

Pós-Graduação

Segurança de Processos



GERENCIAMENTO DE BARREIRAS EM PLANTAS PETROQUÍMICAS

Alcinda N. N. Viana, Lilian C. G. Da Silva, Nara R. Correia, Vitória B. Pellizzari

RESUMO

O desenvolvimento de novas tecnologias na Indústria de Óleo e Gás desencadearam plantas com processos mais complexos: pressões e temperaturas maiores, químicos mais reativos e processos não convencionais. Tais condições exigem rigor na gestão dos riscos das plantas de processos, a fim de evitar a ocorrência de um evento de grandes proporções. Desta forma, faz-se necessária a aplicação de metodologias para a Segurança de Processo Baseada em Risco. Em um processo típico, as camadas de proteção são definidas como um conjunto de sistemas ou ações que possam reduzir ou cessar os impactos às pessoas, ao patrimônio e ao meio ambiente provenientes de uma falha ou acidente de segurança de processo. Ao identificar um cenário de risco iminente para um acidente, se as barreiras não estiverem devidamente preparadas para atuarem, as consequências deste acidente podem proporcionar imensuráveis prejuízos à sociedade. Diante desse cenário, um dos grandes desafios para as indústrias consiste em desenvolver adequadamente o gerenciamento destas barreiras, incluindo a identificação dos perigos, avaliação dos cenários acidentais e a gestão de integridade e confiabilidade dos equipamentos e sistemas existentes nas respectivas plantas industriais. No presente trabalho, serão abordadas as barreiras de um processo de produção do cloreto de polivinila proveniente de uma planta petroquímica didática. Inclui-se também o desenvolvimento da segurança de processo e os seus importantes conceitos, com destaque para as técnicas de gerenciamento de risco como Metodologia de Bow-Tie e o Método de Análise Hierárquica de Processo (AHP). Dentro do contexto de prevenção de acidentes, avalia-se o conjunto de barreiras preventivas e mitigadoras, avaliando a relevância delas para o processo. Dentro do contexto de avaliação de barreiras e cenários foi desenvolvido e aplicado um questionário considerando a avaliação e a experiência de dois especialistas em segurança de processos. A partir desta experiência foi possível a aplicação consistente da ferramenta AHP e conclusões de grande valia foram obtidas com este método, além de elaborado painel dinâmico contendo a hierarquização das barreiras propostas e indicadores de Segurança de Processos e de Confiabilidade.

Palavras-chave: Gerenciamento de riscos, plantas petroquímicas, Análise Hierárquica de Processos (AHP), HAZOP, LOPA, Bow-Tie, Painel Dinâmico.

ABSTRACT

The development of new technologies in Oil & Gas industry triggered plants with more complex processes: higher pressures and temperatures, more reactive chemicals, and unconventional processes. Such conditions require strict risk management in process plant, in order to avoid the occurrence of a major event. So, it's necessary to apply methodologies for risk process management. In a typical process, protection layers are defined as a set of system or actions that can reduce or stop the impacts of people, property and the environment resulting from a failure or process safety accident. When identifying an imminent risk scenario for an accident, if the barriers are not properly prepared to act, the consequences of this accident can provide immeasurable damage to society. Given this scenario, one of the major challenges for industries is to properly develop the management of barriers, including the identification of hazards, assessment of accidental scenarios and the management of integrity and reliability of equipment and systems existing in the respective industrial plants. In the present work, the barriers of a polyvinyl chloride production process from a didactic petrochemical plant will be addressed. It also includes the development of process safety and its important concepts, with emphasis on risk management techniques such as Bow-Tie Methodology and the Process Hierarchical Analysis Method (AHP). Within the context of accident prevention, the set of preventives and mitigating barriers is evaluated, assessing their relevance to the process. In the context of continuous improvement, a proposal for monitoring these layers is carried out with the help of the concept of reliability indicators demonstrated in a dashboard.

Keywords: Risk Management of Hazards (Bow-Tie), petrochemical plants, Hierarchical analysis of process (AHP), Hazards and Operability Study (HAZOP), Layers of Protection Analysis (LOPA), Dashboards.

1. INTRODUÇÃO

1.1 O conceito de risco em Segurança de Processos

O conceito de risco é um termo que se caracteriza como a reorientação das relações que os indivíduos e as coletividades estabelecem com os acontecimentos que podem ocorrer no futuro. O uso da palavra risco se inicia em torno do século XIV, fase da pré-modernidade. Nesta época, verifica-se a transição no modo de produção e de organização da sociedade que originam os Estados Nações (Gondim, 2007).

Um risco pode ser compreendido como a probabilidade de que uma pessoa sofrerá um dano devido a uma ameaça particular. Exemplificando, pode-se descrever a ação de dirigir um automóvel com uma ameaça potencial de dano e, ao dirigir um carro em alta velocidade, apresenta-se uma situação de risco. Logo, para toda a atividade humana existe um risco associado, sendo possível reduzir o risco em determinadas situações, porém não é possível eliminá-lo por completo: de acordo com a Organização Mundial da Saúde (2002), o risco zero não é possível de se alcançar.

Existem diversos tipos e classificações para riscos: riscos ambientais, à saúde, de acidentes, econômicos e financeiros. De acordo com Nogueira (2006), o termo risco indica a probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas ou bens materiais). É uma condição potencial para a ocorrência de um processo adverso, que, ao atingir um sistema vulnerável, proporciona danos humanos, ambientais e/ou materiais e na sequência perdas econômicas e sociais. Desta forma, a análise de uma situação de risco envolve a identificação do cenário de risco em conjunto com a avaliação das consequências, pois não há risco sem alguma probabilidade de acidente e nem acidente sem qualquer consequência de perda ou dano (Nogueira, 2006).

No Brasil, com o aumento das atividades de exploração e produção de óleo e gás *onshore* e *offshore*, aumenta-se também a produção em refinarias e plantas petroquímicas. Com esse crescimento da produção, acompanhado do aumento da complexidade da cadeia produtiva e da competitividade do mercado, diferentes formas de gestão nos recursos da organização permitem o aumento da complexidade dos riscos envolvidos nesses processos, sendo necessário buscar ações preventivas dentro do gerenciamento dos riscos para tentar evitar que acidentes aconteçam ou, caso aconteçam, que suas consequências não sejam tão graves quanto possível.

Sabe-se que riscos pessoais ou ocupacionais relacionados com escorregões, quedas e acidentes com veículos produzem efeitos sobre um único trabalhador, porém,

riscos relacionados aos processos podem causar acidentes envolvendo a liberação de materiais potencialmente perigosos, incêndios e explosões (AIChE, 2008). Os incidentes e acidentes de segurança de processos podem causar danos não só aos trabalhadores, como também à vizinhança das instalações. Em consequência, a segurança de processos atua de forma ampla no projeto, engenharia de instalações, nas análises de perigos e riscos, na investigação de incidentes, na manutenção dos equipamentos, alarmes, controles de processo e procedimentos a fim de assegurar o gerenciamento dos riscos e prevenir os acidentes.

Para exemplificar, um acidente de processo que marcou a sociedade foi o acidente de Bhopal, na Índia, em 1984. Neste acidente, ocorrido na planta de produção de pesticidas, a dispersão de uma nuvem tóxica de isocianato de metila causou, aproximadamente, a intoxicação de duzentos mil pessoas e a morte de quatro mil pessoas. Nos anos de 2018 e 2019 aconteceram perdas importantes nas refinarias e ativos petroquímicos, particularmente aqueles construídos na década de 1960 ou antes, além disso, terminais/plantas de distribuição e processamento de gás também sofreram perdas. Há casos desses acidentes nos EUA, a explosão em Jiangsu, na China, foi o maior dano à propriedade petroquímica desde Pasadena, em 1989 (100 Largest Losses, 2020).

Avanços na segurança de processos químicos enfatizam o uso de ferramentas tecnológicas apropriadas, que gerem informações para a tomada de decisões de segurança com relação ao projeto e operação da planta (CROWL e LOUVAR, 2015).

Os sistemas de gestão comumente utilizados que visam à eliminação da existência de perigos incluem a verificação de segurança, auditorias de segurança, técnicas de identificação de perigo, listas de verificação e a aplicação adequada do conhecimento técnico (CROWL e LOUVAR, 2015).

1.2 Reações de *runaway* e seus riscos

De acordo com Pasquet (2017), reações de “*runaway*” são uma das principais fontes de acidentes industriais. Eles podem ocorrer em uma ampla gama de setores, incluindo produtos químicos, petroquímicos, processamento de alimentos, fabricação de plásticos e borracha e metalurgia e são causados principalmente por uma perda de controle do processo. Os processos envolvidos são diversos, englobando reação química, polimerização e destilação, entre outros. A perda de controle do processo está relacionada a vários fatores, como falha de instrumentação, falha relacionada a fatores humanos,

reatores mal limpos, tanques, tubulações ou colunas de destilação contendo impurezas ou adições acidentais de substâncias indesejadas.

Pasquet (2017) demonstra, através do estudo de vários acidentes envolvidos com tipo de reação, que a gestão de barreiras e a identificação de riscos de forma inadequada são muitas vezes os principais fatores envolvendo acidentes causados por reações de *runaway*. Assim como na maioria dos processos químicos, não é possível eliminar completamente o risco de um *runaway*: a minimização do risco é o objetivo que deve ser procurado quando se trata de reações com potencial de *runaway*. Portanto, ressalta-se a importância de a segurança dos processos químicos estar suportada por um apropriado sistema de avaliação e gerenciamento de risco para a prevenção e mitigação dos riscos de *runaway*.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar o gerenciamento das barreiras em um reator de polimerização para a produção do cloreto de polivinila (PVC) de uma planta petroquímica aplicando a ferramenta de gerenciamento de risco *Bow-Tie*. Para isso, foi feita a análise de risco usando o HAZOP em conjunto com LOPA incluindo os cenários e suas respectivas barreiras. Finalizando, a abordagem para tomada de decisão promovendo a hierarquização dos cenários denominada de AHP (Análise Hierárquica de Processo) subsidiou a categorização dos cenários considerando os seguintes critérios: disponibilidade, criticidade, eficácia, redundância e dependência da ação humana.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para este trabalho consistem em:

1. Realizar uma análise de risco dos cenários deste processo, estabelecendo as barreiras preventivas no processo de produção do PVC através da técnica de HAZOP complementada com o LOPA.
2. Aplicar a metodologia de gerenciamento de risco *Bow-Tie*, apresentando no diagrama os cenários em conjunto com as barreiras preventivas e mitigadoras referentes a este processo;
3. Aplicar o método de multicritério para tomada de decisão, AHP, por meio de um questionário aplicado a especialistas da área de segurança de processos;

4. Resumir as informações em um modelo de *dashboard* contemplando o *Bow-tie*, hierarquização e indicadores para as barreiras identificadas, a fim de monitorar o seu estado de degradação.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Camadas de proteção: barreiras

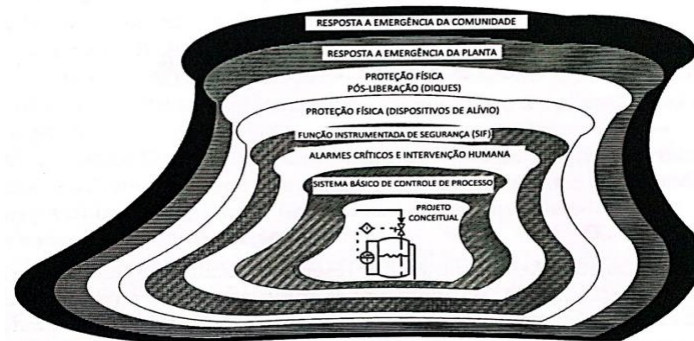
Acidentes graves na indústria de processo geralmente envolvem falhas de várias camadas de proteção associadas. Com isso, a integridade de cada uma é fundamental para garantir operações seguras.

Essas camadas de proteção, também chamadas de barreiras, consistem em um grupo de equipamentos, acessórios ou ações de controle que impedem que os desvios de processo se tornem acidentes ampliados (UGULINO, 2015).

As camadas de proteção que se destinam a impedir que o cenário ocorra podem ser denominadas de camadas de proteção preventivas. Outras camadas que podem ser denominadas de camadas de proteção mitigadoras, destinam-se a reduzir a gravidade da consequência do evento iniciador (LOPA CCPS AICHE, 2021).

