

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

Bruno Fracaroli Neves
Felipe Rosa Mohana Borges



SISTEMA DE GESTÃO DE SEGURANÇA RBPS APLICADO AO
ACIDENTE DE OPTIMA BELLE

RIO DE JANEIRO

2023

Bruno Fracaroli Neves
Felipe Rosa Mohana Borges

Sistema de Gestão de Segurança RBPS Aplicado ao Acidente de Optima Belle

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior

Rio de Janeiro
2023

CIP - Catalogação na Publicação

N797s Neves, Bruno Fracaroli. Borges, Felipe Rosa Mohana
Sistema de Gestão de Segurança RBPS aplicado ao
acidente de Optima Belle / Bruno Fracaroli. Borges,
Felipe Rosa Mohana Neves. -- Rio de Janeiro, 2023.
110 f.

Orientador: Carlos André Vaz Júnior.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2023.

1. Acidente Químico. 2. NaDCC. 3. RBPS. 4.
Sistemas de gestão de segurança. 5. Optima Belle. I.
Vaz Júnior, Carlos André, orient. II. Título.

Bruno Fracaroli Neves
Felipe Rosa Mohana Borges

Sistema de Gestão de Segurança RBPS Aplicado ao Acidente de Optima Belle

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Química da Universidade Federal do
Rio de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Engenheiro
Químico.

Aprovado em 18 de dezembro de 2023.

Carlos André Vaz Júnior, D. Sc., Escola de Química - UFRJ

Bruno Didier Olivier Capron, D. Sc., Escola de Química - UFRJ

Sávio Souza Venâncio Vianna, D. Sc., Unicamp

Rio de Janeiro
2023

AGRADECIMENTOS – BRUNO FRACAROLI NEVES

Não considero os acidentes, sejam eles de quaisquer naturezas (químicos, de aviação, de trânsito e muitos outros), como apenas números e/ou lições aprendidas. São, antes de mais nada, pessoais, pois envolvem seres humanos, direta ou indiretamente. Para mim, o acidente deste estudo deve ser usado com muito respeito às vítimas. Torço para que a análise do acidente de Optima Belle sirva para inspirar outros a se interessar por este tema tão importante que é a segurança de processos na indústria química e garantir que tenhamos operações cada vez mais seguras. Por isso, meu primeiro muito obrigado vai às três vítimas.

Agradeço também ao meu orientador Carlos André Vaz Júnior. Conhecemo-nos quando cursei sua disciplina ainda no terceiro período. Foi quem topou o desafio de criar o capítulo da AICHe em 2019. Por todo o suporte e interação, além de toda ajuda técnica neste trabalho, meu muito obrigado.

Aos professores Bruno Capron, Maurício Bezerra e Argimiro Secchi, que me entrevistaram e para avaliar se eu poderia representar bem a UFRJ no intercâmbio e me permitiram viver um dos meus sonhos, muito obrigado pela confiança. De igual maneira, gostaria de agradecer à CAPES e ao governo brasileiro pelo apoio fornecido para que este sonho se tornasse realidade.

Impossível falar da França e meu período acadêmico lá sem agradecer enormemente aos professores Romain Privat, Jean-Noël Jaubert, Eric Favre e Christophe Castel, que me orientaram no estágio para obtenção do Mestrado em Engenharia de Processos da École Nationale Supérieure des Industries Chimiques (ENSIC). O apoio e a paciência de vocês foram essenciais para eu superar o desafio. Também agradeço à Aya Barakat e ao Francisco Paes, estudantes de doutorado da ENSIC, que por muitos dias dividiram a sala comigo e fizeram os dias do mestrado mais leves, divertidos e com muito aprendizado.

Às diversas pessoas que não conseguiria mencionar em apenas uma página, mas que representam alguns círculos, como: meus amigos próximos que vivem no meu coração para sempre, meus colegas de faculdade, demais colegas de intercâmbio, minha família próxima, os profissionais que conheci enquanto realizei meus estágios, colegas de estudo de idiomas e de case, meu muitíssimo obrigado. Tenho certeza de poucas coisas na vida, e uma delas é de que tudo pode ser visto como um aprendizado. Por todas as experiências vividas e aprendizados obtidos, não há palavras para agradecer. Espero ainda aprender muito mais nessa vida, com vocês e com as outras pessoas que aparecerem – para mim, esta é uma das belezas da vida.

AGRADECIMENTOS – FELIPE ROSA MOHANA BORGES

Antes de tudo, desde que nós nos entendemos como indivíduos, nossos pais nos conceberam a este mundo. Muitos não tiveram o privilégio que eu tive de ter os pais presentes e unidos ao longo da vida. Por isso agradeço aos meus pais, Ronaldo da Silva Mohana Borges e Áurea Valéria Rosa Mohana Borges, por terem me feito como eu sou hoje e terem dado todo o apoio necessário, inclusive em todos os meus altos e baixos. Vocês são exemplares e minha principal referência para quase tudo que faço na minha vida, consciente ou inconsciente.

Minha família sempre se mostrou presente e me deram todo o suporte quando eu e meus pais precisaram. Agradeço a minha tia Rose, por ser uma referência acadêmica e mostrar que o desenvolvimento intelectual é uma jornada perene. Agradeço minha tia Grace, por ter me acolhido em sua casa e ser minha referência para extroversão e networking, técnicas que muito aprendi com seus ensinamentos e pratico com vigor até os dias de hoje. Agradeço meu tio Marcos, por mostrar que para a família nunca deve faltar tempo ou recursos, sempre nos recebendo de braços abertos e com a mesa farta. Agradeço aos meus primos Rafael e Miguel, que me aturaram muito quando criança mas sempre me abraçaram como irmão. Agradeço aos meus avós Cleusa e Roberval, que apesar da distância, nunca se deixaram abalar com isso e sempre me receberam com o maior amor que avós poderiam dar.

Gostaria de fazer um agradecimento especial à minha avó e madrinha Áurea Pereira da Costa, que faleceu em 2021 depois de muito lutar com a senescência natural do corpo humano. Minha avó provou para mim que a força de vontade e de viver, de continuar a estar presente para a família, da perseverança contra a dura realidade da efemeridade humana, são todas vindas da sua saúde espiritual. Que eu consiga realizar e internalizar 10% de todos os ensinamentos que me passou em minha vida.

Agradeço aos meus amigos Bruno Fracaroli e Matheus Bimbi, que estiveram ali do meu lado desde que entramos na graduação de engenharia, em 2017. Nossas conversas dos tópicos mais abrangentes foram o alimento intelectual que me mantiveram são ao longo de toda a graduação. A quantidade de conteúdo, aprendizado e experiência que trocamos ao longo desses 7 anos poderia preencher uma biblioteca inteira, e espero que tenha contribuído para suas vidas assim como contribuíram para a minha.

Agradeço aos meus amigos Matheus, João, Pedro, Ruan, Nathanael, Guilherme, Vinícius, Heitor e Felipe, que desde o colégio me agraciam com o melhor divertimento que beneditinos podem proporcionar. Agradeço também aos meus amigos João Pedro, Deco, Lucca, João Victor, Elias e Pedro, que me mostraram que a nossa sanidade foi deixada de lado quando

decidimos virar leões. Agradeço também ao Jonny, que decidiu embarcar no meu convite louco de fazer engenharia química no colégio e esteve ao meu lado desde então.

Agradeço ao Arthur, que mesmo depois de anos separados voltamos a ter uma amizade vibrante que espero manter para a vida.

Agradeço aos meus amigos Bruno, Débora, Carol, Ana Clara, Nathália e Gabi, que mesmo nos conhecendo recentemente, fizeram meus últimos meses mais suportáveis e agradáveis.

Agradeço a todo o corpo docente da EQ, por todos os ensinamentos ao longo dos anos e peço perdão pelo rendimento muito aquém que gostaria de ter tido nesses 7 anos de graduação. Agradeço em particular ao nosso orientador Carlos André Vaz pela paciência e apoio que nos deu neste trabalho, assim como na disciplina que fizemos.

RESUMO

NEVES, BRUNO F.; BORGES, FELIPE R. M.. **Sistema de Gestão de Segurança RBPS aplicado ao Acidente de Optima Belle**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), em tradução livre “Centro de Segurança de Processos Químicos”, estabeleceu em 2007 o modelo denominado *Risk-Based Process Safety* (RBPS), em tradução livre “Sistema de Gestão de Segurança de Processos Baseado em Risco” referência na indústria para a eficaz implementação de sistemas de gestão de segurança. Esse *framework* é estruturado em quatro blocos fundamentais, que se sustentam em 20 elementos ao todo. Os elementos visam garantir a segurança nas indústrias químicas por meio de sistemas, métodos e atividades específicas. Este estudo analisa os fatores contribuintes para o acidente ocorrido na instalação fabril da Optima Belle em Belle, West Virginia, Estados Unidos, em dezembro de 2020, utilizando a estrutura do RBPS como base de análise. O acidente resultou em uma fatalidade e três feridos. Na época, a Optima Belle havia sido contratada pela *Clearon Corporation*, por intermédio da *Richman Chemical Inc.*, para desidratar aproximadamente 16 toneladas de dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) dihidratado, divididas em quatro lotes. No decorrer do processamento do primeiro lote, o secador de cone duplo rotativo explodiu devido a uma reação de decomposição térmica auto acelerada do NaDCC dihidratado. Vários fatores contribuíram para essa explosão, incluindo a sobrepresurização do secador, que estava equipado com um sistema de alívio de pressão inadequado para o procedimento. O objetivo deste estudo é destacar as falhas em cada um dos elementos do RBPS que propiciaram a ocorrência do acidente. Ao final da análise, observa-se que nove dos vinte elementos apresentaram falhas que poderiam ter sido identificadas e, possivelmente, evitado o acidente. Exemplos desses elementos são “Competência em Segurança de Processos”, “Gestão do Conhecimento de Processos” e “Identificação de Perigos e Análise de Riscos”.

Palavras-chave: Segurança de Processos, Acidente Químico, Sistemas de Gestão de Segurança, RBPS, Optima Belle, NaDCC.

ABSTRACT

Neves, Bruno F.; Borges, Felipe R. M.. **RBPS Safety Management System Applied to the Optima Belle Accident**. Rio de Janeiro, 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

Since 2007, the Center for Chemical Process Safety (CCPS) has developed the Risk-Based Process Safety (RBPS) framework, which remains a benchmark in the industry for the effective implementation of safety management systems. This framework comprises four fundamental blocks, being sustained by 20 elements in total, aimed at ensuring safety in the chemical industry through specific systems, methods, and activities. This study analyzes the contributing factors to the accident that occurred at the Optima Belle manufacturing facility in Belle, West Virginia, United States, in December 2020, using the RBPS structure as the basis for analysis. The accident resulted in one fatality and three injuries. At the time, Optima Belle had been contracted by Clearon Corporation, through Richman Chemical Inc., to dehydrate approximately 16 tons of sodium dichloroisocyanurate (NaDCC) dihydrate, divided into four batches. During the processing of the first batch, the rotary double cone dryer exploded due to a self-accelerated thermal decomposition reaction of the NaDCC dihydrate. Several factors contributed to this explosion, including the overpressure in the dryer, which was equipped with an inadequate pressure relief system for the procedure. The objective of this study is to highlight the failures in some of the RBPS elements that led to the occurrence of the accident. At the end of the analysis, we identified that nine out of the twenty elements showed failures that could have been identified and potentially prevented the accident. Examples of these elements are “Process Safety Competence”, “Process Knowledge Management”, and “Hazard Identification and Risk Analysis”.

Keywords: Process Safety, Chemical Accident, Safety Management Systems, RBPS, Optima Belle, NaDCC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Pilares e elementos (base e colunas, respectivamente) do RBPS	22
Figura 3.1 – Reação de formação de ácido cianúrico a partir da pirólise de ureia.....	37
Figura 3.2 – Reação de formação de DCCA e TCCA a partir de ácido cianúrico e gás cloro em água com pH controlado.....	38
Figura 3.3 – Representação da conversão de NaDCC dihidratado para NaDCC.....	40
Figura 3.4 – Diagrama de processo da desidratação de CDB-56 na Optima Belle.....	42
Figura 3.5 Secador rotativo de cone duplo da Optima Belle.....	42
Figura 3.6 – Diagrama conceitual do secador de cone duplo rotativo da Optima Belle, fora de escala	44
Figura 3.7 – Exemplo de um secador de leito fluidizado utilizado industrialmente	46
Figura 4.1 – Excerto do Procedimento para desidratação de CDB-63® da Optima Belle.....	48
Figura 4.2 – Condições de operação do secador rotativo da Optima Belle em 08/12/2020; áreas em cinza indicam aplicação de vapor à camisa do secador	51
Figura 4.3 – Incêndio após a explosão do secador da Optima Belle	53
Figura 5.1 – Visão esquemática de como os perigos térmicos de produtos químicos reativos contribuem para acidentes de incêndio e explosão em um cenário geral de aplicação na indústria	67
Figura 5.2 – Válvula de pressão de segurança.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Os diferentes sistemas de gestão de segurança de processos/operacional.....	34
Quadro 3.1 – Cianatos comumente utilizados em piscinas	36
Quadro 4.1 – Excerto do procedimento para desidratação de CDB-63® da Optima Belle, listando dados físicos e informação de reatividade	48
Quadro 5.1 - Comparação da FISPQ de outros 6 fornecedores para o NaDCC dihidratado ...	60
Quadro 5.2 – Comparação das propriedades físicas e térmicas do NaDCC dihidratado e do NaDCC	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AICHE	American Institute of Chemical Engineering
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Combustíveis
ANSI	American National Standards Institute
API	American Petroleum Institute
ARC	Accelerated Rate Calorimetry
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BP	British Petroleum
BPVC	Boiler and Pressure Vessel Code
CCPS	Center for Chemical Process Safety
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CRW	Chemical Reactivity Worksheet
CSB	Chemical Safety Board
DCCA	Dichloroisocyanuric Acide
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EPA	Environmental Protection Agency
FISPQ	Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químico
HAZOP	Hazards and Operability
HSE	Health and Safety Executive
ILO	International Labor Organization
ISO	International Organization for Standardization
LOPA	Layers of Protection Analysis
NaClO	Hipoclorito de Sódio
NADCC	Dicloroisocianurato de Sódio
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBR	Norma Brasileira
NFPA	National Fire and Protection Agency
NR	Norma Regulatória
NSF	U.S. National Science Foundation
OMS	Organização Mundial da Saúde
OSHA	Occupational Safety and Health Organization

