

Pós-Graduação

Segurança de Processos



HAZOP APLICADO À ANÁLISE DE RISCOS PARA TRANSIENTES OPERACIONAIS EM PLANTAS DE PROCESSO QUÍMICOS

Andres F. L. Júnior, Leonardo R. Louback, Mauricio F. Quélhas, Priscila M. R. Gomes, Rafaela V. P. da Silva

RESUMO

A aplicação de técnicas de análise de riscos em situações transientes é fundamental para identificar, avaliar e mitigar potenciais ameaças ou incertezas associadas a atividades específicas. Essas técnicas visam aprimorar a gestão de processos, garantindo a eficiência e segurança das operações.

Em relação a situações transitórias, a análise de riscos começa pela identificação de possíveis eventos adversos que podem ocorrer durante a execução do processo em questão. Isso envolve a avaliação de diferentes cenários, desde falhas operacionais até eventos externos imprevistos. Em seguida, são atribuídas probabilidades e impactos a esses eventos, classificando-os conforme sua criticidade.

Uma vez identificados e classificados, os riscos podem ser mitigados através da implementação de medidas preventivas ou mitigadoras. Isso pode envolver a revisão e aprimoramento dos procedimentos, a introdução de controles adicionais, o treinamento de pessoal ou até mesmo a aplicação de tecnologias específicas.

Ao adotar uma abordagem sistemática de análise de riscos, as organizações podem não apenas proteger seus processos e ativos, mas também promover uma cultura de segurança, melhorando a confiabilidade e eficácia global de suas operações.

Especificamente sobre a técnica de HAZOP, a técnica consiste em aplicar a cada segmento de um processo a metodologia de identificação de desvios previamente estabelecidos, visando identificá-los durante as condições normais de operação, identificando as causas responsáveis por tais anormalidades e as respectivas consequências, em diferentes trechos do sistema (comumente denominados nós de estudo).

A proposta deste trabalho é desenvolver um modelo de HAZOP para ser aplicado em operações transientes. A principal abordagem é que durante a aplicação da metodologia, problemas potenciais sejam investigados por desvios e/ou palavras-guia adaptadas.

Palavras-chave: *Análise de Risco de Processo, Desvio operacional, HAZOP, Transiente operacional.*

ABSTRACT

The application of risk analysis techniques in transient situations is essential to identify, assess, and mitigate potential threats or uncertainties associated with specific activities. These techniques aim to enhance process management, ensuring efficiency and operational safety.

Regarding transient situations, risk analysis begins with the identification of possible adverse events that may occur during the execution of the relevant process. This involves evaluating different scenarios, ranging from operational failures to unforeseen external events. Subsequently, probabilities and impacts are assigned to these events, classifying them according to their criticality.

Once identified and classified, risks can be mitigated through the implementation of preventive or mitigating actions. This may involve reviewing and improving procedures, introducing additional controls, personnel training, or even the application of specific technologies.

By adopting a systematic approach to risk analysis, organizations can not only protect their processes and assets but also promote a safety culture, enhancing the overall reliability and effectiveness of their operations.

Regarding to HAZOP technique, it involves applying the methodology of identifying pre-established deviations to each segment of a process. The goal is to identify these deviations during normal operating conditions, pinpointing the causes responsible for such abnormalities and their respective consequences in different sections of the system (commonly referred to as study nodes).

The aim of this work is to develop a HAZOP model for application in transient operations. The main approach is that, during the methodology application, potential problems are investigated through adapted deviations and/or guide words.

Keywords: *Process Hazard Analysis, Transient operations, HAZOP, Operational Deviation.*

1. INTRODUÇÃO

O trabalho descrito propõe um método baseado na técnica do HAZOP, a fim de disponibilizar uma ferramenta de análise de riscos para procedimentos usados em transientes operacionais, por exemplo paradas e partidas de unidades ou plantas de processo.

Os acidentes descritos no item 2 - Contextualização descrevem a importância dos fatores humanos na prevenção de perigos de acidentes graves na Indústria de Processos. Existem fatores organizacionais que são necessários para garantir uma força de trabalho atuando dentro de uma cultura de segurança. O item aqui explorado dos fatores organizacionais são os procedimentos com o intuito de minimizar o potencial de falhas humanas.

Foram aqui explorados artigos baseados na literatura existente sobre o assunto. O item de contextualização descreve vários acidentes graves e suas recomendações

associadas de prevenção, controle e mitigação. Em alguns exemplos, ações ou omissões por parte da equipe operacional são cruciais.

Foi desenvolvida uma metodologia estruturada e qualitativa de avaliação de riscos para procedimentos críticos. O método utiliza os princípios do estudo de HAZOP, metodologia comprovada e largamente utilizada pela indústria de processo para avaliar o novo design de processos e operações normais, mas focando na sequência de ações realizadas durante um procedimento em transiente. A escolha do procedimento é realizada pela sua criticidade e todas as tarefas associadas são analisadas em equipe, identificando potenciais falhas humanas em cada tarefa, utilizando palavras-guia adaptadas. Para falhas possíveis, a equipe avalia as consequências, potencial de recuperação e outras medidas de redução de risco. Se o risco de falha humana for alto, a equipe recomenda melhorias para minimizar a probabilidade de erro.

Este artigo descreve a contextualização da situação de transientes, a fundamentação teórica levantada na literatura, a metodologia do trabalho executado, a adaptação do HAZOP proposta, um estudo de caso para um procedimento de parada planejada de uma unidade de tratamento de águas ácidas e as vantagens e limitações existentes para a adaptação.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

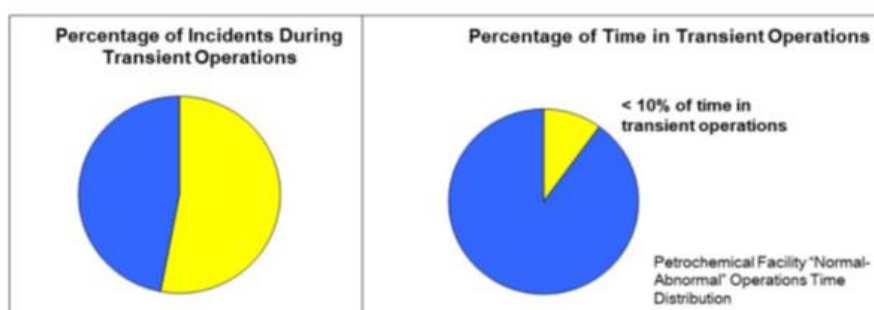
2.1. Histórico de Acidentes

Um dos direcionadores para a realização do presente trabalho é o histórico elevado de acidentes na indústria de processos que ocorrem durante operações transitórias, como partidas (*startup*), paradas (*shutdown*) e transições entre modos de operação. As normas para análise de risco e especificação de SIS geralmente baseiam-se no estado de operação permanente da planta. Segundo (BRIDGES, CLARK, 2011), a maioria dos métodos de análises de risco de processo não analisam detalhadamente as falhas que podem ocorrer durante esses modos de operação e muitas vezes focam somente em operações estáveis do processo. As práticas atuais das análises de risco de processo geralmente dão pouca atenção a outras fases da operação ou até as ignoram completamente (BAYBUTT, 2014). De acordo com (BRIDGES, MARSHALL, 2016), essa lacuna foi identificada há aproximadamente 25 anos e ainda existem lacunas nas análises de riscos e perigos em plantas industriais. Com isso, muitas companhias têm tomado iniciativas para aprimorar as técnicas de análises de risco de processo, concentrando os esforços no desenvolvimento

dos procedimentos não rotineiros, alavancados pelo aumento da pressão regulatória de diversos países, para que a indústria execute uma análise de riscos que abranja todos os modos de operação (BRIDGES, CLARK, 2011).

