

SEGURANÇA DE PROCESSOS: LIÇÕES APRENDIDAS DO ACIDENTE DE BHOPAL APLICADAS EM UMA FÁBRICA DE CELULOSE KRAFT

Flávio Marcelo Correia¹, Gustavo Ribeiro², José Alexandrino Machado³

¹CENIBRA Celulose Nipo-Brasileira S.A.

²CMPC Celulose Riograndense

³Segurança Operacional Ltda.

RESUMO

Em dezembro de 1984, 40 toneladas do gás isocianato de metila vazaram das instalações da *Union Carbide* na cidade de Bhopal, Índia, resultando na morte de mais de 3 mil pessoas, além de gerar impactos severos à saúde pública, afetando centenas de milhares de pessoas, e provocar prejuízos ambientais com a contaminação de áreas agrícolas e a morte de animais. Embora robusto e avançado, o setor de celulose e papel no Brasil apresenta riscos de processo relevantes em todas as áreas do processo fabril. Ao contrário da segurança ocupacional, os protocolos da segurança de processo ainda não estão plenamente estabelecidos nas grandes empresas brasileiras de celulose. Este trabalho busca explorar os principais elementos do acidente da fábrica de pesticidas da *Union Carbide Índia*, ocorrido em 1984, e associar sua aplicação ao *Gerenciamento de Segurança de Processos* (PSM) em uma fábrica de celulose kraft, oferecendo recomendações e *insights* para aprimorar os protocolos de segurança de processo, melhorar a avaliação de riscos e promover a cultura de segurança nas operações industriais.

Palavras-Chave: Segurança de Processos, Celulose Kraft

INTRODUÇÃO

O Brasil tem avançado em vários aspectos no controle da segurança ocupacional. Possuímos 37 normas regulamentadoras visando assegurar a segurança do trabalho e saúde (Ministério Trabalho e Emprego, 2020). Algumas delas abordam uma pequena parte dos aspectos da segurança de processos, como a NR-13 (caldeiras e vasos de pressão), NR-19 (explosivos), NR-20 (inflamáveis e combustíveis), NR-37 (plataformas de petróleo). Contudo, as NRs possuem foco de segurança ocupacional. Com exceção da indústria de óleo e gás e alguns setores da indústria química, o País ainda se encontra distante das melhores práticas internacionais no campo da segurança de processos.

A indústria de celulose apresenta riscos significativos ao longo de seu processo fabril. A complexidade química e térmica das operações envolve a gestão de elevados estoques de substâncias altamente reativas – como clorato de sódio, dióxido de cloro, ozônio,

hidróxido de sódio, peróxido de hidrogênio e ácido sulfúrico –, além da geração de subprodutos perigosos, como metanol, mercaptanas e outros gases inflamáveis. Soma-se a isso o uso de equipamentos sob condições extremas de pressão e temperatura, como digestor, reator de pré-branqueamento e caldeiras, o que reforça a necessidade de uma abordagem ampla da gestão de riscos.

Nesse contexto, revisitar a análise de acidentes históricos é uma oportunidade valiosa para refletir sobre vulnerabilidades sistêmicas e fortalecer a cultura de segurança. Um exemplo emblemático é o desastre ocorrido em 1984, na cidade de Bhopal, Índia, quando uma nuvem de vapor de Metil Isocianato (MIC) – composto tóxico e volátil – foi liberada por uma fábrica de pesticidas da *Union Carbide*, atingindo a comunidade local. O evento resultou em centenas de milhares de feridos e estimativas de mortes que variam entre 3 mil e 20 mil, sendo considerado um dos maiores desastres industriais da história (Broughton, 2005). Embora nenhum acidente posterior tenha igualado a magnitude das fatalidades observadas em Bhopal, incidentes relacionados à segurança de processos continuam a ocorrer, evidenciando a importância da vigilância contínua e da aprendizagem organizacional.

Incidentes de segurança de processo são eventos adversos que ocorrem quando materiais ou energias perigosas escapam da contenção, levando a reações descontroladas, perdas de integridade estrutural, emissões tóxicas, incêndios ou explosões. Tais eventos podem representar riscos à saúde humana, ao meio ambiente e ao negócio da empresa (Maguire, 2017).

A indústria de celulose e papel apresenta vários riscos de processo. Dos 26 eventos de liberação acidental em todos os setores da indústria química nos EUA reportados pelo CSB *Chemical Safety and Hazard Investigation Board* (CSB 2025), três estão associados ao setor de celulose e papel, que é uma área que lida com componentes perigosos, como matérias-primas ou subprodutos, apresentando vários cenários de risco de processo. Na **Figura 1** são apresentados os pilares que norteiam o conceito de segurança de processo, e pode ser observado que “aprender com a ex-

Autor correspondente: Flávio Marcelo Correia. E-mail: fmarcelocorreia@gmail.com - Fone +55 (31) 3829 5536. Ipatinga-MG.



Figura 1: Gestão de Segurança de Processos (CCPS 2010)

periência” é um dos quatro blocos na base do sistema de gestão da segurança de processos, proposto pelo *Center for Chemical Process Safety* (CCPS 2010) no modelo de Segurança de Processo Baseado em Risco (*RBPS Risk Based Process Safety*).

Este conceito de “lições aprendidas”, propõe a análise crítica dos eventos ocorridos, para implementar ações que evitem repetição de falhas. Inclui elementos como investigação de acidentes, indicadores, auditoria e melhoria contínua. Essas práticas ajudam as organizações a identificarem as causas, implementar ações corretivas e melhorar os processos para evitar ocorrências futuras. Ao focar na aplicação no “aprendizado com a experiência” nas práticas diárias, as organizações contribuem na construção da cultura de segurança positiva.

Sob essa perspectiva, este artigo tem como objetivo analisar os principais fatores do acidente na *Union Carbide – Bhopal* em 1984, com uma análise crítica das causas, correlacionando suas lições aprendidas com práticas aplicáveis à realidade de uma fábrica de celulose kraft, com foco na prevenção de acidentes majorados e na melhoria *Gerenciamento de Segurança de Processos* (PSM).

Histórico do acidente

Em 1969, a *Union Carbide Corporation USA* (UCC) implantou a fábrica da *Union Carbide India Ltda* (UCIL) em Bhopal, para fabricar o pesticida *Sevin* (popularmente conhecido como *Carbaril*). Após a independência da Grã-Bretanha em 1947, os líderes indianos buscaram incentivar o desenvolvimento no país, apoiando empreendimentos e com propagandas persuasivas. A implementação de uma indústria de agroquímicos foi muito bem recebida pela sociedade local (Peterson 2009).

A fábrica na Índia ofereceria vantagens competitivas devido ao acesso fácil a um mercado em crescimento e custos ope-

racionais baixos. Inicialmente, o *Sevin* foi fabricado usando MIC importado. A partir do início de 1980, este intermediário químico passou a ser fabricado na Índia usando o know-how fornecido pela matriz americana. A nova instalação foi anunciada como sendo projetada e construída com base em vinte anos de experiência das instalações MIC da UCC em West Virginia, EUA.

A Figura 2 apresenta uma visão geral da estocagem da planta MIC (Duhon, 2014). Como mecanismo de proteção, os tanques são enterrados sob concreto, e possuem um sistema de refrigeração (um compressor e resfriador comuns) para manter o MIC em baixa temperatura. Em casos de problemas, os gases podem ser enviados para um *Scrubber* (lavador de gases de neutralização) ou para o *flare* (um tipo de incinerador de gases tóxicos, antes de serem emitidos na atmosfera). Estes dois equipamentos serão descritos em maior detalhe no item “principais equipamentos”.

