

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE GLOBAL BASEADA EM SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO APLICADA AO ESTUDO DE RISCOS MULTIDIMENSIONAIS EM SISTEMAS DE GÁS NATURAL

Cristina Pereira Medeiros

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

Marcelo Hazin Alencar

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

Thalles Vitelli Garcez

Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE
tvgarcez@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 trata da Análise de Sensibilidade Global baseada em Simulação Monte Carlo aplicado ao modelo de Análise de Riscos Multidimensionais em gasodutos de gás natural proposto por Brito & de Almeida (2009). As entradas do modelo são obtidas a partir de distribuição teórica de probabilidade, mediante percentual de variação de seus valores originais. O modelo é replicado 100.000 vezes para cada análise conduzida. A associação entre os resultados é avaliada com base no coeficiente de correlação τ de Kendall. As variações obtidas pela Simulação Monte Carlo são ilustradas por meio de informações visuais.

PALAVRAS CHAVE. Avaliação de Risco, Análise de Sensibilidade Global, Simulação de Monte Carlo.

ADM – Multicriteria Decision Support;

ABSTRACT

This paper intends to Global Sensitivity Analysis based on Monte Carlo Simulation applied to the Multidimensional Risk Analysis model in natural gas pipelines proposed by Brito & de Almeida (2009). The model inputs are obtained from theoretical probability distribution by percentage change of their original values. The model is simulated 100,000 times for each conducted analysis. The association between the results is evaluated based on Kendall's correlation coefficient and variations obtained by Monte Carlo Simulation are illustrated by means of visualizing information.

KEYWORDS. Risk evaluation, Global Sensitivity analysis, Monte Carlo simulation

ADM – Multicriteria Decision Support;

1. Introdução

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2014) a participação do gás natural na matriz energética nacional atingiu o patamar de 12,8%. Na geração térmica a gás natural houve um acréscimo de 47,6%, atingindo o patamar de 69,0 TWh. Em 2013 o gás natural destinado à geração de energia elétrica alcançou na média 42,7 milhões m³/dia, representando um aumento de 57,8% ante 2012.

Entende-se por infraestrutura de transporte de gás natural a rede de gasodutos que transporta o gás natural seco até os pontos de entrega às distribuidoras estaduais. Esta infraestrutura é composta por uma malha que escoo gás natural de origem nacional e outra que escoo produto importado (ANP, 2011).

Mesmo sendo um meio de transporte considerado seguro, a ocorrência de falhas em gasodutos pode acarretar em acidentes catastróficos. O Brasil ainda não possui uma base de dados concisa de acidentes e vazamentos de gasodutos de gás natural e esta lacuna dificulta a avaliação de risco nos dutos de transporte nacionais (GARCEZ et al., 2010).

Segundo a *Society of Risk Analysis* (SRA, 2015), a análise do risco consiste em um estudo detalhado, incluindo a avaliação de riscos e alternativas para a gestão de riscos, realizada para compreender natureza indesejada em diversos aspectos, consequências negativas para a vida humana, a saúde, a propriedade ou o ambiente. Trata-se ainda de um processo analítico para fornecer informações em relação a eventos indesejáveis, através do processo de quantificação das probabilidades e consequências esperadas para os riscos identificados.

Ao longo dos anos, diferentes tratamentos têm sido aplicados para estimar riscos em gasodutos. Brito & de Almeida (2009) destacam que, se a análise de risco considera apenas aspectos humanos ou financeiros, sua avaliação é insuficiente e de pouca abrangência. À luz da necessidade de análise multidimensional em gasodutos de gás natural, estes atores propuseram um modelo de análise de risco agregando as perspectivas humana, financeira e ambiental mediante hierarquização em prioridade de risco. Em diferentes contextos de engenharia, também existem diversas abordagens de avaliação do risco sob uma perspectiva multidimensional da consequência (de ALMEIDA et al., 2015; GARCEZ & de ALMEIDA, 2014a; GARCEZ & de ALMEIDA, 2014b; LOPES et al., 2009).

Mazzola (1999), em sua avaliação de risco em gasodutos de gás natural, afirma que o resultado do estudo depende diretamente dos parâmetros analisados. Para entendimento do comportamento dos parâmetros do problema, a análise de sensibilidade realizada com o propósito de avaliar a variação de resultados como uma função da variação de dados do problema é de fundamental importância.

Conforme de Almeida (2013), a avaliação global das alternativas e a análise de sensibilidade e robustez dependem da problemática estabelecida, sendo a problemática de Ordenação a mais complexa.

Kucherenko et al. (2009) destacam que na Análise de Sensibilidade Global (ASG), é avaliado o efeito de um fator enquanto todos os outros fatores são variados, e assim eles são responsáveis por interações entre as variáveis e não dependem da escolha de um ponto nominal.