PHA	Process Hazard Analysis
PSI	Process Safety Information
PSM	Process Safety Management System
PSO-BR	Programa de Segurança Operacional Brasileiro
PSV	Pressure Safety Valve
RBPS	Risk Based Process Safety
RCI	Richard Chemical Inc.
RMP	Risk Management Program
SADT	Self-Accelerating Decomposition Temperature
SDS	Safety Data Sheet
SGSO	Sistema de Gestão de Segurança Operacional
SGSST	Sistema de Gestão de Segurança e Saúde do Trabalho
TCCA	Trichloroisocyanuric Acid
USEPA	United States Environmental Protection Agency
WSO	World Safety Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 SISTEMAS DE GESTÃO DE SEGURANÇA.....	19
2.1 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS BASEADA EM RISCO	21
2.1.1 Comprometimento com a Segurança de Processos	22
2.1.1.1 Cultura de Segurança de Processos	23
2.1.1.2 Conformidade com Padrões e Normas	24
2.1.1.3 Competência em Segurança de Processos	25
2.1.1.4 Envolvimento da Força de Trabalho	25
2.1.1.5 Proximidade dos Stakeholders	26
2.1.2 Compreensão de Perigos e Riscos	26
2.1.2.1 Gestão do Conhecimento do Processo	26
2.1.2.2 Identificação de Perigos e Análise de Riscos	27
2.1.3 Gestão dos Riscos.....	28
2.1.3.1 Procedimentos Operacionais	28
2.1.3.2 Práticas de Trabalho Seguro	28
2.1.3.3 Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos	29
2.1.3.4 Gestão de Terceiros	29
2.1.3.5 Treinamento e Garantia de Desempenho.....	30
2.1.3.6 Gestão da Mudança	30
2.1.3.7 Prontidão para a Operação.....	30
2.1.3.8 Disciplina Operacional	30
2.1.3.9 Gestão da Emergência	31
2.1.4 Aprendizado com a Experiência	31
2.1.4.1 Investigação de Acidentes	31
2.1.4.2 Medições e Métricas	31
2.1.4.3 Auditoria.....	32
2.1.4.4 Revisão de Gestão e Melhoria Contínua	32
2.2 MOTIVAÇÃO PARA ESCOLHA DO RBPS	32
3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE DICLOROISOCIANURATO DE SÓDIO . ERROR!	
BOOKMARK NOT DEFINED.	
3.1 RELEVÂNCIA DOS COMPOSTOS ORIGINADOS DE ÁCIDO CIANÚRICO	35

3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE DICLOROISOCIANURATO DE SÓDIO (NADCC)	37
3.3 PARTICULARIDADES DA OPERAÇÃO DE DESIDRATAÇÃO DO CDB-56® EM CDB-63® À ÉPOCA DO ACIDENTE	38
3.3.1 As empresas envolvidas no processo de contratação da operação	38
3.3.2 Descrição dos componentes químicos envolvidos na desidratação	39
3.3.3 Descrição do processo de desidratação	41
3.3.4 Equipamento de secagem	43
3.3.5 Procedimento de desidratação	44
3.3.6 Diferenças entre o processo da Optima e o antigo processo da Clearon	45
4 O ACIDENTE DE OPTIMA BELLE	47
4.1 INCONSISTÊNCIAS ENTRE PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO E PROCEDIMENTO DE PARADA DE EMERGÊNCIA	48
4.2 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE	49
4.2.1 Inicialização em 08 de dezembro de 2020	49
4.2.2 Monitoramento de processos e resolução de problemas	49
4.2.3 Inspeção do secador	50
4.2.4 A Explosão	52
4.2.5 Análise técnica do acidente	53
5 ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUINTES PARA O ACIDENTE	55
5.1 FALHAS EM RELAÇÃO À GESTÃO DO CONHECIMENTO DO PROCESSO	56
5.1.1 Orientações do CCPS e da OSHA	56
5.1.2 Inadequação do pacote de tecnologia	57
5.1.2.1 Inadequações na FISPQ das substâncias envolvidas	59
5.1.3 Sistema de gerenciamento de conhecimento de processo da Clearon	65
5.2 FALHAS EM RELAÇÃO À AVALIAÇÃO DE PERIGOS TÉRMICOS	66
5.2.1 Orientações do CCPS	68
5.2.2 Práticas de avaliação de riscos térmicos das companhias envolvidas	69
5.2.3 Lacunas de avaliação de reatividade por parte das companhias envolvidas	69
5.3 FALHAS EM RELAÇÃO À SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS E AO DESIGN DE PROCESSO	71
5.3.1 Tecnologia do secador utilizado para converter CDB-56® em CDB-63®	72
5.3.2 Design da camisa de resfriamento e aquecimento	74
5.3.3 Dispositivos de segurança de alívio de pressão	76

5.3.3.1 Preliminary Hazard Analysis (PHA) da desidratação de CDB-56® da Optima Belle	77
5.3.4 Escala da operação de batelada	79
5.4 FALHAS EM RELAÇÃO À TERCEIRIZAÇÃO DE PRODUÇÃO ENVOLVENDO MATERIAIS PERIGOSOS	81
5.4.1 Gerenciamento de conhecimento de processo em operações terceirizadas	81
5.4.2 Identificação de perigos e análise de riscos em operações terceirizadas	82
5.4.3 Outras responsabilidades das empresas envolvidas na terceirização	83
5.4.4 Conclusões quanto à terceirização	84
5.5 FALHAS EM RELAÇÃO À COBERTURA REGULATÓRIA DE SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS REATIVAS	85
6 ANÁLISE DO ACIDENTE SOB A ÓTICA DO RISK-BASED PROCESS SAFETY (RBPS)	88
6.1 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “COMPETÊNCIA EM SEGURANÇA DE PROCESSOS”	89
6.2 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DE CONHECIMENTO DOS PROCESSOS”	89
6.3 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS E ANÁLISE DE RISCOS”	91
6.4 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS”	92
6.5 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “INTEGRIDADE E CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS”	92
6.6 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DA MUDANÇA”	94
6.7 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “DISCIPLINA OPERACIONAL”	95
6.8 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DE EMERGÊNCIA”	96
6.9 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES”	97
7 CONCLUSÕES	99
8 REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Os séculos XIX e XX foram de grande desenvolvimento tecnológico e social graças à revolução industrial, que elevou o patamar mundial de produção e consumo de bens e serviços. Este desenvolvimento, contínuo, gera uma enorme demanda por energia, produtos químicos, commodities e alimentos. Como consequência, há um aumento no tamanho e na complexidade das plantas de processamento. Inevitavelmente, houve o aumento e a criação de novos riscos, que precisam ser prevenidos e mitigados (KHAN; RATHNAYAKA, AHMED, 2015). Ainda assim, mesmo com todas as tecnologias, métodos e sistemas desenvolvidos nas últimas décadas, esta ainda é uma tarefa difícil, e acidentes, com os mais variados níveis de gravidade continuam acontecendo.

Outra área crucial para prevenção de perdas e desastres é a de educação em segurança de processos. Ela possui relevância significativa nas operações diárias da indústria. É baseada e desenvolvida em cima dos principais acidentes na indústria de processos químicos (MKPAT; RENIERS; COZZANI, 2018). Estes, por sua vez, podem ter impactos significativos no meio ambiente e nas pessoas ao redor (Baybutt, 2016). São caracterizados por uma baixa frequência de ocorrência associados a consequências de alto impacto, como, por exemplo, várias fatalidades, perda de ativos e danos à reputação da empresa (DITCHBURN; DAVID, 2006). Assim, a educação em segurança de processos surge como o aprendizado de princípios de segurança com disciplinas operacionais a partir de uma abordagem sistemática, buscando evitar acidentes catastróficos (MKPAT; RENIERS; COZZANI, 2018).

Foi mencionado por Kletz (1993) que acidentes ocorrem e se repetem na indústria de processos químicos devido à má disseminação e utilização de informações de acidentes anteriores para preveni-los. De acordo com Kidam e Hurme (2013), é possível aprimorar o sistema de aprendizado com acidentes passados. Isto pode ser alcançado por meio da análise consistente de dados de acidentes, publicação de lições aprendidas e implementação dessas lições na prática. Esses esforços manteriam a conscientização sobre segurança de processos e possibilitariam a melhoria contínua deste tema no projeto e na operação de plantas.

Muitas análises de acidentes têm como objetivo identificar a causa raiz dos acidentes e extrair lições aprendidas com eles. As causas de acidentes frequentemente são classificadas como técnicas e humanas e organizacionais. A divisão entre elas não é clara, pois muitas causas técnicas envolvem aspectos relacionados aos humanos, como erros de projeto, de instalação e/ou serviço. Também é comum que tanto os fatores técnicos, quanto os humanos e organizacionais contribuam para os acidentes ao mesmo tempo. Normalmente, existem mais de

uma causa para um acidente (KIDAM; HURME, 2013). Estudos anteriores constataram, em média, 2,3 causas em um acidente, com uma variação entre 2,0 e 2,7 causas (Nivolianitou et al., 2006; Sales et al., 2007). Buscando prevenir os acidentes, diferentes métodos, ferramentas e procedimentos focados na eliminação de erros de origem técnica e humanas e organizacionais foram desenvolvidos, assim como sistemas de gestão de segurança (MKPAT; RENIERS; COZZANI, 2018).

Pelo estudo de acidentes passados em diversas indústrias, sistemas de gestão de segurança ganharam notoriedade com o passar dos anos. A utilização ativa deles na operação de uma indústria se mostra crucial para estar de acordo com boas práticas da indústria, bem como evitar acidentes e perdas. O framework *Risk Based Process Safety*, proposto pelo CCPS em 2007, é composto por 4 blocos fundamentais e 20 elementos. Estes elementos, juntos, englobam uma série de atividades e métodos que buscam garantir a eficiência e efetividade dos sistemas já existentes, bem como a formalização de um sistema caso a unidade fabril ainda não possua.

No âmbito do estudo da segurança de processos, de acidentes passados e dos esforços para prevenir novos acidentes, há algumas definições chaves. Destacam-se três: “incidente”, “acidente” e “desastre”. Pode-se definir um incidente como uma mudança inesperada ou indesejada no comportamento normal do sistema, que causa ou tem o potencial de causar uma perda. O termo comumente usado acidente, é um incidente no qual ocorre uma perda significativa. Já um desastre é um incidente muito sério que envolve perda de vidas e/ou extensos danos materiais (COOKE; ROHLEDER, 2006).

Um exemplo de acidente que recorre à indústria química de processo são as explosões. Há explosões físicas e químicas. Uma explosão física ocorre quando a energia acumulada é subitamente liberada numa mudança física rápida, como, por exemplo, a expansão de um gás comprimido. Um exemplo é o *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion* (BLEVE). Já uma explosão química envolve a energia derivada de uma reação química. Um exemplo é a explosão de um reator causado pela decomposição de produtos numa reação química descontrolada (Abbasi et al, 2017). De acordo com o *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE), em tradução literal “Instituto Americano de Engenheiros Químicos”, reações descontroladas são um sistema de reações termicamente instáveis que apresentam uma taxa de reação acelerada e incontrolável, resultando em aumentos rápidos de temperatura e pressão. Assim, se a possibilidade de ocorrência desta reação não for conhecida, ou os equipamentos de processo não forem devidamente desenhados considerando este cenário, elas podem facilmente levar a uma explosão ou incêndio, se houver produtos inflamáveis no meio.

É no contexto da ocorrência de reações de decomposição descontroladas que este trabalho está inserido. Busca-se analisar o acidente catastrófico ocasionado pela decomposição descontrolada de dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) dihidratado sob a ótica das diretrizes do RBPS, *framework* de segurança de processos desenvolvido pelo CCPS em 2007. Ele ocorreu em 2020, na planta da Optima Belle, em Belle, West Virginia, nos Estados Unidos e causou um falecimento e três feridos. A ocorrência foi investigada pelo *U.S. Chemical Safety Board (CSB)*, em tradução livre “Conselho de Segurança Química dos EUA” que publicou um relatório final de investigação em julho de 2023.

Para tal, o trabalho foi dividido em cinco partes principais: (i) compreender sistemas de gestão de segurança, (ii) entender o processo produtivo e as substâncias envolvidas no caso da Optima Belle, (iii) o acidente per se, (iv) os fatores causais da catástrofe e, por fim, (v) analisar o acidente sob a ótica do RBPS. O objetivo do trabalho, foi demonstrar que a aplicação adequada dos elementos propostos pelas diretrizes de RBPS, do CCPS, poderia ter reduzido significativamente a chance do acidente ocorrer. Além disso, buscou-se ressaltar recomendações para que acidentes futuros possam ser evitados com base nas lições aprendidas neste caso.

2 SISTEMAS DE GESTÃO DE SEGURANÇA

Sistemas de gestão de segurança de processos podem ser definidos de diferentes maneiras. Diversas instituições com interesses em processos e/ou segurança se interessam no desenvolvimento, implementação e melhoria destes sistemas, como, por exemplo, *Center for Chemical Process Safety* (CCPS), *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), em tradução livre “Administração de Saúde e Segurança Ocupacional”, *International Labour Organization* (ILO), em tradução livre “Organização Internacional do Trabalho”, Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), Agência Nacional de Petróleo (ANP) e outros.

Na década de 70 houve um movimento de criação de organizações de segurança depois de alguns grandes acidentes como o de Flixborough, no Reino Unido, em 1974 e Seveso, na Itália, em 1976. Na década seguinte alguns outros acidentes reforçaram a necessidade de agências reguladoras e ações afirmativas mais firmes, como o acidente da Union Carbide, em Bhopal, em 1984 e o desastre de Piper Alpha, no Reino Unido, em 1988 (CROWL; LOUVAR, 2002).

Nessa década essas organizações começaram a criar seus padrões de definição de segurança de processos além de publicações sobre sistemas estruturados (*frameworks*). Organizações famosas criadas nessa década foram a *Occupational Safety and Health Organization* (OSHA) em 1970 nos Estados Unidos, a *Health and Safety Executive* (HSE), em tradução livre “Diretoria de Segurança e Saúde”, em 1974 no Reino Unido e a *World Safety Organization* (WSO), em tradução livre “Organização Mundial de Saúde”, em 1975.

O acidente da Union Carbide em Bhopal (1984) foi causado por uma contaminação com água de um tanque de isocianato de metila, causando mais de 3.000 fatalidades e 100.000 pessoas feridas. Logo então líderes da indústria química requisitaram ao AIChE liderar um movimento para eliminar acidentes catastróficos desta magnitude. Assim, foi criado o *Center for Chemical Process Safety* (CCPS) em 1985, com dezessete companhias parceiras (AIChE, 2023).

Segundo o CCPS, sistemas de segurança de processos são um “conjunto extensivo de políticas, procedimentos e práticas concebidos para assegurar que as barreiras contra episódios de acidentes estão em vigor, em uso, e são eficazes” (CCPS, 2022). Em 2007 foi lançado o “*Guidelines for Risk Based Process Safety*” pelo CCPS. Esta seção busca esclarecer o conceito de *Risk Based Process Safety* (RBPS), que será utilizado neste trabalho para a análise do acidente de Optima Belle. Todavia, para compreender este *framework*, antes é essencial entender o conceito de sistemas de gestão de segurança. Diferentes entidades que atuam na

segurança de processos e/ou operacional possuem definições para o termo. A seguir, apresenta-se algumas destas definições.

De acordo com a *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), sistema de gestão de segurança é uma abordagem organizacional para gerenciar a segurança e saúde no local de trabalho, integrando políticas, procedimentos e práticas para identificar, avaliar e controlar riscos ocupacionais (OSHA, 2000). Em 1992 a OSHA publicou o *Process Safety Management Standard* (PSM), em tradução livre “Padrões de Gerenciamento de Segurança de Processos”, com o objetivo de estabelecer padrões de programas de segurança para os empregadores. Esses padrões consistem em identificar, avaliar e controlar os possíveis perigos de se trabalhar com materiais perigosos.

Para a *International Labor Organization* (ILO), sistemas de gestão de segurança são um “conjunto de políticas e procedimentos utilizados por uma organização para reduzir eventos indesejados, como incidentes, acidentes, doenças ocupacionais, e quase acidentes, entre sua força de trabalho ou funcionários”(ILO Chemicals at Work, 2011). Em 1993 a ILO publicou o “*Safety in the use of chemicals at work*”, em tradução livre “Segurança ao utilizar químicos no trabalho”, em que aborda os princípios e medidas para garantir um ambiente de trabalho seguro ao manusear produtos químicos. Além disso, em 2001 a ILO publicou o *Guidelines on occupational safety and health management systems* (ILO-OSH 2001), em tradução livre “Diretrizes para sistemas de gerenciamento de saúde e segurança ocupacional”, com o objetivo de promover oportunidades para trabalhadores de obter trabalho produtivo em condições de dignidade humana básica. Em português, tradução feita pelo Ministério do Trabalho e Emprego em 2005, o sistema criado pela ILO é o “Sistema de Gestão da Segurança e Saúde no Trabalho” (SGSST).