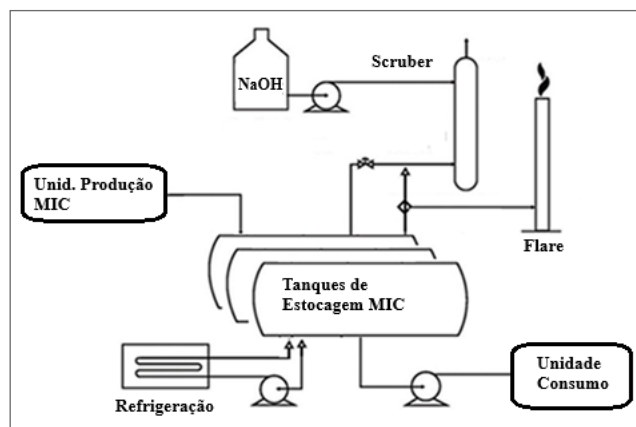


Figura 2. Visão geral da estocagem MIC

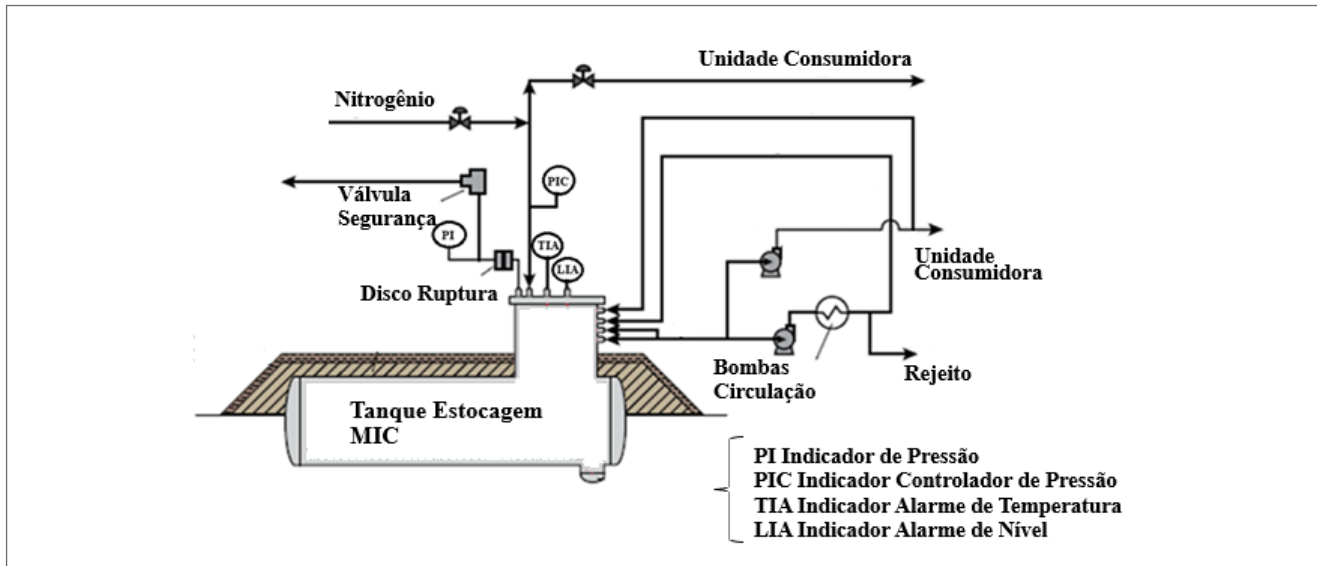


Figura 3. Fluxograma do tanque MIC

Conforme reporta Raghunandan e Jayaprakash (2020), embora os engenheiros da matriz UCC tenham supervisionado o projeto – a construção e a operação até o final de 1982 –, a instalação indiana teve cortes de custos no projeto, com alguns equipamentos de segurança subdimensionados em comparação com a unidade americana. Quanto à estocagem, a unidade dos EUA usava MIC em linha do processo, e dessa forma, armazenava pequenas quantidades do produto. Ao contrário, em Bhopal o processo exigia o armazenamento de MIC em grandes volumes.

Principais Equipamentos

Os principais equipamentos envolvidos na ocorrência são detalhados a seguir.

Armazenamento MIC

O MIC produzido é estocado em três tanques, interligados em um *header* comum. O dimensionamento foi realizado para que dois dos três tanques de armazenamento fossem usados para armazenar o produto, e um terceiro tanque mantido vazio para ser usado em emergências ou produtos fora de especificação (UCC 1985).

A Figura 3 apresenta os acessórios de armazenamento MIC, incluindo a instrumentação, disco de ruptura e válvula de segurança (que foi atuada por sobrepressão). O MIC é armazenado sob pressão de nitrogênio, que é fornecido aos tanques por um coletor único. O conjunto é provido com indicadores de pressão e temperatura (ambos com indicação local e remota), bem como dispositivos de alívio como válvulas de segurança (SRV) e disco de ruptura. Um alarme de alta temperatura é acionado, caso ultrapasse o limite estabelecido (UCC 1985).

Lavador de Gases Scrubber (VGS)

O *Scrubber* ou lavador de gases, trata-se de um equipamento usado para neutralizar emissões atmosféricas, removendo poluentes gasosos, sendo largamente usado na

indústria química. De forma geral, envolve a passagem dos gases contaminados por uma solução líquida (água ou uma solução neutralizante), que remove contaminantes como partículas sólidas, compostos voláteis, ácidos e outros componentes perigosos (Shreve e Brink, 1980).

A Figura 4 apresenta o lavador de gases da planta da UCIL. Os gases MIC que tenham eventualmente escapados do processo ou da válvula de alívio, entram no *Scrubber* em contrafluxo com uma solução cáustica, para serem neutralizados e depois liberados para a atmosfera através de uma chaminé a uma altura aproximada de 30 m (100 ft) do solo. Se o VGS não estiver disponível, há uma linha de desvio diretamente ao flare. O VGS foi projetado para neutralizar um máximo de 3,5 t/h (7.700 lb/h) de MIC com taxa máxima de 9,6 t/h (21.200 lb/h) (Varadarajan *et al.* 1985).

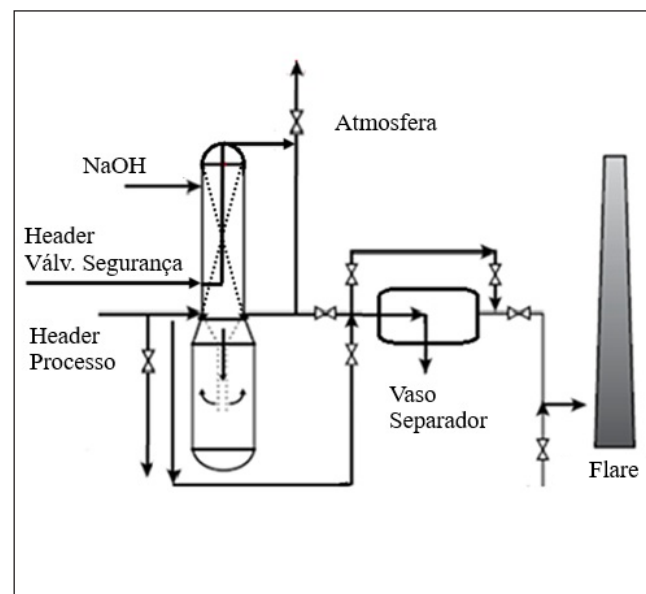


Figura 4. Neutralização de gases MIC (adaptado UCC 1985)

Flare

O flare é um dispositivo utilizado para a queima controlada de gases residuais em indústrias químicas, também chamado de chaminé de tocha ou queimador de segurança. Sua função principal é garantir a segurança das operações ao queimar gases que não puderam ser processados na planta, minimizando efeitos negativos na atmosfera (Bahadori 2014). Na planta da UCCIL, o flare tinha o objetivo de queimar gases MIC oriundos da estocagem do VGS, para não lançar gases MIC na atmosfera em eventuais casos de vazamentos.

Refrigeração

Disponível um sistema comum (um compressor e um resfriador) para os três tanques de armazenamento, para refrigerar temperaturas de armazenamento abaixo de 5 °C.

Situações adversas antes do incidente

No início de 1984, a fábrica estava operando com um terço de sua capacidade por falta de demanda, acarretando problemas financeiros e ausência de perspectivas de sua continuidade. Isso levou a demissões, falhas na capacitação dos funcionários, redução de custos de manutenção, acarretando falhas sérias em vários equipamentos, vazamentos e problemas operacionais. Entre 1980 e 1984, a força de trabalho foi reduzida em 50%, com eliminação de alguns cargos chave como o supervisor de manutenção de turno (Chouhan *et al.* 1994).