A avaliação de risco de gasodutos de gás natural depende de diversos parâmetros relacionados à operação do gasoduto e dos possíveis modos de falha que podem ocorrer e suas consequências. Além disso, muitos parâmetros do modelo são elicitados conforme experiência do decisor, cuja incerteza é inserida ao problema. Adicionalmente, diferentes combinações de parâmetros podem ocorrer ao longo da extensão do gasoduto, e a interação entre estes parâmetros deve ser analisada a fim de entender o seu comportamento.

Portanto, como contribuição deste trabalho, propõe-se a Análise de Sensibilidade Global do modelo de decisão proposto por Brito & de Almeida (2009), baseada em Simulação de Monte Carlo a fim de permitir e compreender o comportamento dinâmico e aleatório das variáveis. As associações entre as ordenações obtidas são medidas a partir do coeficiente de correlação τ de Kendall, um método não paramétrico, que avalia se há relação entre duas amostras.

2. Revisão da Literatura

2.1 Panorama Nacional do Gás Natural

O Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2014 consolida os dados referentes ao desempenho da indústria de petróleo, gás natural e biocombustíveis e do sistema de abastecimento nacional no período 2004-2013. Os dados mostraram que o Brasil permaneceu na 31ª colocação no ranking das maiores reservas provadas de gás natural no ano de 2013.

Conforme ANP (2014), em 2013, o Brasil contava com 601 dutos destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos, perfazendo 19,7 mil km. Destes, 150 dutos (14,3 mil km) eram destinados ao transporte e 451 (5,4 mil km) à transferência. Para a movimentação de gás natural, havia 110 dutos, com extensão de 11,7 mil km, enquanto para os derivados eram 422 dutos, totalizando 5,9 mil km. Outros 32 dutos, com quase 2 mil km, destinavam-se à movimentação de petróleo. E os 76 km restantes, compostos por 37 dutos, eram reservados à movimentação dos demais produtos, tais como etanol e solventes.

Com base no Anuário estatístico da ANP (2014), em 2013 a produção nacional de gás natural aumentou superando o volume produzido em 2012 em 9,1%. Os campos do pré-sal foram responsáveis por 70% desse incremento.

Em contrapartida ao declínio da produção de petróleo, a de gás natural obteve acréscimo de 9,1%, totalizando 28,2 bilhões de m³ em 2013. Nos últimos 10 anos, a produção nacional de gás natural apresentou crescimento médio de 5,8% ao ano.

As vendas de gás natural aumentaram 21,9% em 2013, totalizando 25,9 bilhões de m³. Nos últimos 10 anos, o crescimento de vendas de gás natural aumentou em média 6,3% ao ano, segundo a ANP (2014).

Para a Petrobras (2013), o aumento da demanda das termelétricas a gás natural, acionadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em função dos baixos níveis dos reservatórios hidrelétricos foi o principal motivo para o aumento da demanda.

Em 2013, o preço médio de referência do petróleo registrou alta de 2,1% e ficou cotado em R\$ 221,46/barril, enquanto o preço de referência do gás natural subiu 19,9%, fixando-se em R\$ 660,48/mil m³. Em 2013, foram arrecadados R\$ 16,3 bilhões em royalties, valor que excedeu em 4,3% o de 2012.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2015) anuncia que novos recordes na produção de petróleo e gás natural no Brasil foram registrados em outubro de 2014, cujos valores foram de aproximadamente 92,7 milhões de metros cúbicos por dia. Esses números representam aumento de cerca de 27,2% na produção de gás natural se comparada ao mesmo mês em 2013 e aumento de aproximadamente 4,2% da produção de gás natural se comparada a setembro de 2014. A produção de outubro de 2014 superou o recorde de 90,9 MMm³/d alcançado em agosto de 2014.

Nos últimos 10 anos, a produção nacional de gás natural apresentou crescimento médio de 5,6% ao ano, atingindo 25,8 bilhões de m³ em 2012, volume 7,3% maior que o de 2011. Em 2012, foram arrecadados R\$ 15,6 bilhões em royalties, valor que excedeu em 20,4% o de 2011, provenientes da exploração e produção de petróleo e gás natural.

2.2 Decisão Multicritério e a Análise de Risco em Gasodutos

de Almeida et al. (2001) observa que a área de manutenção tem passado por uma evolução grande em termos de métodos aplicáveis ao seu processo de gerenciamento e decisão. Segundo de Almeida et al. (2015), para a tomada de decisão ser mais assertiva deve-se haver um nível de conhecimento adequado para a entrada de um modelo, expressando as incertezas a partir de métricas de risco. Aven & Zio (2014) ressaltam que as técnicas de avaliação e gestão de riscos têm sido aprimoradas através da investigação e aplicação de novas perspectivas e desafios.

A avaliação probabilística do risco às vezes também é referida como uma avaliação quantitativa dos riscos que sistematiza os conhecimentos, informações e incertezas sobre os fenômenos envolvidos nas atividades estudadas (FLAGE et al., 2014).

Ao longo dos anos, diferentes tratamentos têm sido aplicados para estimar riscos em gasodutos. Brito & de Almeida (2009) destacam que, se a análise de risco considera apenas aspectos humanos ou financeiros, sua avaliação é insuficiente.