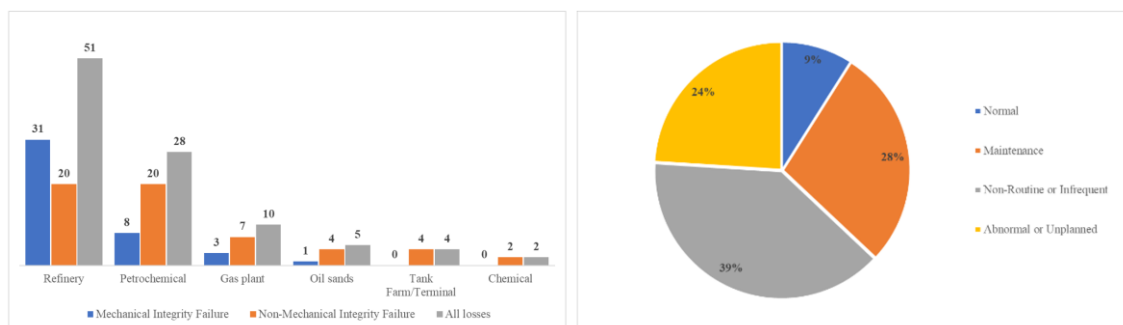
Segundo (DUGUID, 1998), uma refinaria ou planta petroquímica permanece menos de 10% do seu tempo em operações transitórias, no entanto, mais de 50% dos incidentes de segurança do processo ocorrem durante essas etapas. Já (BRIDGES, CLARK, 2011) realizaram uma compilação de 47 dos principais acidentes de segurança de processo de 1987 a 2010 que revelou que 66% dos casos ocorreram durante operações transientes.

Figura 1: Proporção de incidentes de segurança durante operações transientes. (DUGUID, 1998).



Mais recentemente, no artigo “The Hazards of Transient Operations”, (CLARKE, 2022), o banco de dados de perdas da Willis Engineering foi utilizado para identificar todas as perdas superiores a US\$ 50 milhões no setor onshore de petróleo, gás e petroquímica de 1996 a 2021. Os dados mostraram que 57% das perdas foram principalmente devidas a falhas relacionadas a operação, com 91% delas ocorrendo durante operações transitórias (63%) ou de manutenção (28%). Isto corrobora com a tese de que a maioria das grandes perdas devido a falhas nos controles operacionais ocorre durante períodos de transição, seja parada, partida, falha de utilidades (energia elétrica, vapor, etc.), operação de equipamentos, dentre outras. Estas perdas destacam deficiências na forma como a análise de risco de processo é realizada, uma vez que muitas vezes se concentra em operações em estado estacionário.

Figura 2: Análise de grandes acidentes com perda material ocorrido entre 1996 à 2021. (CLARKE, 2022).



Um dos acidentes mais graves mencionados em todos os bancos de dados, ocorreu em março de 2005 em uma refinaria da British Petroleum (BP), localizada na cidade de Texas City. Conforme o relatório da Junta de Investigação de Segurança e Riscos Químicos dos EUA — U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB, 2007), por volta das 13h20 do dia 23 de março de 2005, uma série de explosões ocorreu na refinaria BP em Texas City durante a partida de unidade de isomerização de hidrocarbonetos. Quinze trabalhadores foram mortos e outros 180 ficaram feridos. Muitas das vítimas estavam dentro ou próximas a instalações provisórias de trabalho localizados perto de um equipamento com escape atmosférico. As explosões aconteceram após uma torre de destilação foi preenchida com hidrocarbonetos e sofreu pressão excessiva, causando a liberação pelo topo de vaso com abertura para atmosfera. O relatório da investigação do acidente apontou deficiências organizacionais e de segurança em todos os níveis organizacionais da BP e uma delas estava o controle deficitário do sistema de segurança na partida da unidade. Todavia, como mostraremos mais adiante, falhas em tarefas do procedimento de partida foram determinantes para a ocorrência do acidente.

Outro acidente em unidade de processamento durante partida ocorreu na Refinaria de Paulínia (REPLAN), em agosto de 2018, no qual não houve fatalidades, mas resultou em prejuízo de dezenas de milhões de dólares (ANP, 2023). Entre as causas do acidente também cabe ressaltar sobre a necessidade de sempre manter a atenção em tarefas estritamente manuais em campo, envolvendo desde a constante avaliação dos procedimentos operacionais em campo até as condições ambientais de trabalho no campo, tendo destaque maior para operações não rotineiras.

Mas não somente durante a partida de unidades ocorrem os acidentes. Um acidente recente durante o procedimento de parada operacional ocorreu na Refinaria da Husky Energy, em abril de 2018 (CSB, 2022). Uma explosão e o subsequente incêndio na refinaria resultaram em ferimentos para 36 pessoas e na evacuação de uma grande parte da cidade vizinha de Superior, Wisconsin. O incidente ocorreu quando a unidade de

craqueamento catalítico fluido do local se encontrava em processo de parada para manutenção planejada. Acredita-se que a válvula guilhotina do catalisador gasto da unidade tenha se erodido e perdeu estanqueidade, não exercendo sua função de manter o nível de catalisador necessário para evitar a mistura de ar com hidrocarbonetos durante a operação transitória. Como resultado, houve fluxo reverso de ar do regenerador para o reator e, em seguida, para outros equipamentos a jusante, desencadeando uma grande explosão. A explosão lançou detritos por toda a planta, e uma peça perfurou um tanque de armazenamento nas proximidades, resultando na liberação de cerca de 15.000 barris de asfalto quente que subsequentemente inflamou e causou um grande incêndio.

Assim como em Texas City, este acidente também está na lista de 100 maiores perdas em acidentes da indústria química e de petróleo da seguradora Marsh de março de 2020 (MARSH, 2020). Foi reportada perda de mais de 600 milhões de dólares. A causa imediata do acidente também consistiu na falha de uma tarefa do procedimento de parada.

