

AValiação de Resiliência em Regiões Vizinhas a Gasodutos de Gás Natural sob uma Perspectiva Multicritério

Francisco Filipe Cunha Lima Viana^{1a}, Marcelo Hazin Alencar^{2a}, Adiel Teixeira de Almeida^{3b}

^aGrupo de Pesquisa em Análise de Risco e Modelagem em Meio-ambiente, Ativos, Segurança, Operações e Natureza – REASON

^bCentro de Desenvolvimento em Sistemas de Informação e Decisão – CDSID

^{a,b}Universidade Federal de Pernambuco, Cx. Postal 7462, 50.630-970, Recife – Pernambuco – Brasil

¹ ffilipelima@ymail.com, ² marcelohazin@gmail.com, ³ rodrigo@cidsid.org.br,

⁴ almeida@cidsid.org.br

RESUMO

O gasoduto é uma infraestrutura fundamental para o transporte de produtos importantes para a sobrevivência das pessoas e o funcionamento de indústrias de bens de consumo de uma sociedade. Neste sentido, o conceito de resiliência tem sido aplicado neste tipo de sistema com o intuito de definir medidas que garantam a integridade física da rede e de todos os envolvidos no funcionamento do duto. Importantes estudos sobre resiliência de gasodutos têm explorado diferentes características dos estágios de resiliência (absorção, resposta e recuperação) e diferentes dimensões de desempenho como fornecimento, segurança, organização e resiliência social. Nesta perspectiva, os decisores envolvidos no processo de tomada de decisão de um gasoduto precisam definir as melhores estratégias para fortalecer o sistema dutoviário contra possíveis ameaças. Este artigo apresenta um modelo de decisão multicritério baseado no método FITradeoff para avaliar diferentes regiões de um gasoduto de acordo com estratégias que reforcem a resiliência da infraestrutura. Uma aplicação numérica ilustra a aplicabilidade do modelo para um gasoduto dividido em 8 regiões-alternativas. As regiões são avaliadas por meio de 9 critérios que seguem 3 objetivos principais de resiliência: garantir resiliência de segurança das pessoas, realizar resiliência organizacional e garantir resiliência de fornecimento. As contribuições deste artigo indicam uma abordagem gerencial adequada para formular estratégias que possam aumentar a resiliência do duto, atenuando as consequências negativas em caso de desastres que possam impactar o gasoduto, gerando profundas perdas a sociedade e ao meio ambiente.

PALAVRAS CHAVE. Resiliência, Multicritério, Gasodutos de Gás Natural, FITradeoff.

Tópicos (indique, em ordem de PRIORIDADE, o(s) tópico(s) de seu artigo)

1. EN&PG – PO na Área de Energia, Petróleo e Gás

2. ADM – Apoio à Decisão Multicritério

ABSTRACT

Gas pipeline is a fundamental infrastructure for the transport of products that are important for the survival of people and the functioning of consumer goods industries in a society. The concept of resilience has been applied to this type of system with the aim to define measures that guarantee the physical integrity of the network and of all those involved in the operation of the pipeline. Important studies on pipeline resilience have explored different characteristics of resilience stages (absorption, response and recovery) and different dimensions of performance such as Supply, Security, Organization and Social resilience. In this perspective, decision makers involved in the decision-making process of a gas pipeline need to define the best strategies to strengthen the pipeline system against possible threats. This article presents a multicriteria decision model based on the FITradeoff method to evaluate different regions of a gas pipeline according to strategies that reinforce the resilience of the infrastructure. A numerical application illustrates the

applicability of the model for a gas pipeline divided into 8 alternative regions. Regions are evaluated using 9 criteria that follow 3 key resilience objectives: ensure people security resiliency, achieve organizational resiliency, and ensure supply resiliency. The contributions of this article indicate a suitable management approach to formulate strategies that can increase the pipeline's resilience, mitigating the negative consequences in case of disasters that could impact the gas pipeline, causing profound losses to society and the environment.

KEYWORDS. Resilience. Multicriteria. Natural Gas Pipelines. FITradeoff.

1. Introdução

Considerando o conceito definido por [Aven 2017], a resiliência é um conceito fundamental relacionado com a capacidade de um sistema sustentar ou restaurar sua funcionalidade e desempenho após uma mudança do seu status quo. De forma semelhante, [Haimes 2009] define resiliência como: i) a habilidade do sistema absorver ataques externos; ii) a capacidade do sistema prever, reconhecer, antecipar e se defender de situações de riscos antes que consequências ocorram; iii) a habilidade de responder e adaptar-se tal que garanta-se que o sistema evite potenciais perdas; iv) o resultado de um sistema obtido pela capacidade de evitar, minimizar e se recuperar da ocorrência de consequências adversas; v) é um paradigma da gestão de segurança que foca em ajudar as pessoas a lidar com a complexidade de atingir o sucesso.