De acordo com a ANAC, um sistema de gerenciamento de segurança operacional é uma abordagem global, sistemática e padronizada para gerenciar os riscos relacionados à segurança (ANAC, 2022). Em 2017 a ANAC publicou o Programa de Segurança Operacional da Aviação Civil (PSO-BR), que consiste em um sistema de gerenciamento de segurança operacional voltado ao aprimoramento da capacidade de atuação regulatória e administrativa do Estado Brasileiro.

A ANP define sistemas de gestão de segurança e riscos associados aos processos e operações por meio do Sistema de Gerenciamento de Segurança Operacional (SGSO). Este sistema é uma estrutura organizacional adotada pelas empresas do setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis para gerenciar os riscos associados às operações, visando garantir a segurança das atividades realizadas e proteger o meio ambiente. O SGSO inclui políticas,

procedimentos, práticas e processos para identificar, avaliar e controlar riscos, além de promover uma cultura de segurança e prevenção de acidentes (ANP, 2007).

A despeito da criação das agências reguladoras e organizações de segurança nacionais e internacionais muitos outros acidentes aconteceram nas décadas subsequentes. Alguns exemplos são: explosão da *British Petroleum* (BP) em Texas City, nos EUA, em 2005; a explosão da plataforma Deepwater Horizon, nos EUA, em 2010; a explosão em Tianjin, na China, em 2015; o desastre nuclear de Fukushima, no Japão, em 2011; o desastre de Mariana, no Brasil, em 2015; e a explosão no porto de Beirute, no Líbano, em 2020.

Trevor Kletz, considerado por muitos o pai da segurança de processos moderna, publicou no ano de 1998 um livro que veio a redefinir os paradigmas da área: *Process Plants - a handbook for inherently safer design*. Em tradução livre “Processo de Plantas Industriais - um *handbook* para design intrinsecamente mais seguros”. Nesse livro algumas grandes inovações foram introduzidas como o conceito de design intrinsecamente mais seguro, análise HAZOP, envolvimento de engenheiros de segurança desde o início de um projeto e simplificação de processos (KLETZ, 1998).

Em linha com as inovações trazidas por Trevor Kletz, em 2007 o CCPS publicou as diretrizes da Segurança de Processos Baseada em Riscos (*Risk Based Process Safety* - RBPS) no artigo *Guidelines for Risk Based Process Safety* (CCPS, 2007). Os próximos tópicos abordam o RBPS, sua estrutura e seus elementos componentes.

2.1 GESTÃO DE SEGURANÇA DE PROCESSOS BASEADA EM RISCO

O *Risk Based Process Safety* (RBPS) é um *framework* que propõe uma abordagem sistemática para a segurança de processos estabelecendo diretrizes para desenvolvimento, correção ou aprimoramento dos sistemas de gestão de segurança das empresas.

O RBPS é baseado nos seguintes princípios:

1. Identificação dos riscos: os riscos associados a um processo industrial devem ser identificados de forma completa e precisa.
2. Avaliação dos riscos: os riscos identificados devem ser avaliados em termos de sua gravidade e probabilidade
3. Mitigação dos riscos: os riscos identificados devem ser mitigados por meio de medidas de segurança,

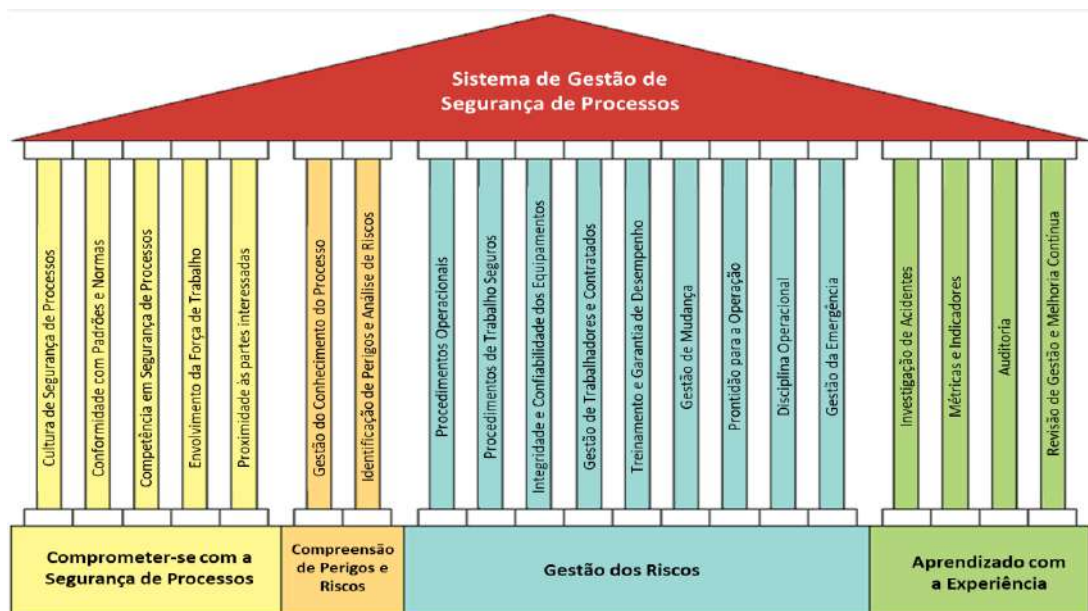
O RBPS é uma abordagem eficaz para prevenir acidentes industriais. O uso do RBPS tem sido associado a uma redução significativa dos acidentes industriais em todo o mundo. (AIChE, 2017; CCPS, 2010)

O CCPS estabelece que os 4 blocos fundamentais de um sistema de gestão de processos baseado em risco são:

1. Comprometimento com a Segurança de Processos;
2. Compreensão de Perigos e Riscos;
3. Gestão de Riscos;
4. Aprendizado com a Experiência.

Esses pilares são desdobrados em outros 20 elementos a serem aplicados pelas indústrias tendo em vista o RBPS. A figura 2.1 a seguir demonstra um esquema do sistema com seus blocos, representando a base do sistema e os elementos representando as colunas.

Figura 2.1 – Pilares e elementos (base e colunas, respectivamente) do RBPS



Fonte: Adaptado de CCPS, (2007)

Os tópicos a seguir exploram os blocos e os elementos mais amplamente.

2.1.1 Comprometimento com a Segurança de Processos

O primeiro bloco do RBPS é o comprometimento da liderança com a segurança de processos. Esse bloco tem por objetivo desenvolver a cultura da empresa nessa temática, identificar e garantir a aplicação de padrões de segurança, estabelecer a competência organizacional e garantir a presença de todos os trabalhadores e principais stakeholders na gestão de segurança do processo. Para tanto, esse pilar é composto por 5 elementos: cultura de segurança de processos, conformidade com padrões e normas, competência em segurança de processo, envolvimento da força de trabalho e proximidade às partes interessadas.

Uma organização sustentável necessita de forte liderança e comprometimento de todas as partes para com os assuntos de relevância, como é o caso da segurança de processos. A segurança portanto deve estar intrinsecamente integrada com a cultura da empresa para que seja atingida a excelência operacional. (CCPS, 2007)

2.1.1.1 Cultura de Segurança de Processos

O primeiro elemento do bloco de comprometimento com a segurança de processos é a Cultura de Segurança de Processos, definida pela CCPS como a “combinação de valores e comportamentos que determinam a maneira como é feita a gestão de segurança de processos”. Os três princípios a serem endereçados à luz de uma efetiva cultura de segurança de processos são:

1. Manter uma Prática Sustentável: estabelecer a segurança de processos como um valor central, prover liderança firme, estabelecer e impor altos padrões de performance e documentar a ênfase e abordagem da cultura.
2. Desenvolver e Implementar uma Cultura Sólida: manter um senso de vulnerabilidade, empoderar os indivíduos para exercer suas responsabilidades de segurança, submeter-se a expertise, garantir comunicação aberta e efetiva, estabelecer um ambiente de aprendizado e questionamento, fomentar confiança mútua, prover respostas céleres para problemas de segurança.
3. Monitorar e Guiar a Cultura: prover monitoramento contínuo de performance

Segundo W.L. Frank (2007) a cultura de segurança de processos, definida por ele como as crenças, atitudes e comportamentos dentro da organização em relação a segurança, é um elemento que percola por todos os outros no RBPS. Uma cultura de segurança de processos robusta, segundo Frank, maximiza a diligência e a efetividade da aplicação dos elementos do RBPS. (FRANK, 2007)

Duas situações em que a cultura de segurança foi reconhecida como uma causa de acidentes foram das naves espaciais americanas Challenger (1986) e Columbia (2003). A recorrência dos acidentes da National Aeronautics and Space Administration (NASA) foi uma consequência de um aumento de atenção à segurança sem solidificar a cultura de segurança subjacente. (OLIVE ET AL., 2005)

Ademais, segundo Olive et al (2005). é fácil identificar quando as organizações têm deficiências culturais. Segundo eles, a cultura tem quatro principais características:

- 1- Comprometimento;

- 2- Comunicação;
- 3- Resiliência e Flexibilidade;
- 4- Vigilância.

Essas características devem perpassar toda a organização, principalmente a alta liderança. Embora difíceis de se medir fisicamente, todas essas características podem ser observadas quando em falta.

2.1.1.2 Conformidade com Padrões e Normas

O segundo elemento do bloco de comprometimento com a segurança de processos é a Conformidade com Padrões e Normas. De acordo com o CCPS (2007), esse elemento consiste em identificar e endereçar as normas, os códigos, as regulações e as leis relevantes para a segurança de processos. Esses padrões e normas a serem seguidos podem ser:

- 1- tanto externos como internos à corporação;
- 2- nos âmbitos municipais, estaduais ou federais;
- 3- nos âmbitos nacionais ou internacionais.

Os padrões podem ser também mandatórios, voluntários ou consensuais. Um exemplo de regulação mandatória é o *Process Safety Management* (PSM) de produtos químicos de grande perigo, publicado pela OSHA em 1992 (AZIZ ET AL., 2013). A implementação de um PSM atualizado e otimizado dentro da realidade de cada organização pode prevenir acidentes caso sigam as regulações com assertividade (LOUVAR, 2008)

No Brasil temos duas principais formas de regulação na forma de normas, as Normas Regulamentadoras (NR) e as Normas Brasileiras (NBR). A primeira é definida pelo Ministério do Trabalho e da Previdência e a segunda pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Enquanto as NR's são obrigatórias por força da lei, as NBR's não são. Muito disso se deve a ABNT ser uma organização privada, embora sem fins lucrativos. (MINISTÉRIO DO TRABALHO E PREVIDÊNCIA, 2022)

Existem também normas internacionais que podem ser utilizadas, de organizações como: *International Organization for Standardization* (ISO), em tradução livre “Organização Internacional para Padronização”, *International Labour Organization* (ILO), *American National Standards Institute* (ANSI), em tradução livre “Instituto Americano Nacional de Padrões” e *National Fire Protection Agency* (NFPA), em tradução livre “Agência Nacional de Proteção a Incêndios”. Todas essas organizações publicam uma série de guias e padrões a serem seguidos pelo mundo todo, que se referem tanto à segurança operacional quanto ocupacional.

A ISO, por exemplo, é considerada referência no mundo pelos seus certificados de qualidade de produtos. (ISO, 2023)

É importante reconhecer como o elemento de “Conformidade com Padrões e Normas” pode ser conectado com o elemento de “Auditoria” dentro do RBPS. A auditoria, em grande parte, vai ser responsável por verificar se as instalações ou a organização como um todo está de fato de acordo com as normas que a empresa se compromete a aderir. Estas normas, por sua vez, como visto, são identificadas a partir do elemento de conformidade com padrões e normas.

2.1.1.3 Competência em Segurança de Processos

O terceiro elemento do bloco de comprometimento com a segurança de processos é a Competência em Segurança de Processos. Esse elemento é caracterizado pela melhoria contínua do conhecimento e competência em segurança de processos, assegurar que as informações necessárias estão devidamente disponíveis para quem precisa e aplicar constantemente aquilo que já foi aprendido.

Esse elemento tem uma sinergia muito grande com o elemento já citado “Cultura de Segurança de Processos”, já que uma cultura sem competência no referente assunto carece de assertividade em suas ações. Além disso, também é importante diferenciar este elemento da “Gestão do Conhecimento do Processo”, elemento do bloco de “Compreensão de Riscos” e do “Treinamento e Garantia de Desempenho”, elemento do bloco de “Gestão de Risco”. A competência em segurança consiste mais na criação de novas formas de se entender os processos enquanto que a gestão do conhecimento lida mais com conhecimentos já formados. Por outro lado, o elemento de treinamento trata mais da propagação do conhecimento a nível individual enquanto que a competência pode ser pensada como uma criação de conhecimento a nível organizacional.

2.1.1.4 Envolvimento da Força de Trabalho

O quarto elemento do bloco de comprometimento com a segurança de processos é o Envolvimento da Força de Trabalho. Ele consiste em promover um envolvimento ativo de todo o pessoal e todos os níveis da organização. Trabalhadores em todas as posições das empresas devem ter papéis e responsabilidades para melhorar e assegurar a segurança de todas as operações.

Assim como o elemento anterior, este elemento também tem uma forte influência do primeiro elemento desse bloco, a “Cultura de Segurança de Processos”. Envolvimento da força

de trabalho pode tanto acontecer de forma extrínseca (*top-down*), como intrínseca/proativa (*bottom-up*). Além disso, sem uma boa gestão de conhecimento, elemento que será abordado posteriormente, o envolvimento dos trabalhadores fica comprometido.

2.1.1.5 Proximidade dos Stakeholders

O quinto elemento do bloco de comprometimento com a segurança de processos é a Proximidade dos Stakeholders. Segundo a CCPS (2007), esse elemento consiste em ter boas relações com os stakeholders apropriados ao longo da vida útil de uma instalação industrial.

Para isso é necessário que sejam procurados os indivíduos e as organizações que podem ser ou acreditam ser afetados pelas operações da instalação e abrir um diálogo sobre segurança de processos, que seja estabelecido um relacionamento com organizações da comunidade local, outras companhias e outros grupos profissionais em todos os níveis (local, estadual e municipal), e prover informação acurada sobre a companhia e os produtos, processos, planos, perigos e riscos da instalação.

2.1.2 Compreensão de Perigos e Riscos

O segundo bloco do RBPS é a Compreensão dos Perigos e Riscos. Organizações que cumprem esse papel são melhores em alocar os recursos escassos de maneira mais efetiva, além de serem melhor capazes de sustentar um sucesso mais prolongado e sustentável.

É importante diferenciar primeiro o que são perigos e riscos, pois muitas vezes esses termos são usados como sinônimos no vocabulário popular. De acordo com o livro *Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis* (CCPS, 1999), em tradução livre “Diretrizes para análises quantitativas de riscos químicos de processos químicos”, perigo é uma “condição física ou química que possui potencial para causar danos a pessoas, propriedades ou ao meio ambiente”. Por outro lado, risco é a relação funcional da frequência/probabilidade e da severidade/consequência de um incidente hipotético. (CCPS, 1999)

2.1.2.1 Gestão do Conhecimento do Processo

O primeiro elemento do bloco de Compreensão de Perigos e Riscos é a Gestão de Conhecimento do Processo. Ele se baseia em documentar as especificações e documentos técnicos do processo, os cálculos e desenhos de engenharia, especificações de design, fabricação e instalação de equipamento de processo e outros documentos escritos como planilhas de segurança material.