É importante mencionar que processos em batelada, bem como alinhamento de equipamentos para operação são entendidos por transientes operacionais. Um exemplo notório do primeiro caso foi o acidente na Planta de PVC da Formosa Plastics (CSB, 2007). Em 23 de abril de 2004, cinco trabalhadores foram fatalmente feridos e outros dois ficaram gravemente feridos quando ocorreu uma explosão em uma unidade de produção de cloreto de polivinila (PVC) na Formosa Plastics em Illiopolis, Illinois, a leste de Springfield. A explosão foi precedida por um vazamento de cloreto de vinila altamente inflamável, que se inflamou. A explosão forçou a evacuação da comunidade e iniciou incêndios que queimaram por vários dias na planta. Igualmente aos anteriores, o acidente ocorreu em função de falha na execução de tarefa no procedimento de conclusão de uma batelada do processo.

Como exemplo de acidente durante alinhamento de equipamento, podemos citar o acidente na Planta de Olefinas Williams Geismar (CSB, 2016). Um incêndio e explosão ocorreram na quinta-feira, 13 de junho de 2013, resultando em ferimentos fatais para dois trabalhadores na planta da William Olefins, Inc., localizada em Geismar, Louisiana. Este acidente foi causado diretamente após a execução de tarefa de procedimento comum em refinarias ou plantas químicas para o qual, tipicamente, não são elaborados procedimentos específicos.

É importante ressaltar que, apesar de alguns acidentes ocorrerem em consequência de uma tarefa executada de forma equivocada, o trabalho aqui descrito busca avaliar os procedimentos, a qual sejam consideradas as consequências decorrentes de um desvio de

execução de tarefa. Importante pontuar que situações como excesso de tarefa, ergonomia na operação entre outros devem ser rigorosamente avaliadas principalmente em situações fora da operação normal.

2.2. Legislações de Segurança de Processo

Desde os primeiros acidentes graves de Segurança de Processo, há esforços para estabelecer modelos ou sistemas de gestão de segurança de processo.

A Diretiva SEVESO I, em 1982, foi a primeira proposta coletiva para definir quais práticas de gestão são recomendáveis, ou em alguns casos, obrigatórias, com objetivo de alcançar um desempenho de segurança de processo mais robusto. Vários outros modelos, sistemas ou estrutura foram propostos posteriormente, incluindo duas novas diretivas, Diretiva SEVESO II, em 1996 e 2003. O fato de SEVESO I não ter sido alterada, mas que uma Diretiva completamente nova foi concebida para SEVESO II, já indica que mudanças importantes foram feitas e novos conceitos foram introduzidos na Diretiva SEVESO II, e que os conceitos vêm sendo reforçados ao longo dos anos.

Nos EUA, A OSHA (Occupational Safety and Health Administration) publicou o padrão de Gerenciamento de Segurança de Processos (PSM) (29 CFR 1910.119) em 1992 em resposta a vários incidentes catastróficos de liberação química que ocorreram em todo o mundo. Esses incidentes despertaram um amplo reconhecimento na comunidade de segurança de que liberações acidentais de produtos químicos altamente perigosos podem resultar em múltiplos ferimentos ou fatalidades de trabalhadores.

No Brasil, O Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional (SGSO) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) foi estabelecido, inicialmente para a área de Exploração & Produção, pela Resolução ANP nº 43/2007. Posteriormente, foi instituído o SGSO também para a atividade de Refino através da Resolução ANP nº 5/2014, com ligeiras diferenças em relação à resolução mencionada acima. Através do SGSO, a ANP busca garantir que as empresas adotem práticas de gestão efetivas de segurança operacional, incluindo o gerenciamento de riscos, gestão de mudanças, investigação de incidentes, análise de riscos e auditorias de segurança. O SGSO tem como objetivo prevenir acidentes, proteger a vida, o meio ambiente e os ativos envolvidos nas atividades operacionais da indústria de petróleo, gás natural e biocombustíveis.

2.3. Gerenciamento de riscos na indústria

Devido a tecnologia agregada às unidades de processo, as plantas da indústria de óleo e gás, atualmente, operam por longos períodos entre os intervalos de paradas para manutenção. Os sistemas aprimorados e avançados de controle de processo e desligamento de emergência corroboram para que os operadores trabalhem em uma planta durante anos sem passar por um estado transitório ou de emergência. É de máxima importância, portanto, que quando vivenciem um estado de emergência ou transitório, respondam de uma forma que seja consistente com a manutenção de um alto nível de segurança do processo. Como pode ser visto nas estatísticas, a maioria dos eventos indesejados em “estado estacionário” ocorre devido a falhas na integridade de equipamentos, já a maioria dos eventos indesejados em “estado transitório” estão relacionadas às manobras e práticas de operações.

A Indústria tem obtido sucesso na redução da frequência de acidentes de segurança de processos, melhorando a confiabilidade dos equipamentos e implementando barreiras de proteção nas suas plantas. Métodos foram desenvolvidos para estimar a confiabilidade desses sistemas com algum grau de confiança. Um desses métodos é o HAZOP. O termo HAZOP significa, em inglês, Hazard and Operability Study, ou Estudo de Perigos e Operabilidade e foi desenvolvido na década de 60 pela Imperial Chemical Industries Ltd (ICI), no Reino Unido. Ele investiga de maneira aprofundada as partes do processo, detectando as possibilidades de variação do padrão projetado, visando identificar os perigos e os problemas de operabilidade de uma instalação de processo. Essa metodologia é baseada em um procedimento que gera perguntas de maneira estruturada e sistemática através do uso apropriado de um conjunto de palavras-guia, sendo mundialmente o mais utilizado.

Em muitos cenários encontrados nos modos de operação de partida, parada e manutenção de equipamentos e/ou plantas industriais não há barreiras suficientes para a mitigação dos riscos. Estes riscos incluem a introdução de líquidos criogênicos em colunas ou vasos antes de garantir a pressurização adequada com gás, válvulas deixadas na posição errada apesar de muitas verificações duplas, válvulas abertas ou fechadas na sequência errada, apesar de listas de verificação e procedimentos escritos, etc.

Durante esses processos não rotineiros, a estreita interação entre os seres humanos e os equipamentos de processos acrescenta oportunidades para introduzir erros que normalmente não ocorrem durante a operação normal de uma planta, aumentando efetivamente as chances de erro pelo simples aumento da exposição e da interferência no processo pela atuação dos operadores. Durante estas operações transientes, algumas

Camadas de Proteção Independentes (IPLs) críticas não estão disponíveis ou não foram inseridas no projeto para mitigar os possíveis cenários acidentais oriundos destes modos de operação.