Dentre os diversos conceitos, a resiliência é geralmente definida com base em três etapas principais: absorção, resposta e recuperação [Yang et al. 2023]. De forma similar [Kammouh et al. 2020] desdobram métricas dos estágios de resiliência em três principais aspectos i) vulnerabilidade reduzida, referindo-se às ações de prevenção e mitigação que reduzem a vulnerabilidade; ii) robustez, em que se inclui a intensificação de mecanismos que visam aumentar a resiliência; iii) recuperabilidade, utiliza práticas de preparação para emergências e ações de recuperação. A concepção da resiliência para [Kammouh et al., 2020] é desenvolvida sob a perspectiva de prevenção pois evita a intensidade da consequência acidental. Isto significa que a priorização de ações também pode ser explorada sem considerar necessariamente a materialização de um acidente, tal como é interpretado com ações de recuperação.

Alguns trabalhos exploram diferentes abordagens para representar, por exemplo, o planejamento de atividades de recuperação para sistemas de energia elétrica e térmica [Sun et al., 2022], projetar estratégias de resposta emergencial contra desastres naturais [He et al., 2018] e crises de abastecimento de energia [Sesini et al., 2021]. Neste sentido, a análise da resiliência em gasodutos diz respeito ao processo de gestão de riscos ao qual envolve um sistema de planejamento, controle, monitoramento de condições de exposição do gasoduto, absorvendo, respondendo e recuperando-se de perigos. Assim, a importância da avaliação da resiliência em dutos de gás natural decorre da necessidade de prevenir a ocorrência de acidentes de extremas consequências, como incêndios e explosões, e caso ocorram, garantir a capacidade do sistema se reinstituir.

[Cimellaro et al. 2015] propuseram um índice de resiliência em função do tempo considerando o processo de recuperação de dutos de gás natural após um terremoto. Usando uma abordagem multicritério, [Rochas et al. 2015] expressam a resiliência de um duto em função do tempo e selecionam a estratégia de recuperação mais eficaz usando o método AHP. [Sesini et al. 2021] testam diferentes estratégias de resposta com um modelo de Programação Linear (PL) com foco em interrupções de choque da cadeia de fornecimento de gás natural (envolvendo extração, transporte, armazenamento e uso final de gás [Sesini et al., 2020]. [Sun et al. 2022] apresentaram uma Programação Linear Mista considerando vários estágios de resiliência em sistemas de energia elétrica e gás natural. [Aldarajee et al. 2020] introduzem uma resposta de emergência resolvendo modelos de LP para decidir planos de investimento ótimos de acordo com diferentes eventos desastrosos, otimizando custos, demandas e objetivos de resiliência. [Dell'Isola et al. 2020] simulam condições de falha na rede de gás avaliando estratégias de recuperação operacional para minimizar a ineficiência no fornecimento de gás em termos de usuários finais residenciais, tecnológicos e industriais. [He et al. 2018] minimizam o corte de carga de eletricidade e gás natural por meio de otimização robusta, identificando estratégias de fortalecimento para estratégias de recursos de resposta.

A perspectiva de explorar modelos determinísticos na seleção de estratégias é útil para o planejamento de ações preventivas e/ou mitigadoras. [Yang et al. 2023] propõem uma abordagem sistemática para quantificar a resiliência integrando formulações determinísticas e probabilísticas de resiliência em um sistema de rede de gás natural. No entanto, os trabalhos mencionados dão pouca atenção aos múltiplos critérios que podem surgir no processo de análise da resiliência. Neste sentido, [Thekdi e Santos 2019] cita a importância do uso de avaliações com múltiplas dimensões

em infraestruturas de transporte devido a existência dos vários estágios e diferentes objetivos atrelados a tomada de decisão.

A exploração de múltiplos aspectos da resiliência na tomada de decisão contribui para a formulação de estratégias relacionadas a diferentes formas de fortalecer um sistema contra um ataque, seja na preparação para ele, seja na recuperação dele. Assim, explorar a capacidade de um sistema de gasodutos lidar com cenários de perigo ajuda as instituições a reduzir os riscos inerentes a consequências negativas. A abordagem multicritério tem sido utilizada em problemas que envolvem o processo de gerenciamento de riscos em gasodutos de gás natural [Viana et al., 2022]. Portanto, este artigo apresenta um modelo de decisão multicritério para avaliar a resiliência de gasodutos de gás natural utilizando o método FITradeoff.