Comumente na literatura, é analisada apenas uma dimensão de risco. À luz da necessidade de contribuir para análise de diversos aspectos, Brito & de Almeida (2009) propuseram um modelo multidimensional de avaliação de risco em gasodutos de gás natural, agregando perspectivas de risco financeiro, humano e ambiental. A partir da incorporação das preferências dos decisores, sendo estes responsáveis pela gestão de gasodutos, é possível modelar seu comportamento na tomada de decisão ao exercer atividades de planejamento, manutenção e prevenção e possibilitar a mitigação dos riscos e consequentemente as consequências a eles associados. Esta é uma necessidade realística diária na tomada de decisão. Por conseguinte, Brito & de Almeida (2009) usaram uma abordagem probabilística através da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), a partir de uma estrutura axiomática do estabelecimento de preferências do decisor. Uma hierarquia de riscos multidimensionais é obtida como resultado da avaliação do modelo multicritério,.

Complementarmente, Brito et al. (2010) integraram ao modelo de Brito & de Almeida (2009) uma abordagem não compensatória, o ELECTRE TRI, classificando as seções do gasoduto de gás natural em categorias de risco. Este modelo disponibiliza ao decisor uma priorização das seções que devem receber medidas preventivas em um dado espaço de tempo, bem como a complexidade destas medidas.

A abordagem multiobjetivo foi incorporada à avaliação de risco de gasodutos de transporte de hidrogênio por Alencar & de Almeida (2010). Para análise de cada dimensão é necessária a agregação de diversos parâmetros inerentes ao gás estudado, parâmetros relacionados às probabilidades de ocorrência e, por fim, parâmetros associados as preferências do decisor.

A complexidade de combinação destes parâmetros é aumentada à medida que os modelos abrangem subcritérios, como no modelo de Lins & de Almeida (2012) que leva em conta consequências para os seres humanos (tais como ferimentos, queimaduras, etc. – além do número de mortes) e considera a diversidade ecológica do entorno do gasoduto – além da área de vegetação queimada.

2.3 Teoria da Utilidade Multiatributo

A Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Utility Theory* - MAUT) foi derivada da Teoria da Utilidade e Teoria da Decisão (KEENEY & RAIFFA, 1976).

Segundo de Almeida (2013), a construção de modelos que utilizam MAUT inclui, geralmente, a abordagem da Teoria da Decisão, que em seu enfoque Bayesiano permite ainda tratar as incertezas inerentes aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento a priori de especialistas no sistema de produção. No contexto de análise de risco em gasodutos a construção de modelos baseados em MAUT pode ser observada, por exemplo, em Brito & de Almeida (2009), Alencar & de Almeida (2010) e Lins & de Almeida (2012).

A diferença fundamental deste modelo é que as os modelos relativos à função valor estão relacionados a consequências determinísticas, enquanto os relativos à função utilidade estão relacionados a consequências probabilísticas, que é inserida na estrutura axiomática do MAUT (de ALMEIDA, 2013).

O problema básico consiste em como estruturar e quantificar uma função utilidade u , ou seja, uma função f , de maneira que:

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)] \quad (1)$$

onde, u_i corresponde a uma função utilidade sobre o atributo x_i .

As condições de independência preferencial devem ser realizadas para obtenção da função utilidade multiatributo (de ALMEIDA, 2013). Para tanto, são identificadas a independência em utilidade e a independência aditiva.

Em de Almeida (2013) pode-se mostrar que se a condição de independência aditiva

entre x e y for atendida, então existe mútua independência em utilidade entre x e y . No entanto, o contrário pode não ser verdadeiro. Isto é, se houver mútua independência em utilidade entre x e y , não se pode afirmar que haja independência aditiva.

3. O método Monte Carlo

A Análise de Sensibilidade Global (ASG) centra-se na incerteza sobre a saída levando em consideração toda a gama de valores dos parâmetros de entrada do modelo. Em um cenário de incerteza, os dados de entrada são avaliados e cada parâmetro é analisado em diferentes princípios. O processo pode ser repetido a um nível aceitável até que o intervalo de incerteza da saída seja alcançado (HOMMA & SALTELLI, 1996).

Na aplicação da Simulação Monte Carlo (SMC), os dados são artificialmente gerados empregando-se um Gerador de Número Aleatório (GNA) e uma distribuição de frequências da variável de interesse (FREITAS FILHO, 2008).

Os números pseudo-aleatórios, (comumente chamados de números aleatórios), são ingredientes fundamentais para experimentos estatísticos, simulação de sistemas estocásticos, análise numérica com métodos de Monte Carlo (MMC), algoritmos probabilísticos, jogos de computador, criptografia, e máquinas de jogos de azar, etc. (L'ECUYER, 2001).

Este método é amplamente encontrado na literatura devido as suas características favoráveis para abordagem da análise de incerteza e sensibilidade.

