



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 4, p. 1–12  
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n4.p1-12>

## Análise de risco do sistema de regeneração de MEG em unidades FPSO: aplicação do método Bowtie

### *Risk analysis of the MEG regeneration system in FPSO units: application of the Bowtie method*

Marcella Vicente Quijo<sup>1</sup>, Yvan Jesus Olortiga Asencios<sup>2</sup>, Luiza Helena da Silva Martins<sup>3</sup>, Andrea Komesu<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Aluna de graduação em Engenharia de Petróleo, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, campus Baixada Santista, SP, Brasil

<sup>2</sup> Professores do Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP, campus Baixada Santista, SP, Brasil

<sup>3</sup> Professora do Instituto de Saúde e Produção Animal, Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA, PA, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: andrea.komesu@unifesp.br

Received: 5 December 2025 | Accepted: 20 December 2025 | Published online: 24 December 2025

**Resumo:** O petróleo e o gás natural são as principais fontes de energia utilizadas no mundo, sendo essenciais para transporte, geração de eletricidade e aquecimento. A produção *offshore* tem se expandido ao longo das décadas, impulsionada pela busca por novas reservas e avanços tecnológicos. Nesse contexto, as plataformas do tipo FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) desempenham um papel fundamental, permitindo a extração, processamento e armazenamento de petróleo e gás em áreas afastadas da costa. Um dos desafios operacionais nessas unidades é a formação de hidratos, que podem bloquear as linhas de produção. Para evitar esse problema, utiliza-se o Monoetileno Glicol (MEG), um agente que reduz a formação dessas estruturas e pode ser regenerado e reutilizado, tornando o processo mais eficiente. O sistema de regeneração do MEG envolve sua separação da água e de impurezas em uma coluna de destilação, garantindo sua reutilização no ciclo produtivo. A segurança nas operações *offshore* é essencial, pois as atividades envolvem riscos significativos devido às condições extremas e à presença de substâncias inflamáveis. Este estudo aplicou a metodologia *Bowtie* para analisar os riscos no módulo de regeneração de MEG em uma unidade FPSO, identificando ameaças, barreiras de prevenção e mitigação, bem como os impactos de falhas no sistema. A análise demonstrou que problemas na regeneração do MEG podem comprometer a operação da plataforma, resultando em riscos ambientais, econômicos e de segurança. A adoção de estratégias integradas de gestão de risco, combinando o método *Bowtie* com outras abordagens, como HAZOP, fortalece a segurança operacional e contribui para a eficiência das operações *offshore*.

Palavras-chave: FPSO, MEG, segurança operacional, gestão de riscos, método *Bowtie*.

**Abstract:** Oil and natural gas are the main energy sources used worldwide, playing a crucial role in transportation, electricity generation, and heating. Offshore production has expanded over the decades, driven by the search for new reserves and technological advancements. In this context, Floating Production Storage and Offloading (FPSO) platforms play a fundamental role, enabling the extraction, processing, and storage of oil and gas in remote offshore locations. One of the operational challenges in these units is the formation of hydrates, which can block production lines. To prevent this issue, Monoethylene Glycol (MEG) is used as an inhibitor, reducing hydrate formation and allowing for regeneration and reuse, making the process more efficient. The MEG regeneration system involves its separation from water and impurities in a distillation column, ensuring its reintegration into the production cycle. Offshore operations require stringent safety measures due to extreme environmental conditions and the presence of flammable substances. This study applied the Bowtie methodology to assess risks in the MEG regeneration module of an FPSO unit, identifying threats, preventive and mitigating barriers, and the consequences of system failures. The analysis revealed that failures in MEG regeneration can significantly impact platform operations,

leading to environmental, economic, and safety risks. The integration of risk management strategies, combining the Bowtie method with other approaches such as HAZOP, enhances operational safety and improves the efficiency of offshore activities.

**Keywords:** FPSO, MEG, operational safety, risk management, Bowtie method.

## 1 Introdução

O petróleo e o gás natural são as principais fontes de energia utilizadas globalmente, essenciais para o transporte, a geração de eletricidade em usinas termelétricas e os sistemas de aquecimento. Em 2022, o consumo mundial de petróleo atingiu 97,3 milhões de barris por dia, com um aumento de 3,1% (2,9 milhões de barris/dia) em comparação ao ano anterior. O Brasil se manteve na nona posição global, consumindo em média 2,5 milhões de barris diários, o que corresponde a 2,6% do total mundial, com um crescimento de 4,9% em relação a 2021. No mesmo ano, o consumo global de gás natural caiu 3,1%, totalizando cerca de 3,9 trilhões de metros cúbicos, enquanto no Brasil, a redução foi mais acentuada, com uma queda de 20,1%, totalizando 32 bilhões de metros cúbicos (0,8% da demanda mundial), colocando o país na 29ª posição entre os maiores consumidores de gás (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2023).

A exploração de gás natural é mais recente do que a do petróleo, iniciando-se nas décadas de 1940-1950, impulsionada pelos avanços tecnológicos nos setores de transporte e industrial. Comparado a outros combustíveis fósseis, o gás natural é considerado mais limpo e eficiente, pois sua combustão emite significativamente menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) (Muñoz, Gomes e Hollanda, 2014). Esse combustível é amplamente utilizado na produção de eletricidade, no aquecimento industrial, em processos de geração de vapor, no comércio, em residências e no setor de transportes.