Para esta abordagem, o decisor (DM) define uma estratégia para alcançar objetivos da resiliência do sistema relacionados à segurança, organização e fornecimento. Ele explora os objetivos que devem fortalecer os sistemas de gasoduto em termos de absorção, resposta e recuperação de eventos por meio de critérios relacionados aos objetivos, obtendo assim uma ordenação final das regiões do gasoduto. Sendo assim, este trabalho suporta o processo formulação de políticas que viabilizem o aumento da resiliência de gasodutos, e consequentemente, proteja as pessoas, o meio ambiente e a sociedade.

2. Tomada de Decisão Multicritério e Avaliação de Resiliência para Gasodutos de Gás Natural

O processo de tomada de decisão multicritério tem como base um conjunto A de m alternativas $A = \{a_1, a_2 \dots a_m\}$ e G o conjunto de n critérios que descrevem os valores de cada alternativa. Os modelos MCDM/A que seguem os pressupostos da Teoria do Valor Multiatributo (*Multiattribute Value Theory* – MAVT) associam uma função valor $v_j(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ para cada alternativa j em relação ao critério i . Com esta função o DM pode comparar os valores das alternativas em termos de preferência estrita ($>$) ou indiferenças (\sim), onde $x_a > x_b$ quando $v(x_a) > v(x_b)$, e $x_a \sim x_b$ quando $v(x_a) = v(x_b)$ [Keeney & Raiffa, 1979]. Para possibilitar esta comparação, o modelo aditivo da função de valor [de Almeida et al., 2015] fornece um valor agregado para cada alternativa usando uma combinação dos valores e constantes de escala do critério w_i , conforme a Eq. 1:

$$v(x_j) = \sum_{i=1}^n w_i v(x_{i,j}) \quad (1)$$

Uma discussão importante ao avaliar múltiplas alternativas e múltiplos critérios é a definição da constante de escala [Weber e Borchering, 1993]. No procedimento de *Tradeoff* [Keeney e Raiffa, 1979], o DM fornece informações de preferência levando em consideração os níveis de critério de cada alternativa com o objetivo de estabelecer pontos exatos de indiferença. No entanto, alcançar níveis exatos de indiferença é cognitivamente demandante e pode consumir muito tempo durante a avaliação, causando possíveis inconsistências no modelo de decisão [Weber e Borchering, 1993]. O método FITradeoff [de Almeida et al., 2016] explorar um procedimento de elicitación no qual o DM explora informações parciais sobre o nível de suas preferências para estimar o valor pesos w_i . Estas informações são definidas na forma de desigualdades, base para estruturação de um modelo de programação linear (Eq. 2 a Eq.7). No caso de ranqueamento de alternativas [Frej et al., 2019], o FITradeoff faz uma comparação entre pares de alternativas utilizando o conceito de dominância, expressa pela função objetivo na Eq. 2. As restrições expressas na Eq. 3 a Eq. 5 representam valores de preferência entre os critérios estabelecido pelo DM por meio de um procedimento flexível e interativo auxiliado pelo Sistema de Apoio à Decisão (SAD) do FITradeoff, disponível para download em <http://fitradeoff.org/>.

$$\text{Max } D(a_a, a_z) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(x_{ia}) - \sum_{i=1}^n k_i v_i(x_{iz}) \quad (2)$$

s.t.

$$k_1 > k_2 > \dots > k_n \quad (3)$$

$$k_i v_i(x'_i) \geq k_{i+1} \quad (4)$$

$$k_i v_i(x''_i) \leq k_{i+1} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n k_i = 1 \quad (6)$$

$$k_i \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

Quanto a ocorrência de acidentes em gasodutos, observa-se que os mesmos ocorrem em escala catastrófica. No entanto, caso a estrutura seja resiliente para enfrentar o perigo, respondendo e se recuperando adequadamente dos ataques, os danos podem ser reduzidos. A avaliação da resiliência em gasodutos tem sido explorada em diferentes perspectivas, seja focando nos estágios de resiliência ou nos desempenhos do sistema.

Avaliação Multicritério com FITradeoff

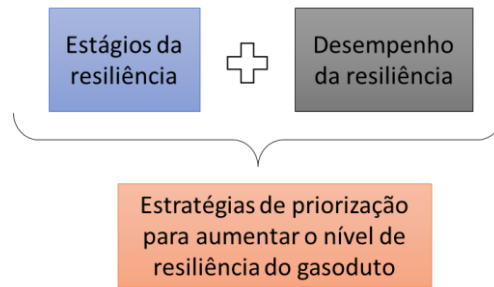


Figura 1 – Avaliação Multicritério para priorização de estratégias de priorização de gasodutos de gás natural

No que concerne aos estágios da resiliência, [Sesini et al. 2020] exploram o fornecimento de gás diante de cenários de segurança energética em termos de adequação, robustez e efeitos de decisões. A decisão envolvida neste caso diz respeito a exploração de estratégias operacionais com o intuito de armazenar gás e sustentar, ou responder, os impactos de uma crise. Neste sentido, [Aldarajee et al. 2020] introduzem uma abordagem de Programação Linear para respostas de emergência resolvendo modelos que definem planos de investimento ótimos de acordo com eventos de desastres, objetivos de resiliência, restrições de custos e demandas. [Dell'Isola et al. 2020] simulam condições de falha na rede de gás avaliando estratégias de recuperação operacional para minimizar a ineficiência no fornecimento de gás para usuários finais residenciais, tecnológicos e industriais.