É importante frisar a importância da gestão do conhecimento dentro do RBPS e da operação de organizações como um todo. Qualquer melhoria que possa ser proposta necessita de um profundo conhecimento das operações já existentes. Além disso, como já abordado anteriormente, o elemento “competência em segurança de processos” só pode ser internalizado na organização com uma boa gestão de conhecimento. Assim, para que uma companhia possa se diferenciar num mercado cada vez mais competitivo é crucial uma gestão de conhecimento que permita formulação de novas ideias de segurança.

Por outro lado, para que a “gestão da mudança” possa ser feita, elemento do bloco de gestão de riscos, é imprescindível que o conhecimento das operações anteriores às mudanças estejam disponíveis. Assim, para que se possa entender os riscos associados a uma mudança num processo é necessário que se entenda bem o processo em primeiro lugar.

2.1.2.2 Identificação de Perigos e Análise de Riscos

O segundo elemento do bloco de Compreensão de Perigos e Riscos é a Identificação de Perigos e Análise de Riscos. Ele consiste em todas as atividades envolvidas em análise e identificação de perigos e riscos nas instalações ao longo de todo o seu ciclo de vida para garantir que os riscos para os empregados, o público e/ou o meio ambiente estejam devidamente controlados dentro da tolerância de risco da organização.

Os estudos de perigos e riscos consistem em responder três principais questionamentos segundo a CCPS (2007):

- (i) O que pode acontecer de errado?
- (ii) O quão sério esse incidente pode ser?
- (iii) O quão frequente este incidente pode ocorrer?

Para fazer esses estudos utilizam-se métodos/modelos que podem ser classificados como: qualitativos, semiquantitativos, quantitativos. Dentro dos modelos qualitativos temos os principais representantes o *Hazard and Operability Analysis* (HAZOP), em tradução livre “Análise de Perigos e Operabilidade”, *Process Hazard Analysis* (PHA), em tradução livre “Análise de Perigos de Processos”, e a matriz de risco. Um método semiquantitativo muito comum é o *Layer of Protection Analysis* (LOPA), em tradução livre “Análise em camadas de proteção”. No caso dos modelos quantitativos temos a árvore de falhas e a árvore de eventos.

Como de praxe neste trabalho, é importante reconhecer a importância desse elemento dentro do contexto global do RBPS. Sem uma boa análise de perigos e riscos fica dificultada a subsequente gestão dos riscos, terceiro bloco do RBPS, que será abordado logo em diante.

Especialmente no que tange ao elemento de “gestão da mudança”, esse elemento deve ser utilizado para que nenhuma mudança seja feita sem o seu devido risco analisado.

2.1.3 Gestão dos Riscos

O terceiro bloco do RBPS é a Gestão de Riscos. Esse bloco foca em operar e manter de forma prudente processos de alto risco, gerir mudanças destes processos para assegurar que o risco se mantenha tolerável e estar preparado para responder e gerir incidentes que venham a ocorrer.

2.1.3.1 Procedimentos Operacionais

O primeiro elemento do bloco Gestão de Riscos é Procedimentos Operacionais. Ele consiste em instruções escritas/digitalizadas que listam as etapas de uma determinada tarefa e descreve a maneira que essas etapas devem ser aplicadas. Bons procedimentos também descrevem o processo, os seus perigos, ferramentas, equipamentos de proteção e controles em detalhe para que os operadores possam confirmar que o processo está respondendo da maneira esperada.

É possível destacar sua relação dentro do RBPS com o elemento de “gestão de conhecimento”, já abordado anteriormente. Muito do conhecimento a ser propagado dentro da organização deve estar documentado em formas de procedimentos. Além disso, com uma devida análise de perigos e riscos feitos, outro elemento já abordado neste trabalho, os procedimentos operacionais têm sua devida relevância para propagar o entendimento dos trabalhadores quanto à segurança operacional.

2.1.3.2 Práticas de Trabalho Seguro

O segundo elemento do bloco Gestão de Riscos é Práticas de Trabalho Seguro. Ele consiste em preencher as lacunas entre os Procedimentos Operacionais e os Procedimentos de Manutenção muitas vezes suplementado com autorizações e licenças. Seu objetivo é ajudar a controlar perigos e gerir riscos associados a trabalhos já estabelecidos na rotina operacional do processo, como operações associadas a manutenção e outras tarefas não rotineiras, como *over haul* de equipamento.

Ainda segundo o elemento, procedimentos podem ser divididos em três categorias: operacionais, manutenção e de trabalho seguro. Procedimentos operacionais são aqueles que envolvem a produção do produto *per se*. Procedimentos de manutenção geralmente envolvem a

testagem, inspeção, calibração, manutenção, reparação ou troca de equipamento(s). Já os procedimentos de trabalho seguro são responsáveis por ocupar o espaço entre os outros dois.

Para isto, é crucial definir o escopo de atuação e quando estes procedimentos se aplicam, além de garantir a implementação constante com pessoal capacitado. Ademais, há de se desenvolver os procedimentos, padrões, checklists e outros documentos que abordam os procedimentos de trabalho seguro, treinar os funcionários (sejam eles próprios ou terceirizados) e outras tarefas mais a fim de garantir o controle efetivo das atividades de trabalho não rotineiras.

2.1.3.3 Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos

O terceiro elemento do bloco de Gestão de Riscos é Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos. Segundo a CCPS (2007) esse elemento é caracterizado por implementar inspeções e testes necessários nos equipamentos para assegurar que estão adequados para o seu funcionamento ao longo do seu ciclo de vida. Esses testes e inspeções focam em:

- 1- prevenir liberação catastrófica de materiais perigosos e/ou a liberação súbita de energia;
- 2- assegurar alta disponibilidade de sistemas críticos de segurança ou utilidade para prevenir ou mitigar os efeitos desses tipos de eventos.

É importante notar que o objetivo finalístico do RBPS é garantir que o processo produtivo como um todo seja seguro. Para isso é importante que seus componentes tenham garantia de reprodutibilidade dentro de uma faixa razoável de operação. Assim, por exemplo, caso a análise de riscos do processo mostre que os equipamentos não atendem a uma respectiva faixa de risco requerida eles podem ser repensados ou até trocados.

2.1.3.4 Gestão de Terceiros

O quarto elemento do bloco de Gestão de Riscos é a Gestão de Terceiros. Ele consiste em um sistema de controles para assegurar que trabalhadores terceirizados colaborem na segurança operacional das instalações. Esse elemento também endereça a seleção, aquisição, uso e monitoramento destes serviços contratados.

Para que os terceiros possam de fato ser integrados de forma segura no processo produtivo de uma operação é importante que estejam a par da cultura organizacional quanto a segurança. Assim, os elementos “Gestão de Conhecimento”, “Cultura de Segurança de Processos” e até o elemento de “Procedimentos Operacionais” se fazem presentes. Mais

importante ainda, pode-se dizer, é o elemento de “Práticas de Trabalho Seguro”, visto que é de se esperar que terceiros não estejam tão a par de todas as operações não-rotineiras. Terceiros com menos tempo de contrato devem ser especialmente guiados quanto aos procedimentos internos da empresa para evitar incidentes.

2.1.3.5 Treinamento e Garantia de Desempenho

O quinto elemento do bloco de Gestão de Riscos é o Treinamento e a Garantia de Desempenho. Ele consiste em treinar os trabalhadores para que desempenhem em seus trabalhos e tarefas críticas de forma confiável e sustentável.

É importante reconhecer a importância do elemento “Identificação de Riscos e Análise de Riscos” nesse contexto. Para que se possa identificar quais treinamentos devem ser feitos é necessário que seja feito um estudo antes de quais perigos são mais prováveis no contexto da operação. Da mesma forma, uma boa gestão de conhecimento também inclui treinamentos e capacitações que nivelem os trabalhadores no processo.

2.1.3.6 Gestão da Mudança

O sexto elemento do bloco de Gestão de Riscos é a Gestão da Mudança. Dentro do RBPS esse elemento se caracteriza por assegurar que mudanças nos processos não introduzam novos perigos ou mudem o perfil de risco. Na Gestão da Mudança também está incluída a revisão e autorização de ajustes propostos para design da instalação, operação, organização ou atividades anteriores à implementação.

Como já abordado neste trabalho, a gestão de mudança está intrinsecamente ligada a outros elementos como “Identificação de Perigos e Análise de Riscos” e a “Gestão do Conhecimento do Processo”.

2.1.3.7 Prontidão para a Operação

O sétimo elemento do bloco da Gestão de Riscos é a Prontidão para a Operação. Ele consiste em assegurar que processos em Shut-down (operacionalmente pausados) estejam em condições seguras de reinício/religamento de operação.

2.1.3.8 Disciplina Operacional

O oitavo elemento do bloco da Gestão de Riscos é a Disciplina Operacional. Ele consiste em executar tarefas operacionais e gerenciais de forma deliberada e estruturada. Essa disciplina

está intrinsecamente ligada também ao bloco de Cultura Organizacional de Segurança ao ser a busca pela excelência na performance de cada tarefa para minimizar desvios padrões estabelecidos para estar em conformidade com normas e regulações.

2.1.3.9 Gestão da Emergência

O nono elemento do bloco da Gestão de Riscos é a Gestão da Emergência. Ele consiste em desenvolver medidas apropriadas de gestão de emergência e de resposta a incidentes. Pode ser pensada em 5 principais etapas:

1. Planejamento de possíveis emergências;
2. Provisão de recursos para executar o plano;
3. Prática e melhoria contínua do plano;
4. Treinamento dos empregados;
5. Comunicar efetivamente com os stakeholders ao ocorrer um incidente.

2.1.4 Aprendizado com a Experiência

O quarto bloco do RBPS é o Aprendizado com a Experiência. Esse bloco consiste em monitorar e agir com base em informações de fontes internas e/ou externas. As formas mais efetivas de se aprender com a experiência são aplicar as boas práticas para se aproveitar ao máximo os recursos disponíveis, corrigir deficiências expostas por incidentes internos e near-misses e aplicar as lições aprendidas por outras organizações.

2.1.4.1 Investigação de Acidentes

O primeiro elemento do bloco de Aprendizado com a Experiência é a Investigação de Acidentes. Ele consiste em um processo formal de investigação de acidentes, incluindo staffing, aplicação, documentação e acompanhamento de investigação de incidentes de segurança de processos, investigação e trending de dados de incidentes para identificar recorrência e gestão de resoluções e documentações de recomendações geradas pelas investigações.

2.1.4.2 Medições e Métricas

Segundo a CCPS (2007), o segundo elemento do bloco de Aprendizado com a Experiência é Medições e Métricas. Esse elemento consiste em quais indicadores considerar, quão frequente deve ser feita a coleta de dados e o que fazer com a informação coletada para assegurar a efetiva e responsiva operação do sistema de gestão de segurança de processos.

Existem dois principais tipos de métricas que podem ser utilizados, segundo a publicação *Guidelines for Process Safety Metrics da CCPS (2009)*, em tradução livre “Diretrizes para métricas de segurança de processos”. Elas podem ser *lagging*, aquelas que compilam dados de incidentes já ocorridos, ou *leading*, aquelas que medem e detectam uma falha no sistema de segurança antes que um incidente ocorra. Assim, utilizando ambas as métricas em conjunto, uma organização pode ser proativa em adequar seu processo aos padrões de maior segurança.

Como pode-se perceber, para que métricas *lagging* sejam feitas é necessário um estudo de incidentes já ocorridos mas também de acidentes anteriores, similares ou não. Dentro do contexto do aprendizado com a experiência, este elemento se conecta bem com o outro elemento de “Investigação de Acidentes”.

2.1.4.3 Auditoria

O terceiro elemento do bloco de Aprendizado com a Experiência é a Auditoria. Ele consiste em um sistema para o agendamento, *staffing*, documentação das avaliações periódicas além de prover sistemas para gerir as resoluções dos achados e ações corretivas geradas pelos auditores.

2.1.4.4 Revisão de Gestão e Melhoria Contínua

O quarto elemento do bloco de Aprendizado com a Experiência é a Revisão da Gestão e Melhoria Contínua. Esse elemento consiste em fazer uma avaliação rotineira que verifica se os sistemas de gestão estão atuando como pretendido e produzindo os resultados desejados com a melhor eficiência possível.

2.2 MOTIVAÇÃO PARA ESCOLHA DO RBPS

Como abordado no início desta seção, várias organizações ao longo do mundo, inclusive brasileiras, têm seus próprios sistemas/guias de gestão da segurança de processos. Vale entender, portanto, os elementos de cada um para se fazer uma comparação. No quadro 2.1 podemos ver esses elementos constituintes de cada sistema. Os elementos marcados em negrito são os que aparecem pelo menos em algum outro sistema de gestão de segurança.

Como é possível perceber pelo quadro 2.1, os sistemas de gestão de segurança de processos/operacional das diferentes organizações, tanto nacionais quanto internacionais, têm grandes similaridades. Vários elementos do RBPS da CCPS (2007) constam na tabela em pelo

menos outros dois sistemas, como “Cultura de Segurança”, “Identificação de Perigos e Análise de Riscos” e “Processos e Procedimentos”.

Dessa forma, a escolha do modelo de sistema de segurança para este trabalho foi feita principalmente na disponibilidade de referências já utilizadas para analisar o acidente de Optima Belle. Por ter sido um acidente americano, o *U.S. Chemical Safety Board* (CSB) elaborou um relatório avaliando o acidente e as principais falhas contribuintes para o acidente, bem como recomendação para diferentes partes envolvidas a fim de aumentar a segurança de processos para futuras ocasiões. Este relatório trabalho. Ademais, a organização é referência mundial no estudo e na promoção da disciplina de segurança de processos, sendo este mais um motivo para a utilização desta entidade como base principal de conteúdo para a escrita deste trabalho.