A produção *offshore* de petróleo e gás, realizada em plataformas no mar, foi impulsionada pela busca por novas reservas após a crise dos anos 70, provocada por embargos da OPEP e pelo esgotamento das reservas terrestres (Lehmköster J, 2014). Atualmente, as plataformas extraem gás e petróleo de profundidades superiores a 3.000 metros. Devido ao alto custo e à complexidade de construção de plataformas fixas em águas profundas, as plataformas flutuantes são mais comuns em áreas de grandes profundidades (Devold, 2013).

Com a exploração de campos em águas mais profundas, as plataformas FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) têm se destacado. Esses navios são preparados para receber, processar, armazenar e transferir petróleo e gás, sendo ideais para locais distantes da costa, onde a instalação de oleodutos é inviável (Shimamura, 2002). A principal vantagem das FPSOs é sua autonomia, sem necessidade de infraestrutura externa como *pipelines* ou armazenamento. Elas podem produzir entre 10.000 e 200.000 barris de petróleo por dia (Devold, 2013).

A formação de hidratos, estruturas cristalinas que encapsulam moléculas de hidrocarbonetos, é um dos principais desafios enfrentados pelas indústrias *offshore*. Essas estruturas podem obstruir as linhas de produção, gerando problemas no escoamento e atrasos na produção. A formação de hidratos ocorre sob condições de alta pressão, baixa temperatura e presença de água e gás. Uma solução para inibir essa formação é a injeção de Monoetileno Glicol (MEG), uma substância de baixa toxicidade e não inflamável, que pode ser regenerada e reutilizada, reduzindo os custos operacionais. O processo de regeneração do MEG ocorre em uma coluna de destilação, separando o MEG da água.

O ciclo do MEG envolve duas correntes principais: o MEG Pobre (Lean MEG), com cerca de 90% de MEG em água, e o MEG Rico (Rich MEG), com cerca de 50% de MEG em água. O MEG Pobre circula pelo sistema de produção, sendo injetado e, ao interagir com o fluxo de gás, torna-se MEG Rico. Esse último passa por regeneração na plataforma, onde a água e os sais são removidos, retornando ao estado de MEG Pobre para nova utilização (Latta, 2013; Teixeira, 2014).

A operação *offshore* envolve riscos significativos, devido às condições climáticas adversas, à maior dificuldade logística e à presença de substâncias perigosas. Assim, a segurança operacional é uma prioridade, exigindo um gerenciamento proativo de riscos. O conceito de segurança operacional inclui práticas, procedimentos e sistemas de gestão para garantir a proteção das instalações e prevenir acidentes.

Este trabalho visa aplicar o método de análise de risco *Bowtie* em uma unidade marítima FPSO, focando no módulo de regeneração de MEG, que está interligado ao sistema de segurança da unidade. A análise de risco envolve a identificação de perigos e a implementação de salvaguardas para interromper a sequência de eventos iniciadores, fortalecendo as barreiras de segurança e garantindo uma operação segura e eficiente.

## 1.2 Técnicas para avaliação de riscos de processo

A avaliação de riscos de processo pode ser realizada por diversas metodologias, cuja escolha depende do contexto e do escopo da análise (Rovins et al., 2015). A Tabela 1 mostra um breve resumo das principais técnicas de análise de riscos.

Tabela 1. Resumo das aplicações das principais técnicas de análise de riscos.

Técnica	Aplicação
Análise preliminar de riscos (APR)	Identificação dos perigos existentes na realização de um serviço.
Lista de verificação ou <i>Checklist</i>	Para a confirmação do cumprimento das normas e práticas da empresa, assim como da legislação local.
Análise de modos de falha e efeitos (FMEA)	Para estudo focado nos equipamentos, e não nos parâmetros do processo.
<i>What-if</i>	Avaliar possíveis desvios no projeto, na montagem, em alguma modificação de um projeto ou planta existente, ou até desvios na operação da unidade.
Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP)	Identificar e avaliar os perigos do processo e os possíveis problemas operacionais.
Análise de Camadas de Proteção (LOPA)	Avaliar as camadas preventivas de contenção de riscos e as reativas de resposta
<i>Bowtie</i>	Avaliar a relação existente entre as causas e consequências atreladas a um evento crítico principal.

Algumas técnicas, como listas de verificação (*checklists*), Análise Preliminar de Riscos (APR) e *What-if*, são mais aplicadas nas fases iniciais do projeto ou antes do comissionamento da operação de uma planta. Já em fases avançadas ou durante a operação, combinam-se técnicas como HAZOP com listas de verificação, *What-if* ou FMEA para monitorar variações e implementar melhorias (Matos, 2009).

A Análise Preliminar de Riscos (APR) é uma técnica qualitativa que identifica antecipadamente os perigos envolvidos em um serviço, classificando os riscos potenciais conforme sua ocorrência e gravidade (Lima, 2016). Seus resultados permitem priorizar preocupações que necessitam de análise detalhada, como observado em um estudo realizado na República Democrática do Laos, onde foi identificada a necessidade de um sistema aprimorado de monitoramento sísmico (Rovins et al., 2015). Contudo, essa técnica não é recomendada para avaliação de desvios em parâmetros de processo (Sousa, 2018).