Helton (1993) apresenta como vantagens a sua adequação para problemas de análise em que há grandes incertezas associadas com as variáveis de entrada. Em particular, a análise diferencial e metodologia de superfície de resposta tendem a executar mal quando relações entre as variáveis de entrada e de saída são não-lineares e as variáveis de entrada possuem grandes incertezas. Outra característica positiva é a possibilidade de estimação direta de funções de distribuição. O autor acrescenta, que em geral, SMC não requer sofisticação que vai além do problema de análise de interesse. E por fim, a SMC cria um mapeamento a partir dos valores das variáveis de entrada com os valores de saída do modelo em análise, que é rico em informações, devido à estratificação completa ao longo da gama de cada variável de entrada e a variedade das variáveis de saída que podem ser geradas e salvas.

4. Aplicação Numérica

O resultado final da avaliação global das alternativas depende da análise de sensibilidade, que pode apresentar problemas e requer a revisão de etapas anteriores do modelo (de ALMEIDA et al., 2015).

A Análise de Sensibilidade do modelo de decisão permite verificar a influência da variação dos parâmetros de entrada nos resultados obtidos. No modelo de avaliação multidimensional de riscos em gasodutos de gás natural analisado, proposto por Brito & de Almeida (2009), considera três critérios: perda humana, perda ambiental e perda financeira. A dimensão de perda humana é baseada na estimativa do número de pessoas atingidas fisicamente devido a um cenário acidental. Na dimensão financeira são analisadas as perdas de receitas, ressarcimento de clientes, a danos de propriedades, multas e indenizações. A avaliação das perdas ambientais é relacionada com os impactos sobre a área de vegetação queimada.

O gasoduto é dividido em seções que formam um conjunto discreto de alternativas $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, cujas características particulares a cada seção são consideradas homogêneas ao longo da seção. A divisão do gasoduto em seções pode ser obtida por um processo subjetivo, embora seja baseado em características físicas, geralmente. Estima-se as condições de operação de cada seção, tais como o fluxo do gás, o diâmetro do gasoduto, o comprimento da seção, entre outros. Estes parâmetros são considerados variáveis apenas por seção, ou seja, independem do tipo de falha (Tabela 1). Em seguida são estabelecidos os parâmetros que dependem da ocorrência de cenários acidentais, provenientes de furos ou rupturas no duto. Os parâmetros desta natureza são apresentados na Tabela 2.

Para cada dimensão de consequência em estudo são avaliadas as consequências resultantes das perdas mediante ocorrência de cenários acidentais. As preferências do decisor são incorporadas ao modelo a partir da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Nesta etapa

são definidas as funções utilidades a partir da estrutura axiomática da MAUT. Para as três dimensões de consequência são consideradas a maior perda associada ao gasoduto estudado na determinação do espaço de consequências, para as quais a utilidade é igual a 0 quando é atribuída a maior perda e a utilidade é igual a 1 quando não há perdas. Especificamente, nesta aplicação, considerando que o decisor possua independência aditiva das preferências, é possível avaliar as funções de utilidade unidimensional das consequências. Além disso, supõe-se que o decisor tem um comportamento de aversão frente ao risco tanto para a dimensão humana quanto para a dimensão financeira cujas utilidades unidimensionais foram ajustadas mediante distribuição exponencial. Para a função utilidade na dimensão ambiental, assume-se um comportamento do decisor de propensão frente ao risco ajustando-se suas preferências a partir da distribuição logística.

Finaliza-se a etapa de elicitación da estrutura de preferência do decisor, determinando as constantes de escala k_f , k_h e k_a , que são respectivamente as constantes de escala das dimensões financeira, humana e ambiental. Seguiu-se o procedimento estruturado determinado por Keeney e Raiffa (1976). O somatório das constantes de escala deve ser igual a 1.

Tabela 1. Parâmetros que variam por Seção na Simulação de Monte Carlo

Parâmetro	Descrição
L_i	Extensão da seção do gasoduto(m)
d	Diâmetro da seção do gasoduto(m)
Q	Vazão regular do gás (m ³ /s)
v	Preço de venda do gás (in \$ per m ³ /s)
W_{ai}	Estimativa da multa do contrato (\$ / s)
P_o	Valor da pressão constante (kgf / cm ²)
L_o	Extensão do gasoduto até a estação de compressão (m)
Veg	Quantidade de vegetação na zona de perigo crítica(%)
β	Constante de proporcionalidade relacionada a perdas financeiras(\$ / J)
η	Número máximo de pessoas feridas
α_i	Probabilidade de ter ao menos uma pessoa afetada pela radiação térmica
PW	Pressão de vapor de água saturada(N/m ²)
RH	Umidade relativa(%)
CDZ	Zona de perigo crítica (m)