As camadas de proteção incluem a concepção de projeto de processo; o sistema básico de controle de processos; funções instrumentadas de segurança; dispositivos passivos, como diques ou paredes à prova de explosão; dispositivos ativos, como as válvulas de alívio de pressão; e intervenção humana. Esse conceito de camadas de proteção é ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 - Camadas de proteção contra um possível acidente



Fonte: LOPA CCPS AICHe (2021)

Segundo Ugulino (2015), a primeira camada de proteção é representada pela concepção de processos intrinsecamente seguros que podem eliminar ou reduzir os perigos a partir do projeto conceitual e possui a função de garantir a contenção dos fluidos do processo impedindo que eles entrem em contato com a atmosfera.

O sistema básico de controle de processo (BPCS), incluindo controles manuais normais, projetado para manter o processo na região operacional segura, representa a segunda camada de proteção. A terceira camada de proteção inclui a ação do operador após a identificação de alarmes.

A quarta camada é constituída pela Função Instrumentada de Segurança (SIF), representada por uma combinação de sensores, processadores lógicos e elementos finais com um nível de integridade de segurança (SIL) especificado que detecta uma condição (anormal) fora do normal e leva o processo a um estado seguro. A SIF é funcionalmente independente do BPCS (LOPA CCPS AIChE, 2021).

Os dispositivos de alívio como válvulas PSV e discos de rupturas, os quais são apropriadamente dimensionados e projetados para proteger cenários de sobrepressão, representam a quinta camada de proteção. E as últimas camadas de proteção são mitigadoras e constituídas pela proteção física pós liberação (diques, paredes à prova de explosão), resposta a emergências da planta (brigada de combate a incêndios, evacuação da planta) e resposta a emergência da comunidade (evacuação da comunidade, abrigo no local).

2.1.1 Identificação e avaliação das barreiras

As camadas de proteção (CROWL e LOUVAR, 2015) são identificadas a partir de análises de riscos, que são baseadas na determinação dos eventos que podem produzir um acidente, probabilidade de ocorrência e as suas consequências. Uma parte importante dessa análise é a etapa de aceitação do risco, no qual são definidos critérios apropriados em uma matriz de riscos.

Segundo Willey (2014), um dos métodos para a identificação de potenciais cenários de perigo é o Estudo de Perigo e Operacionalidade (HAZOP). Esse método se baseia na combinação de parâmetros de processo (como fluxo, nível, temperatura, pressão, concentração, pH, viscosidade etc.) com uma palavra-guia associada a estes parâmetros para sugerir possíveis desvios.

O HAZOP traz como vantagem a identificação dos perigos, incluindo as informações sobre como esses perigos podem se desenvolver em decorrência dos

procedimentos de operação e das perturbações operacionais do processo (CROWL e LOUVAR, 2015).

De acordo com LOPA CCPS AIChE, (2021), a Análise de Camada de Proteção (LOPA) é uma metodologia de avaliação de risco que tem sua origem no propósito de responder às seguintes questões-chave para a camada de proteção tendo como base no risco.

- Quão seguro é o suficiente?
- Quantas camadas de proteção são necessárias?
- Quanta redução de risco deve proporcionar cada camada?

Segundo Willey (2014), a LOPA proporciona uma avaliação mais detalhada e semiquantitativa dos riscos e camadas de proteção associadas ao perigo. Ela permite identificar os cenários que apresentam o risco mais significativo e determinar se as consequências podem ser reduzidas pela aplicação de princípios de projeto inerentemente mais seguros. Podendo ainda ser utilizada para identificar a necessidade de sistemas instrumentados de segurança (SIS) ou outras camadas de proteção para melhorar a segurança do processo.

Conforme LOPA CCPS AIChE, (2021), a LOPA utiliza categorias de ordem de grandeza para a frequência do evento iniciador, severidade das consequências e probabilidade de falha das Camadas de Proteção Independente (IPL) para estimar o risco do cenário, de forma a determinar se o risco pode ser tolerado.

A LOPA avalia o cenário para causa – consequências e complementa o HAZOP. Segundo Crowl & Louvar (2015), cada IPL é avaliada quanto à eficácia na prevenção do cenário, independência e auditabilidade.

2.2 Métodos de avaliação de risco

2.2.1 O método HAZOP

A origem do HAZOP foi verificada na empresa Imperial Chemical Industries, nos anos 70, com foco em analisar sistemas de processos químicos, identificando os riscos e operabilidade e estendidas para demais sistemas mecânicos, eletrônicos entre outros.

Este estudo baseia-se em um procedimento indutivo qualitativo, estabelecendo que os acidentes ocorrem como consequência de desvios de variáveis de processo e de acordo com os parâmetros normais de operação. Uma equipe multidisciplinar de profissionais é responsável por analisar as causas e consequências destes desvios de

variáveis e em conjunto com as palavras-guia, com destaque para os perigos mais significativos. As principais palavras-chave ou palavras-guia são: pressão, temperatura, vazão e nível, gerando os desvios de processo.

Reforça-se que o estudo de HAZOP não se aplica somente para a segurança contra um acidente, mas também para os perigos que possam ocasionar a perda na continuidade operacional, comprometendo a qualidade do produto e a eficiência do processo nas devidas instalações. As palavras-guia, descritas anteriormente, dividem-se em primárias e secundárias: as primárias (parâmetros) têm um aspecto do equipamento ou uma condição de processo definida como parâmetro; As secundárias (desvios) sugerem os desvios, como parâmetros que não estão alinhados com a operação. A Tabela 1 apresenta o estudo de HAZOP com as palavras-guia, os desvios associados e as barreiras de preventivas e mitigadoras.

Tabela 1 - Palavras aplicadas aos estudos de HAZOP

Palavras-guia Primária	Palavras-guia secundária	Desvios
Fluxo, Contaminação, Temperatura, Pressão, Nível	Não	Negação das intenções do projeto
	Mais	Aumento quantitativa de uma propriedade física relevante
	Menos	Diminuição quantitativa de uma propriedade física relevante
	Reverso	Oposto da intenção do projeto

Fonte: Elaborado pelas autoras.

2.2.2 O método HAZOP em conjunto com LOPA

A aplicação do LOPA de forma integrada com HAZOP facilita para que todos os cenários e barreiras sejam registrados em uma planilha única. O LOPA é uma metodologia semiquantitativa de avaliação de riscos, gerando uma estimativa de risco e tem como objetivo determinar se as camadas de proteção de um cenário são suficientes para reduzir a frequência de ocorrência a um nível tolerável. Também, ressalta-se a abordagem nas consequências severas e seus resultados a fim de identificar os Níveis de Integridade e Segurança (SIL) necessários para cada função instrumentada de segurança (SIF).

O método LOPA é definido de acordo com os seguintes passos:

- Identificar as consequências para proteger os cenários;
- Selecionar os cenários de acidentes;
- Identificar e determinar a frequência do evento iniciador para cada cenário;
- Identificar as IPL e estimar a probabilidade de falha na demanda para cada uma;
- Estimar o risco do cenário por fórmulas;

As IPL podem ser representadas por um dispositivo, sistema ou ação capaz de prevenir as consequências indesejadas de um evento iniciador. Para que uma camada de proteção seja considerada independente a mesma deve atender aos seguintes requisitos (Muniz, 2016):

- Efetiva: Deve prevenir ou mitigar a ocorrência da consequência conforme planejada;
- Independente: Não deve ser dependente do evento iniciador e de outra IPL já considerada;
- Disponível: Deve estar disponível para atuar sempre que necessário;
- Auditável: Deve permitir a monitoração da sua efetividade, aplicabilidade e funcionalidade.

2.3 Métodos de gerenciamento de risco

2.3.1 O método *Bow-Tie*

A metodologia *Bow-Tie* é uma forma de diagramação que surgiu no ICI (Imperial Chemical Industries) em cursos de análise de perigos da *University of Queensland* na Austrália em 1979. Sua utilização também foi confirmada quando a *Royal Dutch / Shell Group* o aplicaram no acidente da plataforma Piper Alpha.

Esse método é utilizado nas indústrias em geral e em diversos processos, apresentando uma abordagem de fácil interpretação visual das barreiras preventivas e mitigadoras. Diagramas de *Bow-Tie* podem ser construídos a partir das árvores de falhas ou a partir de uma sessão de brainstorming. É imprescindível o entendimento das causas e consequências de um risco, bem como as interações com os controles de prevenção e recuperação.

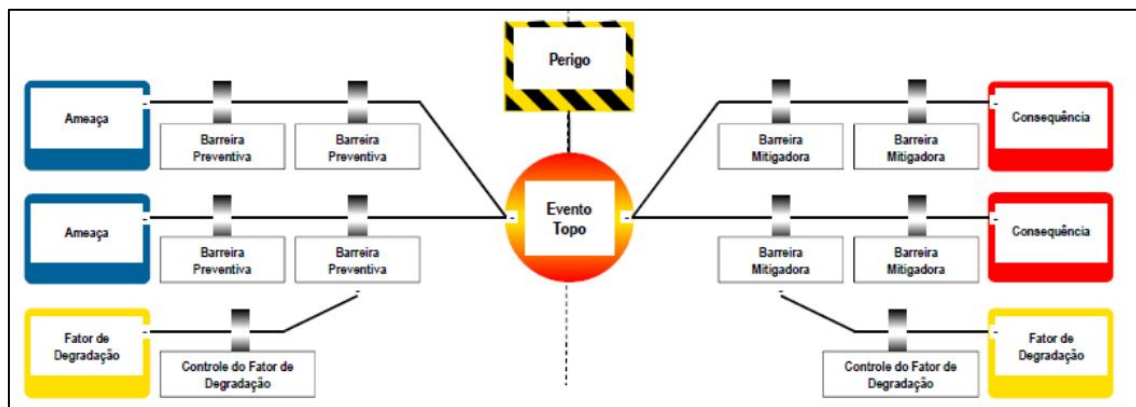
A metodologia do *Bow-Tie* é aplicada conforme os seguintes itens:

- Na parte central tem-se a identificação do perigo e do evento topo;
- Na parte esquerda tem-se a representação das diversas causas (ameaças) que promovem o evento topo;

- No lado direito tem-se as diferentes consequências que culminam com o evento topo;
- Identificação e representação das barreiras preventivas, que previnem as ameaças;
- Identificação e representação das barreiras mitigadoras, que previnem as consequências indesejadas;
- Finaliza-se com os fatores que afetam a efetividade das barreiras que estão relacionados aos dois lados do *Bow-Tie*, os fatores de degradação e os controles do fator de degradação;

O diagrama esquemático do Diagrama de *Bow-Tie* está ilustrado na Figura 2

Figura 2 - Exemplo típico de Diagrama de *Bow-Tie*



Fonte: CCPS (2018)

A dinâmica deste método consiste no conhecimento dos perigos e seus efeitos, avaliando os riscos envolvidos, incluindo suas especificações de recuperação e controle que devem estar atualizadas. As vantagens da sua aplicação consistem em: facilitar o entendimento e a visualização, através da representação gráfica; suporte para monitorar a integridade e a confiabilidade das barreiras preventivas e mitigadoras; recurso também durante a realização das auditorias e investigação de incidentes. O método possui algumas limitações pois, em caso mais complexos os diagramas ficarão mais poluídos visualmente e dificultando o entendimento do processo.

2.3.2 O método AHP

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) foi desenvolvido por Tomas L. Saaty em meados da década de 70, tornando-se um dos métodos multicritério mais adotado no auxílio à decisão (LUDOLF, 2021). A sigla AHP incorpora suas

características, as quais são essencialmente direcionadas à superação das limitações cognitivas dos tomadores de decisão.