Quadro 2.1 – Os diferentes sistemas de gestão de segurança de processos/operacional

Sistema de gestão de segurança	Elementos
RBPS DO CCPS (20 ELEMENTOS)	<ul style="list-style-type: none"> • Cultura de segurança de processos • Conformidade com Padrões e Normas • Competência em Segurança de Processos • Envolvimento da Força de Trabalho • Proximidade às partes interessadas • Gestão de Conhecimento do Processo • Identificação de Perigos e Análise de Riscos • Procedimentos Operacionais • Procedimentos de Trabalho Seguro • Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos • Gestão de Terceiros • Treinamento e Garantia de Desempenho • Gestão da Mudança • Prontidão para a Operação • Disciplina Operacional • Gestão da Emergência • Investigação de Acidentes • Métricas e Indicadores • Auditoria • Revisão de Gestão e Melhoria Contínua
SGSST DA ILO (16 ELEMENTOS)	<ul style="list-style-type: none"> • Política de segurança e saúde no trabalho • Participação dos trabalhadores • Responsabilidade e prestação de contas • Competência e Capacitação • Documentação do SGSST • Comunicação • Análise do Planejamento e Implementação • Planejamento, desenvolvimento e implementação • Objetivos de segurança e saúde no trabalho • Prevenção de fatores de risco (perigos) • Monitoramento e medição do desempenho • Auditoria • Análise crítica pela administração • Ação preventiva e corretiva • Melhoria Contínua • Investigação de lesões, degradações da saúde, doenças e incidentes relacionados ao trabalho e seus impactos no desempenho de segurança e saúde
PSO DA ANAC (8 ELEMENTOS)	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecimento e Implementação de Processos e Procedimentos • Implementação de um SGSO • Investigação de acidentes e incidentes • Identificação de perigos e avaliação de riscos • Gerenciamento de riscos • Vigilância da segurança operacional • Desempenho da segurança operacional • Promoção da segurança operacional
SGSO DA ANP (16 ELEMENTOS)	<ul style="list-style-type: none"> • Cultura de segurança, compromisso e responsabilidade gerencial • Envolvimento do pessoal • Qualificação, treinamento e desempenho do pessoal • Ambiente de trabalho e fatores humanos • Seleção, controle e gerenciamento de contratadas • Monitoramento e melhoria contínua do desempenho • Auditorias • Gestão da informação e da documentação • Investigação de acidentes e Projeto, construção, instalação e desativação • Elementos críticos de segurança operacional • Identificação e análise de riscos • Integridade mecânica • Planejamento e gerenciamento de grandes emergências • Procedimentos operacionais • Gerenciamento de mudanças

Fonte: Elaboração própria

3 ESPECIFICAÇÕES DO NADCC E PARTICULARIDADES DO PROCESSO DA OPTIMA BELLE

A fim de entender e analisar adequadamente o acidente de Optima Belle é imperativo entender o processo produtivo típico da matéria prima e as substâncias que o compõem, bem como suas finalidades e, conseqüentemente, sua importância no mercado. Este capítulo objetiva descrever o processo de produção do dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) dihidratado (nome comercial CDB-56®) e sua versão anidro (nome comercial CDB-63®). Os equipamentos utilizados no processo de desidratação que gerou o acidente, e suas particularidades vis-à-vis outros processos conduzidos pela Clearon também serão analisados.

3.1 RELEVÂNCIA DOS COMPOSTOS ORIGINADOS DE ÁCIDO CIANÚRICO

Desde a revolução industrial os padrões sanitários da população mundial, principalmente no primeiro mundo, foram transformados irreversivelmente. O uso de produtos clorados como desinfetantes no século passado foi o principal fator de redução de doenças transmitidas pela água (LANTAGNE ET AL, 2010). Essa redução foi conseqüentemente responsável pela redução de aproximadamente metade da mortalidade em cidades grandes (CUTLER; MILLER, 2005).

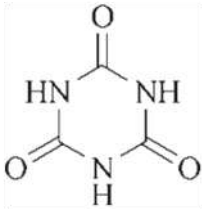
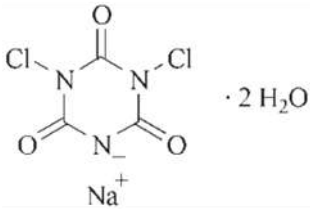
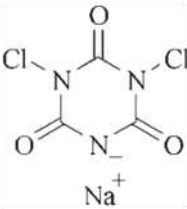
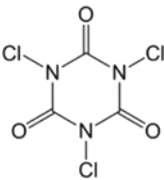
O desinfetante mais popular para limpeza de água potável é o hipoclorito de sódio (HClO), porém com o tempo alguns outros agentes foram criados como alternativas. Uma dessas foi o dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) que recentemente foi aprovado pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), em tradução livre “Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos”, e pela *World Health Organization* (WSO) como agente para tratamento de água potável (PROTO ET AL, 2016).

Algumas vantagens do NaDCC frente ao NaClO são: (i) resistência de inativação por materiais orgânicos, (ii) decomposição mais lenta ao liberar HClO, (iii) capacidade de manter um nível apropriado de cloro sem afetar o pH da solução e (iv) baixos níveis de toxicidade e corrosividade (PROTO ET AL, 2016). O exato mecanismo de ação do NaDCC ainda está a ser elucidado, visto que seu efeito microbicida é diferente do NaClO, como estudado por Bloomfield e Uso (1985).

Cianatos formados a partir do ácido cianúrico, como o dicloroisocianurato de sódio anidro (NaDCC), o dicloroisocianurato de sódio dihidratado (NaDCC dihidratado), e o ácido tricloroisocianúrico, foram comumente utilizados em piscinas para estabilizar o cloro residual e, conseqüentemente, minimizar a degradação pela luz solar desde 1958 (WAHMAN, 2018).

Eles também podem ser usados como desinfetantes e o NaDCC dihidratado ainda pode ser usado como detergente para lavar louças (HUTHMACHER; MOST, 2012). O quadro 3.1 apresenta algumas informações básicas das substâncias.

Quadro 3.1 – Cianatos comumente utilizados em piscinas

Fórmula estrutural				
Nome químico	Ácido cianúrico	Dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) dihidratado	Dicloroisocianurato de sódio (NaDCC)	Ácido tricloroisocianúrico
Sinônimos	Tricarbimida S-triazinatriona	Trocloseno de sódio dihidratado Dicloro-s-triazinatriona dihidratado	Trocloseno de sódio Dicloro-s-triazinatriona	TCCA Tricloro-s-triazinatriona
Nome comercial	-	CDB-56®	CDB-63®	-
Fórmula molecular	$C_3H_3N_3O_3$	$C_3H_4Cl_2N_3NaO_5$	$C_3Cl_2N_3NaO_3$	$C_3Cl_3N_3O_3$
Peso molecular	129,07 g/mol	255,97 g/mol	219,94 g/mol	232,40 g/mol

Fonte: Elaboração própria

Em 2001, o dicloro e o tricloroisocianuratos foram aprovados para o tratamento rotineiro da água potável sob o *US Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act* (em tradução livre, “Ato Federal de Inseticidas, Fungicidas e Rodenticidas dos Estados Unidos”). Assim, os fabricantes obtiveram a certificação NSF 60¹ para a adição de dicloro ou tricloro à água potável. Um fator complicador para estas substâncias é que a concentração real de cloro livre nesses sistemas não pode ser medida com precisão pelos métodos atualmente aprovados (WAHMAN, 2018). Além do uso desinfetante, o NaDCC também mostra potencial para aumentar a qualidade e prolongar a vida útil de frutas pós-colheita devido às suas propriedades antibactericidas (WU ET AL, 2018).

Devido às suas propriedades desinfetantes e estudos realizados sobre toxicidade aguda e irritabilidade do NaDCC dihidratado, foi constatado que os isocianuratos clorados são pouco

¹ O NSF/ANSI 60 Produtos Químicos para Tratamento de Água Potável - Efeitos na Saúde é um padrão nacional americano estabelecendo requisitos mínimos de efeitos na saúde para os produtos químicos que são diretamente adicionados à água potável para seu tratamento. Este padrão não estabelece requisitos de desempenho, sabor ou odor para produtos químicos de tratamento de água potável (NSF, 2016).

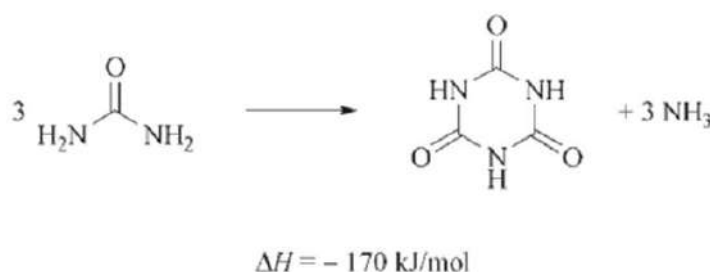
tóxicos e não corrosivos (SEO; JO, 2021). Em 2020 e 2021, a *United States Environmental Protection Agency* (EPA) aprovou o uso do NaDCC como desinfetante de superfícies duras para hospitais e instalações de fabricação quando utilizado de acordo com o rótulo. Assim, o produto passa a ter ainda mais valor, dado que em 2020 se alastrou a pandemia do COVID-19 (OMS, 2020).

3.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE DICLOROISOCIANURATO DE SÓDIO (NADCC)

Além de compreender o que são sistemas de gestão de segurança, os diferentes elementos que compõem o *framework* do RBPS e as características dos produtos utilizados, é essencial compreender as características do processo de produção do NaDCC à época do acidente. Este capítulo tem como objetivo apresentar este processo e as particularidades da planta da Optima Belle em dezembro de 2020. Além disso, discutir-se-á os principais equipamentos e sistemas utilizados.

Um dos pontos de partida para compreensão do processo é estudá-lo pelo caminho inverso de produção: do produto final até o produto inicial. Há 5 grandes substâncias envolvidas nesse caminho reacional. A primeira, o próprio dicloroisocianurato de sódio (NaDCC). A segunda é o NaDCC na sua versão di-hidratada. A terceira é o gás cloro, gás de coloração amarelo-esverdeada com forte odor irritante. É resultado da eletrólise da solução de cloreto de sódio (sal grosso) em água (CETESB, 2012). A quarta, o hidróxido de sódio, sólido branco e cristalino, obtido a partir da eletrólise de soluções aquosas de cloreto de sódio. A quinta, o ácido cianúrico, sólido inodoro branco, produzido em escala comercial por meio da pirólise de ureia entre 200°C e 300°C (HUTHMACHER; MOST, 2012). A reação de formação de ácido cianúrico e a entalpia da reação são apresentadas na figura 3.1.

Figura 3.1 – Reação de formação de ácido cianúrico a partir da pirólise de ureia



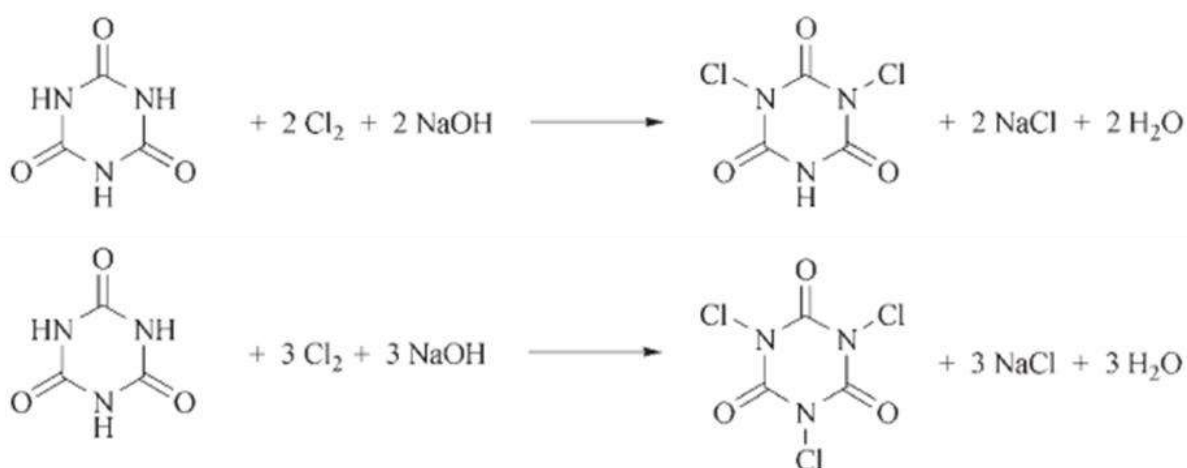
Fonte: HUTHMACHER; MOST, 2012

Pode-se dizer, então, que o ácido cianúrico é o início de todo o processo de formação dos cianatos. Ele foi produzido pela primeira vez por Friedrich Wöhler em 1829. Como visto, sua produção é a partir da decomposição térmica da ureia a temperaturas a partir de 175°C.

Como subproduto libera 3 moléculas de amônia (*Annalen der Physik und Chemie, 1829*). Sua principal utilidade é como estabilizador de piscinas ao capturar cloro ativo e solução. Isso é necessário pois a exposição desses radicais livres ao sol provoca uma decomposição fotolítica (O'Brien, 1974).

A formação dos sais clorados de isocianurato de interesse para este trabalho ocorre a partir do mesmo caminho reacional. O gás cloro reage com ácido cianúrico na água, em pH controlado, para formar tanto compostos orgânicos diclorados, como triclorados. De fato, a preferência de formação dos compostos halogenados é definida pela proporção de hidróxido de sódio para ácido cianúrico. Ou seja, se for uma proporção de 2:1, forma-se majoritariamente ácido dicloroisocianúrico (DCCA). Se a proporção for de 3:1, forma-se majoritariamente ácido tricloroisocianúrico (TCCA) com 90% de rendimento (HUTHMACHER; MOST, 2012). A figura 3.2 apresenta estas reações.

Figura 3.2 – Reação de formação de DCCA e TCCA a partir de ácido cianúrico e gás cloro em água com pH controlado



Fonte: Adaptado de HUTHMACHER; MOST, 2012

Por fim, a formação de dicloroisocianurato de sódio (NaDCC) é obtida a partir de uma simples reação de desidratação do dicloroisocianurato de sódio dihidratado. Diferentes equipamentos podem ser utilizados para este processo, como um secador de leito fluidizado a pressão atmosférica ou um secador rotativo de cone duplo pressurizado. Os pormenores da operação de desidratação conduzida pela Optima Belle será o tema de discussão da próxima seção.

3.3 PARTICULARIDADES DA OPERAÇÃO DE DESIDRATAÇÃO DO CDB-56® EM CDB-63® À ÉPOCA DO ACIDENTE

3.3.1 As empresas envolvidas no processo de contratação da operação

A Optima Belle opera em Belle, West Virginia, EUA, e foi estabelecida em 2014. Fornece seus equipamentos para serviços de fabricação por contrato de produtos químicos e, à época, era locatária no *site* da *The Chemours Company* em Kanawha County, West Virginia, EUA.

A *Richman Chemical Inc.* (RCI) fornece serviços de fabricação personalizada, busca de produtos e gerenciamento de projetos para empresas do setor farmacêutico e médico, produtos químicos especializados e empresas de tecnologia emergente.

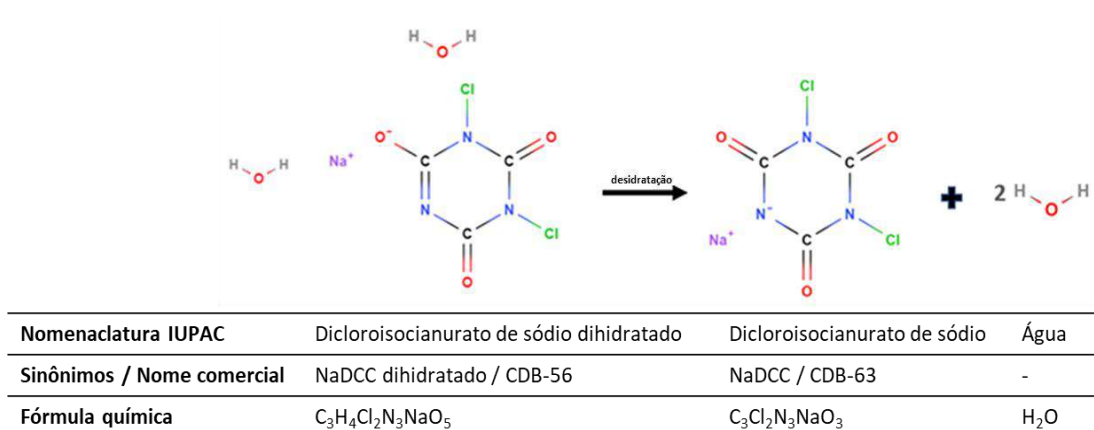
A *Clearon Corporation* (Clearon) produz compostos isocianúricos clorados em suas instalações em South Charleston, West Virginia, EUA. Exemplos destes compostos são ácido tricloroisocianúrico, ácido dicloroisocianúrico e dicloroisocianurato de sódio dihidratado (NaDCC dihidratado ou pelo nome comercial CDB-56®). Estes produtos são convertidos em uma variedade de produtos acabados (SOLENIS, 2023). Exemplos de produtos acabados feitos pela Clearon incluem desinfetantes e sanitizantes para aplicações domésticas e industriais, tratamento de águas para banho e outras aplicações.