Tabela 2. Parâmetros que variam por Cenário na Simulação de Monte Carlo

Parâmetro	Descrição
Ω	Fator que mostra quantas vezes mais provável que haja uma fatalidade é uma queimadura de 1º ou 2º grau quando uma pessoa é exposta a radiação
$\lambda_{\theta,jk}$	Constante relacionada com o cenário de seção (m ² /J)
$g_{\theta,jk}$	Inverso do tempo médio para apagamento das chamas (1/s)
R	Taxa de liberação do gás a partir do furo ou ruptura (m ³ /s)
A_i	Área efetiva (m ²)
$Zi_{\theta,jk}$	Constante de proporcionalidade entre o tempo para restaurar o fluxo regular do sistema com o tempo de apagamento das chamas
$\pi_{\theta,jk}$	Probabilidades de ocorrência dos cenários acidentais relacionados a um vazamento acidental de gás natural
$I_{\theta,jk}$	Fluxo de radiação média sobre o cenário acidental (J/m ² .s)

Uma vez calculadas as funções de consequência para cada dimensão de risco, estimadas as probabilidades de ocorrência de cada cenário acidental, calcula-se os valores de

riscos para cada seção do gasoduto. Portanto, esses conjuntos de valores de risco formam uma hierarquia de risco do gasoduto. Ao final, as seções são priorizadas com relação ao risco, obtendo-se uma ordenação completa das seções.

O risco calculado para uma seção S é apresentado na Equação (2). Sua obtenção é dada pelo somatório das perdas associadas às três dimensões de risco, no qual a cada critério é associada uma constante de escala, multiplicado pela probabilidade de ocorrência do cenário acidental. Ao final adiciona-se a probabilidade do cenário de normalidade, ou seja, a probabilidade de que o duto opere normalmente.

$$\left\{ \pi_i(\theta_{jk}) \cdot \sum_j \sum_k \left[\begin{aligned} &+ \int_h f(h|\theta_{jk,\alpha_i}) k_h u(h) dh \\ &+ \int_a f(a|\theta_{jk,\alpha_i}) k_a u(a) da \\ &+ \int_f f(f|\theta_{jk,\alpha_i}) k_f u(f) df \end{aligned} \right] \right\} (-1) \cdot \pi_i(\theta_N) \quad (2)$$

O gasoduto analisado é composto por 10 seções que compreendem diferentes ocupações do solo, como mostrado na Figura 1.

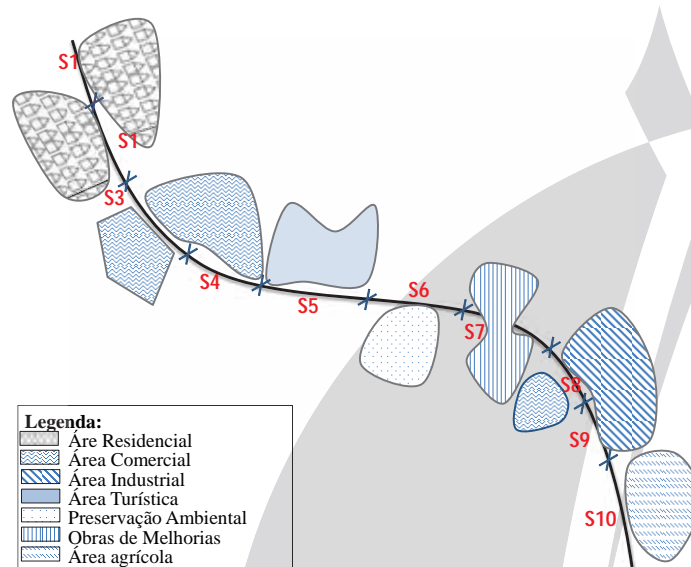


Figura 1. Layout do Gasoduto Analisado

A partir dos valores de risco multidimensional tem-se as diferenças entre os riscos das seções dos gasodutos. Estas diferenças e a ordenação obtida são mostrados na Tabela 3. A diferença absoluta do risco e a razão das diferenças são obtidas pela escala intervalar da função utilidade e permite a comparação de incrementos do valor de utilidade entre as alternativas (de Almeida et al., 2015).

Tabela 3. Seções Priorizadas e comparação do incremento do risco

Posição no Ranking	Seção	Diferença Absoluta	Razão
1	S4	9,4557	4,1301
2	S3	2,2894	0,3310
3	S2	6,91665	2,5845
4	S7	2,6762	0,6058
5	S8	4,4177	1,8919
6	S5	2,3351	0,3563

7	S9	6,5528	0,64008
8	S10	10,2374	1,1221
9	S1	9,1231	
10	S6		

Sendo assim, são avaliadas a razão das diferenças entre as seções adjacentes em prioridade de risco. A partir da Tabela 3 verifica-se que a seção 4 é prioritária para alocação de recursos preventivos e mitigativos de risco, manutenção, financeiros, etc., portanto, esses recursos devem ser alocados inicialmente para esta seção. A análise da razão das diferenças de risco permite ao decisor perceber que a diferença de risco entre as seções S4 e S3 é cerca de 4 vezes maior do que a diferença de risco entre as S3 e S2. De acordo com de Almeida et al. (2015), estes incrementos de risco proporcionam ao decisor diferentes interpretações com relação a visualização do risco, permitindo que os recursos sejam alocados de acordo com a hierarquia do risco.