A Lista de Verificação (*Checklist*) consiste na elaboração de uma lista de possíveis perigos e áreas críticas, podendo ser aplicada em qualquer etapa do projeto. Existem *checklists* específicos para equipamentos, subsistemas e processos. No entanto, por ser uma abordagem limitada aos itens listados, seu uso em conjunto com outras técnicas, como *What-if*, é recomendado para uma análise mais abrangente (Matos, 2009).

A Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) foca na identificação de falhas potenciais em sistemas e seus impactos. Essa técnica é voltada para equipamentos, e não para parâmetros de processo (Matos, 2009). Um grupo de especialistas analisa possíveis falhas e seus efeitos, classificando-os segundo gravidade, probabilidade de ocorrência e detecção, em uma escala de 1 a 10. O produto desses fatores gera um índice de prioridade de risco, auxiliando na priorização de ações corretivas (Rovins et al., 2015).

A técnica *What-if* se assemelha ao HAZOP, mas com um nível maior de foco e menos detalhamento, tornando-se um método mais ágil para identificar riscos. Envolve um grupo de discussão que formula perguntas iniciadas por "E se...?" ou "Como poderia...?", utilizando palavras-guia como "falha de utilitário" ou "erro operacional" (Rovins et al., 2015). Assim, os perigos são identificados e avaliados, e recomendações são feitas conforme necessário (Matos, 2009).

O Estudo de Perigo e Operabilidade (HAZOP) identifica potenciais perigos e problemas operacionais, propondo medidas para minimizar ou eliminar riscos (Kotek e Tabas, 2012). Amplamente utilizado na indústria, seu sucesso depende da experiência dos participantes, que analisam o processo em busca de desvios operacionais, suas causas, consequências e salvaguardas (Rovins et al., 2015). Empresas que adotam o HAZOP frequentemente observam maior estabilidade operacional, menor necessidade de manutenção e melhoria na qualidade do produto (Crowl e Louvar, 2011).

A Análise de Camadas de Proteção (LOPA) é uma técnica semi-quantitativa utilizada na indústria química para avaliar riscos e camadas de proteção associadas a cenários críticos (Willey, 2014). Complementar aos estudos de HAZOP e APR (Chinaqui, 2012), o LOPA permite identificar vulnerabilidades nos sistemas de segurança, avaliar a necessidade de sistemas instrumentados de segurança (SIS) e sugerir aprimoramentos para reduzir riscos e impactos potenciais (Willey, 2014).

A metodologia *Bowtie* é uma ferramenta visual para análise de riscos que permite uma compreensão clara das ameaças, das barreiras de prevenção e das medidas de mitigação para reduzir impactos negativos. Essa metodologia representa graficamente como os riscos podem evoluir para eventos críticos e quais controles estão disponíveis para evitar ou minimizar suas consequências. No tópico a seguir, a metodologia *Bowtie* será detalhada.

### 1.3 Bowtie

A análise de risco *Bowtie* é uma metodologia qualitativa que fornece uma maneira eficaz de comunicar cenários de risco complexos em um formato gráfico de fácil compreensão. Esse método ilustra as relações entre as causas de eventos indesejados, as formas de preveni-los e mitigá-los, evitando que evoluam para perdas e danos (Voicu et al., 2018).

Nesta análise, são identificadas as barreiras que impedem que determinadas ameaças levem à ocorrência do evento principal. Além disso, busca-se estabelecer quais medidas de recuperação estão prontas para limitar os efeitos adversos caso as barreiras sejam vencidas e o evento principal ocorra. Essas medidas são específicas para cada consequência identificada. Assim, o método *Bowtie* auxilia na demonstração clara do nível de controle existente sobre os riscos, permitindo a identificação de pontos fracos, lacunas e oportunidades para a redução contínua dos riscos.

Os principais objetivos do método *Bowtie* são (CGE Risk 2015):

- Fornecer uma estrutura para analisar sistematicamente um risco;
- Avaliar se o nível atual de controle é suficiente, garantindo que os riscos sejam tão baixos quanto razoavelmente praticáveis;
- Identificar onde e como os recursos de investimento podem ter maior impacto;
- Aumentar a comunicação e a conscientização sobre riscos.

O nome *Bowtie* deriva do formato gráfico do diagrama, que se assemelha a uma gravata borboleta (CGE Risk, 2015). O diagrama é composto por três seções principais: do lado esquerdo, estão listados os eventos que podem levar à ocorrência do evento principal, posicionado no centro; à direita, encontram-se os possíveis resultados decorrentes desse evento. Dessa forma, o diagrama combina duas análises essenciais: uma sobre as causas e outra sobre as consequências, permitindo uma visualização clara da relação entre esses elementos. As barreiras e formas de mitigação preenchem o espaço entre os extremos da "gravata" e o centro. Essas barreiras devem estar alinhadas com padrões de engenharia amplamente estabelecidos, seguir procedimentos de eficácia comprovada e atender aos padrões da organização. Ademais, devem ser periodicamente testadas e submetidas à manutenção preventiva para garantir sua eficácia operacional. Os elementos de barreira devem ser independentes entre si, sem possibilidade de dualidade (Belan, 2017).