[Francis e Bekera 2014] mencionam algumas dimensões de desempenho da resiliência consideradas essenciais para lidar com infraestruturas, tais como critérios de segurança, organização, sistemas socioecológicos, econômicos e sociais. [Thekdi e Santos 2019] também introduzem alguns critérios de desempenho de resiliência para sistemas de infraestrutura relacionados à função, capacidade, usuários, partes interessadas, social, sustentabilidade, saúde e segurança, economia e condições de transporte.

Neste trabalho apresenta-se uma avaliação de resiliência baseada em uma abordagem multicritério onde há um conjunto de objetivos conflitantes relacionados ao desempenho da resiliência. Para o caso de gasodutos, os objetivos da resiliência são definidos em função da Segurança, Organização e Fornecimento (Tabela 1).

O objetivo “Garantir a resiliência da segurança das pessoas (O1)” diz respeito a aspectos de resiliência relacionados à absorção, quando um acidente tem sua magnitude reduzida em relação a proteção das pessoas; e à recuperação, quando um acidente ocorre e o sistema de emergência é

eficiente para atender o trato das pessoas. O objetivo “Performar resiliência organizacional (O2)” é inerente a processos de gestão que auxiliem o sistema a absorver possível impactos de forma mais branda, reduzindo assim a vulnerabilidade do local, ou suportem o processo de recuperação. O objetivo “Garantir a resiliência do fornecimento (O3)” indica os mecanismos relacionados ao atendimento dos clientes em casos de interrupção da rede, e/ou recuperação de danos estruturais da rede e reestabelecimento do fornecimento.

Objetivos	Notação	Critério	Unidade	Preferência
Garantir a resiliência da segurança das pessoas (O1)	C1	Distância crítica para as pessoas	m	Max
	C2	Nível de cultura de segurança	-	Max
	C3	Unidades de emergência	Und	Max
Performar resiliência organizacional (O2)	C4	Tempo de intervalo de inspeção	Dias	Min
	C5	Quantidade de operadores disponível	Und	Max
	C6	Orçamento para mitigação emergencial	R\$	Max
	C7	Tempo para apagamento de chamadas	Horas	Min
Garantir a resiliência do fornecimento (O3)	C8	Armazenamento para usuários industriais e comerciais	m ³	Max
	C9	Armazenamento para usuários domésticos	m ³	Max

Tabela 1 – Objetivos e critérios de resiliência de gasodutos

O problema de decisão deste estudo visa identificar as regiões com menor valor agregado considerando os objetivos de desempenho da resiliência e priorizá-las no planejamento de mitigação do duto. Neste sentido, considera-se que a estratégia para mitigação segue uma ordem a qual é visada pelo decisor para alocação de recursos, definida por meio do modelo multicritério FITradeoff para ordenação [Frej et al., 2019].

Vale ressaltar que apesar do perigo não ser explorado neste estudo, a perspectiva de mitigação para esta abordagem leva em conta o perigo generalizado iminente como um fator da priorização, ou seja, a preferência é explorada pela concepção de um acidente e não pela frequência dele.

Os critérios estabelecidos na Tabela 1 expressam métricas claras do desempenho da resiliência em cada região do gasoduto. Para C1, a distância crítica deve ser minimizada [Jo & Ahn 2002], pois quanto menos pessoas na região do duto, menor a consequência em caso de acidentes. Para C2, o nível de cultura segue uma escala construída por [Iqbal et al. 2019] denominada em função de avaliações, monitoramento e práticas de melhoria em segurança. O critério C3 representa a quantidade de hospitais ou instituições de apoio que possam auxiliar em situações de emergência, o que difere de região para região do duto. O critério C4 avalia um processo inerente a identificação de inconformidades ao longo do duto por meio de inspeções. Quanto maior a frequência de inspeções, menor o tempo entre inspeções, e menor o tempo de intervalo. Considera-se que quanto menor o tempo, maior a resiliência, inibindo a ocorrência de acidentes. Os critérios C5 e C6 representam a quantidade de recurso alocada para atender as regiões em casos emergenciais de acidentes, ou seja, quanto maior a disponibilidade maior a resiliência da região para lidar com um evento de desastre [Bruneau et al. 2003]. O tempo de apagamento das chamadas envolve uma estimativa relacionada ao processo operacional de inibição das chamadas em casos de explosão e outros cenários acidentais na região do gasoduto [Dadashzadeh et al. 2018], [Landucci et al. 2015]. No caso dos critérios C8 e C9, a quantidade de armazenamento de gás representa a garantia no funcionamento do serviço, ou seja, do fornecimento aos usuários da rede. Neste caso o decisor difere sua preferência em relação ao armazenamento para cliente industriais, comerciais e domésticos.

