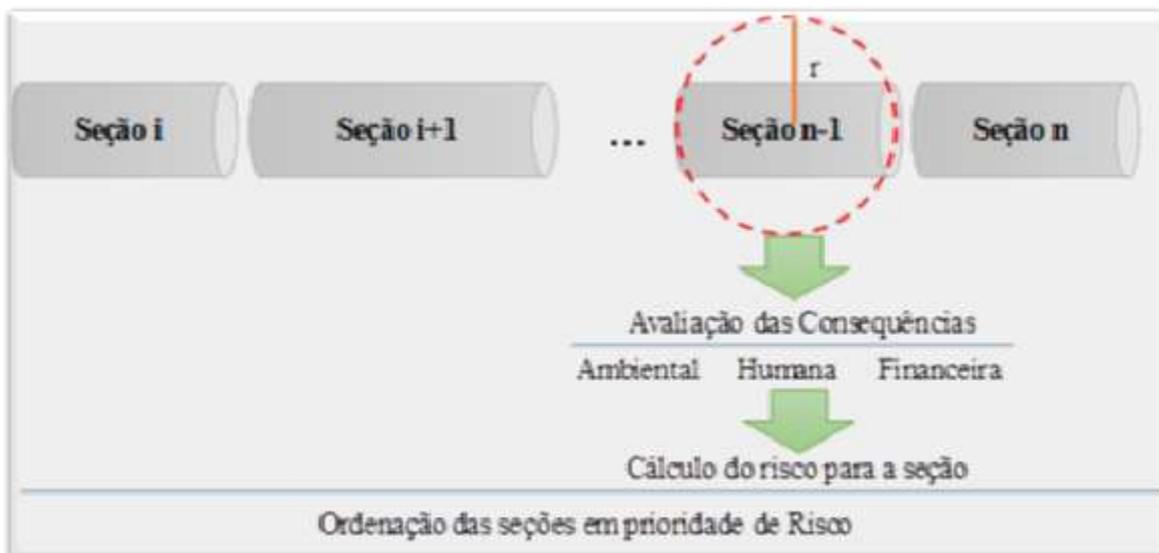


Figura 1 Avaliação de risco em gasodutos de gás natural

3.1 Análise de incertezas

Considera-se que as diferentes fontes de incerteza a que estes parâmetros estão submetidos pode influenciar na sugestão de priorização das seções do gasoduto. Considera-se que esta é uma fase crítica do processo de avaliação, onde o decisor necessita pensar a respeito dos níveis de risco para cada seção e conseqüentemente alocar recursos financeiros e de manutenção a fim de mitigar os riscos inerentes a cada uma delas. Neste sentido busca-se analisar as fontes de incerteza e reduzi-las sempre que possível. Além disso, estima-se que em alguns casos, a análise das incertezas também pode afetar a avaliação final das seções de risco do gasoduto, sobre o qual o esforço deste trabalho é concentrado.

Primeiramente, os parâmetros são estimados para cada seção e em seguida as conseqüências são analisadas e posteriormente agregadas em uma métrica de risco. Obtém-se, portanto, a ordem original das seções em prioridade de risco.

Em seguida, diferentes níveis de incerteza necessitam ser avaliados. Estes níveis devem ser cuidadosamente estimados, bem como os parâmetros a serem avaliados. Uma vez constatado que certo nível de incerteza avaliado, análises mais detalhadas devem ser consideradas a fim de identificar as principais fontes de incerteza. Para esta finalidade são considerados 4 níveis de incerteza para todos os parâmetros, para os quais são considerados um intervalo de avaliação de $\pm 5\%$, 10% , 15% e 20% . Para um contexto real, diferentes níveis podem ser considerados, baseados na avaliação dos especialistas, inclusive níveis diferentes para diferentes parâmetros.