Segundo Costa *et al.* (2008), são elementos fundamentais para o método AHP:

- Atributos e propriedades: avaliar as alternativas em relação a atributos e propriedades (critérios);
- Correlação Binária: dois elementos comparados baseados em um critério;
- Escala Fundamental: associa-se um valor de prioridade a cada elemento em relação a outro elemento conforme valores definidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Escala fundamental de Saaty

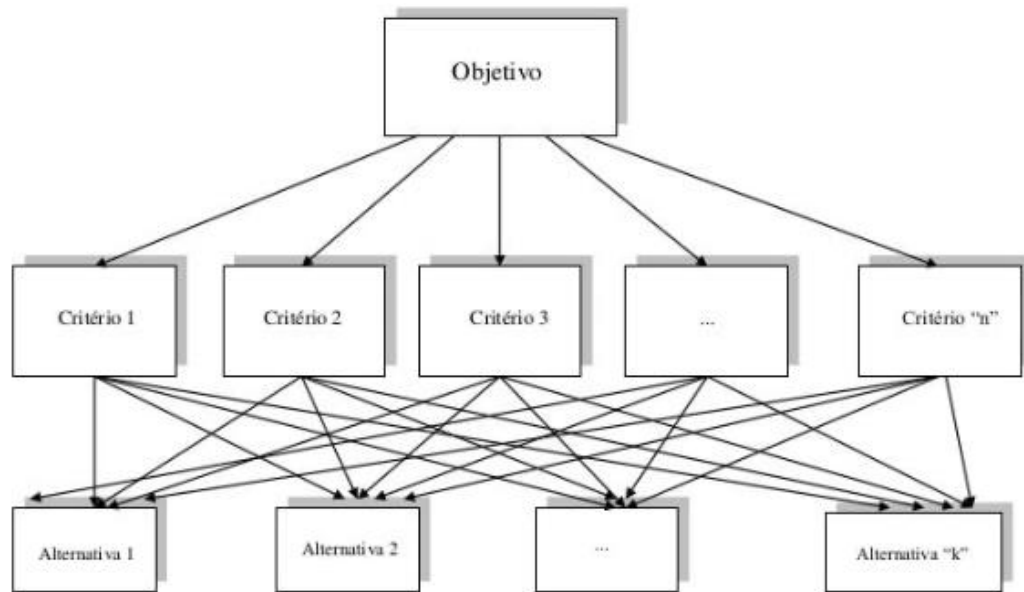
Valor	Definição
1	Igual importância
3	Moderada importância
5	Forte importância
7	Muito forte importância
9	Extrema importância
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Fonte: adaptado de Saaty (1991)

O método AHP assume que um conjunto de critérios tenha sido estabelecido e propõe um conjunto normalizado de pesos para ser usado quando as alternativas que usam critérios estejam sendo comparadas. Esse possibilita que o julgamento qualitativo seja quantificado com o objetivo de fornecer comparações precisas, reduzindo a incerteza entre as comparações de pares (BORADE *et al.*, 2013).

De acordo com a Figura 3, o método AHP possibilita criar uma estrutura constituída por: objetivo, critérios e alternativas através de um modelo de árvore de decisão (UGULINO, 2015).

Figura 3 - Modelo de árvore de decisão



Fonte: MARTINS (2018)

Dessa maneira, para tal aplicação do método, as etapas desenvolvidas no presente trabalho são descritas a seguir.

Etapa 1: Identificar os critérios a serem avaliados e estruturar o problema em níveis hierárquicos, facilitando a visualização do sistema como um todo e seus componentes.

Etapa 2: Construção das matrizes de decisão para a comparação par a par dos critérios, a partir da avaliação de especialistas com experiência na área, utilizando a escala fundamental proposta por Saaty (Tabela 2). A coleta de dados é realizada por meio de um questionário.

É válido ressaltar que o método AHP não estabelece um número mínimo de especialistas, e de acordo com Bouzon (2016), o tamanho da amostra de três especialistas é aceito para o método.

Etapa 3: Determinação do peso local de cada critério, obtendo o vetor de prioridades. Para normalizar as matrizes de decisão calcula-se a soma dos elementos de cada coluna da matriz e posteriormente divide cada elemento destas matrizes pelo somatório da respectiva coluna. O peso local de cada critério são as médias das linhas dos quadros normalizados.

Etapa 4: Verificação da consistência das respostas de um especialista por meio do Índice de Consistência (IC), do Índice de Consistência Randômico (IR) e da Razão de Consistência (RC). A Razão de Consistência dos julgamentos é denotada pela Equação 1

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (1)$$

na qual IR é o Índice de Consistência Randômico (ver Tabela 2) obtido para uma matriz recíproca de ordem n, com elementos não negativos e gerada randomicamente. O IC é dado pela Equação 2

$$IC = \frac{\gamma_{max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

Na qual $\gamma_{m\acute{a}x}$ é o maior autovalor da matriz de decisão. De acordo com Saaty (2000) a condição de consistência dos julgamentos é $RC \leq 0,10$.

A Tabela 3 apresenta os valores de IR em função da ordem n da matriz de decisão, dado pelo número de critérios avaliados.

Tabela 3 - Valores para o IR										
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,4	1,45	1,49

Fonte: adaptado de BOUZON *et al.* (2016)

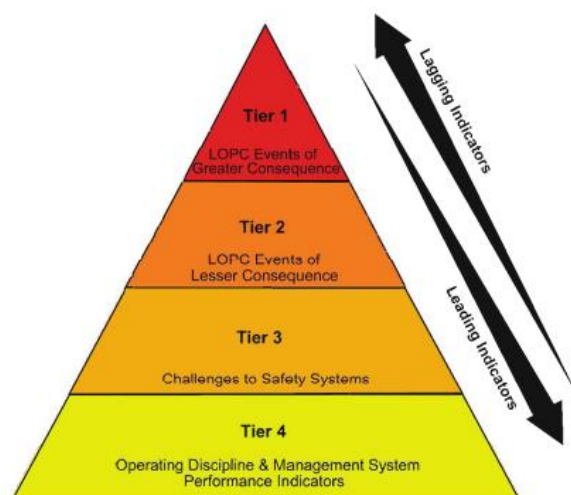
Etapa 5: Calcula-se o peso global de cada critério por meio da multiplicação do peso do mesmo pelo peso da categoria a qual este pertence (BOUZON *et al.* 2016).

2.4 Indicadores

Para melhorar continuamente o desempenho das barreiras, é essencial a prática de indicadores que avaliem a sua performance e auxiliem na análise de tendência, de forma a manter a disponibilidade, qualidade, requisitos de segurança e níveis de custo operacional da planta.

Os indicadores proativos de segurança de processo *Tier 3* permitem a avaliação das condições inseguras que demandaram as camadas de proteção, operação fora dos limites previstos de segurança, auxiliando na previsão de um acidente mais grave. Já os indicadores *Tier 4* indicam o desempenho dos principais elementos e sistemas dos processos, camadas de proteção ou disciplina operacional, que previnem incidentes. Tais indicadores possibilitam a companhia identificar e corrigir as fraquezas das suas barreiras (API 754, 2016). A Figura 4 ilustra os indicadores de Segurança de Processos.

Figura 4 - Pirâmide dos Indicadores de Segurança de Processos



Fonte: ANSI/API Recommended Practice 754 (2016)

Os processos em reatores de batelada são mais propensos a erros de incidentes de segurança, como consequência, deve-se melhorar os aspectos de segurança e confiabilidade na fase de projeto, bem como na fase operacional (RIZAL *et al.*, 2006). Assim, as estratégias de manutenção tornaram-se uma das mais importantes atividades na tomada de decisão na indústria. Quando esta é centrada na confiabilidade, torna-se possível minimizar os custos do ciclo de vida dos equipamentos, através da análise de indicadores (VISHNU; REGIKUMAR, 2016).

A análise RAM (*Reliability, Availability and Maintainability*) refere-se à confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade. A confiabilidade é a probabilidade de um sistema, equipamento ou componente continuar desempenhando a sua função especificada no projeto, de acordo com as condições de operação especificadas, em um intervalo de tempo (TELES, 1992).

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Em que: R é *Reliability* (Confiabilidade);

t é o intervalo de tempo de interesse para projetar a confiabilidade;

e é a constante de Neper base de logaritmo naturais (igual a 2,71)

λ é a taxa de falhas ($\lambda = 1/\text{MTBF}$), na qual MTBF é o tempo médio entre falhas.

A disponibilidade é a probabilidade de que um sistema ou um componente desempenhe sua função desejada no tempo necessário quando mantido ou operado da

maneira prescrita (ADE *et al.*, 2018). A disponibilidade é baseada no tempo médio para falha (MTTF) e no tempo médio para reparo (MTTR) do equipamento.

$$Disponibilidade(\%) = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100 \quad (4)$$

Como observado na Equação 4, a disponibilidade é um parâmetro que captura o nível de especialização do pessoal de manutenção (pelo MTTR) e a probabilidade de falha do equipamento (pelo MTTF). Se um equipamento for altamente confiável, ele terá alto MTTF e, portanto, maior disponibilidade inerente (ADE *et al.*, 2018). Uma análise de árvore de falhas representa os possíveis eventos de falha, podendo ser utilizado para na análise do MTTF (ANANTHARAMAN *et al.*, 2022).

Matematicamente, a manutenabilidade é a probabilidade de realizar uma manutenção de um equipamento ou sistema dentro de um período previsto conforme a Equação 5 (TELES, 1992). Esse indicador possui a característica de permitir avaliar estratégias de sobressalentes, horizonte de planejamento, fornecedores qualificados e até mesmo redundâncias de equipamentos.

$$M(t) = 1 - e^{-\frac{t}{MTTR}} \quad (5)$$

Em que $M(t)$ é a manutenabilidade;

t é o tempo para o qual se deseja projetar a manutenabilidade,

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se desenvolve em um Estudo de Caso com a aplicação de um modelo de gerenciamento das barreiras de um processo de polimerização do cloreto de polivinila desenvolvido nos livros *Guidelines for Safe Automation of Chemical Processes* (1993) e *Layer of Protection Analysis* (2000) do CPPS. O primeiro utiliza uma abordagem de análise de risco qualitativa semelhante ao HAZOP, enquanto o segundo utiliza uma abordagem mais quantitativa, o LOPA, para analisar o mesmo caso. Escolheu-se utilizar a referência mais nova, *Layer of Protection Analysis* (2000), com adaptações, para as considerações do trabalho.

3.1 O Estudo de Caso

O estudo de caso estabelecido para este trabalho consiste na produção de PVC através da polimerização do monômero de cloreto de vinila (VCM) para cloreto de polivinila (PVC).

Durante a fase de processo, um time formado por especialistas de processo e de projetos procederam com as análises de risco e identificação dos potenciais perigos da planta. Foi considerado o conceito de projeto inerentemente seguro, incluindo uma abordagem para minimizar os perigos de inventário. A partir desta análise de inventário, o layout da planta poderia ser modificado a fim de considerarmos a redução de potenciais incidentes.

Na sequência, descreve-se o processo de polimerização do monômero VCM para a obtenção do PVC. As condições da reação iniciadora (e seus aditivos) foram obtidas cuidadosamente para assegurar que a taxa da reação possa ser controlada a fim de prevenir as reações de *runaway* durante a produção do PVC.

As reações de *runaway* são conhecidas como reações que ocorrem em processos exotérmicos, em que o calor gerado excede o que dele pode ser removido. A partir do aumento da temperatura, a taxa de remoção de calor, que possui um comportamento linear, pode ser superada pelas taxas de reação e de produção de calor, apresentando um comportamento exponencial, conduzindo a uma perda de controle da reação (ZURICH, 2012).

Os riscos primários associados a este processo são a inflamabilidade, toxicidade e combustão originadas a partir do VCM. O VCM consiste em um perigoso produto inflamável, com combustão tóxica, sendo considerado carcinogênico. Analisando o histórico de acidentes com VCM, identifica-se uma planta no Japão (ZURICH, 2012), no qual quatro pessoas morreram e quatro ficaram feridas.

Esse acidente ocorreu devido a descarga do lote em um reator errado, sendo que o monômero não polimerizado foi liberado para uma sala que continha demais reatores em paralelo. O vapor do VCM adicionado a uma centelha, originada da parte elétrica de máquinas ou devido à eletricidade estática, provocou uma reação química que proporcionou uma reação de ignição. Posteriormente, uma explosão foi verificada no ambiente dos reatores.

Lições aprendidas de acidentes com esse produto e o reconhecimento dos riscos são sempre uma importante oportunidade para buscar a melhoria contínua na segurança operacional. (ZURICH, 2012).

Conforme a NR 26 toda substância comercializada deve apresentar uma ficha de segurança de produtos químicos (FISPQ) descrevendo as propriedades dos produtos químicos utilizados no local quanto aos perigos para a segurança e saúde dos trabalhadores conforme os critérios do Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS). Para o VCM não foi encontrada uma FISPQ em português, porém suas propriedades foram identificadas em referências internacionais. O Quadro 1 apresenta as propriedades e características do VCM.