Segundo o CSB (2023), a relação comercial entre elas se dava por meio de um acordo contratual entre Optima Belle e Clearon, intermediado pela empresa parceira de terceirização, RCI. O contrato estabelecia que a Optima Belle produziria dicloroisocianurato de sódio anidro, NaDCC ou CDB-63®, em nome da contratante, a partir da desidratação do NaDCC dihidratado (CDB-56®). A Clearon concordou com a proposta técnica apresentada pela RCI e a Optima Belle fez os preparativos para a conversão de quatro bateladas da matéria prima em CDB-63® na sua unidade fabril em Belle. Era esperado que cada batelada desidratasse cerca de 4 toneladas de NaDCC dihidratado.

3.3.2 Descrição dos componentes químicos envolvidos na desidratação

A desidratação de uma molécula é quando moléculas de água são removidas de uma substância. No caso em questão, removia-se moléculas de água do NaDCC dihidratado (CDB-56®), um composto isocianurato clorado, para produzir NaDCC (CDB-63®), conforme mostrado na figura 3.3. Além disso, pode-se observar os nomes de cada composto e suas fórmulas químicas.

Figura 3.3 – Representação da conversão de NaDCC dihidratado para NaDCC



Fonte: Adaptado de CSB, 2023

O NaDCC dihidratado é um pó cristalino ou sólido granular seco, branco e de fluxo livre, com odor intenso de cloro (CETESB, 2014). Como visto na seção 3.1, é utilizado principalmente como fonte de cloro disponível em aplicações de limpeza, alvejamento, desinfecção e saneamento. Trata-se de um agente oxidante que, quando aquecido à sua temperatura de decomposição, pode passar por uma reação de decomposição liberando gás cloro, tricloreto de nitrogênio (NCl₃) e outros subprodutos (CSB, 2023). A *National Fire Protection Association* (NFPA), classifica o NaDCC dihidratado como um oxidante de Classe 1. Ou seja, é considerado um material oxidante que apresenta alto risco de contribuir para a ocorrência e propagação de incêndios (NFPA 704, 2022). Além disso, é altamente corrosivo e seu processamento normalmente requer a utilização de equipamentos resistentes à corrosão.

Vale ressaltar que o NaDCC dihidratado não é tratado pelo padrões de *Process Safety Management* (PSM), da *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) ou pelas regulações do *Risk Management Program* (RMP), em tradução livre “Programa de Gerenciamento de Riscos”, estabelecidas pela *US Environmental Protection Agency* (EPA). Este fato será abordado em maior detalhes nos capítulos 5 e 6.

Já o NaDCC é um material granular branco com um odor intenso semelhante a alvejante ou cloro (CETESB, 2014). Quando aquecido, pode se decompor e liberar vapores tóxicos, incluindo cloro, óxidos de nitrogênio e óxido de sódio (NCBI, 2021). Similarmente à sua versão contendo duas moléculas de água, é comercializado como uma fonte de cloro ativo para a cloração da água, especialmente em piscinas, assim como em detergentes e agentes de alvejamento. Assim como o NaDCC dihidratado, o NaDCC não está abrangido pelo padrão PSM da OSHA ou pela regra RMP da EPA.

Pelo relatório de investigação do CSB (2023), os resultados dos testes pós-incidente (calorimetria por taxa de reação e calorimetria exploratório diferencial) revelaram que o

NaDCC dihidratado inicia uma reação exotérmica descontrolada a aproximadamente 81°C quando aquecido em um recipiente fechado, resultado da decomposição descontrolada do NaDCC dihidratado. A Olin, predecessora da Clearon, realizou testes semelhantes sobre a decomposição do NaDCC dihidratado nas décadas de 1970 e 1980. Na década de 1990, estudos adicionais da indústria estimaram uma temperatura de decomposição autossustentável (em inglês *Self-Accelerating Decomposition Temperature, SADT*) para o NaDCC dihidratado entre 45°C e 65°C (WHITEMORE, 1994). De acordo com o CCPS, SADT pode ser definida como:

“A temperatura mais baixa que uma massa de material, capaz de uma reação de decomposição exotérmica, deve ser mantida de modo que o calor da decomposição exceda a quantidade de energia perdida para o ambiente. Isso resultará em um aumento na temperatura da massa e aceleração da taxa de reação de decomposição” (CCPS, 2023).

O Manual de Testes e Critérios das Nações Unidas define a SADT como "a temperatura mais baixa na qual pode ocorrer uma decomposição autossustentável com uma substância na embalagem" (United Nations, 2019). O SADT é uma medida "do efeito combinado da temperatura ambiente, cinética da reação, tamanho da embalagem e propriedades de transferência de calor da substância e sua embalagem" (United Nations, 2019).

Na época do incidente, a *Safety Data Sheet* (SDS), no Brasil conhecida como Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ), do NaDCC dihidratado (CDB-56®) da Clearon listava uma temperatura de decomposição do NaDCC dihidratado de 240°C a 250°C.

Conforme analisado nos capítulos 5 e 6, será visto que esta informação, apesar de verdadeira, esconde nuances que possivelmente levaram à uma má interpretação dos dados por parte do time da Optima Belle e, infelizmente, foi um dos fatores contribuintes para o acidente.

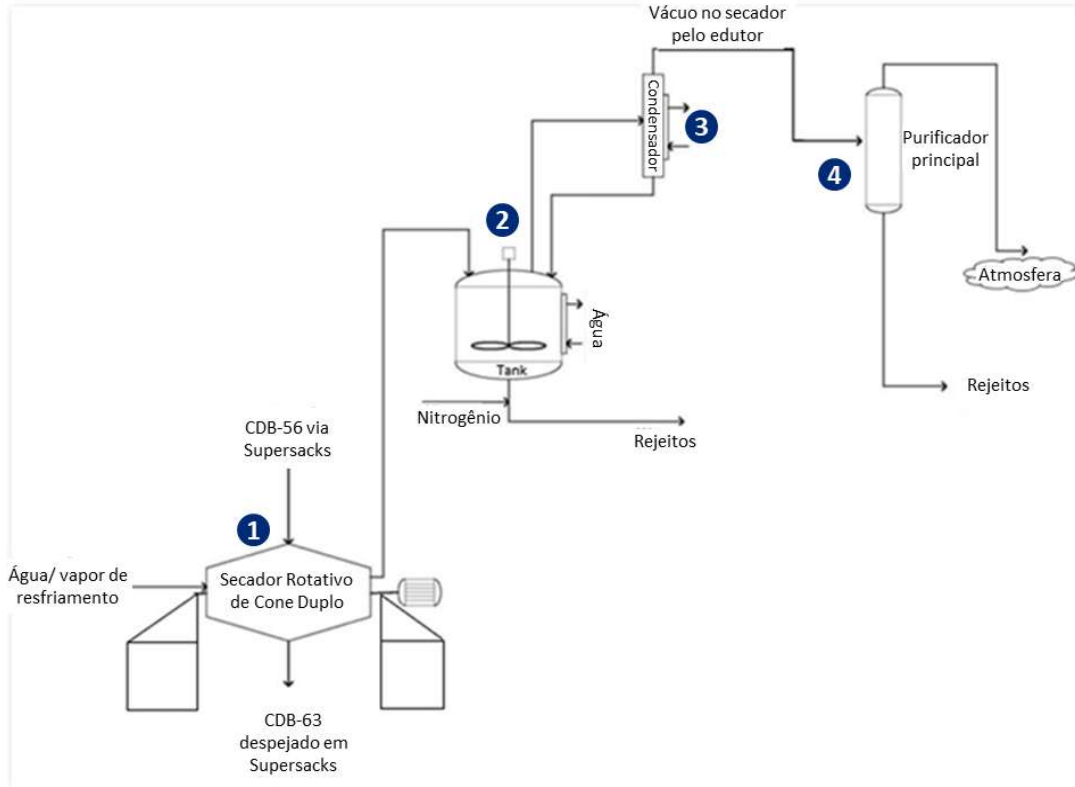
3.3.3 Descrição do processo de desidratação

Para o processo de desidratação de CDB-56® em CDB-63® contratado pela Clearon, a Optima Belle montou um processo próprio para as substâncias, apresentado na figura 3.4. Para desidratar cerca de 4 toneladas de CDB-56®, a Optima Belle utilizou seu secador rotativo de cone duplo Hastelloy® C-276 existente, equipamento número 1 na figura 3.4, com um volume útil aproximado de 4,7 metros cúbicos, mostrado na figura 3.5.

O CDB-56® possui uma densidade a granel de cerca de 897 a 961 quilogramas por metro cúbico; assim, 4 toneladas do material granular preencheriam de 89 a 95% do volume útil do secador. O secador, que podia ser girado para agitar o conteúdo, também possuía uma

camisa que poderia ser alimentada com utilidades do processo, incluindo água de resfriamento, vapor e nitrogênio.

Figura 3.4 – Diagrama de processo da desidratação de CDB-56 na Optima Belle



Fonte: Adaptado de Optima Belle, 2020

Figura 3.5 Secador rotativo de cone duplo da Optima Belle



Fonte: Optima Belle, 2020

O CDB-56® deveria ser aquecido por vapor na camisa enquanto o secador era agitado. A Optima Belle podia remover gases produzidos (como vapor d'água, da desidratação) usando o sistema de vácuo do secador. De acordo com cálculos do CSB, 4 toneladas da matéria prima deveriam gerar aproximadamente 473 litros de água durante a desidratação.

O sistema de vácuo conduzia a descarga de vapor do secador para um tanque (número 2, na figura 3.4), que coletava líquidos eliminados do processo. A corrente de vapor então fluía do tanque por meio de um condensador que condensava e removia líquido adicional e um edutor² (número 3 na figura 3.4), que provia a força motriz para as condições de vácuo no secador.

Por fim, vapores do secador fluíam para um lavador (número 4 na figura 3.4), onde eram misturados com soda cáustica para controlar o pH da solução do lavador acima de 7. Isto era necessário para evitar uma suspensão do certificado ambiental da empresa. Caso o edutor não fosse capaz de extrair vapor do compartimento, o vapor d'água poderia continuar no tanque, entrar em contato com o CDB-56 e se tornar um potencial risco de decomposição. O líquido do lavador era transferido para um contentor de resíduos, enquanto os vapores eram liberados na atmosfera.

O vapor utilizado para aplicar o aquecimento indireto ao secador era regulado para 30 libras por polegada quadrada manométrica (psig). Como resultado, a temperatura máxima interna do secador que poderia ser alcançada era aproximadamente 130°C. O líder técnico da Optima Belle (um engenheiro químico e gerente de processo) para o processo de desidratação acreditava que essa temperatura seria suficientemente alta para liberar a água de hidratação do CDB-56® e baixa o suficiente para evitar a temperatura de decomposição de 240°C a 250°C listada na FISPQ da substância (CSB, 2023).

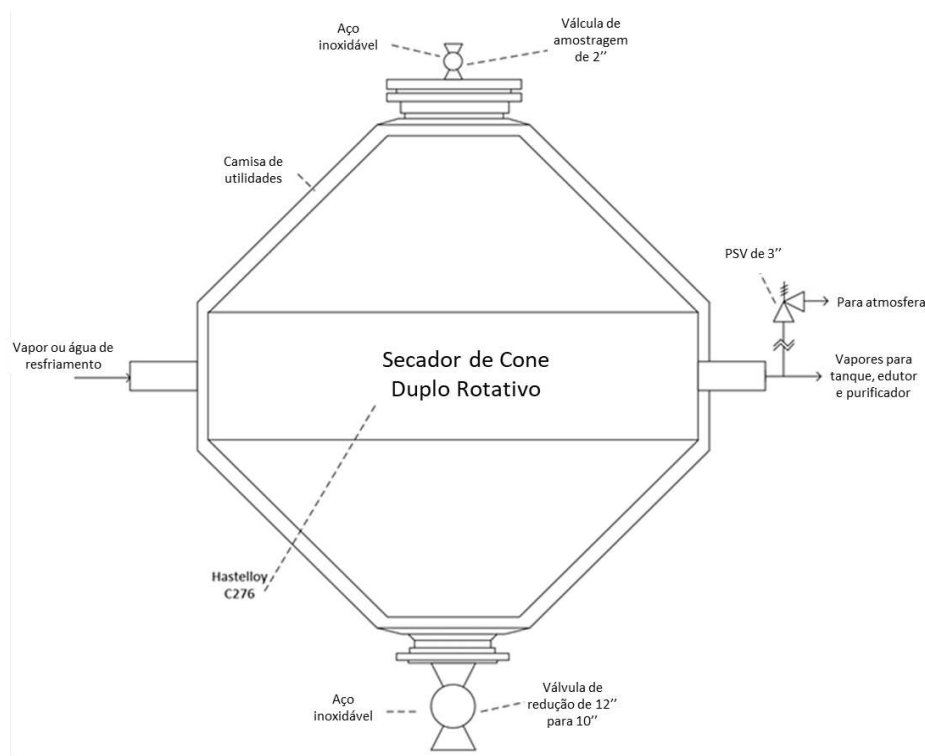
3.3.4 Equipamento de secagem

O secador rotativo de cone duplo Hastelloy® C-276 de cerca de 4,7 metros cúbicos da Optima Belle foi projetado e construído como um tanque de pressão, de acordo com o *American Society of Mechanical Engineers (ASME) Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)*. Dois registros construídos em aço inoxidável foram conectados ao secador (Figura 3.6). O primeiro era uma válvula esférica manual redutora de 12 polegadas para 10 polegadas, instalada em uma extremidade, e o segundo era uma válvula de porta de amostragem de 2 polegadas, instalada na tampa localizada na extremidade oposta. De acordo com a CSB (2023), a Clearon esperava que

² Dispositivo que extrai vapor do secador para reduzir a pressão do secador abaixo da pressão atmosférica

alguma corrosão ocorresse no aço inoxidável com o uso prolongado demandado com o processo de desidratação do CDB-56®, mas não esperava uma corrosão significativa durante os quatro lotes contratados. Logo, não deveria apresentar nenhum risco à operação.

Figura 3.6 – Diagrama conceitual do secador de cone duplo rotativo da Optima Belle, fora de escala



Fonte: Adaptado de CSB, 2023

Uma *pressure safety valve* (PSV) de 3 polegadas e discos de ruptura em série, cada um em 30 psig, foram usados para proteger o secador da Optima Belle de super pressurização (Figura 3.6).