Para esta avaliação é considerada a SMC, onde a distribuição triangular é considerada. Um total de 10.000 simulações são realizadas para cada um dos percentuais de variação dos parâmetros. Em seguida, é considerada a medida de correlação τ de Kendall, cujos valores podem ser obtidos para inferir a respeito da robustez dos resultados obtidos. Nesta fase, considera-se que a avaliação visual permite que o decisor obtenha um maior entendimento sobre o comportamento dos resultados frente às incertezas. Diferentes níveis de incerteza podem ser comparados e maior detalhamento deve ser conduzido sempre que necessário.

Quanto mais próximo o parâmetro τ estiver de 1, maior correlação é identificada entre a ordenação obtida na simulação e a ordenação original, demonstrando que poucas permutações foram encontradas entre as seções. No caso oposto, valores próximos de -1 indica que as seções tendem a inverter a prioridade, na qual as últimas posições da ordenação das seções na simulação correspondem às primeiras posições da ordem original e vice-versa. Este caso é crítico para o estudo, sobre a qual a análise da ordem original é irreal para a avaliar os riscos. Além disso é



necessário verificar a frequência com que este comportamento ocorre e analisar as suas consequências com relação a priorização das seções. Neste contexto, um conjunto de passos são estimulados a serem considerados pelo analista a fim de guiar o decisor na tomada de decisão sobre a priorização das seções de risco.

4 Análises gráficas e Discussão dos Resultados

Aqui são apresentados os resultados obtidos no item 4.1, de maneira a conduzir o analista no processo de avaliação de incertezas e posterior geração de informação para o decisor.

Inicialmente considera-se a dispersão dos valores de τ obtidos para os quatro casos analisados, conforme Figura 2. Para um nível de incerteza em torno de 5%, observa-se uma maior concentração de simulações com alta correlação enquanto que os demais percentuais analisados apresentam maior número de simulações com valores de τ menores que zero, onde observa-se a possibilidade de inversão de ordenação das seções, porém em níveis menores, ou seja, nenhuma avaliação obteve correlação perfeita negativa, indicando que no pior caso, isto não aconteceria.