A variação de uma metodologia estruturada e qualitativa de avaliação de riscos foi desenvolvida para esses procedimentos críticos. O método é semelhante ao estudo de HAZOP para avaliar o projeto e a operação dos processos industriais, mas focando na sequência de ações realizadas durante um procedimento crítico de partida, parada e manutenção, o HAZOP para operações transientes.

2.4. A técnica HAZOP

Identificar os cenários que levam a consequências mais graves é subsídio para direcionar esforços e investimentos. Independente da técnica selecionada para identificar cenários perigosos, é exigida aplicação por uma equipe multidisciplinar formada por especialistas de diversas áreas.

Várias técnicas (ABNT, NBR 31010) foram propostas e aplicadas para identificação de perigos e a análise de riscos, desde a fase do projeto até início da operação, sendo parte integrante do gerenciamento de mudanças. Sem um processo de identificação estruturado, os perigos podem não ser identificados, implicando em perdas potenciais financeiras e humanas.

O HAZOP é uma ferramenta estruturada para identificação e aplicação de medidas corretivas para riscos sendo amplamente utilizada em indústrias químicas, petroquímicas, óleo, gás, dentre outros processos. É uma técnica usada para identificar riscos com impacto para pessoas, meio ambiente, materiais e imagem da companhia, além de que, baseia-se na premissa de que os cenários acidentais são causados por desvios nas variáveis operacionais ou nas ações operacionais. Essa técnica classifica qualitativamente o risco inicial e final, após a aplicação de recomendações para redução de riscos identificados pela técnica.

O HAZOP foi desenvolvido pela ICI (Imperial Chemical Industries LTD), em 1960, no Reino Unido e seu uso e desenvolvimento foram incentivados pelo Guia da Chemical Industries Association (CIA) publicado em 1977. Desde então, tornou-se a técnica mais utilizada nos novos projetos e avaliação de risco em plantas em operação.

A principal vantagem da utilização dessa técnica é sua estruturação, sendo simples e intuitiva para equipes conhecedoras do processo (KLETZ, 1999). Quando

complementada por outras técnicas, p. ex. LOPA (Layer of Protection Analysis, Análise de Camadas de proteção), requisitos de segurança adicionais podem ser determinados para algumas salvaguardas.

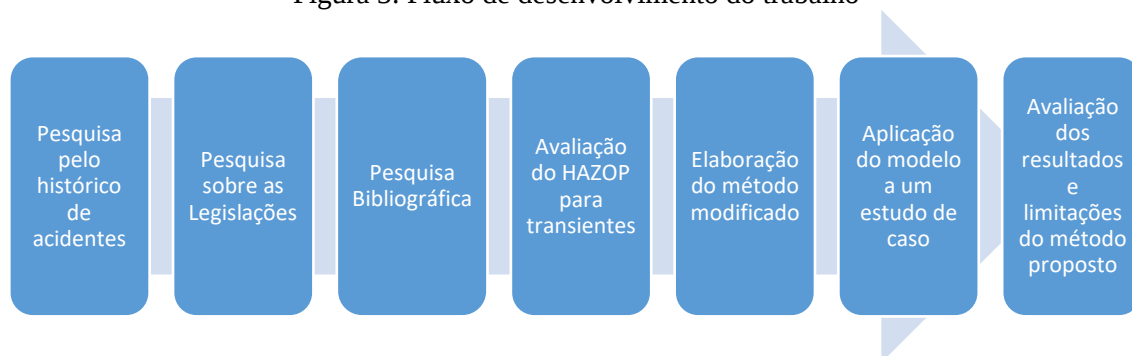
Um exemplo disso é a definição do nível de integridade das malhas do Sistemas Instrumentados de Segurança (SIS). Esses estudos fornecem informações às organizações para ajudá-las a melhorar a segurança e gerenciar o risco de suas operações (NOLAN, 2015).

Embora o HAZOP seja uma técnica robusta, bem estruturada e que vem sendo adaptada e aplicada em várias áreas, ainda existe uma lacuna de aplicação dessa técnica em operações transientes como partidas, paradas e manutenções de plantas industriais (TRUCCO, CAVALLIN, 2006). O HAZOP na maioria das instalações concentra-se nas operações em estado estacionário.

3. METODOLOGIA DO TRABALHO

A fim de desenvolver uma metodologia de HAZOP de transientes, baseado na técnica clássica e nos estudos posteriormente desenvolvidos, foram seguidas as etapas descritas na Figura 3.

Figura 3: Fluxo de desenvolvimento do trabalho



3.1. Pesquisa pelo Histórico de Acidentes

Para pesquisar o histórico de acidentes ocorridos durante transientes operacionais, avaliamos diversas publicações sobre o tema, incluindo artigos em periódicos, bancos estatísticos de seguradoras renomadas (Marsh, Willis Engineering) e, também, relatórios de investigação de grandes acidentes (CSB).

3.2. Pesquisa sobre as Legislações

Essa etapa teve como principais motivadores a confirmação da importância da análise de riscos em todos os principais modelos de gestão, tanto o da ANP quanto internacionais (OSHA, Seveso), bem como a escassez da exigência pela análise de risco especificamente para transientes operacionais.

3.3. Pesquisa bibliográfica

Mesmo com a escassez de legislação específica, é possível encontrar trabalhos publicados com diferentes propostas para análise de risco de transientes. Com tal objetivo, foram pesquisados repositórios bibliográficos (Science Direct, Springer, Simpósios Internacionais, etc).

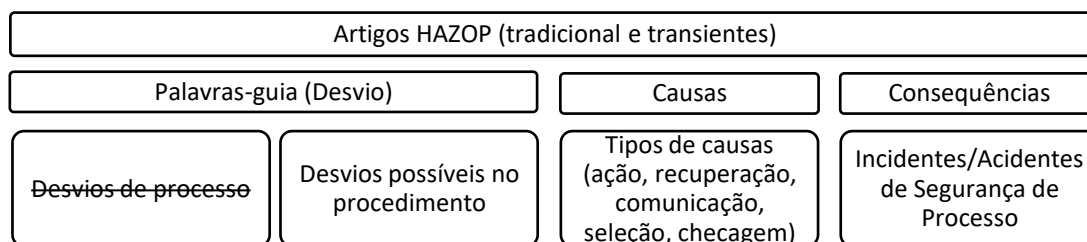
3.4. Avaliação do HAZOP para transientes

A partir dos trabalhos encontrados, optamos por estudar o método HAZOP, tendo em vista ser uma metodologia bastante enraizada, com potencial de redução do tempo de implantação. Avaliamos seus pontos fortes e deficiências, focando em sua aplicação a transientes operacionais e, também, abordagens de erros humanos em ações procedimentais.

3.5. Elaboração do método modificado

Com a literatura encontrada, bem como com o resultado do estudo do método, foram selecionados artigos para adaptação da metodologia para a realidade de uma indústria de óleo e gás. Passo a passo da transformação no fluxograma da Figura 4.