3. Aplicação numérica

Uma aplicação numérica é apresentada com base nas informações de [Viana et al. 2021]. O gasoduto deste estudo está dividido em 8 regiões, as quais são avaliadas de acordo com os critérios de resiliência apresentados anteriormente.

Regiões do gasoduto	Critérios								
	C1 (m)	C2	C3 (#hospitais)	C4 (dias)	C5 (#operadores)	C6 (R\$)	C7 (horas)	C8 (m³)	C9 (m³)
R1	10	2	0	15	12	200.000,00	10,1	110	21,3
R2	8,4	7	0	23	15	250.000,00	2,5	120	24,5
R4	12	3	2	10	8	180.000,00	1,2	154	22,3
R5	2,1	3	1	15	28	110.000,00	5,4	87	21,9
R6	0	5	0	20	22	210.000,00	2,8	95	30,7
R7	11	2	3	23	20	510.000,00	12,1	21	15,8
R8	3	4	1	7	16	150.000,00	7,4	12	20,4
R9	12,3	6	0	28	18	180.000,00	1,6	65	22,75

Tabela 2 – Matriz de decisão

Para os critérios C4 e C7 a avaliação intracritério foi elicitada no módulo do FITradeoff devido a característica não linear de preferência. Esta etapa consiste em determinar a função valor marginal dos critérios do decisor em relação aos níveis das consequências das regiões do gasoduto. Por meio da comparação de pares de intervalo de valores, o decisor fornece preferências estritas entre os intervalos.

A Figura 2 demonstra a avaliação intracritério para o critério C4 (Tempo de intervalo de inspeção). A função valor marginal deste critério reflete a preferência de intervalos menores de inspeção em relação a intervalos maiores, pois quanto maior o intervalo, menor a chance de identificar inconformidades no sistema do gasoduto.

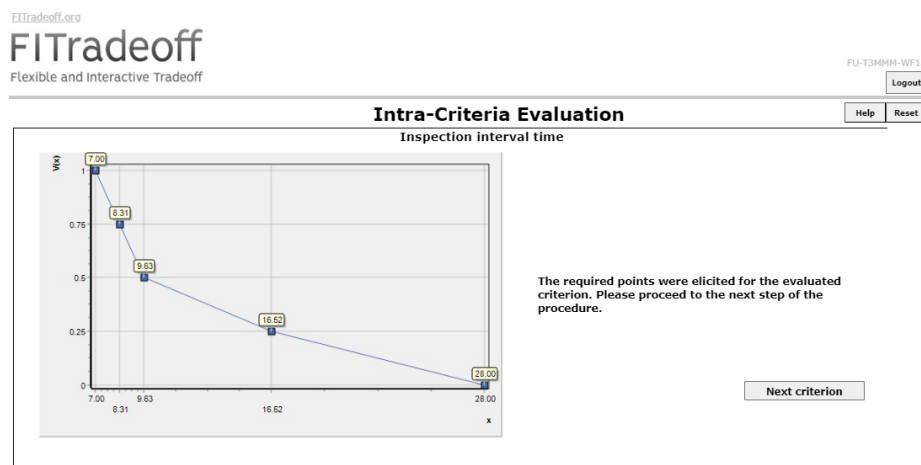


Figura 2 – Avaliação Intracritério do Tempo de intervalo de inspeção (dias por $v(x)$)

Similarmente, a avaliação intracritério é realizada para o critério C7 (Tempo para apagamento de chamadas), que é estabelecido por meio da comparação de intervalos de redução no tempo de apagamento das chamadas. As funções valor dos critérios C1, C2, C3, C5, C6, C8 e C9 foram definidos como linear.