Quadro 1 – Propriedades / Características do VCM

Propriedades relacionadas ao potencial de Incêndio	Limite de flamabilidade no ar: 3.6 – 33%; Flash point: -108F; Auto-ignição T = 882 F Derramamentos produzem nuvens de gás mais pesadas que o ar promovendo o <i>flashback</i>. Gases produzidos (HCL, CO, etc) produzido em caso de incêndio Possibilidade de explosão em espaços confinados Exposições externas em container podem ocasionar o BLEVE
Fatores de Risco associados a saúde ocupacional	Irritação nos olhos, nariz e garganta Em caso de inalação pode causar dificuldades de respiração e sintomas adversos e até mesmo a morte. Exposição excessiva pode causar danos ao fígado e ao rim; Carcinogênico e listado pela OSHA (<i>Occupational Safety and Health Administration</i>), IARC (<i>International Agency Research on Cancer</i>) Limite de exposição OSHA– 1 ppm TWA, 5 ppm (limite médio não excedendo 15 minutos)
Pictogramas	
Poluição na água	Limite do produto na água de processo – 10 ppm Limite de descarte do produto na água – 1 ppm
Emissões atmosféricas	Limite de descarte do processo na atmosfera – 10 ppm Limite anual de concentração na planta – 0,2 µg/m³ VCM no ar
Medidas de Controle	Alerta para Alta Flamabilidade, remover recursos de ignição, ventilação; Evacuar a área, permitindo a entrada somente com equipamentos de proteção; Potenciais de queimaduras;

Fonte: CCPS (2013)

Outro item em destaque no Quadro 1 é a utilização dos pictogramas que são de grande valia para a identificação quanto aos perigos associados ao VCM. Para este caso tem-se as classes de perigos associadas: chama (inflamável, auto-reativo, emite gás inflamável), crânio e ossos cruzados (tóxico agudo) e o último símbolo perigo à saúde (carcinogênico, perigoso por aspiração) (ABNT NBR 14725-3:2012).

Na sequência, a Equação 6 apresenta a reação de polimerização do monômero de cloreto de vinil (VCM) para obter o cloreto de polivinila (PVC).

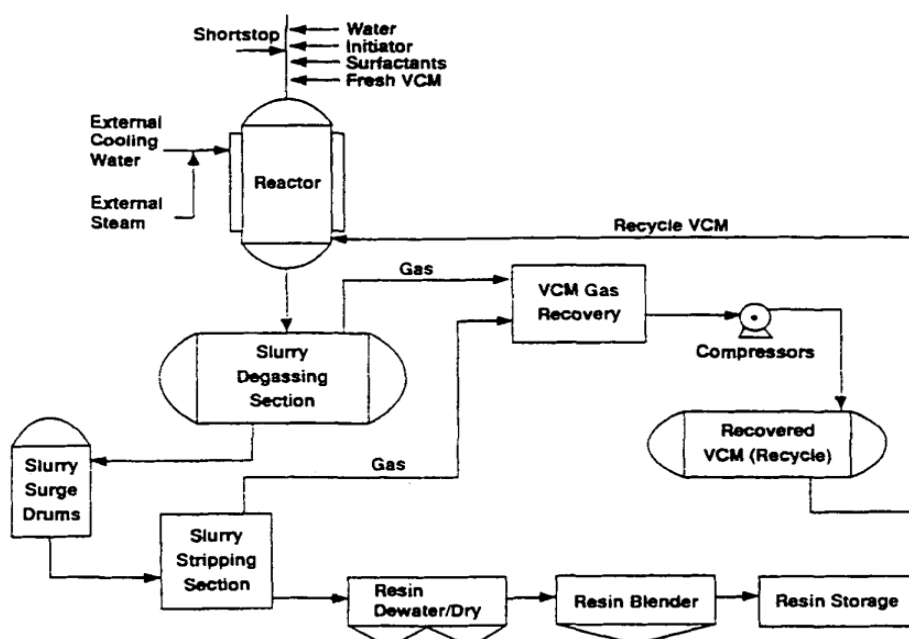


O PVC é obtido a partir da reação da polimerização do cloreto de vinila. A ligação dupla entre os carbonos é rompida, permitindo a formação das ligações simples entre as moléculas do cloreto de vinila.

O processo em avaliação descreve a fabricação em batelada de uma operação semi contínua em que o processo de polimerização costuma levar aproximadamente dez horas. Quando o reator é agitado mecanicamente, o calor da reação é removido através de circulação e resfriamento de água através de sua jaqueta. O sistema do processo é projetado com múltiplas unidades do reator em paralelo e, dessa forma, o processo pode operar em uma base semicontínua. Neste caso, tem-se como objetivo reconhecer a facilidade da produção, que possui tipicamente algumas unidades em paralelo operando em sequência.

A Figura 5 apresenta o fluxograma de processo de fabricação de PVC. Se o vaso do reator for aberto para manutenção, logo após que o último lote foi processado e despejado, é mandatório proceder primeiramente com o procedimento de remoção do ar residual (oxigênio) presente no vapor, a fim de minimizar a reação de oxidação do monômero. Um dos produtos desta reação é o HCl, que lidera uma reação de corrosão no vaso reator e, na sequência, promove um produto de baixa qualidade.

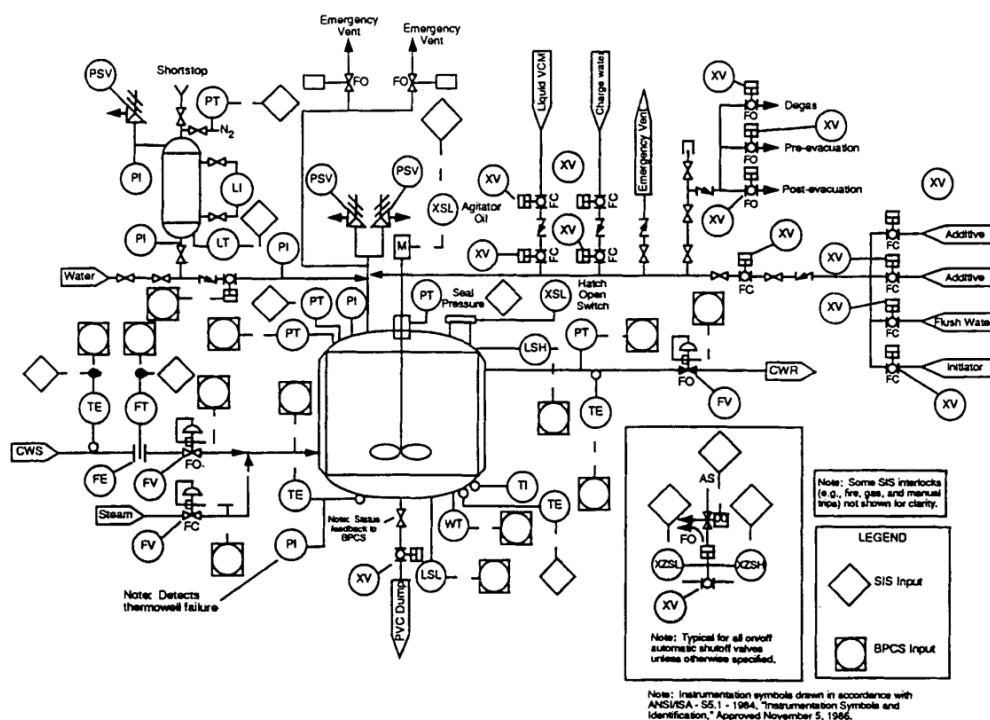
Figura 5 - Fluxograma de processo de PVC



Fonte: CCPS (2013)

A partir do fluxograma, tem-se um processo completo a partir da tubulação de recebimento, armazenamento dos inibidores, sistema de funcionamento da planta, a disposição das válvulas de alívio em conjunto com os sistemas de *vent*, sistema de recuperação e estocagem do VCM finalizando com o sistema que realiza a decapagem e secagem do PVC. Neste trabalho, destaca-se as etapas do processo que ocorrem dentro do vaso reator em conjunto com os recursos de instrumentação presentes na Figura 6 para controlar e monitorar este processo.

Figura 6 - Diagrama de Instrumentação (P&ID) do PVC



Fonte: CCPS (2013)

Desta forma, a primeira etapa é o tratamento do reator com solução anti-incrustante para prevenir polimerização na parede do reator. Posteriormente, o vaso é enchido com água desmineralizada e surfactantes.

A reação inicial é um líquido peróxido, que é dissolvido em solvente. Esse produto é armazenado em baixas temperaturas em um *bunker* especial. Pequenas quantidades são removidas para utilização diária no processo, mantidas em refrigeração. Em um primeiro momento, introduz-se uma pequena quantidade ao reator para assegurar que somente a quantidade correta está sendo adicionada.

Após o início da reação inibidora, a água é aquecida a vapor e aplicada na jaqueta do reator para aumentar a temperatura de 130 a 140°F, onde a reação poderá proceder em

uma taxa satisfatória. A agitação se faz necessária para suspender o VCM na água (controle particular do tamanho) e, por consequência, melhorar a transferência de calor através do lote ou batelada e produzir um produto uniforme. Ao se ter uma reação exotérmica, a água de resfriamento é circulada através da jaqueta do vaso para controle da temperatura do reator. As condições do reator são controladas cuidadosamente durante dez horas, aproximadamente, para uma completa polimerização.

A reação está definida como completa quando a pressão do reator diminui, sinalizando que a maior parte do monômero já reagiu. O polímero reagido é removido do reator e enviado para as unidades de processo a jusante para recuperação de VCM residual, desumidificação e secagem.

No Quadro 2 descreve-se os riscos e as respectivas consequências relacionadas ao VCM.

Quadro 2 – Tipo de consequência do VCM e resultados associados

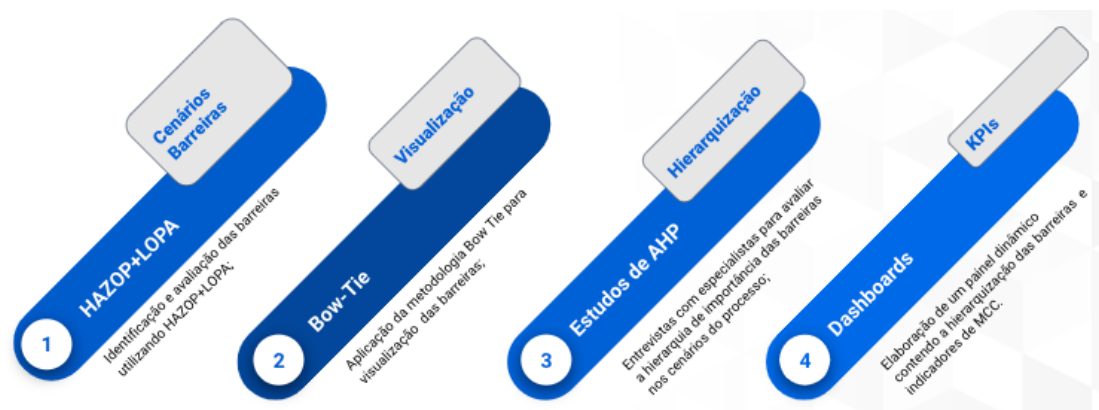
Tipo de consequência do VCM	Resultados associados
Jato de Fogo (jet fire)	Vazamento de líquido pressurizado pode ignizar e formar uma queima em jato, podendo atingir algum equipamento causando danos materiais
Flash de fogo (flashfire)	A liberação do líquido pressurizado produz vapores inflamáveis que podem atingir fontes de ignição
Pool Fire	Líquido residual da liberação forma um “pool”. Pode ocorrer a ignição e queima devido a extensão da chama sobre a “pool”.
BLEVE	Tanque pressurizado de VCM associado a exposição da tubulação a um incêndio externo ocasiona uma falha catastrófica no vaso do reator.
Explosões	Vazamento de gás inflamável dentro de espaço confinado possibilidade de ignição
Falha hidráulica	Repentino colapso do vaso do reator
Falha de stress de corrosão	Colapso metalúrgico do vaso do reator
Combustão de produtos tóxicos	A combustão dos produtos do VCM
Reação de runaway devido a “polimerização”	Reação de polimerização do VCM tem o potencial de provocar a ruptura no vaso do reator e a liberação do VCM ocasiona grandes prejuízos (Controle da temperatura da água do sistema de resfriamento do reator pode mitigar esta reação)

Fonte: CCPS (1993).

3.2 Etapas desenvolvidas

Na Figura 7 apresenta as etapas aplicadas ao estudo de caso, ilustrando a metodologia deste trabalho.

Figura 7 - Sequência da aplicação do método



Fonte: Elaborado pelas autoras.