Diante desses resultados, é preciso realizar análises de sensibilidades para verificar a robustez do modelo e dos parâmetros de entrada. Para isso, são usadas Simulações Monte Carlo, variando os parâmetros de entrada para diferentes ranges de valores. Com esta análise pretende-se identificar intervalos de sensibilidade dos parâmetros, de maneira a propor ao decisor uma avaliação mais profunda do modelo a partir dos resultados obtidos. Pretende-se para cada range analisar 100.000 trials (replicações) a partir do coeficiente de correlação τ de Kendall.

Nesta etapa são analisadas a correlação de cada simulação com o ranking original e ao final dos casos, avalia-se a correlação do τ médio. Para um número n de iterações em uma simulação Monte Carlo, uma série de τ_i será obtida e em seguida é necessário verificar a significância estatística destes valores. A propagação desta distribuição fornecerá informações sobre os limiares dos parâmetros e inferências sobre a robustez do modelo poderão ser realizadas (DAHER & de ALMEIDA, 2012).

Este método irá avaliar se o valor médio de τ obtido rejeita a hipótese nula de que não há associação entre a amostra obtida e o resultado original. Para considerar os resultados como robustos, serão considerados os valores de τ que obtenham correlação ao grau de significância igual ou superior a 95%. Para um valor de N (tamanho da amostra) superior a 8, a aproximação da normal é geralmente considerada (DENOEU, et al. 2005).

Primeiramente, avalia-se os resultados mediante entrada baseada em randomização dos parâmetros gerada a partir de range igual a 20%, segundo distribuição triangular. Seguindo esta configuração de entrada de dados, verificou-se que o modelo é sensível a mudanças quando seus parâmetros são variados em 20%, pois a correlação é aceita para grau de significância de 90%.

Em seguida, foram analisadas a influência de ranges iguais a 15% e 10%. Para ambos, o modelo apresentou robustez, identificando que há correlação entre os resultados obtidos e a ordenação original para grau de significância de 95%. Os valores de α e o percentual de simulações correlacionadas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Nível de Significância para Rejeição de H_0 : mútua independência entre as amostras.

Range	α	% de Simulações Correlacionadas
10%	0,05	68,89
15%	0,05	53,42
20%	0,10	62,29

Para todos os ranges analisados foram observadas ao menos 1 replicação com correlação perfeita positiva, ou seja, o resultado da variação dos parâmetros apresentou ordenação igual ao ranking original. À medida que a variação dos parâmetros é diminuída, reduz-se também o desvio padrão, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5. Valores obtidos do Coeficiente de Correlação τ de Kendall

Range	Mínimo	Média	Máximo	Moda	Mediana	σ
10%	-0,1556	0,4932	1	0,4667	0,5111	0,1802
15%	-0,4667	0,4150	1	0,4222	0,4222	0,2125
20%	-0,5111	0,3749	1	0,3778	0,3778	0,2180

São apresentados os resultados da SMC para cada range avaliado na Figura 4. Como demonstrado na Tabela 4, a variação de 10% e 15% rejeitam a hipótese nula ao mesmo grau de significância (95%), logo não há diferenças significativas entre as ordenações apresentadas como pode ser observado na Figura 4a-b. No entanto, o modelo foi sensível ao range de 20%, ou seja, apresentou maior variação do que os ranges de 10% e 15%, como pode ser ilustrado na Figura 4c ao passo que a seção S4 permaneceu como prioritária cerca de 10% a menos quando comparado com a Figuras 4a-b.

Avaliações sobre variações das constantes de escala foram também realizadas, mas não provocaram alterações significativas, rejeitando a hipótese nula ao mesmo grau de significância do range analisado. Isso significa que a variação conjunta dos parâmetros relacionados ao gasoduto para range de 20% mantendo inalteradas as constantes de escala, a correlação é constatada para grau de significância de 90%. Ao simular as alterações de 20% para todos os parâmetros inclusive as constantes de escala, a hipótese nula é também rejeitada ao grau de significância de 90%. Análise semelhante é realizada para os ranges de 10% e 15%.