A construção da análise pelo método *Bowtie* ocorre por meio das seguintes etapas (CGE Risk 2015):

1. Identificação dos perigos: definir quais perigos serão analisados.
2. Identificação dos eventos principais (ou evento de topo): determinar o momento em que o controle sobre o perigo é perdido.
3. Identificação das ameaças: estabelecer as causas que podem levar ao evento de topo.
4. Identificação das consequências: mapear os cenários indesejáveis decorrentes do evento de topo.
5. Identificação das formas de prevenção e barreiras de recuperação: determinar medidas que impeçam a ocorrência do evento principal (barreiras preventivas) e formas de mitigar suas consequências (barreiras de recuperação).
6. Identificação dos fatores de agravamento e barreiras para contê-los: avaliar como os controles podem falhar e estabelecer barreiras que protejam a barreira principal contra fatores de agravamento.

No presente trabalho, a análise de risco foi realizada conforme a metodologia *Bowtie*, pois essa abordagem permite uma avaliação abrangente, desde a identificação dos riscos e das barreiras que evitam a evolução das ameaças até as medidas de mitigação para prevenir consequências catastróficas.

Dessa forma, o método *Bowtie* pode ser desenvolvido seguindo uma sequência lógica de perguntas, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

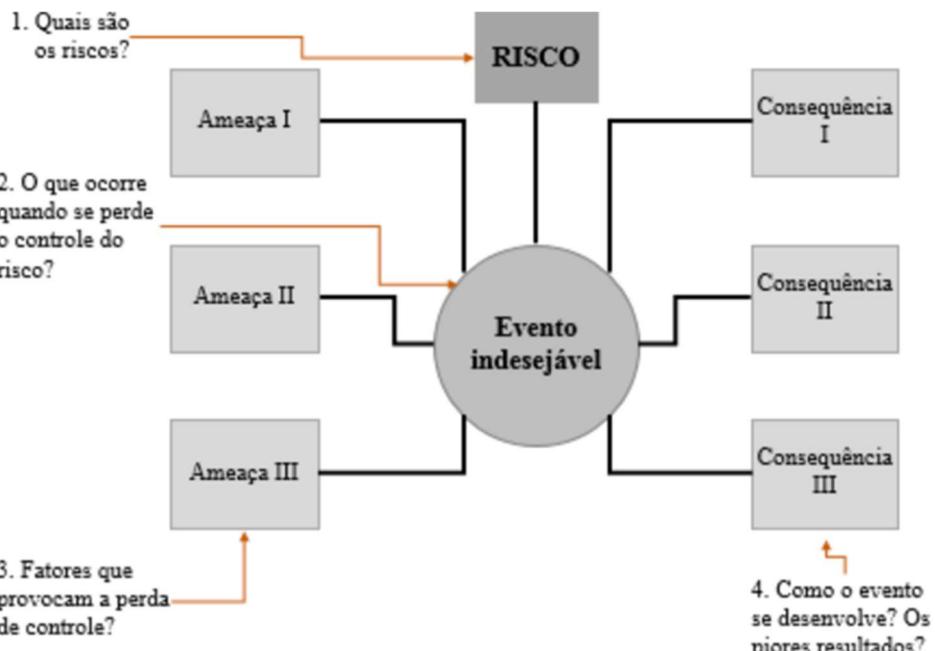


Figura 1. Sequência lógica de perguntas para construção do Bowtie – Parte 1. Fonte: Belan (2017).