3.2.1 Etapa 1 – Identificação e avaliação das barreiras – HAZOP em conjunto com LOPA

O estudo de LOPA, desenvolvido na referência, foi adaptado para ser representado junto ao HAZOP. Esta abordagem integrada considera os seguintes aspectos: o conceito de um evento ou condição habilitadora que poderia modificar a frequência do evento iniciador; conceito e regras para identificar e incluir camadas de proteção independentes (IPL); aplicar o critério de tolerância de risco numérico.

Destaca-se uma vantagem nesta integração entre HAZOP e LOPA: redução do tempo gasto com análises e conclusões da equipe técnica; facilidades de integração utilizando softwares que podem gerar os pares de causa-consequência para aplicação no LOPA.

Foram consideradas 13 (treze) barreiras diferentes aplicadas a 8 (oito) cenários avaliados, conforme as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Cenários encontrados e validados

Cenários encontrados e validados	Código
Perda de água de resfriamento	CEN1
Falha no acionamento do motor do agitador	CEN2

Perda de energia elétrica (toda a planta)	CEN3
Perda da bomba de água de resfriamento (elétrica)	CEN4
Carga dupla de catalisador	CEN5
Falha do controle de nível do BPCS	CEN6
Falha no controle de temperatura do BPCS durante o aquecimento, com o superaquecimento da batelada	CEN7
Falha no selo do agitador	CEN8

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Tabela 5 – Barreiras de cada cenário

Barreira	Cenário aplicável
Sistema de resfriamento de emergência	CEN1, CEN2, CEN3
Ação do operador ao alarme de temperatura/pressão alta, com adição de inibidor de reação	CEN1, CEN2, CEN3, CEN4, CEN5, CEN7
Ação do operador ao alarme de temperatura/pressão alta, com o alívio de gás do reator	CEN2, CEN3
Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal e tubulação separados	CEN1, CEN2, CEN3, CEN4, CEN5, CEN6, CEN7
SIF que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura/pressão no reator	CEN1, CEN2, CEN3, CEN4, CEN5, CEN6, CEN7, CEN8
Partida da bomba de AR (água de resfriamento) por turbina a vapor, em baixa vazão de água de resfriamento	CEN4
Células de nível/pesagem do BPCS	CEN6
Ação do operador interrompendo o fluxo	CEN6
SIF que adiciona água de resfriamento de emergência	CEN7

Ação do operador com a despressurização do reator	CEN8
Sistema de ventilação no selo do eixo 1 do agitador	CEN8
Sistema de combate a incêndio	CEN8
Plano de resposta à emergência	CEN8

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Para este estudo de caso foram considerados os possíveis efeitos encontrados no caso de falha das barreiras preventivas que consistem em: a reação descontrolada, sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades. Outro cenário comum nas indústrias petroquímicas é a perda de material que pode ocorrer devido a vazamento do vaso, ruptura de tubulação e elevação da válvula de alívio. Neste caso, a perda de produto PVC ocorre após a impossibilidade de impedir a ocorrência da reação descontrolada.

A planilha referente aos Estudos HAZOP em conjunto com LOPA está presente no Apêndice A.

3.2.2 Etapa 2 – Gerenciamento das barreiras – *Bow-Tie*

Após a identificação das barreiras, aplicou-se a metodologia *Bow-Tie* para auxiliar na visualização da atuação de cada uma dessas barreiras preventivas e mitigadoras nos diferentes cenários identificados no estudo HAZOP com LOPA. A Tabela 6 apresenta a descrição dos itens pertencentes ao *Bow-Tie*.

Tabela 6 – Definições do *Bow-Tie* para o Estudo de Caso

Item	Descrição	Exemplos
Evento Topo	Primeiro evento dos eventos não desejados	Reação descontrolada
Ameaças	Condições que podem acarretar o evento topo	Perda de água de resfriamento Falha no acionamento do motor do agitador Perda de energia elétrica (toda a planta) Perda da bomba de água de resfriamento (elétrica) Falha do operador - Carga dupla do catalisador Falha do controle de nível do BPCS

		Falha no controle de temperatura do BPCS
		Falha do selo agitador
Barreiras Preventivas	Barreiras no sistema para evitar as causas	Sistema de resfriamento de emergência
		Ação do operador ao alarme
		SIF de abertura de válvulas de alívio
		SIF de adição de água de resfriamento de emergência
		Válvula de alívio de pressão (PSV)
		Célula de nível / pesagem do BPCS
		Sistema de ventilação
Consequências	Efeitos possíveis para pessoas, meio ambiente, patrimônio, imagem da empresa	Colapso do vaso reator / explosão / vazamento / lesões
Barreiras Mitigadoras	Barreiras que possam minimizar as consequências	Plano de Resposta e Emergência
		Sistema de Combate a Incêndio

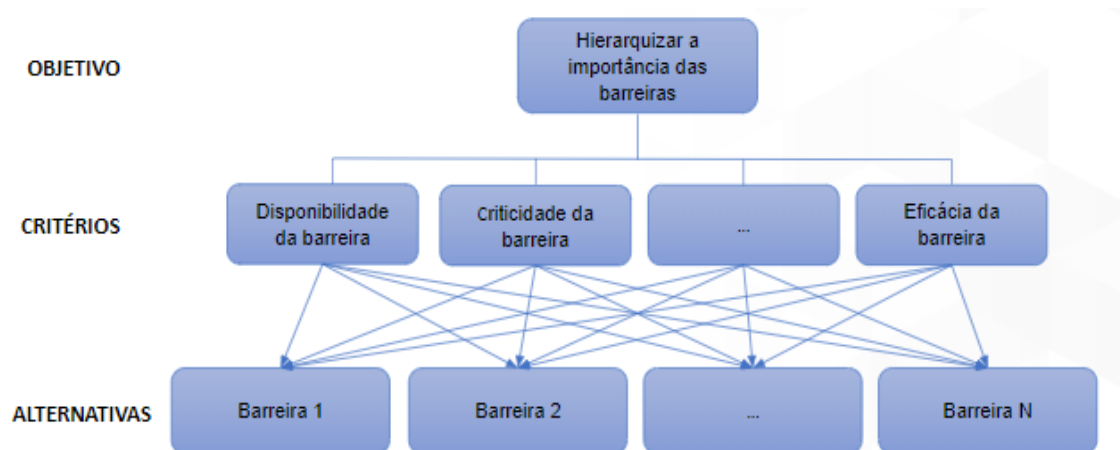
Fonte: Elaborado pelas autoras.

Na seção de resultados, será realizado um comparativo entre os diagramas de *Bow-Tie* demonstrando diferentes aplicações entre barreiras mitigadoras.

3.2.3 Etapa 3 – Gerenciamento das barreiras – AHP

Após a aplicação da metodologia *Bow-Tie*, buscou-se, pela avaliação de critérios para as camadas de proteção, a aplicação do método AHP com o objetivo de hierarquizar a importância das barreiras dos cenários avaliados conforme apresentado na Figura 8. Esta hierarquização orientará os gestores no suporte a decisão de ações para o restabelecimento da condição de integridade ou para o contingenciamento das barreiras de maneira a eliminar, contingenciar ou mitigar os cenários de consequências indesejáveis na instalação.

Figura 8 - Estrutura hierárquica do problema



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Os critérios das camadas de proteção (barreiras) avaliados neste estudo foram os seguintes:

- **Disponibilidade:** se quando demandada, a barreira pode cumprir a sua função;
- **Críticidade:** importância da barreira em caso de falha;
- **Eficácia:** se a barreira é eficaz na prevenção da consequência;
- **Redundância:** se a barreira apresenta redundância em caso de falha;
- **Dependência de ação humana:** o quanto a barreira é dependente da ação humana para desempenhar a sua função.

A aplicação do método AHP conta com a aplicação de questionários a Especialistas de Segurança de Processo designados pelo SENAI/CETIQT. Esses especialistas classificaram as barreiras quanto ao grau de importância em cada cenário, de acordo com o exemplo apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Exemplo genérico de questionário a ser preenchido pelos especialistas

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira tem a maior DISPONIBILIDADE, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor		
		PSV		
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		SIF de abertura de válvulas de alívio		
		PSV		
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio		
		Alarme + ação do operador + adição de inibidor		

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Neste contexto, para atingir tal resultado no que diz respeito ao gerenciamento de barreiras, serão apresentadas as matrizes geradas a partir da avaliação dos especialistas da área de segurança de processos após a coleta e a transformação das informações, de acordo com as etapas do método AHP.

3.2.4 Etapa 4 – Monitoramento das barreiras - Proposta de *Dashboard*

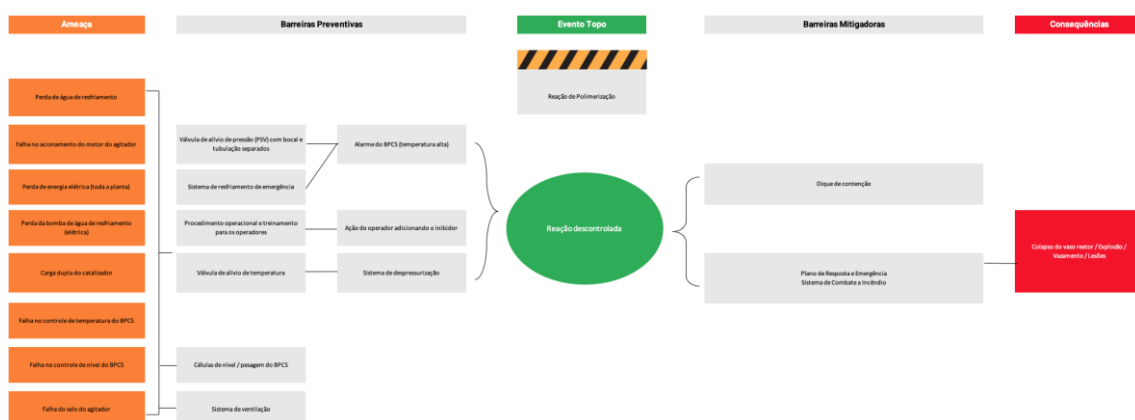
Para o monitoramento das barreiras foram propostos indicadores de Segurança de Processos e de Confiabilidade. Em seguida, juntamente com os resultados do *Bow-Tie* e AHP, os indicadores serão inseridos em um painel dinâmico para o monitoramento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da identificação dos cenários da análise de risco integrada HAZOP e LOPA, apresentados no Apêndice A, foram elaborados os diagramas de *Bow-Tie* (A) e (B) de maneira a representar o gerenciamento das barreiras preventivas e mitigadoras (Figuras 10 e 11, respectivamente).

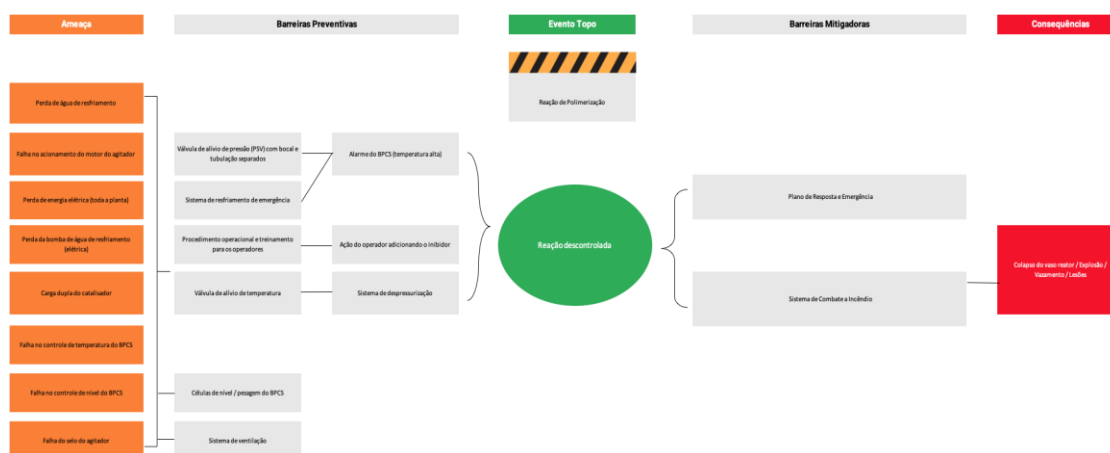
No diagrama *Bow-Tie* (A) considerou-se a barreira do dique de contenção, a qual na prática a aplicabilidade dela é de grande importância para a contenção dos fluidos devido a algum tipo de vazamento. No entanto, visto que o dique de contenção apresenta um custo de construção e para não gerar barreiras excessivas para um cenário que já havia atingido o risco tolerável, esta barreira que a princípio se adicionou na análise de HAZOP em conjunto com LOPA, deixou de ser considerada na análise de risco e consequentemente, no *Bow-Tie*.