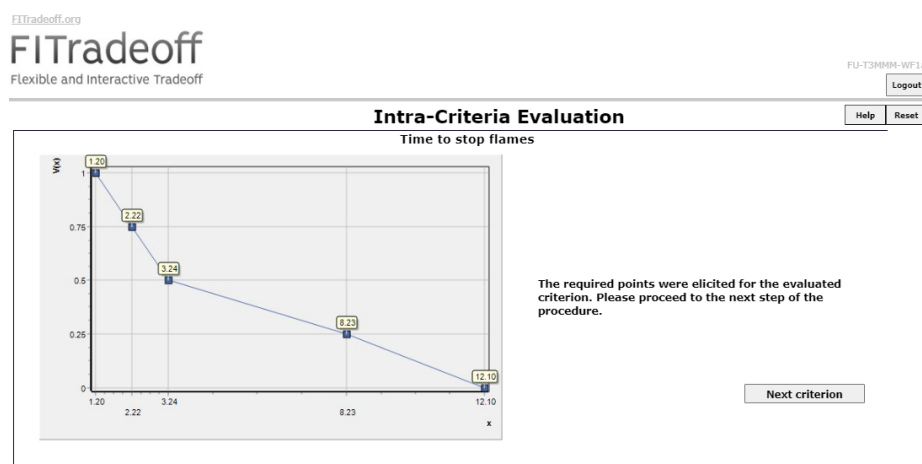


Figura 3 – Avaliação Intracritério do Tempo para apagamento de chamas (dias por $v(x)$)

A multidimensionalidade da resiliência permite que o decisor estabeleça uma perspectiva de decisão buscando estratégias que fortaleçam a resiliência do gasoduto por meio do alcance dos objetivos. Por exemplo, se o decisor priorizar o objetivo O1 (Garantir a resiliência da segurança das pessoas) os valores das constantes de escalas de C1, C2 e C3 serão maiores que os critérios dos outros objetivos. O decisor deste estudo é um gerente responsável pelo processo de gerenciamento de riscos na empresa do duto.

Para esta aplicação, a ordenação dos objetivos da resiliência é interpretada como uma premissa de “sub-ordenação” dos critérios. Em outras palavras, o decisor estabelece a ordenação dos objetivos sob a perspectiva de resiliência alta para regiões, o que significa determinar uma estratégia para aumentar o nível de resiliência daquelas regiões que não estão em um nível alto em relação aos objetivos do decisor. Sendo assim, os critérios representam um conjunto de possíveis medidas a serem melhoradas.

Esta definição é expressa por meio do estabelecimento de preferências entre os objetivos. Neste caso, avaliam-se relativamente os objetivos da seguinte forma: “Garantir a resiliência da segurança das pessoas (O1)” > “Performar resiliência organizacional (O2)” > “Garantir a resiliência do fornecimento (O3)”. Esta ordenação indica a importância em estabelecer medidas que garantam a Resiliência da Segurança em primeira ordem, a Resiliência Organizacional em segundo, e a Resiliência do Fornecimento em terceira ordem. Consequentemente, a ordenação dos critérios é definida como $w_1 > w_2 > w_3 > w_4 > w_5 > w_6 > w_7 > w_8 > w_9$. Sendo assim, o SAD do FITradeoff permite que o decisor avalie o desempenho dos critérios comparando alternativas hipotéticas através da definição de preferências e não preferências (Figura 4), obtendo assim as restrições das Eq. 4 e 5. Para mais detalhes do processo de eliciação de preferências, consultar [de Almeida et al., 2016].

FITradeoff
Flexible and Interactive Tradeoff

Ranking of criteria scaling constants
By pairwise comparison
Answer the following questions by choosing consequences A or B

Consequences

Consequence A

Criteria	Worst	Best
Critic	(W1) 12.3	(B1) 12.3
Safety	(W2) 7	(B2) 7
Support	(W3) 9	(B3) 9
Maint	(W4) 544	(B4) 254
Workfo	(W5) 8	(B5) 28
Mitiga	(W6) 110	(B6) 120
Time t	(W7) 12.1	(B7) 1.2
Storage	(W8) 12	(B8) 154
Storage2	(W9) 15.8	(B9) 30.7

Consequence B

Criteria	Worst	Best
Critic	(W1) 12.3	(B1) 12.3
Safety	(W2) 7	(B2) 7
Support	(W3) 9	(B3) 9
Maint	(W4) 544	(B4) 254
Workfo	(W5) 8	(B5) 28
Mitiga	(W6) 110	(B6) 120
Time t	(W7) 12.1	(B7) 1.2
Storage	(W8) 12	(B8) 154
Storage2	(W9) 15.8	(B9) 30.7

Which consequence do you prefer?

☒ Consequence A
☐ Consequence B
☐ Indifferent

Restart OK

Legend:

- Critic-Critical distance to people
- Safety-Safety culture
- Support-Support emergency organ
- Maint-Maintenance interval time
- Workfo-Workforce availability
- Mitiga-Mitigation budget
- Time t-Time to stop flames
- Storage-Storage for industry

Chosen order of scaling constants:

Continue

W1 is the worst outcome of criterion C1
 B1 is the best outcome of criterion C1

Alternatively the ranking of scaling constants can be done by Overall evaluation.