Durante a fase de *startup*, foram recrutados 15 operadores, todos com escolaridade mínima equivalente ao Ensino Médio no Brasil. No momento do incidente, apenas seis desses profissionais possuíam tal formação. Além disso, uma parcela significativa dos operadores não possuía proficiência na língua inglesa, idioma dos manuais operacionais dos equipamentos. O programa de capacitação, originalmente previsto para durar seis meses, acabou sendo substancialmente abreviado, sendo concluído em poucas semanas (Labib e Champaneri 2012).

Pequenos vazamentos e anormalidades de processo aconteciam, mas eram encobertos. Uma auditoria de processo realizada por engenheiros da própria Union Carbide (EUA), em 1982, relatou várias não conformidades em seu relatório. Contudo, a maioria das ações corretivas indicadas pela equipe técnica à época não foi implementada (Bloch, 2016).

O evento

A produção de MIC foi interrompida em 22 de outubro de 1984. Naquela época, o tanque 610 continha aproximadamente 41 t do produto, e estava com 75% de nível (superior ao 50% recomendado pelos manuais). O tanque 611 também possuía MIC em quantidades da mesma ordem. Além disso, de acordo com os padrões técnicos, pelo menos um dos três tanques de armazenamento deveria estar vazio (*backup*). No entanto, os três tanques continham certa quantidade do produto (Ayres e Rohatgi, 1987).

A estocagem era normalmente mantida pressurizada com nitrogênio (~1 kgf/cm²). Como fruto de uma modificação para minimizar vazamentos, a pressão de nitrogênio passou a ser usada também para transferir MIC para a unidade *Sevin*. À medida que o material líquido é transferido, a pressão do gás mostrará uma redução gradual, sendo necessário repor nitrogênio para manter a pressão. Conforme reportam Varadarajan *et al.* (1985), de 22 de outubro a 30 de novembro, o tanque 610 esteve próximo da pressão atmosférica. Durante o primeiro turno do dia 30 de novembro houve alguns problemas na pressurização do tanque 611 (a pressão não pôde ser aumentada). Assim, foram feitas tentativas de pressurizar o tanque 610 e transferir o MIC deste para a unidade consumidora, mas sem sucesso. A transferência do MIC foi então continuada a partir do tanque 611. No segundo turno de 1.º de dezembro (14:45 – 22:45), foram feitas novas tentativas de pressurizar o tanque 610, também sem sucesso.

A cronologia dos principais eventos na noite do dia 2 de dezembro, é descrita a seguir (UCC 1985):

22:45 - Troca de turno.

23:00 - Operador de campo informa vazamento de MIC próximo ao VGS, mas não conseguiu identificar a fonte. Operador de painel constata aumento da pressão do tanque 610 (2 para 10 psig).

00:15 - Operador de painel constata elevação rápida da pressão do tanque 610 (10 para 30 psig, e, logo em seguida, atingindo máximo da escala - 55 psig). Comunicou a ocorrência ao supervisor. Tentou ativar o VGS no painel de controle (sem sucesso).

00:20 - O supervisor notificou ao superintendente da planta (que se deslocou de outra área interna até a planta MIC).

01:00 – Acionada a sirene de vazamento de gases e ligado o sistema de pulverização de água na chaminé (que não atingiu altura suficiente por sua baixa pressão).

01:30 até 02:30 - Válvula de segurança do tanque MIC fechou, indicando que a pressão ficou menor que o setpoint (40 psig).

Os gases que escaparam para a atmosfera causaram perda de vidas, danos graves a milhares de pessoas, animais e plantações. Em termos práticos, na noite de 2 de dezembro de 1984, os equipamentos de prevenção não estavam funcionando, desde o sistema de refrigeração, *Scrubber*, *flare* e a cortina de proteção contra água (subdimensionada). Os resultados, desastrosos para a população, poderiam ter sido evitados.

A fábrica foi fechada naquela noite e nunca mais foi reaberta para produção comercial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise do acidente

Eckerman (2005) considera nove principais causas. A saber: 1) falha de projeto em incluir grandes volumes de estocagem do MIC; 2) procedimento operacional deficiente para lavagem de tubos interligados aos tanques de estocagem; 3) práticas de ope-

ração e manutenção deficientes; 4) ausência de funcionamento do *scrubber*; 5) falta de pressão suficiente nos jatos de água de pulverização; 6) incinerador de gases fora de serviço; 7) ausência de fluido refrigerante; 8) falta de plano de emergência local; e 9) medidas inadequadas de corte no quadro e qualificação de funcionários.

Evento Inicial: Água ao Tanque

O evento inicial foi a passagem de um grande volume de água ao tanque 610 (cerca de 750 L), vindo a causar reações de decomposição do MIC. À medida que a reação progredia, a temperatura e a pressão do tanque aumentavam significativamente. É comum em instalações industriais instalar válvulas e drenos nas tubulações para facilitar a drenagem e injetar água, vapor, nitrogênio ou ar para purga ou limpezas. Há controvérsias sobre a origem e como a água chegou ao interior do tanque 610. Macleod (2014) discute quatro possibilidades sobre a provável causa:

1. *Lavagem acidental com água*: Uma “Figura 8” foi montada na tubulação supostamente invertida (chapa cega para parte externa), permitindo passagem de água. A “Figura 8” (também chamada de “*spectacle blind*”), é um dispositivo instalado entre flanges que possui o formato de um “8”, sendo um lado cego (sem furo), utilizado para bloquear o fluxo e outro lado com furo, permitindo a passagem do fluido, conforme indicado na **Figura 5**.

Durante um procedimento de limpeza, a água percorreu o caminho até o tanque E610 (com 7 m em elevação e 150 m de distância). Esta possibilidade teria sido contestada devido à pressão insuficiente da água e válvulas manuais fechadas nas tubulações.

2. *Sabotagem*: Tal possibilidade está descrita no relatório de Kalelkar e Little (1998) encomendado pela UCC. As evidências são circunstanciais (funcionários descontentes, um manômetro ausente, uma mangueira de água deixada aberta, folhas de registro alteradas e comoção geral durante um intervalo para o chá) e foram contestadas por todos os trabalhadores que estavam no turno na época.

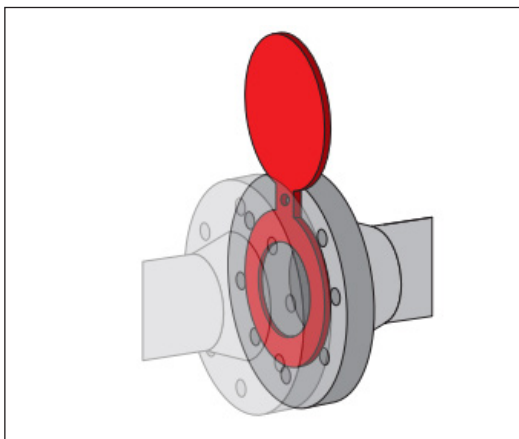


Figura 5. Exemplo de “Figura 8”, possivelmente montada invertida

3. *Decomposição do gás*: Possível entrada gradual de água e contaminantes ao longo de semanas antes da ocorrência. Como o tanque E610 não foi pressurizado com nitrogênio, é possível que a água ou a soda cáustica do lavador, junto com outros contaminantes, tenham entrado no mesmo durante o período de seis semanas em que ficou cheio e sem uso.
4. *Mistura com nitrogênio*: Entrada acidental de água em vez de nitrogênio devido à confusão na conexão das mangueiras. Há algumas evidências de que tentativas repetidas de transferir o MIC falharam porque ele não estava mantendo a pressão na estocagem. Foi encontrado clorofórmio no tanque de alimentação SEVIN, sugerindo que algum material havia sido transferido do tanque E610. É possível que um dos funcionários tenha tentado conectar nitrogênio, mas conectou água por engano. Esta teoria foi descartada porque as linhas são codificadas por cores (azul para água, cinza para nitrogênio e branco para ar) e têm tamanhos de bicos diferentes.

Independentemente da efetiva causa, múltiplas falhas contribuíram para a gravidade da catástrofe.