3.3.5 Procedimento de desidratação

Segundo CSB (2023), nenhuma das três empresas (Optima Belle, Clearon e RCI) havia realizado a desidratação de CSB-56® utilizando um secador de cone duplo rotativo. Para fazê-lo, Optima Belle desenvolveu, pioneiramente, um novo procedimento de desidratação utilizando o secador rotativo. Este procedimento foi entregue à Clearon para revisão e validação. Apesar de inicialmente ter solicitado à RCI um secador de leito fluidizado, em última instância esteve de acordo com a mudança. O novo procedimento incluía os seguintes passos:

1. Iniciar a circulação do lavador.
2. Adicionar o CDB-56® no secador e fechar a válvula de carga manual.

3. Garantir que água está fluindo pela camisa do tanque e que o tanque está conectado na ventilação correta.
4. Iniciar a rotação do secador.
5. Criar vácuo usando o sistema de lavagem principal. Uma purga de nitrogênio pode ser aplicada dentro do secador, a critério da gerência da Optima Belle ou do cliente.
6. Aplicar vapor à camisa do tanque. Esta etapa do processo em batelada também incluía a seguinte nota:

“Se a rotação no cone duplo parar, desligar o vapor imediatamente para impedir o calor de ir para o compartimento. Consulte com a gerência se água de resfriamento precisa ser inserida na camisa. Se a rotação parar, garantir que uma purga de nitrogênio passe no cone duplo até a rotação retomar.”

7. Permitir que a temperatura interna do secador chegue a 120 °C. **Não permitir que a temperatura interna suba acima de 130 °C!**

Além das etapas descritas acima, o procedimento da desidratação também incluía dados físicos e informações de reatividade. Além disso, havia uma seção de "Procedimento de Desligamento de Emergência". Esta seção orientava a operação a desligar o vapor e aplicar água fria na camisa do secador caso a rotação do secador parasse por qualquer motivo. Esta instrução ia de encontro ao que foi desenhado pela Optima no procedimento de desidratação. As consequências desta inconsistência serão analisadas no capítulo 5.

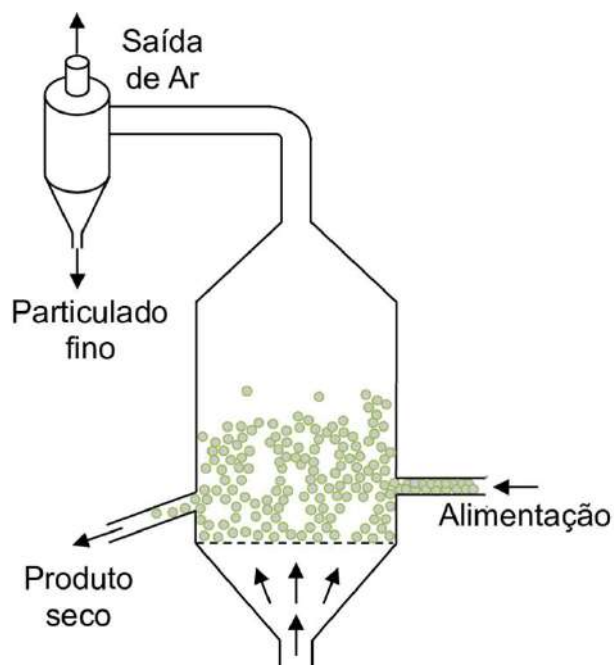
3.3.6 Diferenças entre o processo da Optima e o antigo processo da Clearon

Como descrito anteriormente, Optima Belle optou por utilizar equipamentos adquiridos anteriormente para outros processos para a desidratação de CDB-56®, incluindo o secador rotativo Hastelloy® C-276. Apesar da Optima Belle já tê-lo utilizado para desidratar outros produtos, era a primeira vez que as três empresas o utilizavam para retirar água de NaDCC dihidratado. Segundo o CSB (2023), a Clearon informou não estar ciente de nenhuma decomposição térmica de CDB-56® em um secador rotativo similar ao da Optima Belle e o método de desidratação utilizado anteriormente não era igual ao proposto pela empresa contratada.

Anteriormente, a Clearon utilizou uma tecnologia de secador de leite fluidizado a pressão atmosférica para o processo de desidratação do CDB-56® (CSB, 2023). Este método é um processo de secagem com ar quente usado em operações contínuas e em batelada (BERK, 2018). Esta tecnologia pode utilizar um fluxo ascendente de ar aquecido por meio de uma cama perfurada e chacoalhamento mecânico para criar o efeito fluidizado em pós (BHANDARI; BANSAL; ZHANG; SCHUCK, 2013). Algumas vantagens da secagem por leite fluidizado incluem altas taxas de secagem (VARZAKAS; TZIA, 2016), e tempos de secagem

relativamente curtos (WALAS, 1990). Por outro lado, uma desvantagem seria o fato da fluidização não ocorrer caso o material seja muito coesivo (IMT, 2006). A figura 3.7 exemplifica um secador de leito fluidizado.

Figura 3.7 – Exemplo de um secador de leito fluidizado utilizado industrialmente



Fonte: BARROS; FREIRE, 2019

Posteriormente, o órgão investigador observou que há diferenças significativas entre ambas tecnologias, que serão abordadas no capítulo 5. Assim, não seria possível realizar a simples troca de tecnologia sem realizar previamente um estudo que identificasse e avaliasse os efeitos destas diferenças no procedimento.

4 O ACIDENTE DE OPTIMA BELLE

Neste capítulo, empreende-se uma análise aprofundada dos fatores-chave que conduziram ao incidente ocorrido na planta da Optima Belle LLC (Optima Belle) em dezembro de 2020. A investigação desse evento foi integralmente concluída no ano de 2023. Como desdobramento dessa investigação, o *U.S. Chemical Safety Board* (CSB), entidade responsável pela investigação de acidentes químicos nos Estados Unidos, elaborou um relatório de investigação final intitulado “*Fatal Chemical Decomposition Reaction and Explosion at Optima Belle LLC*” (CSB, 2023). Os elementos abordados neste presente capítulo foram desenvolvidos com base nas conclusões apresentadas neste relatório.

De maneira resumida, o acidente se deu por uma reação de decomposição química e, posteriormente, uma explosão. O incidente ocorreu na unidade fabril da Optima Belle, em Belle, West Virginia, nos Estados Unidos da América (EUA). A causa do acidente foi determinada como uma decomposição autossustentável do dicloroisocianurato de sódio dihidratado aquecido (CDB-56®) dentro de uma unidade secadora rotativa da Optima Belle. O objetivo da operação era remover água do composto a fim de produzir dicloroisocianurato de sódio anidro (CDB-63®). Esta operação seria realizada pela Optima Belle em nome da *Clearon Corporation* (Clearon), por meio de um acordo contratual com o parceiro de terceirização de fabricação *Richman Chemical Inc.* (RCI).

Durante a desidratação do CDB-56® dentro da unidade secadora, o composto clorado de isocianurato passou por uma reação de decomposição inesperada, liberando gases. Isto ocasionou o aumento da pressão interna do secador, superando sua pressão de projeto e, conseqüentemente, resultando na explosão do equipamento. Fragmentos metálicos e destroços da aparelhagem foram lançados para fora do local e dentro das instalações, atingindo um tubo de metanol que posteriormente pegou fogo.

Em termos de segurança, a empresa falhou em: (i) compreender adequadamente os perigos potenciais, (ii) analisar os riscos e (iii) detectar e mitigar a reação de decomposição térmica autossustentável. Contribuindo para o incidente, houve a falha da Clearon em transmitir informações suficientes de segurança de processo para a Optima Belle. Outros fatores que contribuíram para o acidente foram: (i) os sistemas ineficazes de gestão de segurança de processo tanto da Clearon quanto da Optima Belle, (ii) gestão de conhecimento deficiente, (iii) falta de conformidade com as orientações da indústria para a fabricação por contrato e (iv) cobertura regulatória insuficiente de perigos reativos (CSB, 2023).

As consequências do acidente foram graves. Em termos de severidade, houve uma fatalidade e três pessoas necessitaram de atendimento médico. Além disso, houve danos significativos às instalações, na ordem de, aproximadamente, US\$33 milhões.

4.1 INCONSISTÊNCIAS ENTRE PROCEDIMENTO DE OPERAÇÃO E PROCEDIMENTO DE PARADA DE EMERGÊNCIA

A seção "Secagem" do procedimento de desidratação, conforme citado na etapa número 6, na seção 3.4.4, instrui a operação a consultar a gerência se for necessário aplicar água de resfriamento na camisa caso a rotação pare. Contudo, o Procedimento de Desligamento de Emergência (Figura 4.1) orienta a operação a aplicar água fria na camisa do secador se a rotação parar por qualquer motivo. O procedimento de desidratação da Optima Belle não especificava se a empresa seguiria as instruções mencionadas na seção "Secagem" ou as instruções listadas no Procedimento de Desligamento de Emergência caso a rotação do secador parasse, podendo ser uma fonte de confusão em caso de problemas.

Quadro 4.1 – Excerto do procedimento para desidratação de CDB-63® da Optima Belle, listando dados físicos e informação de reatividade

Dados físicos		
CDB-56 (matéria prima)	Fórmula química	$C_3N_2O_3Cl_2Na \cdot 2H_2O$
	Nome químico	dicloroisocianurato de sódio dihidratado
	Aparência	Pó branco
CDB-63 (produto final)	Fórmula química	$C_3N_2O_3Cl_2Na$
	Nome químico	dicloroisocianurato de sódio
	Aparência	Pó branco
Reatividade		
CDB-56 (matéria prima)	Temperatura de autoignição	N/A
	Agentes extintores	Quantidades abundantes de água
	Incompatibilidade	Óleo, combustíveis, solventes, redutores, baixas quantidades de água, ácidos, agentes oxidantes fortes
CDB-63 (produto final)	Temperatura de autoignição	N/A
	Agentes extintores	Quantidades abundantes de água
	Incompatibilidade	Óleo, combustíveis, solventes, redutores, baixas quantidades de água, ácidos, agentes oxidantes fortes

Consulte as fichas de dados de segurança do material para obter informações adicionais.

Fonte: Adaptado de Optima Belle, 2020

Figura 4.1 – Excerto do Procedimento para desidratação de CDB-63® da Optima Belle

Procedimento de parada de emergência

1. Se a emergência ocorrer durante uma transferência química, pare transferência imediatamente fechando as válvulas do sistemas de encanamentos adequados
2. No evento da rotação do cone duplo parar por qualquer razão, desligue o vapor e aplique água fria à camisa do secador de cone duplo. Continue o vácuo, se possível. Se vácuo não pode ser mantido, aplique uma pequena passagem de nitrogênio no cone para inércia.

Fonte: Adaptado de Optima Belle, 2020

Ainda de acordo com o relatório de investigação do CSB (2023), amostras do produto deveriam ser coletadas a cada 30 minutos ou conforme orientação da gerência. O material deveria ser entregue ao laboratório de qualidade para análise de umidade, a partir da análise gravimétrica e inspeção visual. Uma vez que o produto dentro do secador passasse na análise de umidade, o vapor deveria ser removido, a camisa do secador deveria ser purgada com nitrogênio, o vácuo liberado, a purga de nitrogênio desativada (se aplicável) e o secador resfriado através da circulação de água pela camisa. Em seguida, o secador deveria ser preparado para ser limpo assim que sua temperatura interna atingisse 50°C.

4.2 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

4.2.1 Inicialização em 08 de dezembro de 2020

De acordo com a CSB (2023), em 08 de dezembro de 2020, aproximadamente às 10h00 da manhã, os funcionários da Optima Belle começaram a primeira de quatro operações bateladas. Foram adicionadas cerca de 4 toneladas de CDB-56® ao secador através da válvula esférica manual de carga de 10 polegadas. Após a adição do CDB-56®, a Optima Belle fechou a válvula, iniciou a rotação do secador, reduziu a pressão interna do secador para condições de vácuo, aplicou uma leve purga de nitrogênio dentro do secador e adicionou lentamente vapor saturado a 30 psig, aproximadamente 130°C, à camisa do secador. Representantes da Clearon estavam presentes durante o início desta primeira operação do lote de CDB-56®. A RCI, terceira parte no acordo de produção por contrato, não estava presente durante as operações em 8 de dezembro de 2020.

4.2.2 Monitoramento de processos e resolução de problemas

Ao longo do dia 8 de dezembro de 2020, a Optima Belle e a Clearon monitoraram o progresso da desidratação. Conforme prescrito no procedimento de desidratação do CDB-56®, os operadores da Optima Belle interromperam a rotação e o aquecimento do secador aproximadamente a cada 30 minutos para coletar uma amostra do material, que era então inspecionada visualmente e examinada quanto ao teor de umidade para monitorar o progresso da desidratação. Mais tarde no dia, a operação do local decidiu estender o intervalo entre as amostras para uma hora.

No final da tarde, observou-se que a temperatura interna do secador estava aumentando mais lentamente do que o previsto e que o teor de umidade do produto não estava diminuindo como esperado. Um supervisor da Optima Belle observou condensação excessiva e água na

camisa do secador através do visor. Assim, solicitou que o secador fosse interrompido para drenar a camisa. Por volta das 17h04, os funcionários da Optima Belle interromperam a rotação do secador, fecharam o fornecimento de vapor e drenaram manualmente a camisa do secador. Por volta das 17h30, os representantes da Clearon deixaram o local pelo restante da noite.

Por volta das 18h00, a Optima Belle reiniciou a rotação do secador e reintroduziu vapor na camisa do secador. Até as 19h00, a temperatura interna do secador subia conforme previsto.

4.2.3 Inspeção do secador

Por volta das 19h30, uma amostra do material granular do secador indicou níveis de umidade semelhantes às amostras anteriores coletadas ao longo do dia (superiores a 11% de umidade), mas não passou na inspeção visual. Foram observadas manchas escuras no material branco.

Por volta das 20h13, após uma troca de mensagens entre a Optima Belle e a Clearon sobre as manchas escuras, a Optima Belle interrompeu o fluxo de vapor para a camisa do secador, parou a rotação do secador e aumentou a pressão do secador para a pressão atmosférica para investigar a causa das manchas escuras observadas nas amostras. Embora o secador em si fosse resistente à corrosão, as válvulas eram de aço inoxidável e, portanto, suscetíveis à corrosão.

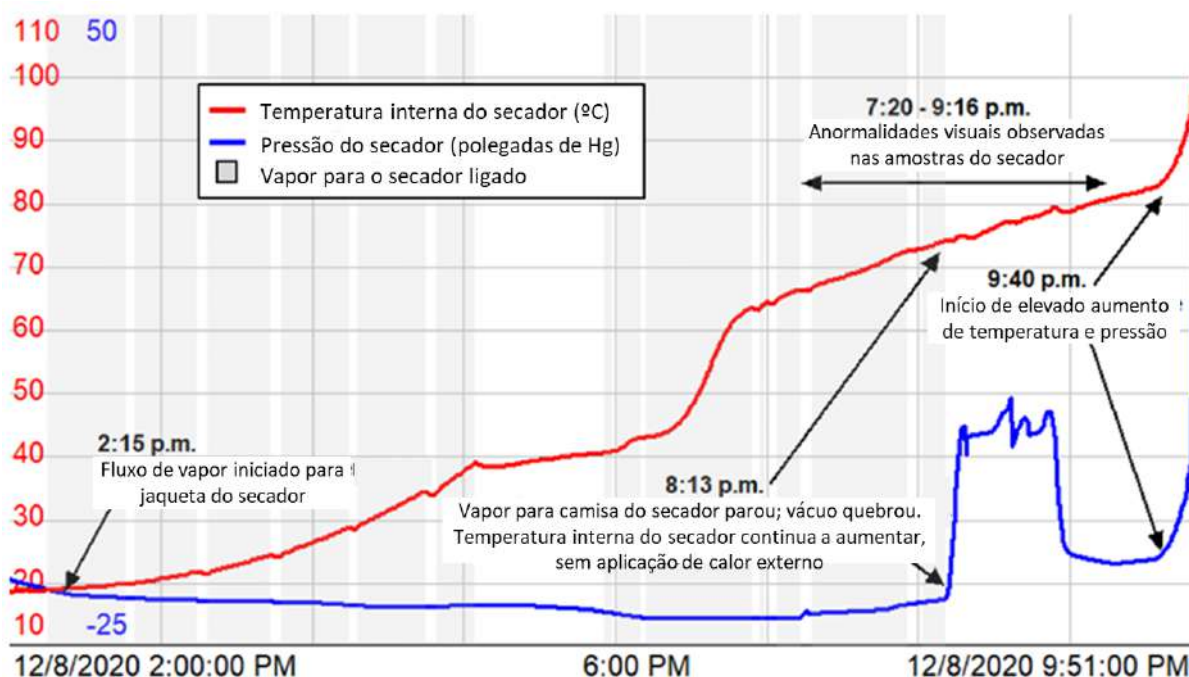
A Optima Belle e a Clearon suspeitaram que a corrosão das válvulas de aço inoxidável poderia ter causado as manchas escuras. Funcionários da Optima Belle examinaram as duas válvulas de aço inoxidável e observaram que ambas estavam revestidas com uma "substância viscosa de aspecto preto" e "uma substância marrom e pegajosa", que eles acreditavam ser proveniente da corrosão do aço. Um funcionário da Optima Belle relatou à CSB que, ao olhar para dentro do secador, o produto parecia grumoso com um tom "amarelado", mas não estava claro se a cor amarelada era um reflexo da lanterna. Funcionários da Optima Belle também descreveram um forte cheiro de cloro ao abrir o secador. Às 20h25, o laboratório analisou sua última amostra, que novamente não passou na inspeção visual.