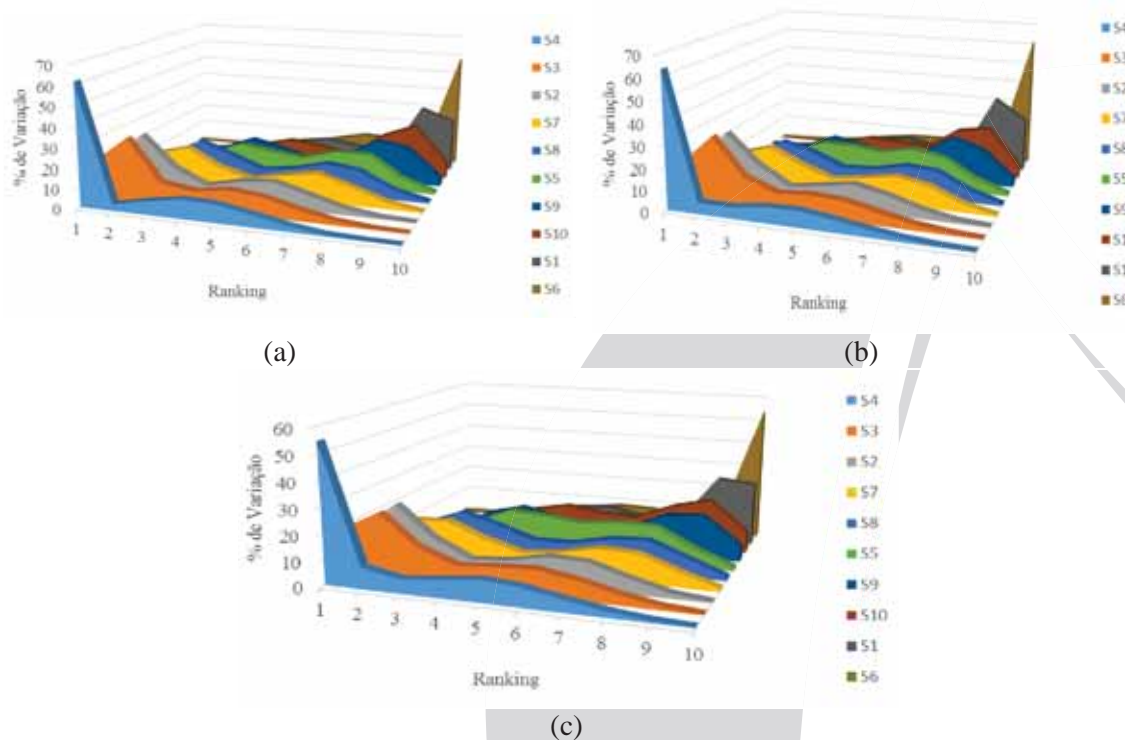


Figura 4. Análise Monte Carlo para cada range de variação dos parâmetros de entrada: (a)10% (b)15% (c) 20%.

5. Conclusões

Verificou-se nessa aplicação, através da Análise de Sensibilidade Global utilizando a SMC, que o modelo de análise de risco multidimensional (BRITO & de ALMEIDA, 2009), é robusto para o ordenamento em hierarquia de risco de gasodutos de gás natural.

Como não há uma base de dados bem consolidada sobre as falhas e acidentes ocorridos em gasodutos em gás natural no país, muitos parâmetros dependem do conhecimento a priori de especialistas, ou seja, do conhecimento subjetivo acerca do funcionamento desses

sistemas. Além disso, para a aplicação do modelo são necessárias coletas de dados de dezenas de parâmetros, que quando considerados a extensão de centenas de quilômetros de gasodutos torna-se uma tarefa complexa com um fator incerteza bastante presente.

Apesar de raros, os acidentes ocorridos em gasodutos de gás natural são responsáveis pela morte ou ferimento de muitas pessoas, bem como perdas de parte de vegetação e principalmente de perdas financeiras ocasionadas ao sistema e a terceiros.

A Simulação de Monte Carlo proporciona ao decisor analisar de maneira global a variação dos parâmetros do modelo e os resultados obtidos. Com isso, avaliações da alteração da hierarquização das seções podem ser observadas mediante mapeamento produzido pela SMC.

A avaliação global dos parâmetros permite também sugerir ao decisor um grupo de alternativas para priorização de alocação de recursos, visto que diferenças na ordenação são obtidas mediante variação em percentual dos dados de entrada. A variação conjunta dos parâmetros se mostrou robusta ao grau de confiança de 95% para os ranges de 10% e 15% indicando que variações de até 15% de todos os parâmetros representam ordenações semelhantes àquela obtida originalmente.

Também, não foi comprovada influência da variação das constantes de escala e dos parâmetros dos gasodutos simultaneamente, obtendo o mesmo grau de significância de rejeição da hipótese nula para as três dimensões de consequência.

As análises descritas correspondem ao problema estudado, não podendo, portanto generalizar os resultados obtidos para outros problemas de aplicação do modelo de Brito & Almeida (2009), pois dependem da característica particular do gasoduto analisado. No entanto, a Simulação de Monte Carlo pode ser realizada para qualquer aplicação do modelo estudado, pois mostrou-se satisfatória para melhor compreensão dos resultados. Por fim, destaca-se que um conjunto específico de parâmetros pode também ser investigado, sempre que necessário.