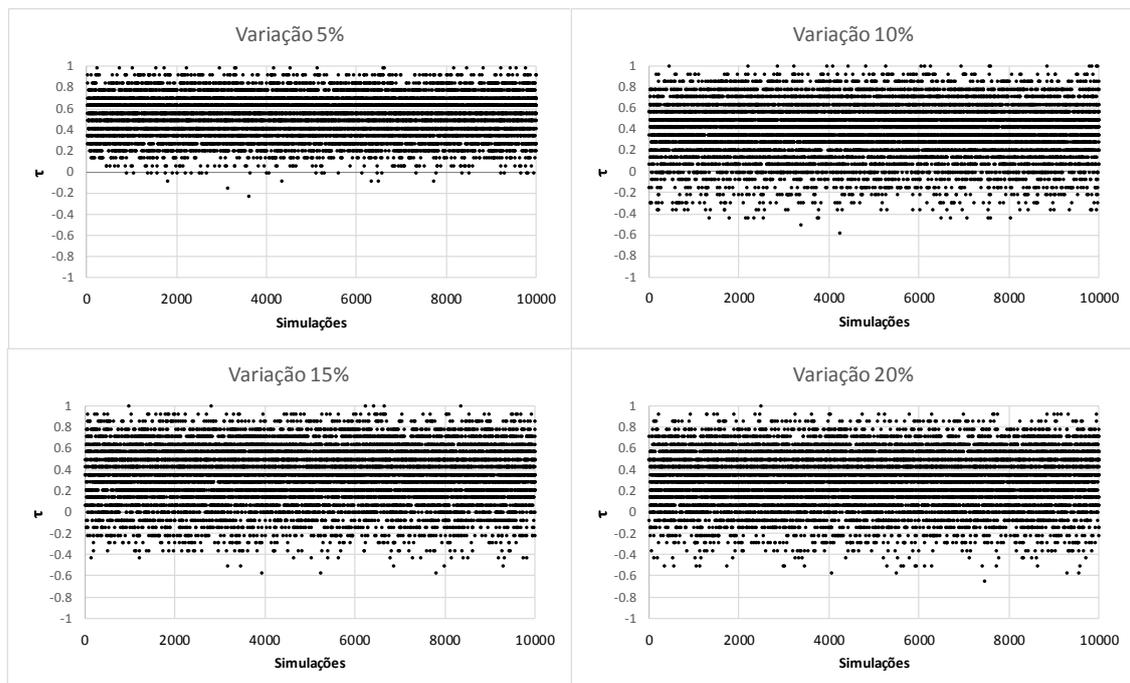


Figura 2 – Dispersão dos valores de τ para cada intervalo de simulação

Além disso, pela Figura 3 observa-se que há assimetria negativa para todos os intervalos de simulação considerados, evidenciando que os dados estão mais próximos de correlação positivas maiores que 0,5 para variações superiores ou iguais a 15%. Além disso, a variação de 15% apresentou maiores frequências para altos valores de τ . Detalhes sobre os valores obtidos são mostrados na Tabela 1. Os valores médios de τ são obtidos para identificar a hipótese de correlação entre as simulações e a ordenação original, indicando o grau de significância da recomendação. Para o intervalo de 5% é considerada correlação com p-valor igual a 0.0314, indicando robustez nos dados, ou seja, são observadas poucas mudanças na ordenação das seções. Por outro lado, os intervalos de 5% e 10% são mais sensíveis a variações, apresentado um maior desordenamento nas seções de risco.

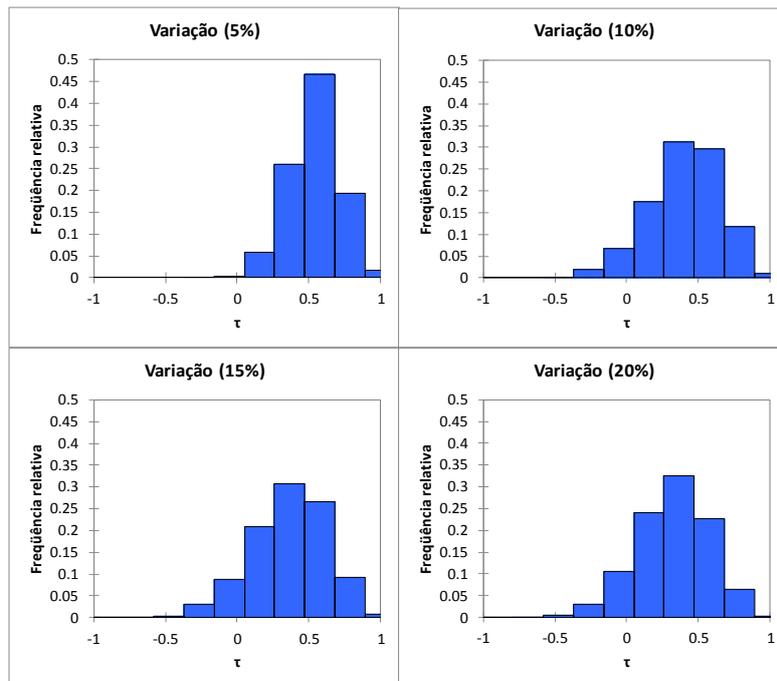


Figura 3 – Análise de Assimetria e frequência dos valores de τ obtidos para cada intervalo de variação

Verifica-se ainda a partir da Tabela 1 que as simulações com 10% e 15% de variação apresentaram valores mínimos iguais a -0.571, embora ambos com baixa frequência. Vale ressaltar que todos os intervalos de simulação obtiveram ao menos uma simulação com correlação perfeita positiva ($\tau=1$), no entanto necessita-se verificar se esta situação pode ser considerada na análise como uma solução viável a ser considerada como priorização das seções, onde a ordenação original é considerada.