Figura 4: Processo de adaptação do método



O desenvolvimento da transformação do método foi inicialmente pensado em avaliar as variáveis de processo associadas aos desvios de procedimento. Ao longo da pesquisa, observamos que as variáveis de processo são consequência de um desvio (palavra-chave), ou seja, a perturbação do processo na condição transiente é inerente, e comportamentos variáveis são esperados para as respectivas variáveis. O que não é esperado é uma execução omitida, anacrônica ou equivocada do procedimento, ocasionando desvios de processo fora das condições de projeto como consequência.

Dessa forma, foram desenvolvidas as palavras guia com essas informações da literatura, agrupando um conjunto de causas conforme descrito mais detalhadamente no item 4.1.

3.6. Aplicação do modelo a um estudo de caso

Após a determinação da proposta de aplicação, fez-se necessária a execução de um estudo de caso para avaliar as vantagens e limitações do método proposto.

A seleção do procedimento de liberação foi feita com base na análise dos principais acidentes da indústria, as quais se referem, em grande parte, a procedimentos de parada e partida.

3.7. Avaliação dos resultados e limitações do método proposto

Concluimos o trabalho com avaliação dos ganhos com a aplicação do método proposto, bem como a observação das restrições de uso.

4. Resultado

4.1. Método proposto

Durante os procedimentos de partida e parada das unidades, as pressões, temperaturas e, portanto, as composições dos fluidos do processo, podem estar bem fora dos parâmetros normais de operação submetendo os materiais de construção das tubulações e equipamentos a estados críticos. A parada de uma unidade é um processo não tão sequencial quanto um procedimento de partida e não é necessariamente o inverso desta. Os inventários devem ser reduzidos ao mínimo operacional e em seguida, o processo deverá ser despressurizado e o estoque residual e frequentemente contaminado deverá, sempre que possível, ser recuperado (reprocessado).

Dado essas particularidades de um processo de transiente, neste trabalho se propõe definir o método de HAZOP aplicado a procedimentos, denominado para os fins desse estudo HAZOP_P.

A avaliação das causas dos perigos de operações transientes utilizando-se o HAZOP_P envolve a avaliação dos procedimentos de partida, parada e manutenção para descobrir possíveis cenários acidentais associados à estas operações. O objetivo, então, desta equipe de HAZOP_P é avaliar, neste momento, os riscos associados à omissão ou execução incorreta de manobras operacionais nestas etapas.

A análise procedimental colabora para identificar as etapas em que há uma maior intervenção operacional e sugerir maneiras de reduzir o risco de um cenário acidental, desde revisão de procedimentos, melhoria dos sistemas de gestão podendo até sugerir a adição de hardware.

Utilizando esta abordagem, a equipe de HAZOP_P se concentra em encontrar cenários em modos anormais ou não contínuos de operação, considerando que erros humanos podem ocorrer durante a execução das manobras e dos cumprimentos dos procedimentos. Tomando-se como premissa que os operadores geralmente têm menos experiência operacional nessas situações não-rotineiras e que estes tipos de operações dependem fortemente da tomada de decisões e das manobras executadas no campo pelo operador. Nessa técnica, não se analisa os Fatores Influenciadores de Performance, partindo-se do pressuposto que os erros ocorrem e suas consequências devem ser analisadas. Uma abordagem posterior pode ser aplicada, para refinar os resultados de probabilidade de ocorrência levando em conta esses fatores.

Para a execução do processo, abaixo estão descritos os passos principais de preparação para a aplicação do método. Cabe lembrar que é necessário garantir o treinamento, competência e a experiência dos Líderes na técnica de HAZOP_P aqui proposta antes de iniciar os passos abaixo.

- Passo 1: Escolher os procedimentos no qual a técnica será aplicada;
- 1. Procedimentos críticos são definidos como procedimentos operacionais ou de manutenção com o potencial de causar ou limitar a escalada de perigos de acidentes graves (MAH - Major Accident Hazards). Esses eventos geralmente estão associados à 'perda de contenção' de substâncias perigosas que têm o potencial de causar consequências graves envolvendo pessoas, meio ambiente ou patrimônio.

Os MAH associados a procedimentos 'críticos para a segurança' podem ser geralmente encontrados com referência às avaliações de risco das unidades (identificados como salvaguardas, por exemplo) ou àqueles que historicamente estão associados a eventos de segurança de processo, e no caso desse trabalho, os procedimentos de parada e partida. Embora muitos perigos em plantas de processamento sejam geralmente eliminados por sistemas de proteção automáticos, geralmente há uma proporção de perigos em que os controles procedimentais são essenciais para alcançar o nível necessário de redução de riscos.

Procedimentos críticos para a segurança incluem atividades físicas ou mentais que:

- Têm o potencial de iniciar uma sequência de eventos, ou
- Interromper uma sequência de incidentes, ou
- Evitar a escalada de um incidente.

- Passo 2: Análise Hierárquica de Tarefas

A Análise Hierárquica de Tarefas é utilizada para listar as etapas-chave na atividade que serão utilizadas na fase de identificação de falhas humanas. O nível de detalhe em cada etapa do procedimento está relacionado ao evento perigoso específico em avaliação. Haverá várias etapas amplas envolvidas na atividade, algumas das quais serão detalhadas em subetapas quando necessário.

As etapas-chave são preparadas antecipadamente à reunião de identificação de riscos. Isso é feito conversando com os operadores sobre como a atividade é realizada na prática, observando a atividade sempre que possível, além de uma revisão do procedimento escrito, lista de verificação, materiais de treinamento e avaliação de riscos relevantes. As etapas-chave incluirão uma descrição do que é feito, quais informações são necessárias (e de onde vêm) e quaisquer interações com outras pessoas.

Nessa etapa, são separados os processos imediatamente superior às tarefas de menor nível, que são os equivalentes aos nós do HAZOP tradicional.

- **Passo 3: Identificar possíveis falhas humanas**

Uma equipe composta por profissionais experientes e conhecedores da planta é necessária para conduzir o estudo de identificação de riscos. Este segue uma abordagem semelhante à exigida para um HAZOP tradicional. A equipe inclui as seguintes funções:

- Líder, especialista independente em segurança de processo
- Especialista em Segurança de Processo do Local
- Supervisor da operação em revisão ou elaborador do procedimento
- Operador ou Técnico com experiência direta na operação

A equipe do HAZOP_P considera cada etapa-chave na atividade proveniente da Análise Hierárquica de Tarefas, com o objetivo de identificar os tipos de falhas humanas descritas nos próximos itens

Para auxiliar a equipe na identificação de falhas humanas possíveis, são aplicados os seguintes desvios (palavras-guia) do HAZOP_P (Tabela 1) a cada etapa-chave. A tabela foi elaborada referenciando-se as falhas apresentadas pela metodologia SHERPA (EMBREY,1986).