Lições na fábrica de celulose Kraft:

O equipamento mais desafiador do PSM na indústria de celulose e papel é a caldeira de recuperação química. Ela regenera produtos químicos usados para o cozimento, processando reações de combustão de licor negro e produzindo sais de sódio no *smelt*, sais inorgânicos fundidos a 900 °C, que são recolhidos na forma líquida (**Figura 6A**), dispostas ao longo do tanque de dissolução (**Figura 6B**):

O contato da água com *smelt* leva a reações explosivas na fornalha, podendo causar perdas expressivas na caldeira de recuperação e equipamentos adjacentes (Reis, 2021). Procedimentos de limpeza manual das calhas fazem com que os operadores fiquem expostos a perigos como fundidos em alta temperatura, licor e vapores quentes. Novas tecnologias estão disponíveis com robôs que executam a atividade reduzindo os riscos do trabalho (Wismer e Lising 2024).



Figura 6. (A) - Bica de Smelt / (B) - Conjunto de bicas na caldeira de recuperação

Como os riscos da Caldeira de Recuperação de Licor Negro são muito eminentes, foi criado nos EUA, em 1961, um Comitê Consultivo da Caldeira de Recuperação de Licor Negro BLRBAC (*Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee*), com o objetivo de compartilhar conhecimento e gerar diretrizes para uma operação segura das caldeiras de recuperação química. A maioria das grandes empresas de celulose segue as recomendações técnicas desse comitê.

Dados coletados por Haraga (2019) mostram que um total de 573 incidentes domésticos nos EUA de caldeira de recuperação foram relatados entre 2009 e 2019. Neste período, o ESP (*Emergency Shutdown Procedure*) foi ativado em um terço das ocorrências. O ESP exige que todos os combustíveis, fontes de água e fontes de vapor sejam isolados da caldeira e que o conteúdo do lado da água da caldeira seja drenado. O sistema deve ser acionado quando há contato de água com o *smelt*. A drenagem rápida consiste na remoção da água contida no interior da caldeira através das válvulas de drenagem rápida, isolando totalmente as opções de entrada de água na fornalha. Nas paradas anuais são realizados testes de drenagem rápida a fim de confirmar a ação de todos os intertravamentos configurados.

Neste contexto, o BLRBAC (2023) estuda a prevenção de quaisquer possíveis fontes de água externas ao processo de recuperação ou caldeira que possam ser acidentalmente introduzidas na câmara de combustão da caldeira de recuperação.

Integridade Mecânica (IM)

A sobrepressão do tanque 610 foi causada por uma reação exotérmica entre o MIC e água. Os gases pressurizados escaparam para a atmosfera através das válvulas de segurança (que foram danificadas devido aos altos níveis de pressão), aumentando o vazamento. Como a fábrica havia suspenso a produção de MIC, houve uma decisão da administração em estocar uma quantidade maior, contrariando a recomendação em minimizar a quantidade de MIC armazenada. Conforme indicado na **Figura 2**, havia três tanques de armazenamento. De acordo com o procedimento da UCC, um deles deveria estar vazio e os outros dois no nível máximo de 50%. Na noite do desastre, as três unidades continham MIC armazenado e o tanque 610 tinha cerca de 70% da capacidade (Eckerman, 2005). Se houvesse menor estoque, menores seriam os efeitos da pressão interna. Além disso, os operadores poderiam ter a opção de adicionar diluente para retardar a reação. Se um dos tanques estivesse vazio, os operadores poderiam transferir o produto ao mesmo.

Lições na fábrica de celulose Kraft:

O objetivo da integridade mecânica é verificar se vasos de pressão, tubulações, sistemas de desligamento de emergência, sensores, alarmes, intertravamentos, bombas e compressores estão funcionando como projetado (OSHA 1992). Diante desse panorama, Hobbs (2008) discute as principais questões para um programa de IM para garantir sua eficácia, sustentabilidade

e sucesso. Os equipamentos devem ser instalados e inspecionados regularmente de acordo com as especificações. Boas práticas de engenharia devem ser seguidas nas ações corretivas da inspeção e testes.

Na indústria de celulose são incluídos digestores, reatores de oxigênio, caldeiras, evaporadores e demais equipamentos indicados no item 13.2 da NR 13 da legislação brasileira. Nos equipamentos da linha de fibras e de recuperação química, a atenção especial deve ser dada aos pontos de recolhimento dos dispositivos de segurança, pois os fluidos pressurizados são quimicamente agressivos, em alta temperatura sofrem expansão quando em pressão atmosférica, sendo necessário instalações adequadas para recebimento dos produtos expelidos. Gorog, 2024a, discute detalhes sobre inspeção, métodos analíticos, bem como exemplos de mecanismos de danos para dar suporte à integridade mecânica aplicados à indústria de celulose e papel.

No caso dos digestores contínuos, falhas em materiais e problemas de corrosão são itens de grande importância e monitoramento (Busby e Hart, 2014; Gorog, 2024b), com casos registrados de explosão como o da fábrica *Androscoggin* em *Maine* – EUA (Jasi, 2020). Como as taxas de propagação de trincas por corrosão sob tensão são difíceis de prever, tem sido desenvolvido novas tecnologias para permitir a rápida identificação de falhas e diagnósticos (Araujo *et al.*, 2024; Harrod *et al.*, 2024).

Refrigeração, *Scrubber* e *Flare*

As taxas de reações exotérmicas como a decomposição do MIC diminuem com a redução da temperatura. Por essa razão, um refrigerador a base de *Freon* de 30 t foi fornecido para manter o produto estocado abaixo de 5 °C. Se o MIC estocado estivesse em menor temperatura, o evento teria sido menos catastrófico. Infelizmente, o sistema de refrigeração foi desligado meses antes do acidente ocorrer, devido a vazamentos e por economia do produto refrigerador.

Devido à indisponibilidade do *Scrubber* para manutenção, os gases MIC gerados não passaram pelo processo de neutralização, sendo liberados diretamente na atmosfera (Murphy *et al.*, 2014).

Nas instalações industriais, a última linha definitiva de defesa é o *flare*, que na noite da ocorrência estava fora de serviço aguardando a substituição de tubulação corroída (Chouhan *et al.*, 1994).

Lições na fábrica de celulose Kraft:

O abatimento de gases na fábrica de celulose é essencial na proteção ambiental e na conformidade com regulamentações de emissões e controle de poluentes atmosféricos como compostos orgânicos voláteis, compostos de enxofre (TRS) e óxidos de nitrogênio (NO_x). Restrições ambientais têm apresentado a obrigatoriedade de coleta de gases não condensáveis do processo (GNC's) para que sejam incinerados ou tratados quimicamente (oxidação). Tais gases são ricos em derivados de enxofre,

que são inflamáveis, explosivos, corrosivos e tóxicos em determinadas concentrações. O tratamento de GNC deve ser projetado com aço inoxidável e possuir os dispositivos de segurança adequados como corta chamas, discos de ruptura e válvulas de alívio, com um intertravamento apropriado.

Em geral, as fábricas de celulose não dispõem de sistemas de *flare* dedicados. Os gases que requerem tratamento são, conforme as boas práticas de engenharia, direcionados para incineração na caldeira de recuperação (BLRBAC, 2021), ou, alternativamente, na caldeira de força. Ressalta-se a importância de atenção especial a essa área, considerando a ocorrência de acidentes fatais em unidades nos EUA, associados a reações explosivas envolvendo GNC (CSB, 2003; CSB, 2018).

Em relação ao sistema de resfriamento, a produção de água gelada para absorver o dióxido de cloro é uma etapa fundamental na produção desse agente de branqueamento. De uma forma geral, o conjunto de resfriamento é constituído por compressor, evaporador, condensador e válvulas de expansão. As plantas de dióxido de cloro devem ser dotadas de um sistema dedicado de absorção, com capacidade de absorver vazamentos de cloro em casos de emergência.