A fim de verificar valores discrepantes de τ , uma análise boxplot é conduzida, conforme mostrado na Figura 4. Dela verifica-se que os valores mínimos e máximos de τ em todas as análises são considerados outliers, ressaltando para o decisor que a ordenação original não pode ser então considerada para fins de priorização, uma vez que as incertezas inerentes aos parâmetros do gasoduto analisado afetam o resultado final, onde uma nova ordenação parece ser mais adequada e mais efetiva a ser considerada. Além disso, similaridades são encontradas nas variações de 15% e 20%, como sugerido nas etapas anteriores de avaliação, sobre os quais possuem 50% dos valores de τ entre aproximadamente 0,2143 e 0,5714, diferenciando-se apenas nos valores médio e mediano. Destaque é dado para avaliação do intervalo de simulação de 5% onde cerca de 50% das simulações possuem valores de τ entre 0,4286 e 0,6423 onde são consideradas boas correlações com a ordenação original. De posse destas análises, o decisor precisa juntar esforços para priorizar as seções do duto considerando as novas informações sobre o comportamento das simulações. Para este propósito são apresentados gráficos que apresentam avaliação adicional sobre o comportamento das seções, conforme mostrado nas figuras que seguem.



Tabela 1: Valores de τ obtidos para cada intervalo de simulação

Estatística	Variação			
	5%	10%	15%	20%
No. de observações	10000	10000	10000	10000
Mínimo	-0.214	-0.571	-0.571	-0.643
Máximo	1.000	1.000	1.000	1.000
Freq. do mínimo	1	1	3	1
Freq. do máximo	21	20	6	1
Amplitude	1.214	1.571	1.571	1.643
1° Quartil	0.429	0.214	0.214	0.143
Mediana	0.571	0.429	0.357	0.357
3° Quartil	0.643	0.571	0.571	0.500
Média	0.537	0.398	0.355	0.315
Moda	0.571429	0.5	0.5	0.357143
Variância (n-1)	0.032	0.064	0.068	0.064
Desvio-padrão (n)	0.180	0.253	0.260	0.254
Coefficiente de variação	0.336	0.634	0.732	0.805
Assimetria (Pearson)	-0.221	-0.389	-0.334	-0.310
Curtose (Pearson)	-0.113	-0.020	-0.172	-0.094
Erro padrão da média	0.002	0.003	0.003	0.003
Correlação (p-valor)	0.0314	0.0838	0.1093	0.1379

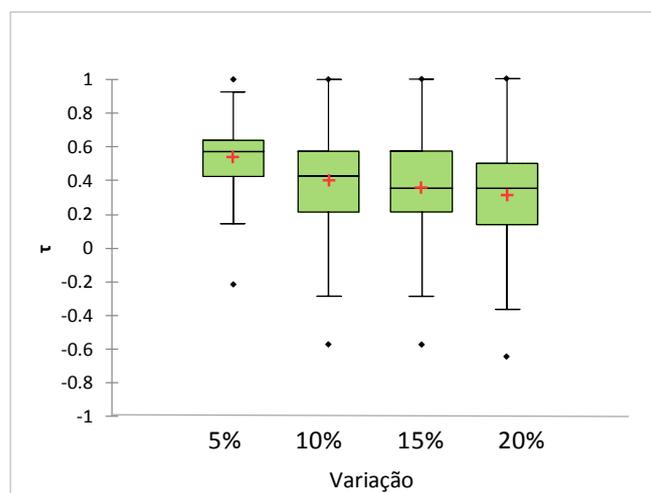


Figura 4 Avaliação de outliers para os intervalos de τ

Primeiramente ressalta-se que o analista deve apresentar a informação para o decisor de maneira mais clara e objetiva possível, evitando manipulações e/ou confusão na apresentação dos dados ao decisor. Além disso, diferentes perspectivas são encorajadas na avaliação das seções, na qual mais de um tipo de gráfico seja apresentado ao decisor para que ele possa estabelecer o método visual mais confortável e claro para a sua análise de priorização.

Este estudo é feito considerando os diferentes níveis de incerteza que ele julgar necessário na avaliação. Para isto, uma análise preliminar sobre a composição das seções é mostrada na Figura 5. Nela constam barras empilhadas que contém a informação sobre o



percentual em que cada uma das seções permanece ao longo das posições na ordenação das seções. Estas são mostradas na ordem de priorização inicial, e para cada um dos diferentes níveis de incerteza são analisados graficamente as mudanças de posição.

