Gestão:

Reunião de Acompanhamento
e Avaliação - RAA 2026

AVALIAÇÃO DE RESILIÊNCIA DE SISTEMAS DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL POR MEIO DE SIMULAÇÕES DE MONTE CARLO

Nunes, L. M. [1]; Nascimento, N. [2] ; Matelli, J. A. [2].

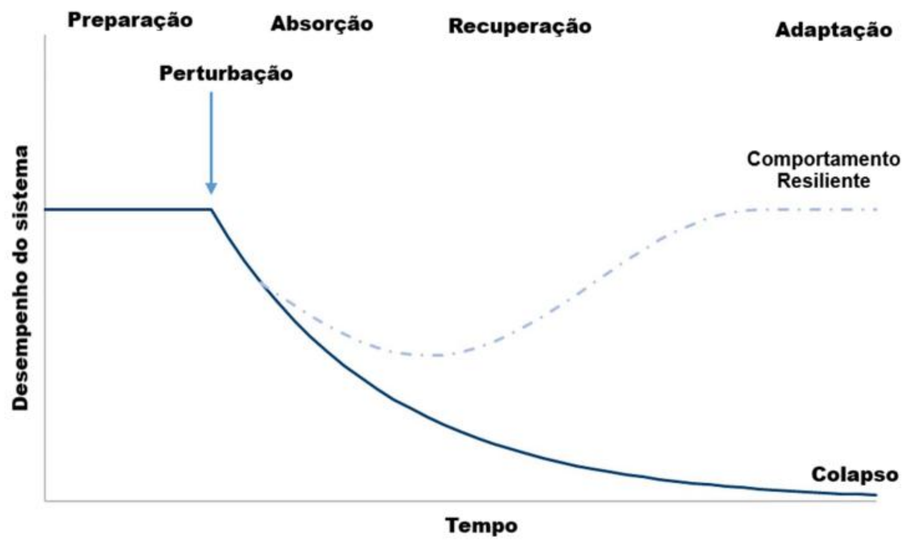
[1]Bolsista (MSc) do PRH 34/UNESP, Pós Graduação em Engenharia, FEG/UNESP, Guaratinguetá-SP. E-mail: l.nunes@unesp.br

[2]Docentes da FEG/UNESP, Guaratinguetá-SP. E-mail: jose.a.matelli@unesp.br; nazem.nascimento@unesp.br.

1. Introdução/Motivação

O gás natural possui papel relevante na matriz energética brasileira, com aplicações industriais e na geração de energia elétrica. Entretanto, a infraestrutura de transporte apresenta limitações estruturais e concentração significativa na região costeira. Além disso, falhas em componentes da rede podem comprometer a continuidade do fornecimento. Nesse contexto, a avaliação da resiliência permite investigar a capacidade dos sistemas de manter sua operação e se recuperar diante de perturbações.

Figura 1 - Representação conceitual do comportamento de um sistema diante de uma perturbação



Fonte: Adaptado de Jesse, Kramer e Koning (2024)