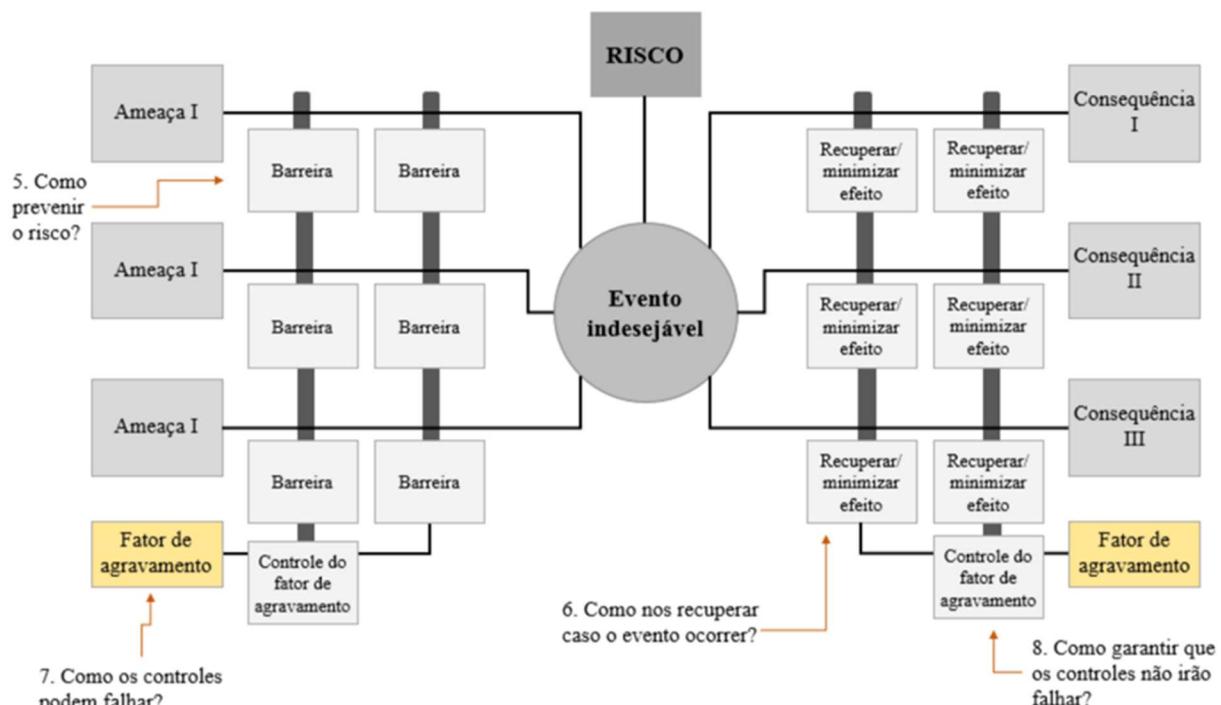


Figura 2. Sequência lógica de perguntas para construção do Bowtie – Parte 2. Fonte: Belan (2017).

## 2 Metodologia

A metodologia utilizada neste estudo baseia-se na aplicação do método *Bowtie* para análise e comunicação de riscos. O método *Bowtie* permite visualizar os cenários de risco de forma estruturada, identificando fontes de perigo, eventos principais, consequências e barreiras de controle. A abordagem adotada seguiu as etapas descritas a seguir:

1. Identificação das fontes de risco: primeiramente, foram identificadas as fontes potenciais de risco, ou seja, os elementos que representam perigo dentro do contexto analisado.
2. Determinação das causas do evento principal: nesta etapa, foram analisados os cenários ou eventos que podem levar diretamente à ocorrência do evento principal, ou seja, a perda de controle sobre o risco.
3. Análise das consequências: foram identificados os cenários subsequentes ao evento principal, analisando as potenciais perdas e danos resultantes da sua ocorrência.

4. Identificação das barreiras preventivas: foram determinadas as barreiras que devem impedir que as ameaças atinjam ou causem o evento principal. Essas barreiras foram posicionadas no lado esquerdo do diagrama *Bowtie*.
  5. Identificação das barreiras de recuperação: as barreiras destinadas a mitigar as consequências do evento principal foram identificadas e posicionadas no lado direito do diagrama.
  6. Avaliação dos fatores de escalonamento: foram analisadas as situações ou condições específicas que podem comprometer a eficácia das barreiras de controle e as estratégias para mitigar tais vulnerabilidades.
  7. Construção do diagrama *Bowtie*: todas as informações coletadas foram inseridas em uma planilha estruturada para, em seguida, serem organizadas na forma de um diagrama *Bowtie*, facilitando a visualização das relações de causa e efeito.
- Esta metodologia permite uma análise abrangente e estruturada dos riscos, auxiliando na tomada de decisão e na melhoria dos controles existentes para a gestão eficiente da segurança.

### 3 Resultados e discussões

O estudo foi conduzido com base em uma unidade marítima de produção de petróleo do tipo FPSO, na qual o módulo de regeneração de MEG está interligado ao recebimento de gás dos poços e ao sistema de segurança da unidade. O foco da análise foi o módulo de regeneração de MEG, crucial para garantir a eficiência da produção de petróleo. Esse sistema permite a regeneração do glicol utilizado na abertura e operação dos poços, proporcionando uma significativa economia ao possibilitar sua reutilização.

Para a análise de risco, foram levantadas as possíveis ameaças às quais o módulo de regeneração de MEG está exposto durante sua operação em alto-mar. A compreensão detalhada do funcionamento do processo e dos equipamentos foi realizada por meio da análise de manuais, documentos de fabricantes, estudos de risco utilizando outras metodologias como HAZOP, matrizes de causa e efeito, consultas a especialistas e acesso a informações de incidentes anteriores. O objetivo principal foi analisar os riscos, especialmente os operacionais, associados à interrupção do sistema de regeneração de MEG.

O evento indesejável identificado foi a perda de contenção na coluna de destilação, que poderia ocorrer de diferentes formas e afetar componentes do sistema, levando à interrupção do processo de regeneração do MEG. A Tabela 2 resume o cenário de risco estudado.

Tabela 2. Resumo do cenário de risco estudado. Legenda: URM- Unidade de Regeneração de MEG, FPSO- *Floating Production Storage and Offloading*.

Negócio	Plataforma Offshore de Produção tipo FPSO
Área de risco	Módulo de URM
Tipologia do risco	Operacional; Ambiental; Vida Humana e Patrimonial
Risco	Coluna de Destilação
Evento indesejado	Perda de contenção na coluna de destilação
Riscos associados	Perda de Ativo / Danos à vida / Perda de Receita

A partir da definição do perigo a ser analisado, que era a presença do módulo de regeneração de MEG no *topside* de uma planta de processamento de hidrocarbonetos, foi identificado um evento de topo: a falha do sistema, caso o controle sobre o perigo fosse perdido. Utilizando o método *Bowtie*, foi elaborada uma planilha de Estrutura de Risco para registrar as ameaças (Tabela 3), as barreiras preventivas e mitigadoras, bem como as possíveis consequências do evento indesejável. Essa estrutura facilitou a visualização das informações e serviu de base para a construção do diagrama *Bowtie*.