Verifica-se que a seção 3 antes prioritária em risco agora tende a não ser a mais prioritária quando incerteza nos valores dos parâmetros é considerada. A seção 1, que ocupava a segunda posição na ordenação original tende a ser prioritária, indicando ao decisor mais uma vez que algumas mudanças na ordenação das seções podem ocorrer e que elas merecem um maior detalhamento para geração de informação. Esta figura dá a ideia de proporção ao decisor que por sua vez pode requerer observar cada seção individualmente, e para isto sugere-se complementar esta informação com os dados obtidos na Figura 6. Esta avaliação pode também ser substituída por uma análise de gráfico de barras simples, com apenas a seção analisada. O esforço cognitivo deve ser o menor possível e por isso algumas podem ser oferecidas ao decisor. A partir da Figura 6, confirma-se que a seção 1 tende a ser mais prioritária em risco do que a seção 1. Além disso, a seção 8, antes na terceira posição, passa a concorrer pela segunda posição, sendo difícil distinguir entre elas. Ressalta-se que a decisão final de priorização das seções é realizada pelo decisor, cujo papel do analista é apresentar a maior quantidade de informação possível a partir de ferramentas que facilitem a decisão e sobretudo o conhecimento sobre o problema.

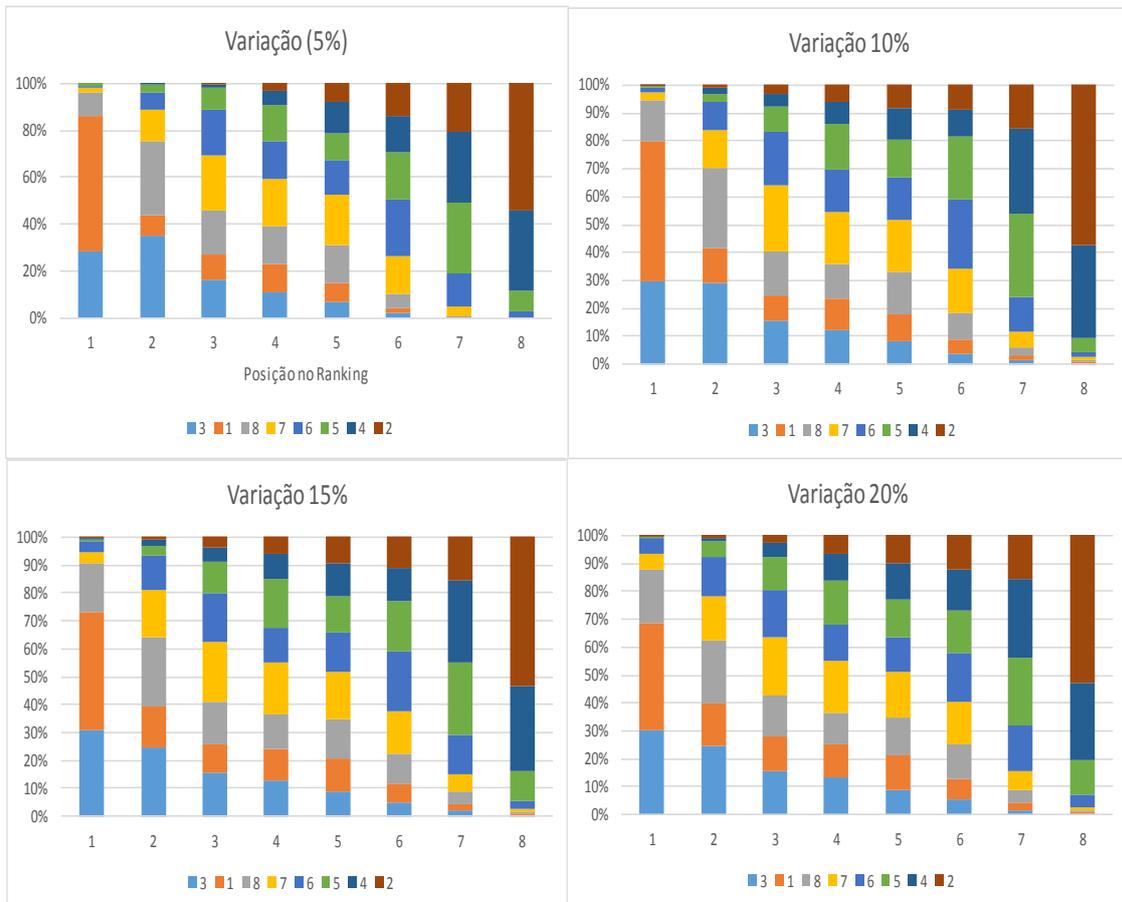


Figura 5 – Análise visual da variação conjunta das seções para cada intervalo de simulação

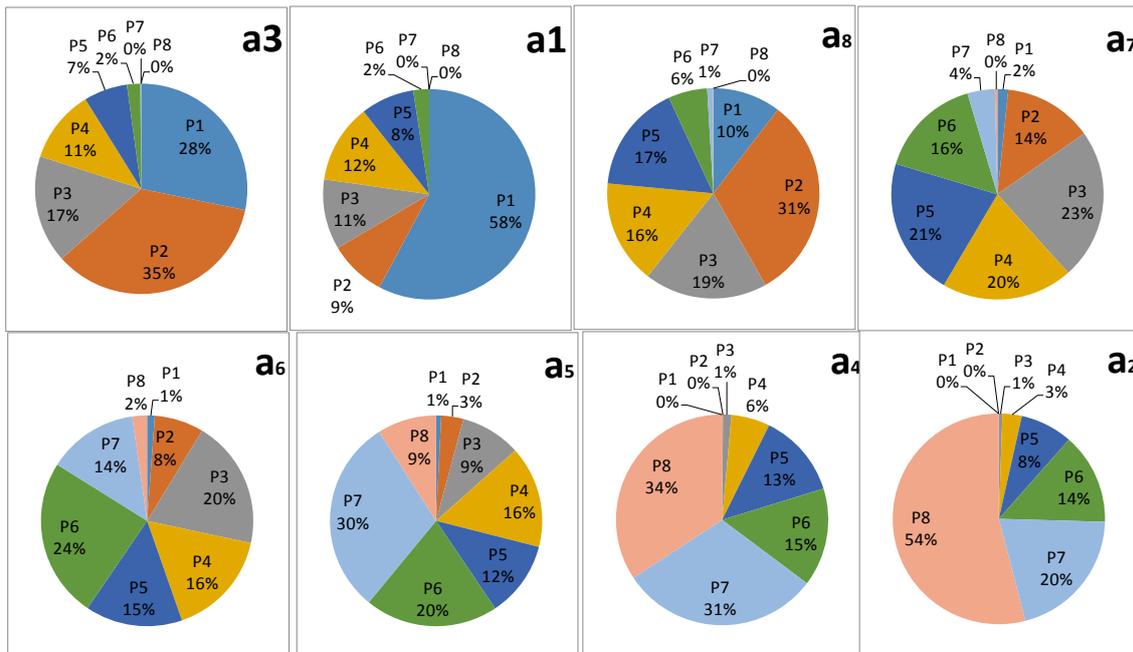


Figura 6 – Análise Individual das seções para o intervalo de 5% (detalhamento da informação da análise conjunta)

5. Considerações Finais

Foi mostrado que a análise de risco multidimensionais em gasoduto é eficiente na obtenção no estabelecimento de uma métrica de risco para priorização das seções do duto, uma vez que o decisor não possui nenhuma informação inicial sobre o risco, mas apenas das diferentes configurações que os parâmetros podem assumir. No entanto, a análise de incertezas pode interferir na recomendação final de priorização das seções, na qual simulações podem conduzir para o entendimento das incertezas e conseqüentemente indicar as novas configurações de priorização das seções do gasoduto. Neste sentido, a análise estatística e de correlação possuem papel fundamental para estimar a influência nos resultados quando diferentes níveis de incerteza são considerados. A análise gráfica, possui, portanto, um papel crucial neste contexto, sobre o qual as seções podem ser melhor analisadas e então priorizadas, a um nível de significância conhecido.