Instrumentação e controle

O MIC reage exotermicamente com a água, aumentando a pressão e a temperatura de forma rápida. Por isso, essas duas variáveis são pontos críticos de controle. O alarme de temperatura foi configurado para notificar uma condição instável ao atingir 11 °C. Ao receber o alarme, espera-se que os operadores tomem ações corretivas. Os tanques possuíam medidores de temperatura e pressão no campo e sala de controle. Como nunca se esperava que a temperatura do MIC refrigerado excedesse 15 °C, os medidores de temperatura foram dimensionados para operação entre -25 °C e +25 °C. No entanto, a temperatura ambiente média da cidade de Bhopal varia de +15 °C a +40 °C. Isso significa que durante o período que o refrigerador estava fora de operação, a temperatura média nos tanques de armazena-

mento era superior aos limites configurados (11 °C), causando alarmes repetitivos. Nessa situação, não havia nada a ser feito pelos operadores (Joseph *et al.*, 2015).

Da mesma forma que a temperatura, a pressão dos tanques era monitorada no campo e remotamente. Embora não houvesse alarme de alta pressão, havia um disco de ruptura de grafite entre o tanque e a válvula de alívio. Para o armazenamento de um produto químico letal como o MIC devem ser normalmente fornecidos dois instrumentos em paralelo (um para controle/indicação e outro para alarme). Não havia disposição desse tipo. A válvula de purga do tanque MIC 610 estava com defeito (conhecido), e os medidores que medem a temperatura e a pressão nas várias partes da unidade MIC não eram confiáveis (Weir, 1987). Não havia um instrumental de prevenção ou um dispositivo de desligamento de emergência no projeto da planta da Índia (Willey, 2014).

Lições na fábrica de celulose Kraft:

É importante que a equipe de automação e processos trabalhe em conjunto nos planos de inspeção e certificação para instrumentos críticos, bem como na otimização de frequência de alarmes. Em relação aos alarmes, é importante que sejam projetados de acordo com princípios de interface homem-máquina, para que sua frequência seja factível de reconhecimento e ação corretiva em todas as condições do processo.

Atualmente, a prática de gerenciamento de alarmes é regulamentada por normas internacionais como a ISA 18.2 (*International Society of Automation*) e a EEMUA-191 (*Engineering Equipment and Materials Users Association*), serve como um guia desde o design até a gestão de alarmes, visando racionalização, monitoramento, gerenciamento de mudanças e auditorias de desempenho. Neste contexto, EEMUA (2013) apresenta as **Tabelas 1 e 2** com referências de aceitabilidade de frequência de alarmes.

Outras referências, como ANSI/ISA (2009), recomendam aceitabilidade em taxas de alarme entre uma e duas ocorrências a cada 10 minutos. Se a frequência de alarmes em sua unidade

Tabela 1. Taxa de alarmes em condições de operação normal

	Alarmes por Operador		Aceitabilidade
	Alarmes/h	Alarmes/ 10 min	
Mais de 1 /min	> 60	> 10	Quase inaceitável
1 / 2min	30	5	Sobrecapacidade
1 / 5min	12	2	Gerenciável
< 1 / 10 min	< 6	< 1	Aceitável

Tabela 2. Taxa de alarmes em condições de operação instáveis

Alarmes em 10 min	Aceitabilidade
> 100	Definitivamente Excessivo
20 - 100	Difícil de operar
< 10	Aceitável

operacional estiver acima desses valores, VanCamp (2016) recomenda implementar ações de melhoria e verificação. Dentre as principais, analisar a correlação da frequência de alarmes com o modo de operação (transição de processo), verificar medidas de variabilidade de taxas e picos, divisão diferenciada de alarmes de situações de operação normal e parada/arranque, configuração dos limites de alarme (*set point*), automatização dos intertravamentos, redundâncias, alarmes em cascata, indicações falsas, alarmes obsoletos e outras para que os alarmes sejam apresentados aos operadores sem exercer suas capacidades perceptivas e cognitivas. Assim, ele terá condições de reconhecer cada alarme, e, principalmente, ter tempo para entender e agir de forma adequada.

Resposta de emergência ineficaz

A ausência de uma supervisão regulatória eficaz e de uma cultura voltada à prevenção de riscos resultou em falhas críticas na resposta emergencial. As sirenes de alarme foram desligadas em poucos minutos. As autoridades civis não tinham nenhum procedimento de emergência e não foram informadas sobre os materiais perigosos armazenados. Uma resposta de emergência eficaz teria salvado muitas pessoas da comunidade vizinha. A UCIL não reconheceu o problema às autoridades civis até cerca de 2 horas após a liberação inicial dos gases. Além disso, os médicos em atendimento na noite da ocorrência não sabiam a causa do incidente e tiveram dificuldades em determinar o tratamento adequado para a grande quantidade de pacientes em curto espaço de tempo (Jasanoff, 1988).

Lições na fábrica de celulose Kraft:

As respostas de emergência devem ser planejadas contra grandes incêndios, explosões, emissões tóxicas e derramamentos. Os planos de resposta a emergências devem ser treinados a todos os funcionários e sua eficácia verificada (OSHA 3133, 1994). A equipe envolvida precisa passar por diferentes cenários e estar preparada para responder a eventos críticos de grande porte. Dessa forma, itens como pressão da água, disponibilidade de máscaras de gás e outros serão descobertos antecipadamente.

Um plano de evacuação para funcionários (ou a comunidade próxima) minimiza os efeitos negativos aos envolvidos. Algumas fábricas de celulose no Brasil realizam simulações de emergência para identificar pontos vulneráveis, cenários indesejáveis e anormalidades a serem aplicados em ambientes internos e externos. Modelos matemáticos podem ser usados para calcular as áreas impactadas por incêndios, liberações de produtos químicos, para eventos como vazamentos em tubulações, liberações de gases e derramamentos (Khan *et al.*, 2015, Artamonov *et al.*, 2021). Além disso, diferentes *softwares* podem ser usados para análise de consequências, como CFD *Computational Fluid Dynamics* (Shen *et al.*, 2020; Shamsuddin *et al.*, 2023). Usando esses recursos, planos de emergência podem ser otimizados. No

Brasil, existe uma legislação específica que trata da comunicação de emergências ambientais (IBAMA, 2014).

Alguns dos produtos químicos usados na área de celulose não são comuns em outros ramos da indústria química. É importante que o serviço médico próprio da empresa auxilie adequadamente os serviços de saúde público próximos à fábrica com os procedimentos adequados em casos de contaminação. Essas ações podem facilitar o trabalho dos envolvidos na prestação de atendimento emergencial à população.

Outro aspecto importante é a interação da empresa com as partes interessadas, em especial as comunidades vizinhas. É importante estabelecer canais de comunicação claros e acessíveis que promovam a transparência e o engajamento. Isso envolve não apenas a divulgação de informações relevantes, mas também a escuta ativa dos envolvidos. A utilização de ferramentas tecnológicas, como plataformas de comunicação e redes sociais facilitam a disseminação de informações fidedignas e fomentam a interação com a sociedade civil. Em última análise, uma comunicação bem estruturada não apenas impulsiona o moral e a motivação dos funcionários, mas também contribui para a reputação da empresa, solidificando relacionamentos e promovendo uma imagem institucional positiva.

Cultura de Segurança de Processo

A Cultura de Segurança de Processo é o primeiro elemento do pilar “Comprometimento com a Segurança de Processo”, no modelo RBPS, indicado na **Figura 1**. Este elemento avalia a combinação de valores e comportamentos coletivos dentro de uma organização. A cultura de segurança fraca pode levar à complacência com normas e procedimentos e falhas na comunicação de riscos, impactando na frequência de incidentes operacionais, seja por atos dos trabalhadores da linha de frente ou da equipe gerencial (Frank, 2007).

Investigações de outros acidentes como a explosão da planta de gás *Longford* (Hopkins, 2001) e o desastre da plataforma *Piper Alpha* (O’Byrne, 2011), demonstram que deficiências na cultura de segurança são fatores críticos em tais ocorrências. Algumas investigações de acidentes industriais identificam “erro humano” como causa comum. Contudo, a causa raiz das falhas humanas estão quase sempre associadas à cultura, engenharia, e fatores organizacionais da própria empresa (Alonso *et al.*, 2018).