Figura 10 - Diagrama de *Bow-Tie* (A) do Estudo de Caso



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Figura 11 - Diagrama de *Bow-Tie* (B) do Estudo de Caso



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Posteriormente com a aplicação do método AHP, identificou-se que não houve tempo hábil para analisar todos os 8 cenários de risco estabelecidos no estudo HAZOP e LOPA, sendo avaliado pelos especialistas apenas o cenário de desvio Pressão Maior da "Perda de água de resfriamento com reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades", conforme a Figura 12.

Figura 12 - Cenário perda de água de resfriamento

Desvios	Avaliação da Frequência		Possíveis Efeitos	Severid. Conseq.			RRF Requerido			Modos de Detecção / Salvaguardas (não IPL)	IPL	RRF	RRF Total	RRF Gap			Nº Rec
	Possíveis Causas	Freq.		S	E	A	S	E	A					S	E	A	
Pressão maior	Perda de água de resfriamento	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	D: Alarme do BPCS de temperatura alta no reator S: Sistema de resfriamento de emergência	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	10	1,00E+06	TR	TR	TR	-
											Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	100					
											SIF (PPD Req. 1 x 10 ³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	1000					

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Por meio do questionário AHP utilizando a matriz de comparação par a par (Figura 13), foram entrevistados dois Especialistas de Segurança de Processo que analisaram todos os critérios (disponibilidade, criticidade, eficácia, redundância e dependência de ação humana) de importância das barreiras do Cenário 01 - Perda de Água de Resfriamento.

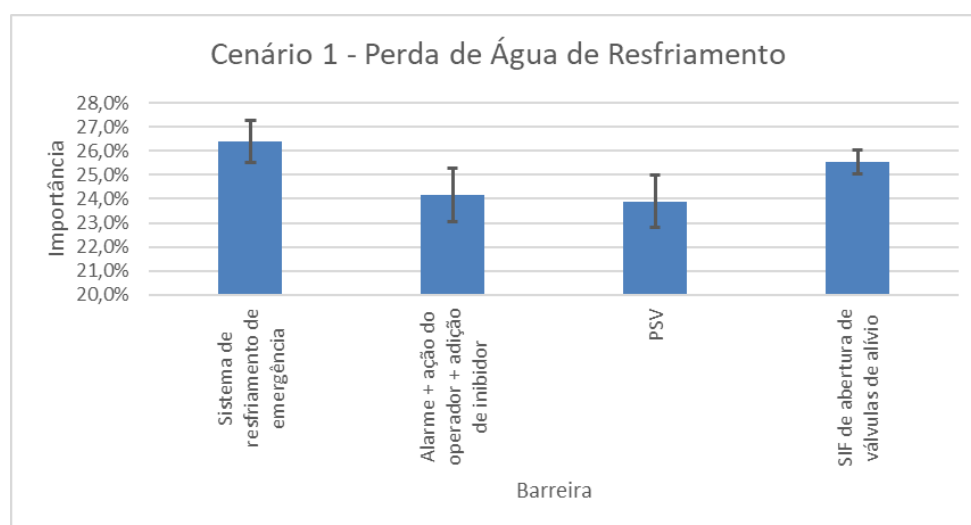
Figura 13 - Matriz de comparação par a par do Método AHP

Matriz		Sistema de resfriamento de emergência 1	Alarme + ação do operador + adição de inibidor 2	PSV 3	SIF de abertura de válvulas de alívio 4	Disco de ruptura 5
Sistema de resfriamento de emergência	1	1	1 1/7	1	1	-
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	2	7/8	1	1	1	-
PSV	3	1	1	1	1	-
SIF de abertura de válvulas de alívio	4	1	1	1	1	-
Disco de ruptura	5	-	-	-	-	1

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Desse modo, através do preenchimento da planilha em Excel, disponibilizada no Apêndice B, os resultados evidenciaram que os especialistas consideraram a barreira “sistema de resfriamento de emergência” mais importante de acordo com os critérios avaliados. A hierarquização da importância das barreiras apresenta-se na Figura 14.

Figura 14 - Hierarquização da importância das barreiras do Cenário 01



Fonte: Elaborado pelas autoras.

Seguindo a hierarquização da importância das barreiras, a Figura 15 evidencia o maior peso de importância de 26,4% da barreira “sistema de resfriamento de emergência”, posteriormente a barreira “SIF de abertura de válvulas de alívio” apresentou o peso de importância de 25,5%, a barreira “ação do operador ao alarme de temperatura alta, com adição de inibidor da reação” com peso de importância de 24,2% e por último, a barreira “válvula de segurança PSV” foi considerada a de menor importância conforme os critérios estabelecidos com o peso de 23,9%.

Figura 15 - Pesos da importância de cada barreira do Cenário 01

Barreiras	Descrição	Peso	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		26,4%	0,9%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	24,2%	1,1%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	23,9%	1,1%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	25,5%	0,5%

Fonte: Elaborado pelas autoras.

Neste cenário, de acordo com os resultados obtidos, o método AHP apresentou ser eficaz na hierarquização da importância das barreiras, já que a aplicação do questionário para as respostas individuais atingiu a Razão de Consistência esperada de consistência dos julgamentos $RC \leq 0,10$ de acordo com Saaty (2000). Ver Apêndice B.

Em relação a última etapa da metodologia do trabalho, a Tabela 07 apresenta os indicadores escolhidos para as barreiras do Estudo de Caso.

Tabela 07 - Indicadores para o monitoramento das barreiras

Barreira	Tipo do Indicador	Descrição do Indicador
Válvula de alívio de Pressão (PSV)	Segurança de Processo Tier 3	-Indicação da quantidade de abertura da PSV do reator; -Indicação da quantidade de vezes que a pressão ultrapassou a PMTA do equipamento
SIF que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	Segurança de Processo Tier 3	-Quantidade de demanda do SIF; -Tempo médio entre o alarme de pré-trip e a atuação da SIF
Resposta do operador ao alarme de temperatura/pressão alta	Segurança de Processo Tier 3	-Indicação da quantidade de vezes que a temperatura/pressão ultrapassou o limite, gerando ou não o alarme

Resposta do operador ao alarme de temperatura/pressão alta	Segurança de Processo Tier 4	-Porcentagem do treinamento necessário para a resposta do operador ao alarme de nível/pressão alta no reator, com verificação de eficácia.
Sistema de resfriamento de emergência (válvula, bomba, temperatura)	Confiabilidade	-Confiabilidade; -Manutenabilidade; -Disponibilidade
Sistema do inibidor de reação (válvula, bomba, temperatura)	Confiabilidade	-Confiabilidade; -Manutenabilidade; -Disponibilidade
Sistema de ventilação no selo do agitador	Confiabilidade	-Confiabilidade; -Manutenabilidade; -Disponibilidade

Fonte: Elaborado pelas autoras.

A frequência da atualização de métricas individuais varia de acordo com a sua natureza dinâmica, dos custos previstos para a coleta de dados e das necessidades locais, deve ser de forma eficiente para auxiliar a gerência da instalação a monitorar o desempenho e a eficiência do sistema de gestão, em uma base de tempo próxima ao tempo real, de forma a identificar os pontos fracos do sistema de gestão em evolução e intervenção nas barreiras, antes da sua degradação.

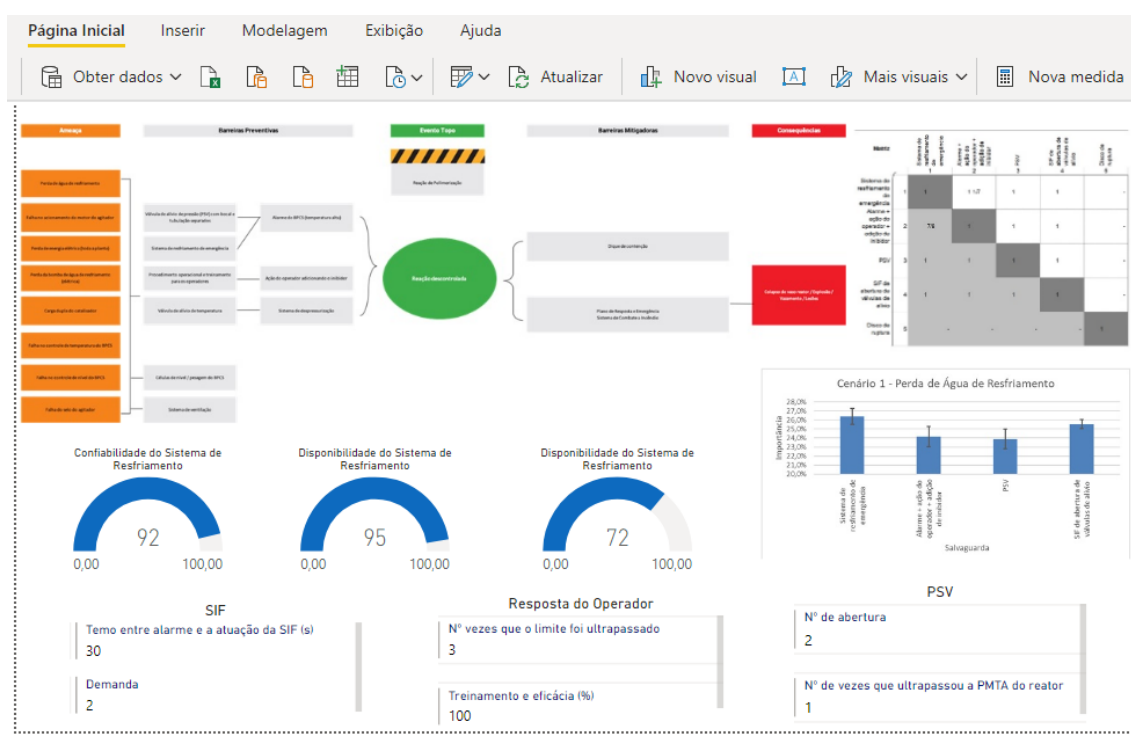
O histórico de falhas e manutenção serve como subsídio para determinar a condição atual dos equipamentos. Em uma fase seguinte, pode-se considerar todos os modos de falha que podem resultar em perda de função do sistema e determinar quais são os de maior risco. Além disso, é necessário que seja dada atenção cuidadosa à mão de obra, materiais e treinamento necessários (OKWUOBI *et al.*, 2018).

As metas estabelecidas devem promover a melhoria contínua na instalação, de forma que o planejamento e a execução de ações para que o indicador atinja e se mantenha dentro da meta estabelecida.

O acompanhamento através de painel dinâmico possibilita visualizações interativas e recursos com uma interface simples, no qual os dados podem ser extraídos de diversas fontes, tais como SQL Server, Access, Excel, permitindo a sincronização automática entre as fontes (Microsoft, 2022). Foi elaborado um modelo de *dashboard* (Figura 16) contendo:

- Diagrama de Bow Tie;
- Resultados da Análise Hierárquica de Processo;
- Indicadores para o acompanhamento das barreiras.

Figura 16 - Modelo de *dashboard* (Valores ilustrativos)



Fonte: Elaborado pelas autoras.

5. CONCLUSÕES

O método AHP possui a capacidade de propor a hierarquização das barreiras, conforme esperado, porém, durante o processo de entrevista e avaliação do questionário com os especialistas, verificou-se que é necessário prever uma carga horária considerável em torno de 2 horas, para preenchimento das planilhas de AHP para cada cenário identificado.

Identificou-se que para a aplicação do AHP como método de gerenciamento de barreiras, faz-se necessário que sejam disponibilizados mais detalhes sobre os sistemas (como operação, ciclo de vida, treinamento, dentre outros) a fim de facilitar a análise pelos especialistas. Ademais, algumas alterações nos valores para ajuste na Razão de Consistência podem influenciar no resultado de hierarquia das barreiras.

Portanto, o presente trabalho recomenda que o método seja aplicado para os cenários mais influenciados pelo desempenho das barreiras, que o mesmo seja utilizado como complementar aos estudos de segurança dos sistemas críticos, preferencialmente com especialistas da própria empresa e/ou especialistas que possuam todas as informações necessárias para o melhor desenvolvimento do método, e analisado por

equipe multidisciplinar de maneira a obter múltiplas visões de diferentes disciplinas, assim como faz-se em uma análise de risco de APR, HAZOP, LOPA etc.