Referências

- Ackermann, F., Howick, S., Quigley, J., Walls, L. e Houghton, T. (2014). Systemic risk elicitation: Using causal maps to engage stakeholders and build a comprehensive view of risks, *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 238(1), pp. 290–299. doi: 10.1016/j.ejor.2014.03.035.
- Al-Kassab, J., Ouertani, Z. M., Schiuma, G. e Neely, A. (2014). Information visualization to support management decisions, *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 13(2), pp. 407–428. doi: 10.1142/S0219622014500497.
- 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*. Elsevier Ltd, 35(8), pp. 3610–3619. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.01.122.
- de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A.



- T. e Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk , Reliability and Maintenance Decision Analysis*. Reliab and. New York: Springer. doi: 10.1007/978-3-319-17969-8.
- Bedford, T., Daneshkhah, A. e Wilson, K. J. (2015). Approximate Uncertainty Modeling in Risk Analysis with Vine Copulas, *Risk Analysis*, 36(4), pp. 792–815. doi: 10.1111/risa.12471.
- Bedford, T., Wilson, K. J. e Daneshkhah, A. (2014). Assessing parameter uncertainty on coupled models using minimum information methods, *Reliability Engineering and System Safety*. Elsevier, 125, pp. 3–12. doi: 10.1016/j.ress.2013.05.011.
- Brito, A. J. e de Almeida, A. T. (2009). Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipelines, *Reliability Engineering and System Safety*, 94(2), pp. 187–198. doi: 10.1016/j.ress.2008.02.014.
- Brito, A. 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*. Elsevier B.V., 200(3), pp. 812–821. doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.016.
- Homma, T. e Saltelli, A. (1996). Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models, *Reliability Engineering & System Safety*, 52, pp. 1–17. doi: 10.1016/0951-8320(96)00002-6.
- Jo, Y. D. e Ahn, B. J. (2002). Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(3), pp. 179–188. doi: 10.1016/S0950-4230(02)00007-4.
- Keeney, R. L. e Raiffa, H. (1976). *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*. John Wiley & Sons.
- Kendall, M. G. (1970). *Rank Correlation Methods*. 4th edn. London: Griffin.
- Lins, P. H. C. e De Almeida, A. T. (2012). Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines, *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 37(18), pp. 13545–13554. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.06.078.
- Medeiros, C. P., Alencar, M. H. e de Almeida, A. T. (2016). Hydrogen pipelines: Enhancing information visualization and statistical tests for global sensitivity analysis when evaluating multidimensional risks to support decision-making, *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 41(47), pp. 22192–22205. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.113.
- Medeiros, C. P., Alencar, M. H. e de Almeida, A. T. (2017). Multidimensional risk evaluation of natural gas pipelines based on a multicriteria decision model using visualization tools and statistical tests for global sensitivity analysis, *Reliability Engineering and System Safety*, 165, pp.268-276 doi: 10.1016/j.ress.2017.04.002.
- Patel, V. M., Dholakia, M. B. e Singh, A. P. (2014). Emergency preparedness in the case of Makran tsunami: a case study on tsunami risk visualization for the western parts of Gujarat, India, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 5705(ahead-of-print), pp. 1–17. doi: 10.1080/19475705.2014.983188.
- Senouci, A., El-Abbasy, M. S. e Zayed, T. (2014). Fuzzy-Based Model for Predicting Failure of Oil Pipelines, *Journal of Infrastructure Systems*, 20(4), p. 4014018. doi:



10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000181.

The New York Times (2010). Texas: Natural Gas Explosion Kills 2." New York Times 9 June 2010: A16(L). Academic OneFile. Web. 6 May 2016.

The New York Times (2014). Utility Charged With 12 Felonies in Gas Explosion." New York Times 2 Apr. 2014: A16(L). Academic OneFile. Web. 6 May 2016.

Zhao, Y. e Song, M. (2016). Failure analysis of a natural gas pipeline, *EFA*. Elsevier Inc., 63, pp. 61–71. doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.02.023.