Quadro1: Palavras-guia HAZOP operações transientes - HAZOP_P

DESVIO	FALHAS TÍPICAS
TAREFA FORA DO TEMPO	A1 - Operação muito longa/curta
	A11 – Tarefa correta na sequência errada
TAREFA INCORRETA	A2 - Operação incorreta
	A3 - Operação na direção errada
	A6 - Operação correta no objeto errado
	A7 - Operação errada no objeto certo
	A9 - Operação incompleta

	A10 - Operação errada no objeto errado
	C2 - Cheque incompleto
	C3 - Verificação certa no objeto errado
	C4 - Verificação errada no objeto certo
	C5 - Cheque incorreto
	C6 - Verificação errada no objeto errado
TAREFA EM EXCESSO/FALTA	A4 - Muito pouca/muita operação
ALINHAMENTO INCORRETO	A5 - Erro de alinhamento
TAREFA OMITIDA	A8 - Operação omitida
	C1 - Cheque omitido
FALTA DE INFORMAÇÃO	R1 - Informação não obtida
	R2 - Informações erradas obtidas
	R3 - Recuperação de informações incompleta
INFORMAÇÃO NÃO COMUNICADA	I1 - Informação não comunicada
	I2 - Informação errada comunicada
	I3 - Comunicação de informações incompleta
ESCOLHA OMITIDA	S1 - Seleção omitida
ESCOLHA INCORRETA	S2 - Seleção errada feita

Para as falhas identificadas, a equipe avalia as consequências, o potencial de recuperação e outras medidas de redução de risco. Se o risco for elevado, a equipe recomenda melhorias para minimizar a probabilidade de erro.

- **Passo 4: Avaliar consequências**

Para as falhas humanas identificadas, a equipe avalia as consequências, considerando que não haverá correção e que outros equipamentos de proteção falham em evitar a sequência de eventos. Em muitos casos, as consequências serão obtidas a partir de estudos existentes ou experiências anteriores. Eventos de baixa gravidade podem ser excluídos posteriormente.

- **Passo 5: Avaliar recuperação**

Para falhas classificadas como risco NT conforme a Quadro 2, a equipe avalia como a equipe de operação pode retornar ou bloquear os efeitos da causa inicial, seja pela pessoa que cometeu o erro ou outra pessoa envolvida no processo. O processo de recuperação envolve a detecção, diagnóstico do que deu errado e correção. A equipe deve garantir que todos esses elementos <evitem o cenário??> e avaliar se o tempo necessário é suficiente para evitar a consequência maior possível no cenário.

- **Passo 6: Recomendações**

A equipe avalia as opções possíveis de redução de risco, incluindo sistemas de proteção existentes. Essas medidas devem ser consideradas suficientes para reduzir o risco da falha humana a um nível tolerável. Quadro 2). A equipe deve considerar opções, seguindo a hierarquia abaixo:

O estudo de HAZOP_P deve dar atenção especial à dinâmica do processo dando subsídios de como o sistema de proteção deverá ser redefinido.

4.2. Estudo de caso

Conforme a metodologia descrita no item 4.1, abaixo estão descritos os passos aplicados a um estudo de caso real.

A equipe multidisciplinar desse estudo de caso foi composta por um líder de estudo, um representante da operação e outro da otimização de processos, o operador supervisor da parada e partida e elaborador do procedimento, além de outras pessoas interessadas na aplicação do método em seus processos.

- Passo 1: Escolher os procedimentos no qual a técnica será aplicada;

O método foi aplicado ao procedimento de parada de uma unidade de tratamento de água ácida de uma refinaria de petróleo.

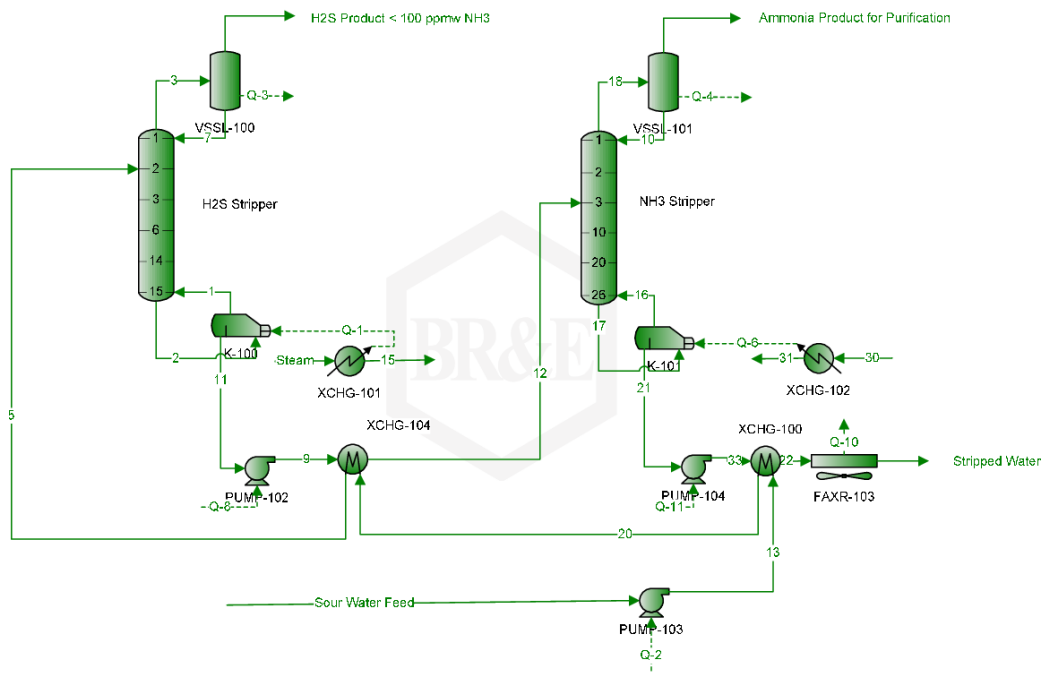
O processo industrial de retificação de águas ácidas tem o objetivo de extrair os contaminantes (sulfeto de hidrogênio e amônia) para que a água seja descartada adequadamente nos processos subjacentes.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, é apresentado um fluxograma de processo simplificado:

Figura 6: Processo de retificação de Água Ácida. Fonte:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Sour-Water-%3A-Where-it-comes-from-and-how-to->

[handle-Addington-Fitz/605eccc000581c9f42a747ad0541e72d1471199c](https://handle-addington-fitz/605eccc000581c9f42a747ad0541e72d1471199c)