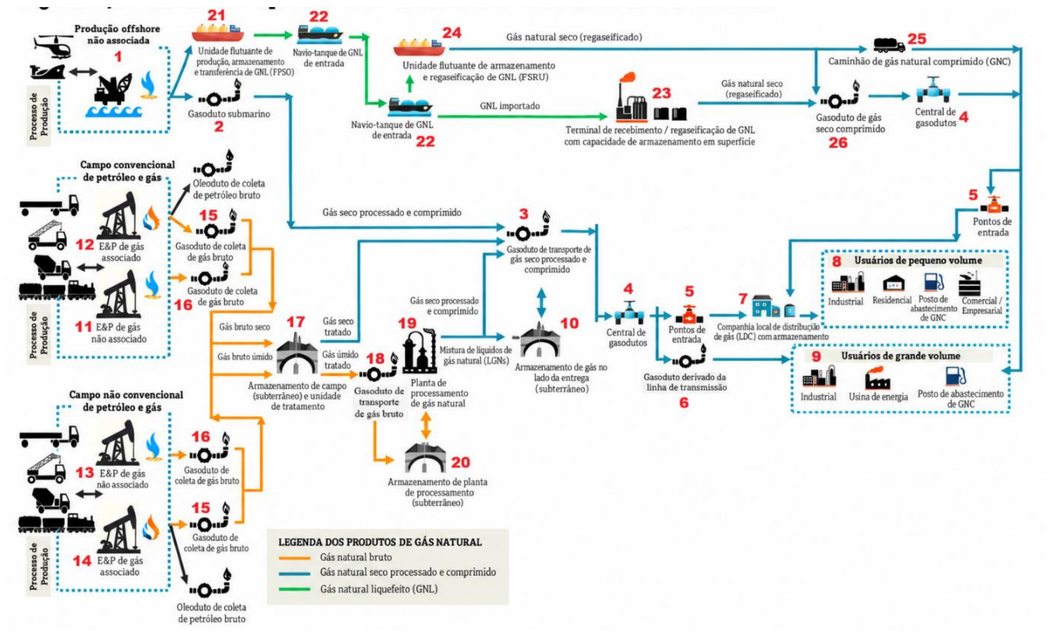
2. Objetivos

Avaliar e comparar a resiliência de diferentes configurações de sistemas de transporte de gás natural por meio de simulações de Monte Carlo, considerando falhas, propagação de indisponibilidades, redundâncias funcionais e processos de recuperação.

3. Modelos

Foram consideradas quatro configurações de transporte de gás natural, adaptadas do diagrama proposto por Tracey e Ruamsook (2015). Os modelos representam alternativas baseadas no transporte de gás natural processado e liquefeito, exemplificado na Figura 2. Os dois últimos modelos consideram a implementação de uma rota adicional com a tecnologia de estações de liquefação flutuantes.

Figura 2 – Exemplo de modelo para o transporte de gás



Fonte: Adaptado de Tracey e Ruamsook (2015)

4. Procedimento

A pesquisa é desenvolvida com base no método proposto por Silva e Matelli (2021), onde o trabalho original desenvolveu o procedimento de avaliação de resiliência para sistemas de cogeração de energia. Deste modo, está sendo realizada uma adaptação deste método para aplicá-lo aos sistemas de transporte de gás natural.

O primeiro passo então é realizar a modelagem das configurações que serão analisadas. Os autores propõem uma planilha de entrada de dados para realizar a modelagem. A Figura 3 representa um exemplo dessa modelagem para configuração apresentada na Figura 2.

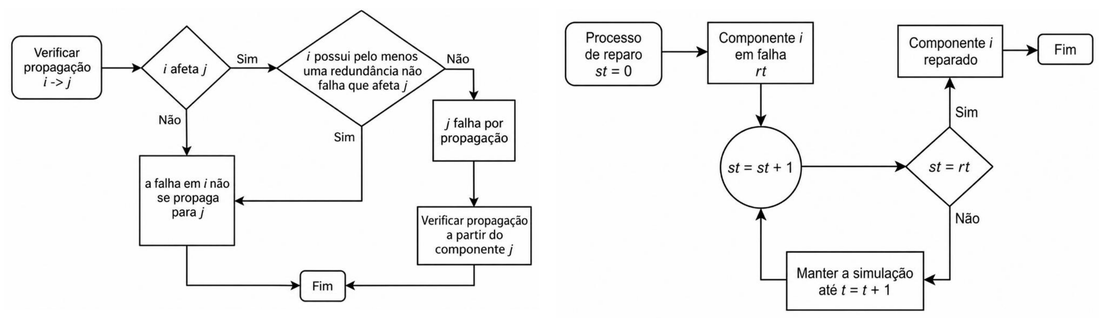
Figura 3 – Planilha de entrada de dados para o modelo