O desastre de Bhopal demonstrou como a falta de comprometimento organizacional, em particular do corpo de gerentes e diretores, pode resultar em consequências catastróficas. As falhas latentes de gestão que se destacam no evento foram armazenamento excessivo de MIC, treinamento insuficiente para a equipe operacional, contratação de operadores com qualificação insuficiente, foco na redução de custos em detrimento das condições de manutenção adequadas. A falta de uma cultura de segurança consistente leva à negligência, riscos operacionais, falhas em treinamentos e decisões gerenciais que compromete

tem as instalações e os trabalhadores, sendo um fator determinante nos bons resultados de prevenção.

Lições na fábrica de celulose Kraft:

A indústria de celulose e papel possui casos críticos de acidentes majorados, cujas causas são atribuídas a falhas na cultura de segurança de processo. Como exemplos a explosão do digestor na Flórida (EUA) em 1994, onde falhas em aplicar diretrizes rigorosas de segurança operacional foram determinantes para a ocorrência (Moskal, 2017). O envenenamento de trabalhadores com sulfeto de hidrogênio na fábrica de celulose e papel da *Georgia-Pacific Corporation* (EUA), evidenciou o impacto da ausência de protocolos eficazes de detecção de vazamentos e treinamento insuficiente dos operadores (CSB, 2018). Da mesma forma, a cultura de segurança deficiente também foi um fator determinante na explosão de poeira combustível em fábricas de *pellets* de madeira no Canadá, onde padrões inadequados de controle e cuidados foram negligenciados (Rayner Brown *et al.*, 2024).

Avaliando perigos

As análises de perigos de processo (PHAs) ajudam a avaliar os cenários de riscos associados a um processo. Uma das principais lições aprendidas com o desastre da UCIL, consiste que uma avaliação adequada de riscos poderia ter feito com que a administração questionasse a decisão de manter estoques superior às recomendações técnicas e operar sem os equipamentos de prevenção.

Lições na fábrica de celulose Kraft:

Em relação ao uso de produtos químicos perigosos, Amyotte e Khan (2021) relatam o conceito de minimizar, substituir e moderar. “Minimizar” materiais perigosos quando o uso não pode ser evitado. “Substituir” substância por um material menos perigoso e “Moderar” usando materiais em suas formas menos perigosas (formulação mais segura), ou identificar opções que envolvam condições de processamento menos severas (como temperatura ou pressão mais baixas). Por questões ambientais, as fábricas de celulose branqueada eliminaram amplamente o uso de cloro elementar e reduziram substancialmente o consumo de dióxido de enxofre gasoso.

Produtos químicos perigosos podem ser encontrados nos vários setores da fábrica. No digestor, exposições potenciais incluem compostos orgânicos de enxofre e sulfeto de hidrogênio. No branqueamento, o dióxido de cloro, que é um irritante pulmonar grave mesmo em baixas concentrações e o peróxido de hidrogênio, que é um componente cujas reações de decomposição, são extremamente intensivas e potencialmente perigosas. Evaporadores e Caldeiras de Recuperação são fontes de gases sulfurosos e requerem precauções. As exposições potenciais de caustificação e recuperação de cal incluem hidróxido de sódio, óxido de cálcio (cal virgem) e hidróxido de cálcio, que são produtos oxidantes agressivos ao ser humano.

Na área do branqueamento, dentro do ambiente preventivo de materiais perigosos, Alp *et al.* (2005) apresentam avaliação de risco para aplicações de dióxido de cloro. Hart *et al.* (2013) desenvolveram modelos para aplicações seguras de peróxido de hidrogênio em plantas de branqueamento, considerando a concentração, a origem da soda cáustica aplicada e a diluição no *mixer* antes da torre de branqueamento. Coyle (1995) relata os principais produtos químicos aplicados nas fábricas de celulose e papel, as características de perigo, bem como as quantidades do mandato regulatório.

Fatores de manutenção

Kletz (2019) relata que os fatores de manutenção, que influenciaram ativamente, foram a falha das válvulas da linha de produtos devido à corrosão, falha na montagem da raquete entre o tanque MIC e a linha de água e outros aspectos. Como dito acima, o sistema de refrigeração, o *Scrubber* e o incinerador de gases estavam inoperantes por demandas de manutenção. A influência da manutenção também inclui deficiências no diagnóstico de falhas, planejamento, execução e verificação (Okoh e Haugen, 2013).

Além disso, não exatamente um problema de manutenção, mas uma questão de engenharia, os chuveiros pulverizadores de água para dispersar os gases não foram suficientes para alcançar o topo da chaminé localizado a 36 m (120 ft) de altura (Shrivastava, 1994).

Lições na fábrica de celulose Kraft:

De uma forma geral, os dispositivos de segurança de processo não são usados continuamente e sua ausência não afetam o ritmo de produção cotidiano. Não raro, tais itens não são considerados “primeira prioridade”, seja em termos de manutenção ou peças de reposição.

Falhas nos descascadores, picadores e correias transportadoras podem levar à ocorrência de incêndio e explosões devido ao atrito em um ambiente com partículas finas de madeira. Ações para prevenção e mitigação de riscos associados a estes eventos nas áreas de manuseio de cavacos devem ser implementadas (Luzic, 2013; Kay e Mazur, 2020).

Atenção especial deve ser dispensada aos equipamentos de detecção e combate a incêndios. Devem ser realizados testes nas variáveis de proteção (vazão e pressão), principalmente nos pontos altos da fábrica, como o topo do digestor e alimentação da caldeira de biomassa. Bombas, detecção e alarme, chuveiros automáticos são importantes e o custo do não funcionamento durante uma emergência pode ser devastador.

Fatores de gerenciamento

As falhas latentes de gestão que se destacam no evento foram o armazenamento excessivo de MIC, treinamento insuficiente para a equipe operacional, contratação de operadores com qualificação insuficiente, falta de cultura de

segurança, foco na redução de custos em detrimento das condições de manutenção.

Lições na fábrica de celulose Kraft:

As fábricas de celulose armazenam grandes quantidades de produtos químicos, como hidróxido de sódio, dióxido de cloro, clorato de sódio, oxigênio, peróxido de hidrogênio (em concentrações superiores a 50%) e outros. Devem ser efetuados balanços de consumo e de abastecimento para determinar as condições adequadas dos níveis de armazenagem.

Na área de recuperação química, algumas unidades contam com tanques de emergência interligados aos sistemas de armazenamento de licor negro, licor verde e licor branco – todos com características alcalinas e toxicidade relevante ao manuseio e ao meio ambiente. Algumas vezes, esses tanques são utilizados como reservatórios de compensação (“tanques pulmão”). O controle do nível de álcali total disponível na planta representa um desafio operacional, especialmente durante períodos de parada geral. Diante disso, é essencial estabelecer critérios técnicos específicos para a utilização dos tanques de emergência como estocagem, bem como definir claramente as ações operacionais a serem adotadas durante esses períodos.

A implantação de fábricas *greenfield* no Brasil, em um curto espaço de tempo, tem sido um desafio. Operadores experientes são atraídos por salários mais altos e expectativas de crescimento. O treinamento para os funcionários recém-contratados precisa ser planejado com antecedência, considerando tópicos de práticas de trabalho seguras, procedimentos operacionais, operações de emergência e paradas de emergência. A reciclagem do treinamento dos procedimentos deve ser realizada pelo menos a cada três anos (OSHA 2015, 2254-09R). A segurança operacional é inestimável e o bem-estar dos funcionários é razão suficiente por si só para praticar uma cultura de prevenção positiva.

Fatores indiretos

Fatores indiretos não listados acima, mas que valem a pena considerar nas rotinas de gerenciamento de segurança de processo de uma fábrica de celulose.

Uma das causas frequentes nos acidentes de processo são falhas no Gerenciamento de Mudanças (*MOC – Management of Change*), que é um sistema para gerenciar todos os tipos de mudanças, como equipamentos, tecnologia e condições de processamento (CCPS 2011). OSHA 3133 recomenda que os empregadores desenvolvam soluções para detectar mudanças temporárias e permanentes. Mudanças nas plantas devem ser revisadas por um profissional competente com visão sistêmica, para que adequação aos padrões de projeto e não produzam efeitos colaterais (Kletz *et al.*, 2010; Wincek *et al.*, 2015). O MOC é um dos elementos básicos do sistema PSM da OSHA e é exigido pelo Regulamento do Programa de Gerenciamento de Riscos da EPA (*Environmental Protection Agency*), dos EUA.