Figura 4 – Elicitação de preferências da avaliação de resiliência de gasodutos de gás natural

A Figura 5 mostra o resultado da ordenação das regiões em ordem crescente de resiliência. No entanto, a priorização das regiões é estabelecida em uma ordem decrescente, pois visa-se melhorar a resiliência daquelas regiões avaliadas com nível mais baixo de acordo com os múltiplos critérios adotados. Nesse caso, a Região 6 é a região mais resiliente do gasoduto. Em contrapartida, a Região 8 foi classificada na última posição, ou seja, de acordo com a estratégia definida na ordenação dos objetivos, deve-se focar em aumentar o valor de preferência desta Região em função dos critérios adotados.

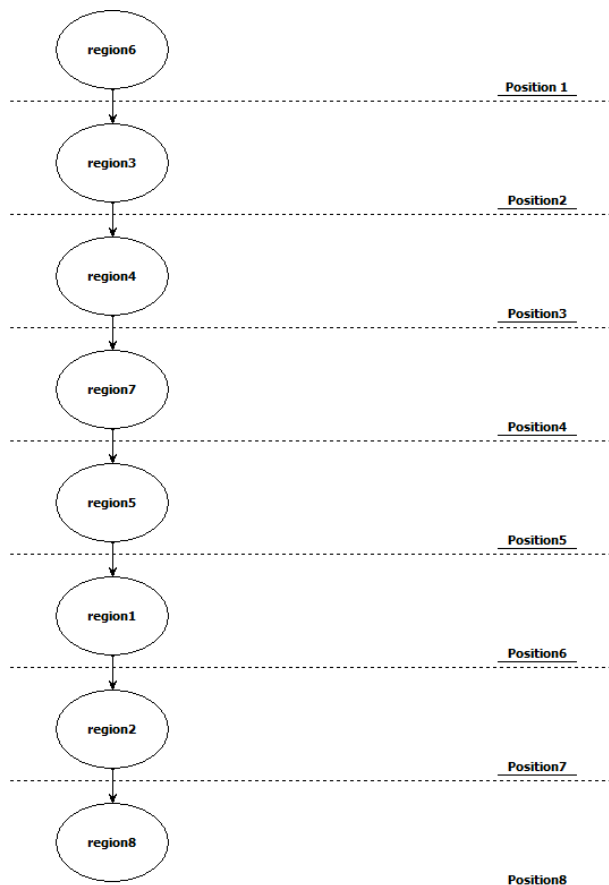


Figura 5 – Resultado do ranking em ordem decrescente de prioridade

O resultado da ordenação mostra que é possível adotar medidas de aumento da resiliência para cada região do gasoduto de tal forma que os critérios avaliados são os próprios direcionadores para o planejamento, ou seja, por meio da revisão de medidas que fortaleçam o sistema seguindo a concepção de absorção, resposta ou recuperação. Por exemplo, de acordo com a Tabela 1, a Região 8 apresenta 3 metros de distância crítica para as pessoas. Neste caso, o decisor deve avaliar medidas de prevenção que foque em aumentar esta distância e garanta a segurança das pessoas.

4. Conclusão

A resiliência em sistemas condicionados a riscos de segurança é um conceito utilizado para avaliar diferentes aspectos de preparação e mitigação accidental. Na literatura, as avaliações de resiliência são direcionadas a partir dos três principais estágios da resiliência: absorção, quando o sistema consegue manter seu funcionamento mesmo com o acidente; resposta, quando o sistema tem a capacidade de se defender de um evento accidental e manter seu funcionamento; e recuperação, que é a capacidade do sistema se restaurar mesmo depois do evento accidental. Estes estágios são definidos em consonância a medidas de performance da resiliência, interpretadas neste trabalho como objetivos, tal como Segurança, Organização e Fornecimento. Para este estudo, estas medidas foram avaliadas de acordo com uma abordagem multicritério por meio do método FITradeoff. Os resultados mostram que é possível estabelecer estratégias para aumentar o nível de resiliência de regiões de gasodutos de gás natural por meio de avaliações dos critérios, estabelecendo uma visão contundente das preferências de decisão e determinando uma ordenação que auxilie o processo de decisão quando o elemento de resiliência precise ser levado em consideração em sistemas de infraestruturas. Vale ressaltar que esta não é uma avaliação de riscos e não envolve aspectos relacionados a frequência e consequência, mas esta avaliação atua diretamente no processo de redução e eliminação dos riscos. Desta forma, este trabalho contribui para estruturação de problemas de decisão envolvendo análise de resiliência que exploram conceitos de preparação, robustez e recuperação de acidentes, ou seja, todos aspectos que envolvem a proteção do sistema de produção ou serviço.

Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), aos quais os autores são gratos.