Como sugestão/recomendações para futuras análises: análise de Homem/Hora gastos na aplicação do método; avaliação dos cenários que não conseguiram ser abordados no presente trabalho; avaliação com diminuição do número de critérios avaliados; avaliação de processo conhecido em uma empresa com equipe multidisciplinar e com diferentes níveis de experiência; e análise da influência da mudança de valores atribuídos para ajuste na Razão de Consistência; utilizar critérios para análise dos cenários de AHP considerando lições aprendidas de projetos anteriores.

Em relação às informações apresentadas pelos indicadores, com a combinação dos indicadores de Segurança de Processos (*Tier 3 e 4*) e os de Confiabilidade, verifica-se a possibilidade de monitoramento das barreiras, de forma a auxiliar na tomada de decisões sobre a melhor estratégia a ser implantada para garantir que um sistema atinja o nível desejado de confiabilidade, segurança e prontidão operacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry 1974-2019, Marsh JLT Specialty, 26th edition, March 2020.

ABNT NBR 6023 2018: Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/40070/1837975/ABNT+NBR+6023+2018+%281%29.pdf/3021f721-5be8-4e6d-951b-fa354dc490ed>.

AICHE/CCPS, Beacon: O que é “Segurança de Processo”?, 2008. Acesso em: 10 jan. 2018. COSTA, J.F.S. et al. Utilização do método de análise hierárquica (AHP) para a escolha da interface telefônica. In: XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2008. Rio de Janeiro. Anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, 2008.

American Petroleum Institute, ANSI/API Recommended Practice 754, Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries, Second Edition, Washington D.C., 2016.

BOUZON, M., GOVINDAN, K., RODRIGUEZ, C. M. T. Identification and analysis of reverse logistics barriers using Fuzzy-Delphi Method and AHP. Resources, Conservation and Recycling, v.108, p.182-197, 2016.

BP America Refinery Explosion. [S. l.], [2007]. Disponível em: <https://www.csb.gov/bp-america-refinery-explosion/>. Acesso em: 7 maio 2022.

CCPS. Indicadores de Segurança de Processo – Guia de Seleção de Indicadores Proativos e Reativos. Ago, 2019.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Safe Automation of Chemical Process, 1993. American Institute of Chemical Engineers

CORREA, Claudia Vasconcellos Rodrigues de Oliveira. Utilização das técnicas de análise – HAZOP e Vulnerabilidade para avaliação de um cenário típico de estação de tratamento de despejos industriais moderna em refinaria. 2014. Rio de Janeiro. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Química.

CROWL, Daniel A. & LOUVAR Joseph F. Chemical Process Safety: Fundamentals with Application, 4th edition, 2019.

CCPS (Center for Chemical Process Safety). Análise de Camada de Proteção – Avaliação simplificada do risco de processo. Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2021.

DEEPWATER Horizon – BP Gulf of Mexico Oil Spill. [S. l.], [2010?]. Disponível em: <https://www.epa.gov/enforcement/deepwater-horizon-bp-gulf-mexico-oil-spill>. Acesso em: 7 maio 2022.

GEORGES GUIOCHON. On the Catastrophic Explosion of the AZF Plant in Toulouse (September 21, 2001). [S.l.]. AIChE, 2012. Disponível em:

<https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/on-catastrophic-explosion-azf-plant-toulouse-september-21-2001>. Acesso em: 7 mai. 2022.

GONDIM, G.M. de M. Do Conceito de Risco ao da Precaução: entre determinismos e incertezas. (2007)

Elétrico Principal de uma Usina Nuclear. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, 2008.

HALASZ, Marcelo Teixeira. Análise de demandas de camadas de proteção definidas com a metodologia Lopa utilizando um sistema de gestão de ativos em instrumentação. 2017. Niterói. Dissertação curso de mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense.

Propriedades Físico Químicas do VCM. Disponível em: <https://www.chemsrc.com/en/cas/75-01-4_1192932.html>.

LIMA, Maria Aparecida de Paula. Limitações e dificuldades da implementação da metodologia de segurança inerente as plantas de processo. Rio de Janeiro, 2018.

MORAIS, C. *et al.* Explaining the explosion onboard FPSO Cidade de São Mateus from regulatory point of view. Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice, [s. l.], p. 173-190, set. 2016 DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315374987-29>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313808420_Explaining_the_explosion_onboard_FPSO_Cidade_de_Sao_Mateus_from_regulatory_point_of_view. Acesso em: 7 mai. 2022.

MUNIZ, M.V.P. “Análise crítica da contribuição da técnica de LOPA na gestão de segurança de processo na indústria”. 2016

NOGUEIRA, F.R. “Gestão de risco nos municípios. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais”. CARVALHO, C.S. e GALVÃO, T. (Org.), Ministério das Cidades; Cities Alliance Brasília, DF, pp.26-45. 2006.

NORSK OLJE&GASS. Norsk Olje&Gass. [S.l.]. Motta, [2015?]. Disponível em: <https://www.norskoljeoggass.no/drift/storulykkerisiko/internasjonalt-petroleumsvirksomhet/fpsocidade-de-sao-mateus/>. Acesso em: 7 mai. 2022.

OMS. Organização Mundial da Saúde. Estabelecendo um Diálogo sobre Riscos de Campos Eletromagnéticos. Genebra: OMS, 2002.

PASQUET, Véronique. Runaway reactions, case studies, lessons learned. Loss Prevention Bulletin, [s. l.], ed. 256, 2017. Disponível em: <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/presse/runaway-reactions-case-studies-lessons-learned/?lang=en>. Acesso em: 30 abr. 2022.

Produtos químicos – Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente Parte 3: Rotulagem - ABNT NBR 14725-3:2012.

Propriedades sobre o vinyl chloride. Disponível em: <
https://www.chemsrc.com/en/cas/75-01-4_1192932.html>.

SAUD, Y. E.; ISRANI, K.; GODDARD, J. Bow-Tie diagrams in downstream hazard identification and risk assessment. *Process Safety Progress*, Hoboken, v. 33, n. 1, p. 26-35, May 2013.

SAATY, T. L. “Método de Análise Hierárquica”. tradução de Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1991.

SEQUEIRA, D. G. Análise e avaliação de risco de incêndio através de diagramas Bow-Tie. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial)-Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2010.

SPINK, M. J. P. Trópicos do discurso sobre risco: risco-aventura como metáfora na modernidade tardia. *Cadernos de Saúde Pública*, 17(6): K1277-1311, nov.- dez., 2001.

TELES, Jhonata. Bíblia do RCM: O guia completo e definitivo da manutenção centrada na confiabilidade na indústria 4.0. Jhonata Teles. Brasília, Engeteles Editora, 2019.

UGULINO, K. L. C. A. Metodologia Dinâmica de Suporte à Decisão: Estudo de Caso da Aplicação da Metodologia Bow-tie na Análise de Risco de um FPSO na Fase de Operação. Dissertação – Universidade Federal Fluminense, UFF. Niterói, 2015.

UNIVERSITY OF QUEENSLAND (Australia). Minerals Industry Safety and Health Centre. National Minerals Industry safety and health risk assessment guide 1979. Disponível em: . Acesso em: 10 jun. 2014.

VASCONCELOS, F. M. Uma Aplicação da Técnica de Análise de Camadas de Proteção (LOPA) na Avaliação do Risco do Sistema de Hidrogênio de Refrigeração do Gerador.

WEST Fertilizer Explosion and Fire. [S. l.], [2016?]. Disponível em: <https://www.csb.gov/west-fertilizer-explosion-and-fire/>. Acesso em: 7 maio 2022.

ZURICH, Riscos de reações químicas reações de “Runaway”, Publicação do Departamento de Risk Engineering da Zurich Brasil Seguros S.A., Agosto 2012.

ZURICH. Riscos das reações químicas reações de “Runaway”. Informativo Risk Engineering, [s. l.], ed. 1, 2012. Disponível em: https://www.zurich.com.br/-/media/project/zwp/brazil/docs/risk-engineering/publicacoes-tecnicas/informativo_risk_engineering_consolidado_riscos_das_reacoes_quimicas_-_riscos_de_runaway_a02.pdf. Acesso em: 7 maio 2022.

APÊNDICE A

Planilha de HAZOP em conjunto com LOPA

HAZOP - Estudo de Perigos e Operabilidade e LOPA - Análise de Camadas de Proteção

Polimerização em batelada de monômero de cloreto de vinila (MVC) para cloreto polivinila (PVC)																			
Unidade:		Polimerização em batelada de monômero de cloreto de vinila (MVC) para cloreto polivinila (PVC)																	
Nós:		Reator encamisado com agitador																	
Desvios	Avaliação da Frequência		Possíveis Efeitos	Severid.			RRF Requerido			Modos de Detecção / Salvaguardas (não IPL)	IPL	RRF	RRF Total	RRF Gap			Nº Rec	Recomendações / Observações	Número Cenário
	Possíveis Causas	Freq.		S	E	A	S	E	A					S	E	A			
Pressão maior	Perda de água de resfriamento	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	D: Alarme do BPCS de temperatura alta no reator S: Sistema de resfriamento de emergência	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	10 100 1000	1.00E+06	TR	TR	TR	-		1
	Falha no acionamento do motor do agitador	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	S: Sistema de resfriamento de emergência S: Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação S: Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com o alívio de gás do reator	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	100 1000	1.00E+05	TR	TR	TR	-		2
	Perda de energia elétrica (toda a planta)	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	S: Sistema de resfriamento de emergência S: Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação S: Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com o alívio de gás do reator	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	100 1000	1.00E+05	TR	TR	TR	-		3
	Perda da bomba de água de resfriamento (elétrica)	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	D: Alarme do BPCS de temperatura/ pressão alta do reator S: Ação do operador, com a adição de inibidor na alta temperatura/ pressão do reator S: Partida da bomba de AR (água de resfriamento) por turbina a vapor, em baixa vazão de água de resfriamento	Ação do operador ao alarme de temperatura/ pressão alta, com a adição de inibidor OU partida da bomba de AR (água de resfriamento) por turbina a vapor, em baixa vazão de água de resfriamento Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal e tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	10 100 1000	1.00E+06	TR	TR	TR	-		4
	Falha do operador - Carga dupla de catalisador	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	D: Alarme do BPCS de temperatura/ pressão alta do reator	Ação do operador ao alarme de temperatura/ pressão alta, com a adição de inibidor Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal e tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	10 100 1000	1.00E+06	TR	TR	TR	-		5
	Falha do controle de nível do BPCS	10	Enchimento demasiado do reator com possibilidade de reação descontrolada, sobrepressão do reator, vazamento em flanges e conexões com lesões e fatalidades.	4	4	4	1000	1000	1000	S: Células de nível /pesagem do BPCS S: Ação do operador interrompendo o fluxo	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal e tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	100 1000	1.00E+05	TR	TR	TR	-		6
	Falha no controle de temperatura do BPCS durante o aquecimento, com o superaquecimento da batelada	10	Reação descontrolada e possibilidade de sobrepressão do reator, vazamento, ruptura, lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	S: Ação do operador com a adição de inibidor	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal e tubulação separados SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator SIF que adiciona água de resfriamento de emergência	100 1000 10	1.00E+06	TR	TR	TR	-		7
	Falha do selo do agitador	10	Vazamento de MVC no selo do agitador (45-450 kg de inflamáveis acima da pressão atmosférica), com possíveis lesões e fatalidades	4	4	4	1000	1000	1000	D: Detecção de vapores em torno do selo S: Ação do operador com a depressurização do reator S: Sistema de combate a incêndio S: Plano de resposta a emergência	Sistema de ventilação no selo do eixo 1 do agitador SIF (PFD Reg. 1 x 10 ⁻³) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	10 1000	1.00E+04	TR	TR	TR	-		8