Em geral, a implementação de procedimentos escritos das rotinas operacionais é um elemento já presente nas fábricas certificadas em programas de qualidade como a ISO 9001. No entanto, é importante revisar os procedimentos para verificar se eles já incluem questões de segurança do processo. E o mais importante: se os procedimentos são facilmente acessíveis a todos os operadores.

Trabalhadores próprios e temporários devem ser informados sobre os principais riscos do local e dos planos de emergência, considerando os riscos relevantes do processo, como incêndio, explosão ou liberações tóxicas, bem como alarmes de vazamento de gases ou problema de processo.

A revisão de segurança *pré-start up* (PSSR) é um método para garantir que uma planta nova ou modificada seja segura para iniciar. Importante verificar se o novo equipamento atende às especificações do projeto, novos procedimentos, se os requisitos MOC do processo foram atendidos e se o treinamento dos funcionários foi efetuado.

O padrão PSM foi adotado para controlar possíveis riscos catastróficos de liberação de processos no início da década de 1990. Nos Estados Unidos foi publicado no Código de Regulamentos Federais (CFR) 29 CFR 1910.119, em 24 de fevereiro de 1992, tornando o PSM uma exigência legal no país. Embora se refira a leis destinadas a promover a segurança industrial especificamente nos Estados Unidos, a maioria dos países industrializados tem regulamentações paralelas em vigor. Além desses regulamentos, o Programa de Gerenciamento de Riscos da Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, estabeleceu vários requisitos aplicáveis aos “processos cobertos”. Um “processo coberto” da OSHA é um termo definido que sujeita determinados equipamentos aos requisitos regulamentares do PSM, como análises de perigos de processo, gerenciamento de mudanças e inspeções de integridade mecânica. No início da década de 1990, alguns artigos descrevendo os impactos dessas regulamentações na indústria de celulose e papel foram publicados (Brown e Buettner, 1992; Kelly e Fieser, 1992). Naturalmente, a adoção de padrões, como os citados, não é suficiente para atingimento da plenitude em segurança de processo (Eves, 1994; Cameron *et al.*, 2017), mas são passos relevantes para a melhoria dos resultados. Em particularidade na indústria de celulose, é importante considerar a inclusão do PSM além dos limites legíveis (Downs e Rosenman, 2019).

É importante registrar que a ênfase tradicional na segurança ocupacional não evita os acidentes de processo (Aldrich *et al.*, 2015; Luna, 2016). Bons resultados da segurança operacional são obtidos por meio de ações específicas dessa área. Nesse contexto, a abordagem RBPS reconhece que todos os perigos e riscos não são iguais. O uso de técnicas apropriadas como Identificação de Perigos e Avaliação de Riscos (HIRA), Análise *What If*, Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP), Análise de Árvore de Falhas, Análise de Árvore de Eventos, Análise de Camada de Proteção (LOPA) e outras, contribuem para a redu-

ção de riscos (AIChE 2016). Atualmente, no cenário brasileiro de celulose e papel, poucas fábricas estão envolvidas nessa abordagem do CCPS.

CONCLUSÕES

A tragédia de Bhopal é um marco emblemático de uma gestão deficiente da segurança de processos. Caso o projeto e a operação da planta tivessem sido conduzidos pelos princípios de *Process Safety Management* (PSM), o incidente não teria ocorrido. O PSM assume relevância particular em fábricas de operações contínuas com grande inventário de produtos peri-

gosos, como é o caso da indústria de celulose e papel. Por isso, alguns países do hemisfério norte estabeleceram regulamentações específicas de PSM para este setor. Já em nosso País, a legislação tem foco predominante na segurança ocupacional, o que contribui para que algumas organizações não implementem uma estrutura dedicada à segurança de processos, no entendimento de que embora os perigos sejam elevados, a probabilidade de ocorrência é considerada muito pequena. Tal premissa, ainda que compreensível sob uma ótica probabilística, pode não ser suficiente diante da gravidade potencial dos cenários envolvidos.

REFERÊNCIAS

- AIChE American Institute of Chemical Engineers. Center for Chemical Process Safety (2nd Ed.). *Guidelines for Implementing Process Safety Management Systems*. Wiley-AIChE, 2016.
- Aldrich, M., Ramsden, M., Steer, R., & Hamilton, I. *Golden Rules to Improve Process Safety Behaviour*. SPE Annual Caspian Technical Conference & Exhibition, 2015.
- Alonso, I. J., Broadribb, M. Human Error: A Myth Eclipsing Real Causes, *Process Safety Progress*, 37(2), p. 145-149, 2018.
- Alp, E., Eng, P., Boughner, R. T., & Pope, M. C. I. C. Risk Assessment for Chlorine Dioxide Systems. In: Proceedings Canadian Chemical Engineering Conference, 2005.
- Amyotte, P. R., Khan, F. I. The role of inherently safer design in process safety. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(4), p. 853-871, 2021.
- ANSI/ISA-18.2. Management of Alarm Systems for the Process Industries, published by American National Standards Institute ANSI and International Society of Automation ISA, 2009.
- Araujo, V. L., Rodrigues, R., Tudeia, B. M. A. Avaliação de integridade de um digestor contínuo em operação: Detecção, dimensionamento e adequação ao uso de perdas de espessura por corrosão, *O Papel*, 10, p. 24-25, 2024.
- Artamonov, A. A., Bogdanova, L. M., Nagibin, S. Y., Loskutov, D. I., & Chemakin, A. S. Mathematical model of chemical process prediction for industrial safety risk assessment. *Procedia Computer Science*, 190, p. 107-114, 2021.
- Ayres, R. U., & Rohatgi, P. K. Bhopal: Lessons for technological decision-makers. *Technology in Society*, 9(1), p. 19-45, 1987.
- Bahadori, A. Blow-down and flare systems. *Natural Gas Processing*, Cap.6, 2014, p. 275-312, 2014.
- Bloch, K. Rethinking Bhopal a Definitive Guide to Investigating, Preventing, and Learning from Industrial Disasters, Elsevier Radarweg, Amsterdam, Netherlands, 2016.
- BLRBAC. Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, Recommended good practice Thermal Oxidation of Waste Streams in Black Liquor Recovery Boilers, 2021.
- BLRBAC. Black Liquor Recovery Boiler Advisory Committee, Recommended good practice safe firing of black liquor in black liquor recovery boilers, 2023.
- Broughton, E. The Bhopal disaster and its aftermath: a review. *Environmental health*, 4, p. 1-6, 2025.
- Brown, C. A., Buettner, C. A. Process safety management in pulp and paper industry, *Tappi Journal*, 75(8) p. 59-63, 1992.
- Busby, G. A., Hart, P. W. Digester thinning: Erosion-corrosion of internal flow channel headers, *Tappi Journal*, 13(8), p. 9-15, 2014.
- Cameron, I., Mannan, S., Németh, E., Park, S., Pasman, H., Rogers, W., & Seligmann, B. Process hazard analysis, hazard identification and scenario definition: Are the conventional tools sufficient, or should and can we do much better? *Process Safety and Environmental Protection*, 110, p. 53-70, 2017.
- CCPS Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for risk-based process safety*. John Wiley & Sons, 2010.
- CCPS Center for Chemical Process Safety. *Guidelines for the Management of Change for Process Safety*. Wiley, 2011.
- Chouhan, T. T. *et al.* Bhopal: The inside story. Carbide workers speak out on the world's worst industrial disaster, The Other India Press, 1994.
- Coyle, W. L. Process safety management and the pulp and paper industry. *Tappi Journal* 78(10), p. 184-190, 1995.
- CSB U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Packaging Corporation of America Hot Work Explosion Final Investigation Report, 2018.
- CSB U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Hydrogen Sulfide Poisoning, 2002-01-I-AL Investigation Report, 2003.
- CSB U. S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board.
- Incident reports, Events reported to the CSB under the accidental release reporting rule, v. 1, 2025.
- Downs, D., Rosenman, K. M. Modernizing Process Safety Management in Pulp & Paper, In: Proceedings 2019 Pulp and Paper Safety Association Conference, 2019.
- Duhon, H. Bhopal: a root cause analysis of the deadliest industrial accident in history. *Oil and Gas Facilities*, 3(03), p. 24-28, 2014.
- Eckerman, I. The Bhopal gas leak: Analyses of causes and consequences by three different models. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(4-6), p. 213-217, 2005.
- EEMUA Publication 191. Alarm Systems: A Guide to Design, Management and Procurement – Third ed., published by the Engineering Equipment and Materials Users Association, 2013.
- Eves, D. Safety Management: Are we learning the lessons? *Process Safety Progress* 13(1) p. 4-5, 1994.
- Frank, W. L. Process safety culture in the CCPS risk-based process safety model. *Process safety progress*, 26(3), p. 203-208, 2007.
- Gorog, M. Continuous digesting rapid thinning and general corrosion, *Tappi Journal*, 23(6), p. 327-335, 2024a.