Tabela 3. Planilha Bowtie de estrutura de risco. Legenda: MEG – Monoetileno Glicol, SPIE- Serviço Próprio de Inspeções de Equipamentos, PTW- Permit to Work

Ameaças (Falhas)	Barreiras					Evento indesejável	Mitigações					Conse- quências
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
<b>Falha Mecânica</b>	Seleção de equipamentos conforme padrões	Sistema de detecção de vazamentos	Monitoramento no local			Seleção e instalação de equipamentos para áreas perigosas	Despressurização emergencial	Detecção de fogo e gás	Supressores de chama fornecidos no respiradouro MEG	Sistema de dilúvio	Procedimentos de emergência	Vapores inflamáveis entram em ignição causando incêndio e lesão pessoal
<b>Corrosão</b>	Seleção adequada dos materiais	Estratégia de gerenciamento de corrosão (cupons de corrosão, químicos anticorrosivos)	Monitoramento no local	Inspeções conforme NR-13 (SPIE)	<b>Perda de contenção na coluna de destilação</b>	Recipiente de contenção	Drenagem	Transferência do inventário para tanques				Dano ao meio ambiente
<b>Impacto mecânico</b>	Garantir a certificação dos equipamentos de movimentação de carga	Restringir as movimentações próximas a equipamentos funcionando e ter um procedimento de movimentação de carga	Garantir a expertise técnica dos responsáveis pela movimentação	Utilização de proteções para impacto		Aplicação de reparos temporários	Isolar a linha de vazamento	Substituir o item danificado				Perda de inventário de MEG

Ameaças (Falhas)	Barreiras					Evento indesejável	1	Mitigações					Consequências
	1	2	3	4	5			2	3	4	5	6	
Flange / Cone- xões / Válvulas / Linhas com vazamento	Inspeções Visuais	Plano de Manuten- ção	Substitui- ção do componen- te	Medição de espes- sura			Injeção de etanol	Fecho- amento dos poços de gás					Formação de hi- drato
Erro Humano	Padroni- zação de proce- dimentos de isola- mento	Padroni- zação para parada e partida do sistema	PTW sup- portada por avalia- ção de risco da tarefa	Treina- mento dos operado- res									
Carreamento de Hidrocarbo- netos	Monitora- mento através de rotina de laborató- rio	Injeção de antiespu- mante no sistema de reciclo	Resposta do opera- dor para processo de alarme	Parada do sistema de regenera- ção de MEG	Limpeza do vaso	Perda de con- tenção na co- luna de destila- ção							
Sobre pressão	Seleção adequada dos mate- riais	Resposta do opera- dor para processo de alarme	Parada do sistema de regenera- ção de MEG	Alívio da Pressão									
Vibração / Fadiga	Linhos e instru- mentos conforme padrões	Sistema de moni- toramento da condi- ção de operação	Monitora- mento no local	Planos de manuten- ção	Suporte correto das linhas								
Obstrução por saturação de sal	Injeção de carbonato de sódio	Monitora- mento por rotina de laborató- rio	Aumentar o fluxo na centrífuga	Drenagem conforme acumulo de sais	Abertura e limpeza dos vasos								

A análise revelou que a principal ameaça ao módulo de regeneração de MEG era a falha na coluna de destilação, o que impossibilitaria a obtenção de MEG pobre e inviabilizaria a abertura dos poços. Adicionalmente, o carreamento de hidrocarbonetos e um possível vazamento representariam o risco de incêndio. Para prevenir essa falha, foram estabelecidas barreiras baseadas nas recomendações do fabricante do módulo, considerando o período de substituição dos componentes e o plano de manutenção recomendado para garantir alta confiabilidade operacional. Além disso, ações mitigadoras foram propostas para minimizar os danos e reduzir o tempo de parada do sistema, garantindo a operação segura dos poços e mitigando os impactos econômicos.

Para garantir a conservação das barreiras, como mostrado na Planilha Bowtie (Tabela 3), são propostas tarefas e para cada uma delas, são eleitos os responsáveis e os benefícios gerados, como mostrado na Tabela 4:

Tabela 4. Setores da empresa e respectivas tarefas. Fonte: Adaptado de Belan (2017).

Setor da empresa	Tarefa	Benefícios
Produção	Monitorar as variáveis do processo, informar sobre desvios e necessidade de manutenção corretiva e fiscalizar o trabalho durante todo o tempo de manutenção.	Garantia de atuação rápida para que o evento indesejável não aconteça.
Planejamento	Garantir que os planos de manutenção estejam ativos e sejam planejados.	Realização das recomendações do fabricante para durabilidade dos equipamentos e continuidade da operação.
Manutenção	Execução do plano de manutenção, <i>checklist</i> de troca de peça e produção de relatório de manutenção.	Garantia de que o equipamento recebeu as manutenções necessárias. Registro do que foi trocado para estudos futuros.
Suprimentos	Manter estoques de peças de reposição.	Otimização do tempo de reparo/ manutenção.
Treinamentos	Capacitar profissionais periodicamente sobre o processo e para atuar em situações de mitigação.	Atualização dos integrantes quanto ao controle do sistema e aumento do domínio do passo a passo que se deve fazer.
Segurança / Marinha	Revisar o plano de contingência periodicamente.	Melhoria contínua de instruções de segurança.