Agradecimentos

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

Referências

- Alencar M.H. e de Almeida A.T.** (2010), Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *Int J Hydrogen Energy* 35(8):3610–3619.
- ANP** (2015) Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim Mensal do gás Natural. Numero 30, 45 p. junho 2011. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=59925&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1392328590459>. Acesso em: 20/01/2015.
- ANP** (2015), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=71976>. Acesso em 20/01/2015.
- ANP** (2015), Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural - Janeiro 2015: Mês/Ano Base Novembro 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?pg=71248>. Acesso em 20/01/2015.
- Aven, T. e Zio, H.** (2014), Foundational Issues in Risk Assessment and Risk Management. *Risk analysis* [0272-4332] vol:34 iss:7 pg:1164 -1172.
- BEN** (2013), Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013/ Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 288 p. 2014. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf. Acesso em 20/01/2015.
- Brito, A. J. e de Almeida, A. T.** (2009), Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural gas pipeline. *Reliab Eng System Safety*, v.94, p.187-198, 2009.
- 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 Operation Research*, 200:812-21.

- Daher, S. F. D. e de Almeida, A. T.** (2012), The use of ranking veto concept to mitigate the compensatory effects of additive aggregation in group decisions on a water utility automation investment. *Group Decision and Negotiation*, v. 21, n. 2, p. 185-204, 2012.
- de Almeida, A.T., Cavalcante, C.A.V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., Almeida-Filho, A.T. e Garcez T.V.** (2015), *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. International Series in Operations Research & Management Science. Vol 231. Springer, New York.
- de Almeida, A.T.** (2013), *Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério*, 1a Edição. São Paulo: Editora Atlas.
- de Almeida, A. T. e Souza, F. C. M. org.** (2001), *Gestão da manutenção na direção da Competitividade*. Recife, Editora Universitária, 2001.
- Denoeux, T., Masson, M. H. e Hebert, P. A.** (2005), Nonparametric rank-based statistics and significance tests for fuzzy data. *Fuzzy sets and systems* [0165-0114] vol:153 iss:1 pg:1 -28.
- Flage, R; Aven, T; Zio, H. e Barald, P.** (2014), Concerns, Challenges, and Directions of Development for the Issue of Representing Uncertainty in Risk Assessment . *Risk analysis* [0272-4332] vol:34 iss:7 pg:1196 -1207.
- Freitas Filho, P. J.** (2008), *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: com Aplicações em Arena*. 2. ed. Florianópolis: Visual Books Ltda., 2008.
- Garcez T. V. e de Almeida A. T.** (2014a), A risk measurement tool for an underground electricity distribution system considering the consequences and uncertainties of manhole events. *Reliability Engineering & System Safety* 124:68–80.
- Garcez T. V. e de Almeida A. T.** (2014b), Multidimensional Risk Assessment of Manhole Events as a Decision Tool for Ranking the Vaults of an Underground Electricity Distribution System. *Power Delivery IEEE Transactions* 29:624–632.
- Garcez, T. V.; Alencar, M. H.; Silva, B. F. A; Lins, P. H. C. L e de Almeida, A. T.** (2010), Estimação Da Taxa De Vazamento Acidental Em Gasodutos De Gás Natural Através Da Elicitação Do Conhecimento A Priori De Especialistas. *Anais do XXX ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, São Carlos, 2010.
- Helton, J.C.** (1993), Uncertainty and sensitivity analysis techniques for use in performance assessment for radioactive waste disposal. *Reliability Engineering and System Safety*, 42 (1993) 327-367.
- Homma, T. e Saltelli, A.** (1996) Importance measures in global sensitivity analysis of nonlinear models. *Reliability Engineering and System Safety* 52:1-17.
- Keeney, R. L e Raiffa, H.** (1976) *Decision with multiples objectives: preferences and tradeoffs*. New York: Wiley; 1976.
- Kucherenko, S., Rodriguez-Fernandez , M., Pantelides, C. e Shah, N.** (2009), Monte Carlo evaluation of derivative-based global sensitivity measures. *Reliability Engineering and System Safety* 94 (2009) 1135-1148.
- L'Ecuyer, P.** (2001), Random Numbers, *Int. Encyc. Social and Behavioral Sciences*, p. 1-9, 2001.
- Lins P.H.C. , de Almeida A.T.** (2012), Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *Int J Hydrogen Energy* 37:13545–13554
- Lopes, Y.G.; de Almeida, A.T.; Alencar, M.H.; Wolmer Filho, L.A.F. e Siqueira, G.B.A.** (2009), A decision support system to evaluate gas pipeline risk in multiple dimensions. *Reliability, Risk, and Safety, Three Volume Set: Theory and Applications*, 67
- PETROBRAS** (2013), *Relatório de Sustentabilidade*. 192 p. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/sociedade-e-meio-ambiente/relatorio-de-sustentabilidade/>. Acesso em 20/01/2015.
- Mazzola, A** (1999), Thermal interaction analysis in pipeline systems - A case study. *Journal of loss prevention in the process industries* [0950-4230] vol:12 iss:6 pg:495 -505.
- SRA** (2015), *Society of Risk Analysis. Risk Analysis Glossary*. Disponível em: http://sra.org/sites/default/files/docs/SRA_Glossary.pdf. Acesso em 20/01/2015.