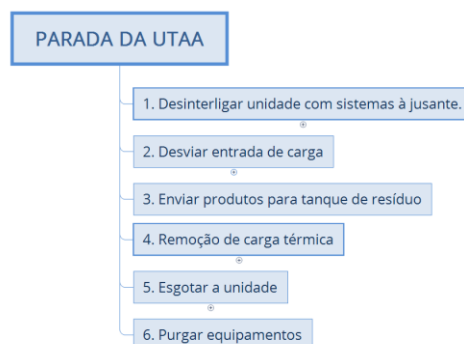


- **Passo 2: Análise Hierárquica de Tarefas**

Como explicado na seção 4.1, no passo 2, é importante agrupar as tarefas por etapas-chave, as quais vão depender da natureza do procedimento em análise. Essencialmente, o procedimento de parada de uma unidade de processo consiste em: desinterligar a unidade com outras unidades ou sistemas, bem como cortar a carga para a unidade; remover energias aplicadas aos produtos, essencialmente, carga térmica, a fim de enviar o inventário da unidade para tanques de resíduo, esgotando a unidade; purga equipamentos a fim de remover contaminantes e/ou produtos inflamáveis.

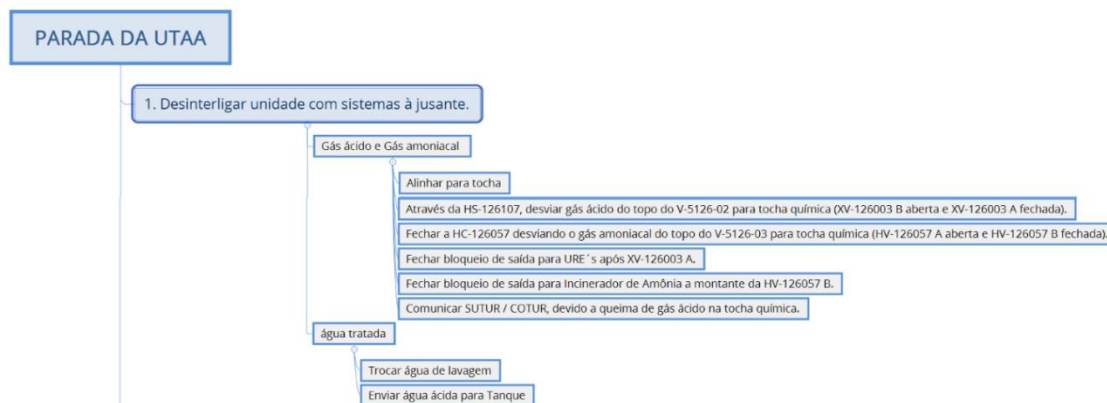
Para fins deste estudo de caso, para o procedimento de parada de uma unidade de tratamento de água ácida, com o intuito de uma separação das tarefas mais refinada, foi proposto o agrupamento apresentado na Figura 7 abaixo.

Figura 7: Hierarquização das etapas para parada da unidade.



As tarefas do procedimento seriam, então, distribuídas pelas diferentes etapas chave, conforme apresentado na Figura 8 abaixo.

Figura 8: Distribuição das tarefas pelas diferentes etapas para parada da unidade.



- Passo 3: Identificar possíveis falhas humanas / Passo 4: Avaliar consequências /
Passo 5: Avaliar recuperação / Passo 6: Recomendações

Os passos 3, 4, 5 e 6 estão descritos na tabela abaixo, com o produto da avaliação de cada tarefa.

Na tabela, o OBJETIVO identifica o alvo a ser alcançado de forma segura em cada fase do processo. A TAREFA descreve o item correlacionado na Quadro 3, de forma sequencial, para que o objetivo seja seguramente alcançado.

Quadro 3: Aplicação do método HAZOP_P à primeira etapa do procedimento de parada da UTAA.

PROCEDIMENTO: Liberação da Unidade de Tratamento de água ácida								
OBJETIVO: Desinterligar unidade com sistemas à jusante.								
TAREFA	DESVIO	CAUSA	CONSEQUÊNCIA	SALVAGUARDA	FREQUÊNCIA	SEVERIDADE	RISCO	RECOMENDAÇÕES
1.1.1	TAREFA OMITIDA	Operação omitida - Comando na HS não executado, não fechando/abrindo as Válvula On-Off	Distúrbio operacional durante a etapa de redução de temperatura da unidade.	Intertravamento de parada da Unidade de Recuperação de Enxofre	B - Remoto	2 - Marginal	T	Sem recomendações
1.1.2	TAREFA OMITIDA	Operação omitida -	Distúrbio operacional	Intertravamento de parada da	B - Remoto	2 - Marginal	T	Sem recomendações

		Comando na HS não executado, não fechando/abrindo as Válvula On-Off	durante a etapa de redução de temperatura da unidade.	Unidade de Recuperação de Enxofre				
1.1.3	TAREFA INCORRETA	Operação incompleta - Não fechamento ou fechamento incompleto do bloqueio.	Alinhamento do header para atmosfera durante a etapa de drenagem no caso de falha da Válvula On-Off . Durante a purga, os equipamentos se encontram com uma pressão maior que o header. A atenção deve ser quando os sistemas estiverem abaixo da pressão do header.	Não há	C- Ocasional	4 - Crítico	M	'R1- Realizar purga no trecho entre a XV de gás ácido e o bloqueio manual; R2- Avaliação do SMS no trecho de gás ácido após a conclusão da purga, antes da abertura dos equipamentos sem purga.
1.1.4	INFORMAÇÃO NÃO COMUNICADA	Lapso de comunicação do corte de Gás ácido/Gás amoniacal	Possível fumaceamento na flare acima dos limites regulados.	Procedimento da operação do flare para redução do fumaceamento	C- Ocasional	2 - Marginal	T	R3- Alterar item para o início do procedimento de corte de gases.
1.1.5	TAREFA INCORRETA	Operação incompleta - Não fechamento das válvulas do circuito.	Dilatação diferencial, vazamento e pressurização da torre.	Intertravamento por temperatura alta.	B - Remoto	4 - Crítico	M	R6- Inserir interlocução da comunicação.
1.1.6	ESCOLHA INCORRETA	Seleção errada feita - Não alinhar nitrogênio com a pressão baixa	Atolamento da T-01, com necessidade de parada das drenagens para Tanque.	(Detecção) - Alarme de nível alto	C- Ocasional	2 - Marginal	T	R7- Detalhar o item, descrevendo as etapas de: fechar a LV, fechar para canaleta de águas contaminadas e abrir para Tanque e abrir novamente a LV
1.1.7	TAREFA INCORRETA	Operação incompleta - Não fechamento das válvulas do circuito.	Dilatação diferencial, vazamento e pressurização da torre.	Intertravamento por temperatura alta.	B - Remoto	4 - Crítico	M	R8- Inserir na sequência acima o fechamento do amostrador.