A análise de risco foi ilustrada graficamente com o diagrama Bowtie, conforme as informações organizadas na planilha (Tabela 3). A metodologia aplicada seguiu as diretrizes descritas no "Bowtie Methodology Manual" da empresa CGE Risk (2015). No diagrama Bowtie (Figura 3), é possível observar desde as ameaças que podem levar a falha do sistema de regeneração de MEG, as barreiras e consequências deste evento indesejado.

Dentre as principais ameaças identificadas, destacam-se a falha mecânica, corrosão, impacto mecânico, vazamentos em flanges, conexões e válvulas, carreamento de hidrocarbonetos, sobrepressão, vibração e fadiga, além da obstrução por formação de complexos de sal. Para cada uma dessas ameaças, foram estabelecidas barreiras preventivas que incluem seleção de equipamentos conforme padrões, inspeções periódicas, monitoramento contínuo, estratégias de manutenção e controle operacional. Essas medidas visam reduzir a probabilidade de ocorrência da perda de contenção, garantindo a integridade do sistema.

No caso de falha das barreiras preventivas e ocorrência do evento indesejado, as consequências podem ser severas, abrangendo desde a perda de inventário de MEG até danos ao meio ambiente e riscos de incêndio e lesões pessoais. Para mitigar esses impactos, foram definidas barreiras corretivas, como despressurização emergencial, drenagem, isolamento de linhas, aplicação de reparos temporários, injeção de etanol para evitar formação de hidratos e procedimentos de emergência específicos para casos de incêndio.

O diagrama *Bowtie* proporciona uma visão estruturada da relação entre ameaças, barreiras e consequências, evidenciando a complexidade do sistema de regeneração de MEG e a necessidade de múltiplas camadas de proteção para minimizar riscos. Essa abordagem facilita a tomada de decisões para aprimorar a segurança operacional, reduzir impactos ambientais e financeiros e garantir a continuidade da operação, reforçando a importância de um sistema de gerenciamento de risco robusto e bem estruturado.