- Gorog, M. Fixed Equipment Mechanical Integrity, *In: Proceedings TAPPICon24*, 2024b.
- Haraga, R. 10 Year Recovery Boiler Incident Statistics, *The Fornax Post*, 20219.
Disponível em: <https://www.thefornax.com/index.php?nav=blog&blog=recovery-boiler-incident-10-year-review>. Acesso em: 01 fev. 2025.
- Harrod, C., Freeman, J., Brayman, M. Continuous digester process safety improvements – Stress corrosion cracking and overpressure protection lessons learned and opportunities, *Tappi Journal*, 23(10), p. 589-600, 2024.
- Hart, P. W., Houtman, C., & Hirth, K. Hydrogen peroxide and caustic soda: Dancing with a dragon while bleaching. *Tappi Journal*, 12(7), 59-65, 2013.
- Hobbs, D. Taming Mechanical Integrity, *Process Safety Progress* 27(2), p. 112-114, 2008.
- Hopkins, A. Lessons from Esso's gas plant explosion at Longford. *Warwick Pearse, Clare Gallagher and Liz Bluff*, 1, 2001.
- IBAMA 2014, Instrução Normativa 15, PUB DOU 07/10/2014 000193 1 75
- Jasi, A. Explosion at US paper mill, *The Chemical Engineer*, 2020. Disponível em: <https://www.thechemicalengineer.com/news/explosion-at-us-paper-mill/>. Acesso em: 21 fev. 2025.
- Joseph, G., Kaszniak, M., & Long, L. Lessons after Bhopal: CSB a catalyst for change. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18(4-6), p. 537-548, 2005.
- Kalelkar, A. S., & Little, A. D. *Investigation of large-magnitude incidents: Bhopal as a case study*. London: AD Little, 1988.
- Kay, J. A., & Mazur, D. C. A Hidden Hazard – Identifying, Understanding and Preventing Combustible Dust Explosions in Forest Industry Facilities. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1, 2020.
- Kelly, R. B., Fieser, S. Understanding the Impact of New Process Safety Management Regulations on the Pulp and Paper Industry, *In: 1992 Environmental Conference Proceedings*, 1992.
- Khan, F., Rathnayaka, S., & Ahmed, S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process safety and environmental protection*, 98, p. 116-147, 2015.
- Kletz, T. A., & Amyotte, P. *Process plants: A handbook for inherently safer design*. Crc Press., 2010.
- Kletz, T. A., & Amyotte, P. *What went wrong?: Case histories of process plant disasters and how they could have been avoided*. Butterworth-Heinemann, 2019.
- Labib, A., & Champaneri, R. The Bhopal Disaster-learning from failures and evaluating risk. *Maintenance Engineering*, 27(3), p. 41-47, 2012.
- Luzic, J. S. Managing the risk of fire and explosion in the pulp and paper industry. *Paper* 360 °, v. 3, p. 27-29, 2013.
- Macleod, F. Impressions of Bhopal. *Loss Prevention Bulletin*, (240), 2014.
- Maguire, R. *Safety cases and safety reports: meaning, motivation and management*. CRC Press, 2017.
- Ministério Trabalho e Emprego – Normas Regulamentadoras – NR, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs> . Acesso em: 20 fev. 2025.
- Moskal, M. Insights on the Panama City Batch Digester Explosion, *In: Proceedings, Tappi PEERS Pulping, Engineering, Environmental, Recycling and Sustainability (PEERS) Conference*, 2017.
- Murphy, J. F., Hendershot, D., Berger, S., Summers, A. E., & Willey, R. J. Bhopal revisited. *Process Safety Progress*, 33(4), p. 310-313, 2014.
- O'Byrne, C. Remembering the piper alpha disaster. *Historical Reflections/Réflexions Historiques*, 37(2), p. 90-104, 2011.
- Okoh, P., & Haugen, S. The influence of maintenance on some selected major accidents. *CET Chemical Engineering Transactions*, 31, 2013.
- OSHA Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals, 29 CFR 1910.119, Federal Regulations of USA, Occupational Safety and Health Administration, Washington, DC, 1992.
- OSHA 2015, 2254-09R 2015 Training Requirements in OSHA Standards.
- OSHA 3133 Occupational Safety and Health Administration. Process safety management guidelines for compliance. Washington, DC: US Department of Labor, 1994.
- Peterson, M. J. Bhopal plant disaster-situation summary, International Dimensions of Ethics Education in Science and Engineering (IDEESE) Project 0734887, University of Massachusetts Amherst (USA), 2009.
- Raghunandan, D., & Jayaprakash, N. D. Bhopal gas disaster: Delhi science forum and people's science movement in india-in memory of Dr. Amit Sengupta. *Saúde em Debate*, 44(spe1), p. 120-134, 2020.
- Rayner Brown, K., Laturnus, B., Murray, G., Yazdanpanah, F., Cloney, C., & Amyotte, P. Integrating process safety management into Canadian wood pellet facilities that generate combustible wood dust. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 102(12), p. 4085-4103, 2024.
- Reis, H. M. *Ciclo de recuperação Química*. São Paulo: Fontenele Publicações, 2021.
- Shamsuddin, D. S. N. A., Fekeri, A. F. M., Muchtar, A., Khan, F., Khor, B. C., Lim, B. H., ... & Takriff, M. S. Computational fluid dynamics modelling approaches of gas explosion in the chemical process industry: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 170, p. 112-138, 2023.
- Shen, R., Jiao, Z., Parker, T., Sun, Y., & Wang, Q. Recent application of Computational Fluid Dynamics (CFD) in process safety and loss prevention: A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 67, p. 104-252, 2020.
- Shreve, R. N., & Brink, J. A. *Indústrias de processos químicos*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1980.
- Shrivastava, P. Technological and organizational roots of industrial crises: Lessons from Exxon Valdez and Bhopal. *Technological Forecasting and Social Change*, 45(3), p. 237-253, 1994.
- VanCamp, K. Alarm management by the numbers. *Chemical Engineer Essentials CPI Prof., Autom. Control*, 2016.
- Varadarajan, S., Doraiswamy, L. K., Ayyangar, N. R., Iyer, C. S. P., Khan, A. A., Lahiri, A. K., ... & Venkataraman, R. S. Report on scientific studies on the factors related to Bhopal toxic gas leakage. *New Delhi: Indian Council for Scientific and Industrial Research*, 1985.
- UCC Union Carbide Corporation. "Bhopal Methyl Isocyanate Incident. Investigation Team Report", Union Carbide, Danbury, CT (USA), 1985.
- Weir, D. Bhopal Syndrome: pesticides, environment and health. Routledge, 1987.
- Willey, R. I. Consider the Role of Safety layers in the Bhopal Disaster. *Chemical Engineering Progress*, 110(12), p. 22-27, 2014.
- Wincek, J., Sousa, L. S., Myers, M. R., & Ozog, H. Organizational change management for process safety. *Process Safety Progress*, 34(1), p. 89-93, 2015.
- Wismer, K., Lising, N. Cultivating positive safety culture in the pulp and paper industry, *Valmet Insights*, 2024. Disponível em: <https://www.valmet.com/insights/articles/experts-voice/cultivating-positive-safety-culture-in-the-pulp-and-paper-industry/>. Acesso em: 11 fev. 2025.