MATRIZ DE TOLERABILIDADE DE RISCOS

Tabela 2 - Matriz de Tolerabilidade de Riscos

Categorias de Severidade das Consequências					Categorias de frequência									
					Descrição / características					A	B	C	D	E
										Extremamente raro	Raro	Pouco provável	Provável	Frequente
Processo					Património / continuidade operacional	Meio ambiente (ver Nota 2)	Imagem	Possível mas sem referências na indústria	Não esperado ocorrer, apesar de haver referências em instalações similares na indústria	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil de um conjunto de instalações similares	Possível de ocorrer uma vez durante a vida útil da instalação	Possível de ocorrer muitas vezes durante a vida útil da instalação		
IV	Catastrófica	Múltiplas fatalidades instantâneas ou fatais em grande escala (ver Nota 2)	Danos catastróficos (podendo levar à perda da instalação industrial)	Danos catastróficos	Repercussão internacional	M	M	NT	NT	NT				
III	Grave	Fatibilidade instantânea ou fatais em grande escala (ver Nota 2)	Danos severos a sistemas / equipamentos (depravação total)	Danos severos	Repercussão nacional	T	M	M	NT	NT				
II	Médica	Lesões graves instantâneas ou lesões graves extensas	Danos moderados a sistemas / equipamentos	Danos moderados	Repercussão regional	T	T	M	M	NT				
I	Marginal	Lesões leves	Danos leves a sistemas / equipamentos	Danos leves	Repercussão local	T	T	T	M	M				
0	Insignificante	Sem lesões ou danos de pequena extensão	Danos insignificantes ou comprometimento da continuidade operacional	Danos insignificantes	Repercussão insignificante	T	T	T	T	M				

Risk Tolerability Criterion

Consequence Severity	Tolerab. Freq. (1 em Y anos)
1	10
2	100
3	1000
4	10000
5	100000

Consequence Severity Decision Table - SISTECH

RANKING	SAFETY	ENVIRONMENTAL	ASSET
5	Multiple fatalities across a facility and/or injuries or fatalities to the public	Catastrophic off-site environmental damage with long-term containment and clean-up	Expected loss greater than \$10,000,000 and/or substantial damage to buildings located off-site
4	Hospitalization of three or more personnel (e.g., serious burns, broken bones) and/or one or more fatalities within a unit or local area and/or injuries to the public	Significant off-site environmental damage (e.g., substantial harm to wildlife) with prolonged containment and clean-up	Expected loss between \$1,000,000 and \$10,000,000 and/or extended downtime with significant impact to the facility operation and/or minor damage (e.g., broken windows) to buildings located off-site
3	Hospitalization injury (e.g., serious burns, broken bones) and/or multiple lost work day injuries and/or injury to the public	On-site release requiring containment and clean-up and/or off-site release causing environmental damage with quick clean-up	Expected loss between \$100,000 and \$1,000,000 and/or downtime of several days severely impacting the facility operation
2	Lost work day injury and/or reportable injury (e.g., skin rashes, cuts, burns) and/or minor impact to public	On-site release requiring containment and clean-up by emergency personnel and/or off-site release (e.g., odor) but no environmental damage	Expected loss between \$10,000 and \$100,000 and/or downtime of more than day causing impact to facility operation and/or reportable quantity event
1	Reportable injury and/or no impact to the public	On-site release requiring containment and clean-up by on-site personnel	Expected loss of less than \$10,000 and/or downtime of less than a day with minor impact to the facility operation

Questionário para Análise Hierárquica de Processo (AHP)

Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

O (A) Sr.(ª) está sendo convidado (a) para participar do projeto de pesquisa “Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila”, de responsabilidade das pesquisadoras Lilian Silva, Nara Correia, Nathally Viana e Vitória Pellizzari (Pós-Graduação em Segurança de Processos no SENAI/CETIQT).

Uma pesquisa bibliográfica identificou quais critérios são considerados importantes para o gerenciamento de barreiras (barreiras) em plantas de processo. Foram identificados e validados 6 (seis) critérios:

Critério	Descrição
Custos	Recursos para implementar e manter a integridade da barreira
Disponibilidade	Se, quando demandada, a barreira pode cumprir a sua função
Criticidade	Importância da barreira em caso de falha
Eficácia	Se a barreira é eficaz na prevenção da consequência
Redundância	Se a barreira apresenta redundância em caso de falha
Dependência da ação humana	O quanto a barreira é dependente da ação humana para desempenhar sua função

Assim, o (a) convidamos a analisar e responder qual sua percepção quanto à classificação de prioridade entre os 6 (seis) critérios encontrados e validados para 8 (oito) cenários e suas respectivas barreiras. Para isto, será necessário o preenchimento de 40 tabelas. Nestas tabelas, você fará uma comparação “par a par” entre os referidos critérios. O objetivo é estabelecer pesos numéricos para cada critério, estabelecendo assim uma escala de prioridade entre as barreiras.

Após o término da pesquisa, poderemos encaminhar o resultado deste trabalho.

Obrigada!
 Alcinda N. N. Viana
 Lilian C. G. Da Silva
 Nara R. Correia
 Vitória B. Pellizzari

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 Singapore License.

To view a copy of this license, visit <<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/sg/>> or send a letter to Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.

Original Spreadsheet Author: Klaus D. Goepel <<http://bpmsg.com>>

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário:Perda de água de resfriamento (CEN1)

Critérios avaliados:

Critério	Descrição	Código
Custos	Recursos para implementar e manter a integridade da barreira	CRIT1
Disponibilidade	Se, quando demandada, a barreira pode cumprir a sua função	CRIT2
Criticidade	Importância da barreira em caso de falha	CRIT3
Eficácia	Se a barreira é eficaz na prevenção da consequência	CRIT4
Redundância	Se a barreira apresenta redundância em caso de falha	CRIT5
Dependência da ação humana	O quanto a barreira é dependente da ação humana para desempenhar sua função	CRIT6

RESUMO

NS:4

Número de barreiras do Cenário

NC:16

Número de Critérios Avaliados

ID:0

ID Critério (0 = resumo)

Escala AHP:1

α:0.1

Consenso:83.1%

AHP 1-9

Consolidated

Objetivo:

Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto aos critérios selecionados (CUSTOS, DISPONIBILIDADE, CRITICIDADE, EFICÁCIA, REDUNDÂNCIA E DEPENDÊNCIA DA AÇÃO HUMANA)

Thresh:1E-08

Iterações:7

EVM check:1.9E-09

Tabela:

barreiras	Descrição	Peso	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		26.4%	0.9%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	24.2%	1.1%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	23.9%	1.1%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	25.5%	0.5%

Resultados:

Autovalor

Razão de Consistência - CR (%):0.37

GCI:0.00

Psi:33.3%

Lambda:4.002

CR:0.1%

MRE:0.0%

Cenário 1 - Perda de Água de Resfriamento

Barreira	Importância (%)
Sistema de resfriamento de emergência	26.4%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	24.2%
PSV	23.9%
SIF de abertura de válvulas de alívio	25.5%

Matriz

	Sistema de resfriamento de emergência	Alarme + ação do operador + adição de inibidor	PSV	SIF de abertura de válvulas de alívio	Disco de ruptura	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sistema de resfriamento de emergência	1	1 1/7	1	1	-	-	-	-	-	-
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	7/8	1	1	1	-	-	-	-	-	-
PSV	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
SIF de abertura de válvulas de alívio	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-
Disco de ruptura	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Principal Autovetor Normalizado

26.39%
24.17%
23.90%
25.54%
0.00%
0.00%
0.00%
0.00%
0.00%
0.00%
0.00%

Resultados:

Autovalor

Razão de Consistência - CR (%):0.37

GCI:0.00

5

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário: CEN 1 - Perda de água de resfriamento

Critério: CRIT 1 - CUSTOS

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério CUSTOS (CRIT1)

Por favor, compare a importância dos elementos em relação ao objetivo e preencha a tabela:

Qual elemento de cada par é mais importante, A ou B, e quanto mais em uma escala de 1 a 9, conforme indicado abaixo.

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Critério	Descrição	RGMM	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		53.0%	14.0%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	20.5%	10.7%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	6.8%	3.2%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	19.7%	9.0%

α : 0.1

Razão de Consistência - CR: 10%

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira tem o maior CUSTO, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	A	3
		PSV	A	6
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	4
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	A	6
		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	2
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	2

Referência para notas:

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário: CEN 1 - Perda de água de resfriamento

Critério: CRIT 2 - DISPONIBILIDADE

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério DISPONIBILIDADE (CRIT 2)

Por favor, compare a importância dos elementos em relação ao objetivo e preencha a tabela:

Qual elemento de cada par é mais importante, A ou B, e quanto mais em uma escala de 1 a 9, conforme indicado abaixo.

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Critério	Descrição	RGMM	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		25.6%	12.5%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	6.0%	2.9%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	34.2%	10.2%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	34.2%	10.2%

α : 0.1

Razão de Consistência - CR:

8%

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira tem a maior DISPONIBILIDADE, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	A	2
		PSV	A	1
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	B	9
		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	9
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1

Referência para notas:

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário: CEN 1 - Perda de água de resfriamento

Critério: CRIT 3 - CRITICIDADE

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério CRITICIDADE (CRIT3)

Por favor, compare a importância dos elementos em relação ao objetivo e preencha a tabela:

Qual elemento de cada par é mais importante, A ou B, e quanto mais em uma escala de 1 a 9, conforme indicado abaixo.

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Critério	Descrição	RGMM	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		10.8%	5.5%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	24.1%	12.4%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	32.6%	10.3%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	32.6%	10.3%

α : 0.1

Razão de Consistência - CR: 10%

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira é mais CRÍTICA, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	A	1
		PSV	B	5
		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	5
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	A	1
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1

Referência para notas:

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério EFICÁCIA (CRIT4)

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Razão de Consistência - CR: 8%

A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	A	3
		PSV	A	5
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	5
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	A	5
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	5
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário: CEN 1 - Perda de água de resfriamento

Critério: CRIT 5 - REDUNDÂNCIA

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério REDUNDÂNCIA (CRIT5)

Por favor, compare a importância dos elementos em relação ao objetivo e preencha a tabela:

Qual elemento de cada par é mais importante, A ou B, e quanto mais em uma escala de 1 a 9, conforme indicado abaixo.

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Critério	Descrição	RGMM	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		49.0%	22.3%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	8.2%	3.7%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	21.4%	5.9%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	21.4%	5.9%
Disco de ruptura			

α : 0.1

Razão de Consistência - CR: 9%

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira é mais precisa de REDUNDÂNCIA, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	A	3
		PSV	A	3
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	3
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	B	4
		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	4
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1

Referência para notas:

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários

Questionário AHP - Avaliação técnica de barreiras envolvidas em um processo de produção de cloreto de polivinila

Cenário: CEN 1 - Perda de água de resfriamento

Critério: CRIT 6 - DEPENDÊNCIA DA AÇÃO HUMANA

Objetivo: Classificar as barreiras pertinentes ao cenário PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO (CEN1) quanto ao critério DEPENDÊNCIA DA AÇÃO HUMANA (CRIT6)

Por favor, compare a importância dos elementos em relação ao objetivo e preencha a tabela:

Qual elemento de cada par é mais importante, A ou B, e quanto mais em uma escala de 1 a 9, conforme indicado abaixo.

Depois de concluído, você deverá ajustar as comparações destacadas de 1 a 3 para melhorar a consistência.

Critério	Descrição	RGMM	+/-
Sistema de resfriamento de emergência		4.1%	1.9%
Alarme + ação do operador + adição de inibidor	Ação do operador ao alarme de temperatura alta, com a adição de inibidor de reação	57.9%	26.3%
PSV	Válvula de alívio de pressão (PSV) com bocal de tubulação separados	19.0%	5.2%
SIF de abertura de válvulas de alívio	SIF (PFD Req. 1 x 10-3) que abre as válvulas de alívio em caso de alta temperatura do reator	19.0%	5.2%

α : 0.1

Razão de Consistência - CR: 9%

Considerando o cenário de PERDA DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO, qual barreira DEPENDE MAIS DA AÇÃO HUMANA, e quanto mais, em uma escala de 1 a 9?				
A	ou	B	A ou B?	Quanto mais? (1-9)
Sistema de resfriamento de emergência		Alarme + ação do operador + adição de inibidor	B	7
		PSV	B	7
		SIF de abertura de válvulas de alívio	B	7
Alarme + ação do operador + adição de inibidor		PSV	A	4
		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	4
PSV		SIF de abertura de válvulas de alívio	A	1

Referência para notas:

Intensidade de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas barreiras possuem a mesma importância nesse critério
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem levemente uma barreira à outra nesse critério
5	Alta importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma barreira à outra nesse critério
7	Muito alta importância	Uma barreira é muito fortemente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática
9	Extrema importância	Uma barreira é completamente favorecida em comparação com a outra, sua dominância é demonstrada na prática

2, 4, 6, 8 podem ser utilizados para expressar valores intermediários