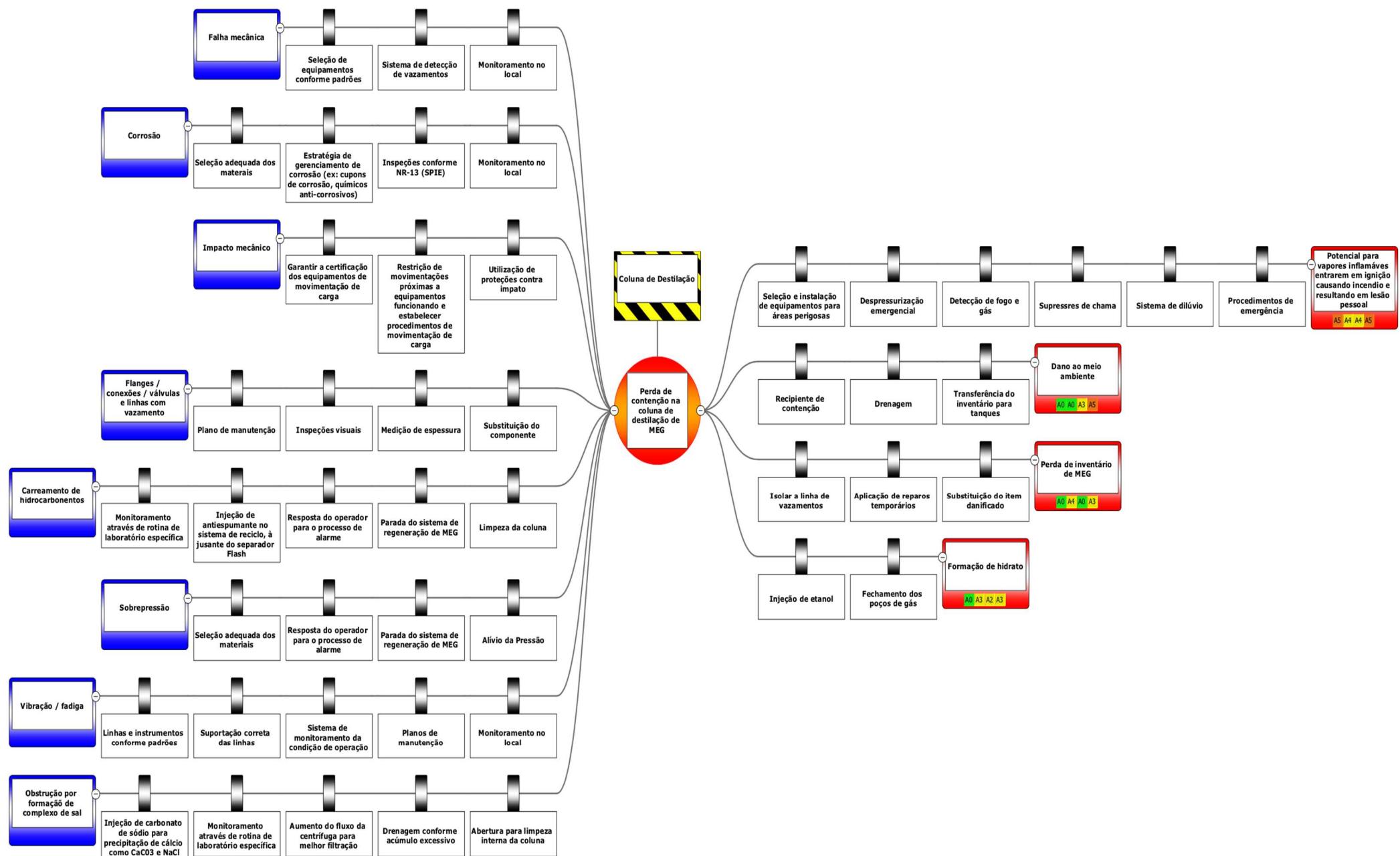


Figura 3. Diagrama Bowtie.

## 4 Conclusões

A aplicação do método *Bowtie* na análise de risco do módulo de regeneração de MEG em uma unidade marítima de produção de petróleo do tipo FPSO permitiu a identificação estruturada das ameaças, barreiras preventivas e mitigadoras, bem como das consequências associadas ao evento indesejado de perda de contenção na coluna de destilação. A abordagem possibilitou uma visão clara dos riscos operacionais envolvidos e contribuiu para a definição de estratégias eficazes de controle, reforçando a importância da gestão de riscos na garantia da segurança operacional e na mitigação de impactos ambientais e econômicos. O estudo evidenciou que a falha no sistema de regeneração de MEG pode comprometer significativamente a produção *offshore*, uma vez que a indisponibilidade do sistema inviabiliza a abertura dos poços, além de potencialmente gerar vazamentos e riscos de incêndio. Dessa forma, a identificação de barreiras eficazes e a adoção de medidas de mitigação são essenciais para assegurar a continuidade operacional e a integridade da planta. A metodologia utilizada demonstrou ser uma ferramenta robusta para avaliação e comunicação de riscos, proporcionando maior previsibilidade e confiabilidade às operações. A integração da análise *Bowtie* com outros métodos de gerenciamento de riscos, como HAZOP e matrizes de causa e efeito, reforça a necessidade de abordagens complementares para uma gestão de segurança mais eficiente. Dessa maneira, o presente estudo contribui para o aprimoramento das práticas de gerenciamento de risco em instalações *offshore*, destacando a relevância da prevenção de falhas e do monitoramento contínuo dos sistemas críticos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de São Paulo pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

## Referências bibliográficas

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2023) *Anuário Estatístico 2023 – Seção 1*. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2023/secao-1/secao-1.pdf> (acessado em 25 de março de 2025).
- Belan, MA (2017) *Análise de confiabilidade em downtime de sonda de perfuração: o método Bow-Tie*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Fluminense, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rio das Ostras.
- CGE Risk (2015) *BowTieXP – Bowtie Methodology Manual*.
- Chinaqui, EF (2012) *Análise e gerenciamento de riscos de processo na indústria química*. Monografia (Graduação), Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena.
- Crowl, DA and Louvar, JF (2011) *Chemical process safety: fundamentals with applications*. 3rd edn. Nova Jersey: Pearson Education.
- Devold, H (2013) *Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry*. 3rd edn. Oslo: ABB.
- Kotek, L and Tabas, M (2012) ‘HAZOP study with qualitative risk analysis for prioritization of corrective and preventive actions’, *Procedia Engineering*, v. 42, pp. 879–886.
- Latta, TM (2013) ‘Flow assurance impacts on lean/rich MEG circuit chemistry and MEG regenerator/reclaimer design’ in *Offshore Technology Conference*, Texas, 2013. Texas: Offshore Technology Conference.
- Lehmköster, J (2014) *Marine resources: opportunities and risks*. Hamburg: Maribus.
- Lima, MA (2016) *Análise preliminar de riscos – APR*. Procedimento Ultracargo, janeiro.
- Matos, JSGC (2009) *Aplicação do HAZOP dinâmico na avaliação de perigo operacional em uma coluna de destilação de uma planta de separação de ar*. Dissertação (Mestrado), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Muñoz, CPF, Gomes, I and Hollanda, L (2014) ‘Gás Natural’, *Cadernos FGV Energia*, v. 2, n. 1.

- Rovins, JE et al. (2015) *Risk assessment handbook*. GNS Science Miscellaneous Series, v. 84. Nova Zelândia.
- Shimamura, Y (2002) ‘FPSO/FSO: State of the art’, *Journal of Marine Science and Technology*, v. 7, pp. 59–70.
- Sousa, GDB (2018) *Análise preliminar de risco*. Salvador: ANP, abril.
- Teixeira, AM (2014) *Análise exergética de processos de recuperação de monoetileno glicol (MEG) em plataformas offshore*. Dissertação (Mestrado), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Voicu, I et al. (2018) ‘Risk management with Bowtie diagrams’, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 400.
- Willey, RJ (2014) ‘Layer of protection analysis’, *Procedia Engineering*, pp. 12–22.