C#	Type	Affects	Redundant	AffectedBy	Function	AverageRepairTime
1	Produção offshore não associada	2_21	0	0		40
2	Gasoduto submarino	3	10_17_19	1		40
3	Gasoduto de transporte de gás seco processado e comprimido	4	26	2_10_17_19		40
4	Central de gasodutos	5_6_9	25	3_26		40
5	Pontos de entrada	7	0	4_25		40
6	Gasoduto derivado da linha de transmissão	9	4_25	4		40
7	Companhia local de distribuição de gás (LDC) com armazenamento	8	0	5		40
8	Usuários de pequeno volume	0	0	7	gas	40
9	Usuários de grande volume	0	0	4_6_25	gas	40
10	Armazenamento de gás no lado da entrega (subterrâneo)	3	2_17_19	19		40
11	E&P convencional de gás não associado	16	13	0		40
12	E&P convencional de gás associado	15	14	0		40
13	E&P não convencional de gás não associado	16	11	0		40
14	E&P não convencional de gás associado	15	12	0		40
15	Gasoduto de coleta de gás bruto associado	17	16	12_14		40
16	Gasoduto de coleta de gás bruto não associado	17	15	11_13		40
17	Armazenamento de campo (subterrâneo) e unidade de tratamento	3_18	2	15_16		40
18	Gasoduto de trasporte de gás bruto	19_20	0	17		40
19	Planta de processamento de gás natural	3_10	2_17	18_20		40
20	Armazenamento de planta de processamento (subterrâneo)	19	18	18		40
21	Unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de GNL (FPSO)	22	0	1		40
22	Navio-tanque de GNL de entrada	23_24	0	21		40
23	Terminal de recebimento / regaseificação de GNL com armazenamento	26	24	22		40
24	Unidade flutuante de armazenamento e regaseificação de GNL (FSRU)	25_26	23	22		40
25	Caminhão de gás natural comprimido (GNC)	5_9	4_6	24		40
26	Gasoduto de gás seco comprimido	4	3	23_24		40

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Silva e Matelli (2021)

O método utiliza duas lógicas principais para seu funcionamento, uma para a propagação de uma falha e outra para a recuperação de um componete. Ambas as lógicas estão descritas nos fluxogramas presentes na Figura 4. Além disso, durante a execução das simulações, o sistema pode operar em quatro estados diferentes: normal, resiliente, estagnado e falho.

Figura 4 – Fluxogramas das lógicas de funcionamento



Fonte: Adaptado de Silva e Matelli (2021)

5. Resultados

Utilizando então parâmetros homogêneos para realizar as simulações de Monte Carlo e, a partir de seus resultados, é possível calcular as métricas de resiliência propostas no procedimento de Silva e Matelli (2021). A Tabela 1 contém a diferença percentual entre as métricas calculadas para as configurações sem a rota alternativa com as métricas dos modelos considerando a rota das estações flutuantes de liquefação.

Tabela 1 – Variação percentual das métricas com a inclusão das rotas alternativas

Métricas	Modelo 1→ Modelo 3	Modelo 2→ Modelo 4
i. Probabilidade de operação resiliente (p_r)	+30,34%	+11,32%
ii. Tempo de operação resiliente ($\bar{r}$)	+39,63%	+12,11%
iii. Tempo até falha ($\bar{f}$)	+25,73%	+21,40%
iv. Probabilidade de falha (p_f)	−71,09%	−63,51%
v. Índice de resiliência normalizado (ρ)	+12,79%	+5,16%
vi. Probabilidade de recuperação do sistema (p_d)	+7,99%	−2,29%
vii. Relação entre operação resiliente e estagnada (θ)	+299,74%	+192,60%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

6. Conclusões

A adaptação do método para aplicações em sistemas de transporte de gás natural se mostrou consistente, representando a direcionalidade de fluxo e simulação de falhas. Além disso, os resultados obtidos com a adição da rota alternativa indicaram um aumento nas métricas de resiliência.

Referências

JESSE, BJ.; KRAMER, G. J.; KONING, V. Characterization of necessary elements for a definition of resilience for the energy system. Energy, Sustainability and Society, Berlin, v. 14, art. 46, 2024.

SILVA, F. S.; MATELLI, J. A. Resilience in cogeneration systems: Metrics for evaluation and influence of design aspects. Reliability Engineering & System Safety, v. 212, art. 107444, 2021.

TRACEY, S.; RUAMSOOK, K. The natural gas supply chain: an integrated process framework. Center for Supply Chain Research, The Pennsylvania State University, 2015.