5. Conclusão

Neste trabalho exploramos bases estatísticas e relatórios de investigação e identificamos a ocorrência de grandes acidentes na indústria química, petroquímica e de óleo e gás durante etapas de transientes operacionais, tais como, partida ou parada de unidades, mudança de modos de operação, operações em batelada e alinhamento ou isolamento de equipamentos do processo.

Exploramos os modelos legais, nacional e internacionais, para gestão de segurança de processo, nos quais reafirmamos a importância da análise de risco, bem como uma lacuna quanto à exigência específica pela análise de risco em transientes operacionais.

Observamos que, tipicamente, transientes operacionais são regidos por procedimentos que apresentam, como características típicas, elevado grau de empirismo, a ausência da aplicação de fatores humanos para sua elaboração, um excesso de orientações prescritivas, e como estes aspectos impactaram nos grandes acidentes.

A literatura mostra que as recomendações oriundas de análises especificamente aplicadas à transientes abrangem cenários acidentais que não são possíveis de serem identificados nas análises de modo contínuo de operação. E, como corroborado pelas legislações, identificar cenários acidentais e proteger-se contra eles significa proteger as empresas dos grandes acidentes de segurança de processo. A prevenção estratégica de perdas deve, portanto, exigir análise de riscos em todos os modos de operação, inclusive em operações transientes, desde a fase de concepção até o descomissionamento das unidades.

Com o intuito de aproveitar um conhecimento já enraizado para a análise de riscos e agilizar a implantação de um novo método, revisitamos o método HAZOP, identificando os pontos fortes de sua aplicação, bem como as deficiências para aplicação nas etapas de transientes operacionais.

Este trabalho descreveu uma metodologia prática e estruturada para a avaliação de procedimentos críticos, utilizando uma variação do HAZOP, a qual chamamos de HAZOP_P. Destina-se a ser utilizado para qualquer procedimento operacional, ou mesmo de manutenção, proporcionando uma redução significativa aos riscos de acidentes graves, seja em plantas existentes ou durante o desenvolvimento de novos processos. O objetivo é reconhecer as tarefas críticas numa atividade, identificar o que pode dar errado e propor recomendações para minimizar a probabilidade de erro.

Uma característica fundamental que se revelou benéfica no estudo foi concentrar-se nas principais etapas de uma atividade que poderia afetar o risco de um evento perigoso específico. Isto permite que a equipe concentre seus esforços nas questões de maior risco e permite que o estudo seja realizado de forma eficaz dentro de um período razoável.

Nos casos em que se verifique que durante a execução de determinado procedimento, uma falha apresente um elevado risco de acidente grave, barreiras de proteção deverão ser avaliadas e recomendadas para a mitigação dos riscos. Caso não seja possível mitigá-los, poderá ser necessário um estudo mais detalhado, avaliando, por exemplo os Fatores Modificadores de Desempenho ou, então, a aplicação de um método de avaliação quantitativa de riscos, geralmente metodologias mais precisas, já que a

metodologia HAZOP_P, bem como na metodologia de referência HAZOP, é uma análise qualitativa baseada puramente na experiência e conhecimento da equipe envolvida.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, **Relatório De Investigação De Incidente Na Refinaria De Paulínia (REPLAN)**, 2023. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/comunicacao-de-incidentes/arquivos-ci/relatoriofinalreplan20082018.pdf>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO/IEC 31010 - Técnicas para o processo de avaliação de riscos: gestão de riscos**. Rio de Janeiro, 2012.

BAYBUTT, P., A critique of the Hazard and Operability (HAZOP) study, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2014.

BRIDGES, WG, Al-Zahrani, R, Best Practices for Addressing Human Factors during PHAs/HAZOPs, **15º Congresso Global sobre Segurança de Processos (GCPS)**, Instituto Americano de Engenheiros Químicos (AIChE), 2019.

BRIDGES, William; CLARK, Tony. How to efficiently perform the hazard evaluation (PHA) required for non-routine modes of operation (startup, shutdown, online maintenance). In: **7TH Global Congress on Process Safety**, 2011.

BRIDGES, William; MARSHALL, Mike. Necessity of Performing Hazard Evaluations (PHAs) of Non-normal Modes of Operation (Startup, Shutdown, & Online Maintenance). In: **12TH Global Congress on Process Safety**, 2016.

CCPS, **Diretrizes para prevenir erros humanos na segurança de processos**, Centro de Segurança de Processos Químicos, Instituto Americano de Engenheiros Químicos, Nova York, 1994.

CLARKE I., The Hazards of Transient Operations, **Chemical Engineering Transactions**, 2022.

CSB Completed Investigations, **BP America (Texas City) Refinery Explosion**, <https://www.csb.gov/bp-america-texas-city-refinery-explosion/>, 2007.

CSB Completed Investigations, **Formosa Plastics Vinyl Chloride Explosion**, <https://www.csb.gov/formosa-plastics-vinyl-chloride-explosion/>, 2007.

CSB Completed Investigations, **Husky Energy Superior Refinery Explosion and Fire**, <https://www.csb.gov/williams-olefins-plant-explosion-and-fire-/>, 2022.

CSB Completed Investigations, **Williams Olefins Plant Explosion and Fire**, <https://www.csb.gov/williams-olefins-plant-explosion-and-fire-/>, 2016.

DIRECTIVE 2003/105/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL - Amending Council Directive 96/82/EC on the **Control of major-accident hazards involving dangerous substances**, 2003.

DUGUID, I. M., Analysis of Past Incidents in the Oil, Chemical and Petrochemical Industries, **Boletim de Prevenção de Perdas**, No. 142, p. 3, Institution of Chemical Engineers, Rugby, Reino Unido, 1998.

EMBREY, D.E., **SHERPA: A systematic human error reduction and prediction approach**, 1986.

KLETZ, T. HAZOP and HAZAN, **Identifying and assessing process industry hazards**, iChem, 1999.

LOPES, A., **A técnica HAZOP, como ferramenta de aquisição de dados para avaliação da confiabilidade humana**. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP, Campinas, 1997.

MARSH JLT SPECIALTY, **100 Largest Losses in the Hydrocarbon Industry**, <https://www.marsh.com/br/industries/energy-and-power/insights/100-largest-losses.html>, 2020.

NOLAN, D. P., **Application of HAZOP and What-If safety reviews to the petroleum, petrochemical and chemical industries**. Noyes Publications, 1994.

PETROBRAS. **Norma Técnica da Petrobras N-2782. REV. D. Técnicas aplicáveis à análise de riscos industriais**, 2015.

TRUCCO, P., CAVALLIN, M. A, Quantitative approach to clinical risk assessment: the CREA method. **Safety science**, v. 44, n. 6, p. 491-513, 2006.

WETTIG, J. et al., Major industrial accidents regulation in the European Union, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries** 12, 1999.