Referências

- Aldarajee, A. H. M., Hosseinian, S. H., & Vahidi, B. (2020). A secure tri-level planner-disaster-risk-averse replanner model for enhancing the resilience of energy systems. *Energy*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117916>.
- Aven, T. (2017). How some types of risk assessments can support resilience analysis and management. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 536-543.
- Bruneau, M., & Reinhorn, A. (2007). Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities. *Earthquake Spectra*, 23(1), 41-62. <https://doi.org/10.1193/1.2431396>.
- Cimellaro, G. P., Villa, O., & Bruneau, M. (2015). Resilience-Based Design of Natural Gas Distribution Networks. *Journal of Infrastructure Systems*, 21(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000204](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000204).

Dadashzadeh, M., Kashkarov, S., Makarov, D., & Molkov, V. (2018). Risk assessment methodology for onboard hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(12), 6462–6475. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.195>.

de Almeida, A. T., Cavalcante, C. A. V., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., de Almeida-Filho, A. T., & Garcez, T. V. (2015). *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis* (Internatio). Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8>.

de Almeida, A. T., de Almeida, J. A., Costa, A. P. C. S., & de Almeida-Filho, A. T. (2016). A new method for elicitation of criteria weights in additive models: Flexible and interactive tradeoff. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 179–191. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.058>.

Dell’Isola, M., Ficco, G., Lavalle, L., Moretti, L., Tofani, A., & Zuena, F. (2020). A resilience assessment simulation tool for distribution gas networks. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103680>.

Francis, R., & Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. In *Reliability Engineering and System Safety* (Vol. 121, pp. 90–103). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.07.004>.

Frej, E. A., de Almeida, A. T., & Costa, A. P. C. S. (2019). Using data visualization for ranking alternatives with partial information and interactive tradeoff elicitation. *Operational Research*, 19(4), 909–931. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-00444-2>.

Haimes, Y. Y. (2009). On the definition of resilience in systems. In *Risk Analysis* (Vol. 29, Issue 4, pp. 498–501). <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01216.x>.

He, C., Dai, C., Wu, L., & Liu, T. (2018). Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(5), 5787–5798. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2820383>.

Iqbal, H., Waheed, B., Haider, H., Tesfamariam, S., & Sadiq, R. (2019). Mapping safety culture attributes with integrity management program to achieve assessment goals: A framework for oil and gas pipelines industry. *Journal of Safety Research*, 68, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.12.010>.

Jo, Y. D., & Ahn, B. J. (2002). Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(3), 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00007-4).

Kammouh, O., Gardoni, P., & Cimellaro, G. P. (2020). Probabilistic framework to evaluate the resilience of engineering systems using Bayesian and dynamic Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106813>.

Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1979). Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. In *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* (Vol. 9, Issue 7). <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310245>

Landucci, G., Argenti, F., Tugnoli, A., & Cozzani, V. (2015). Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire. *Reliability Engineering and System Safety*, 143, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.023>.

Rochas, C., Kuzņecova, T., & Romagnoli, F. (2015). The concept of the system resilience within the infrastructure dimension: Application to a Latvian case. *Journal of Cleaner Production*, 88, 358–368. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.081>.

Sesini, M., Giarola, S., & Hawkes, A. D. (2020). The impact of liquefied natural gas and storage on the EU natural gas infrastructure resilience. *Energy*, 209, 118367. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118367>.

Sesini, M., Giarola, S., & Hawkes, A. D. (2021). Strategic natural gas storage coordination among EU member states in response to disruption in the trans Austria gas pipeline: A stochastic approach to solidarity. *Energy*, 235. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121426>.

Sun, Q., Wu, Z., Ma, Z., Gu, W., Zhang, X. P., Lu, Y., & Liu, P. (2022). Resilience enhancement strategy for multi-energy systems considering multi-stage recovery process and multi-energy coordination. *Energy*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122834>.

Thekdi, S. A., & Santos, J. (2019). Decision-Making Analytics Using Plural Resilience Parameters for Adaptive Management of Complex Systems. *Risk Analysis*, 39(4), 871–889. <https://doi.org/10.1111/risa.13209>.

Viana, F. F. C. L., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., & de Almeida, A. T. (2021). Multidimensional risk classification with global sensitivity analysis to support planning operations in a transportation network of natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 96(June), 104318. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104318>.

Viana, F. F. C. L., Casado, R. S. G. R., da Silva, L. B. L., Alencar, M. H., Ferreira, R. J. P., & de Almeida, A. T. (2022). A hybrid multicriteria decision model for selecting a portfolio of risk-based maintenance actions in natural gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 103, 104655.

Weber, M., & Borcharding, K. (1993). Behavioral influences on weight judgments in multiattribute decision making. *European Journal of Operational Research*, 67(1), 1–12. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90318-H](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90318-H).

Yang, Z., Su, H., Du, X., Zio, E., Xiang, Q., Peng, S., Fan, L., Faber, M. H., & Zhang, J. (2023). Supply resilience assessment of natural gas pipeline network systems. *Journal of Cleaner Production*, 385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135654>.