A rotação do secador permaneceu desligada enquanto a Optima Belle investigava a causa das manchas pretas e inspecionava as duas válvulas de aço inoxidável. Contrariamente ao "Procedimento de Desligamento de Emergência" (Figura 4.1), a Optima não aplicou água fria na camisa e não aplicou vácuo enquanto a rotação do secador estava desligada. A temperatura interna do secador continuou a aumentar lentamente (Figura 4.2) apesar de nenhum vapor ser fornecido à camisa. Neste ponto, não identificado pela Optima Belle, o conteúdo do secador provavelmente começou a se decompor a uma taxa suficiente para desencadear uma

reação descontrolada. Sem rotação e sem aplicação de vácuo, qualquer vapor d'água liberado teria permanecido em contato com o material no secador.

Às 20h37, a Optima Belle fechou a válvula manual redutora do secador (Figura 3.6) e novamente aplicou vácuo no secador. A Optima Belle não reiniciou a rotação do secador. Neste momento, a temperatura interna registrada do secador era de 77°C.

Figura 4.2 – Condições de operação do secador rotativo da Optima Belle em 08/12/2020; áreas em cinza indicam aplicação de vapor à camisa do secador



Fonte: Adaptado de CSB, 2023

Por volta das 21h16, a Optima Belle ligou para a Clearon para discutir a possível corrosão e próximos passos. Por volta das 21h20, enquanto a temperatura do secador continuava a subir sem a aplicação de vapor na camisa, o pH do lavador principal caiu abaixo de 8. Desconhecido pela Optima Belle à época, esta queda no pH provavelmente foi resultado de produtos de decomposição, incluindo cloro, saindo do secador. Preocupada principalmente em evitar a suspensão no permissivo ambiental, em vez de interpretar essa queda no pH como um indicador de atividade de decomposição dentro do recipiente, a Optima Belle tomou medidas para aumentar o pH do lavador, conforme instruído aos operadores. Como a válvula de abastecimento de álcali automatizada não funcionava, dois operadores da Optima Belle adicionaram manualmente soda cáustica ao lavador para evitar que o pH caísse abaixo de 7.

Por volta das 21h30, a Optima Belle e a Clearon concordaram, por ligação telefônica, em interromper a operação do lote para a noite e continuar a investigar as manchas pretas pela manhã. A Optima Belle planejava fazer uma última amostra do secador, substituir a válvula

esférica de aço inoxidável por uma flange cega de 12 polegadas, aplicar água de resfriamento na camisa e girar o secador pelo restante da noite até que a equipe pudesse se reunir pela manhã. Por volta do mesmo horário, a Optima Belle começou a realizar uma purga de nitrogênio na camisa do secador.

Após a ligação, o operador deixou a sala de controle para abrir manualmente as válvulas para interromper a purga de nitrogênio na camisa e aplicar água de resfriamento, já que os dois operadores de campo estavam ocupados tentando aumentar o pH do lavador. Neste momento, a temperatura interna registrada do secador estava ligeiramente acima de 80°C.

4.2.4 A Explosão

Por volta das 21h40, antes que a Optima Belle pudesse retomar a rotação do secador, a temperatura e a pressão do secador aumentaram bruscamente à medida que o NaDCC dihidratado se decompôs (figura 4.2). Após o incidente, observou-se água no fundo do tanque abaixo da altura das lâminas do agitador, indicando que a liberação da água de hidratação do CDB-56® havia começado e estava sendo coletada no tanque, apesar do nível do líquido provavelmente não estar sendo registrado no dispositivo de medição.

As últimas gravações nos dados do controlador indicam que a temperatura do secador atingiu 108°C e a pressão do secador atingiu 33 polegadas de mercúrio (in. Hg), cerca de 16 psig, antes que o secador explodisse catastróficamente. Contudo, como visto pelo gráfico das condições de operação, o equipamento provavelmente não foi capaz de mensurar a pressão, dado que ela subiu muito rapidamente em curtíssimo período de tempo.

Fragmentos e projéteis de metal do secador explodido atingiram uma tubulação de metanol próxima pertencente a outro inquilino do local e o metanol liberado pegou fogo (Figura 4.3). Fragmentos de metal também foram encontrados fora do local na *U.S. Route 60*, a aproximadamente um quilômetro do local.

Figura 4.3 – Incêndio após a explosão do secador da Optima Belle



Fonte: The New York Times, 2020

O operador de controle da Optima Belle, que estava trabalhando para aplicar água de resfriamento na camisa do secador, foi fatalmente ferido. Ele foi encontrado vivo, preso sob os destroços, mas morreu posteriormente no hospital. Sua morte foi atribuída a uma intoxicação pelos vapores de NaDCC que ele havia inalado. Os dois operadores de campo da Optima Belle foram atendidos por irritação respiratória, e um residente do Condado de Kanawha relatou uma lesão. Ele relatou à polícia que sofreu um acidente de trânsito na *U.S. Route 60* devido a um fragmento da explosão que caiu na pista. O dano total estimado à propriedade da Optima Belle pelo acidente foi de \$33,1 milhões.

4.2.5 Análise técnica do acidente

A CSB (2023) concluiu que o NaDCC dihidratado no secador rotativo da Optima Belle passou por uma reação de decomposição auto acelerada. Esta conclusão é baseada em quatro evidências:

1. os testes de acelerometria de taxa crescente (ARC), usada para avaliar a atividade térmica de substâncias (AIChE, 2023), mostraram que o NaDCC dihidratado pode alcançar atividade exotérmica detectável auto acelerada a aproximadamente 81°C quando o vapor d'água liberado é confinado e está em contato próximo com o produto;
2. os dados do processo mostram que a temperatura do secador da Optima Belle começou a aumentar exponencialmente assim que o secador atingiu aproximadamente 83°C;
3. os dados do processo também mostram que o pH no lavador de vapor começou a diminuir acentuadamente a partir de 11,4, indicando que gás ácido estava sendo ventilado para o lavador; e

4. os operadores afirmaram que sentiram um cheiro semelhante ao de cloro durante a amostragem do produto e após a explosão. O cloro é um conhecido produto de decomposição do NaDCC dihidratado que reage com a água (como a água removida do dihidrato ou a água no lavador de vapor) para produzir ácido hipocloroso e ácido clorídrico.

O secador da Optima Belle foi projetado para 30 psig e estava equipado com um sistema de alívio ajustado para a mesma pressão. No entanto, como discutido com mais detalhes na seção 5.3.3, o sistema de alívio de pressão do secador da Optima Belle não foi dimensionado para uma decomposição do NaDCC dihidratado. Assim, não conseguiu liberar o gás gerado a uma taxa suficiente para evitar que a pressão no secador aumentasse além da pressão máxima de trabalho permitida do secador. Os dados do processo mostram que a pressão dentro do secador de cone duplo começou a aumentar exponencialmente momentos antes da explosão.

A CSB concluiu que a pressão excessiva produzida pela reação de decomposição do NaDCC dihidratado causou a sobrepressurização do secador rotativo da Optima Belle e sua subsequente falha catastrófica.

5 ANÁLISE DOS FATORES CONTRIBUINTES PARA O ACIDENTE

As experiências passadas de acidentes na indústria de processos tornaram o público mais consciente e preocupado com as consequências negativas associadas a eles (Roed-Larsen et al., 2004; Christen et al., 1994). Com o advento da internet e a facilidade da comunicação instantânea, a população está altamente sensibilizada em relação a esse assunto. Os perigos envolvidos em plantas de processos e seus impactos ao trabalho dos funcionários da indústria e ao meio ambiente frequentemente provocam protestos públicos em diversas partes do mundo. Portanto, é importante adotar medidas de segurança para prevenir, mitigar ou controlar esses perigos. Um primeiro passo para tal é entender os fatores contribuintes de acidentes passados e extrair lições de aprendizado deles.

O entendimento destes perigos nas plantas em operação nos dias atuais é crucial para permitir a consolidação de medidas tomadas ou a serem tomadas (a partir de recomendações da entidade que investigou o acidente) por meio de sistemas de gestão de segurança. Este capítulo busca estudar os fatores que contribuíram para o acidente de Optima Belle, ocorrido em dezembro de 2020 em Belle, West Virginia, EUA. Os principais aspectos identificados pelo CSB (2023) são apresentados de forma resumida abaixo:

1. **Gestão do conhecimento do processo:** a eficácia da gestão de riscos depende de uma compreensão detalhada e documentação das ameaças de um processo e dos produtos químicos envolvidos no processo. A Clearon carecia destes sistemas e, como consequência, o pacote de tecnologia entregue à Optima Belle não comunicava adequadamente as circunstâncias e temperaturas que poderiam levar à decomposição do NaDCC dihidratado (CSB, 2023).
2. **Avaliação de riscos térmicos:** nenhuma das partes envolvidas na operação de fracionamento avaliou de forma eficaz os riscos do NaDCC dihidratado ou da operação. Destacam-se: (i) falha em identificar o início da decomposição do NaDCC dihidratado como um cenário crível, exceto como resultado de uma temperatura de decomposição superior a 240°C, intrusão de água ou contaminação do produto com outros contaminantes, (ii) pesquisas de literatura inadequadas considerando os dados públicos e internos da Clearon sobre o NaDCC dihidratado disponíveis, e (iii) falha em utilizar métodos de triagem de perigo reativo disponíveis adequados para avaliar a reatividade ou explosividade potencial do NaDCC dihidratado aquecido dentro de um recipiente de pressão metálico (CSB, 2023).
3. **Seleção e design de equipamentos:** Optima Belle utilizou seu equipamento de produção existente para a desidratação do CDB-56®. Contudo, este equipamento não foi projetado, dimensionado ou reprojetoado para a desidratação do CDB-56®. Como resultado, o equipamento não foi concebido para resfriar rapidamente o conteúdo do secador ou para aliviar a pressão excessiva gerada durante a reação de decomposição. Além disso, Clearon e Optima Belle essencialmente conduziram um experimento sobre

um novo método para desidratar CDB-56® em escala de produção total (envolvendo cerca de 4 toneladas de matéria prima) sem antes realizar experimentos em escala laboratorial e piloto, indo de encontro a práticas de segurança básicas (NCBI, 2017). O resultado final desse experimento em escala de produção foi uma explosão catastrófica. Se estudos em menor escala tivessem sido realizados, Optima Belle, Clearon e RCI provavelmente teriam obtido dados adicionais sobre a estabilidade térmica do NaDCC dihidratado, informações sobre reatividade e conhecimento do processo antes de executar o primeiro lote em escala de produção, o que poderia ter levado a alterações no processo e potencialmente prevenido a reação de decomposição e a explosão (CSB, 2023).

4. **Orientação para terceirização da fabricação de produtos (“tolling”):** empresas frequentemente complementam a produção interna por meio da terceirização de processos químicos e outras operações. Esses acordos são conhecidos como terceirização de produção (em inglês, “tolling”). A Clearon estabeleceu um contrato de terceirização com a RCI, uma intermediária, que, por sua vez, contratou a Optima Belle. O *Center for Chemical Safety Process* (CCPS) oferece orientações da indústria para que estes tipos de acordo ocorram de maneira segura e eficaz. A explosão do secador poderia ter sido evitada se as empresas tivessem aplicado as orientações sugeridas pela indústria (CSB, 2023).
5. **Cobertura regulatória de perigos reativos nos EUA:** O NaDCC dihidratado e o NaDCC são compostos clorados de isocianurato que podem passar por uma decomposição auto acelerada quando aquecidos. Essas reações podem resultar em explosões, incêndios e emissões tóxicas com impactos severos em pessoas, propriedades e no meio ambiente. No entanto, muitos desses produtos químicos reativos não são regulamentados sob o PSM da OSHA ou sob a RMP da EPA. Caso estas substâncias estivessem contempladas por uma das regulações, a Optima Belle seria legalmente obrigada a implementar sistemas de mitigação e gerenciamento de riscos que poderiam ter evitado este acidente (CSB, 2023).

5.1 FALHAS EM RELAÇÃO À GESTÃO DO CONHECIMENTO DO PROCESSO

De acordo com a investigação conduzida pela CSB em 2023, como parte de seu acordo de fabricação por terceiros (“tolling”), a Clearon forneceu à Optima Belle um "Pacote de Tecnologia" para auxiliar a contratada no desenvolvimento do design do processo e seleção dos equipamentos, bem como nos procedimentos operacionais para o processo de desidratação. O Pacote de Tecnologia pode ser análogo ao *Process Safety Information* (PSI) com base em seu conteúdo.

5.1.1 Orientações do CCPS e da OSHA

A Optima Belle utilizou as informações contidas no Pacote de Tecnologia como base para sua avaliação técnica no desenvolvimento e análise de riscos de seu processo proposto de

desidratação de NaDCC dihidratado. Como será descrito nesta seção, a Clearon carecia de práticas eficazes de gestão do conhecimento do processo, o que contribuiu para a compreensão inadequada por parte da Optima Belle dos perigos do processo de desidratação do CDB-56® e, por fim, para a explosão do secador.

O elemento gestão do conhecimento do processo “tem como objetivo primário manter informações acuradas, completas e compreensíveis que podem ser acessadas sob demanda”. Portanto, este elemento embasa todo o conceito de gerenciamento de segurança de processos baseado em risco. Não é possível aplicar a metodologia adequadamente sem a compreensão dos riscos, e um conhecimento completo e acurado do processo é imprescindível para identificar os perigos e avaliar os riscos (CCPS, 2007).

Normalmente, a responsabilidade do desenvolvimento e manutenção de conhecimento de processos é compartilhada entre várias empresas. Isto se dá pelo fato de que conhecimento cresce, evolui e se acumula ao longo do ciclo de vida do processo. No início, é de responsabilidade dos times de engenharia e de pesquisa e desenvolvimento (P&D). No momento de inicialização e comissionamento da planta, a responsabilidade é transferida para o local no qual a unidade está localizada. Em outros casos, pode ser mantido por um grupo central, externo ao local, que gerencia este conhecimento. Informações de perigos químicos normalmente são desenvolvidas pelos fornecedores ou pelo time de P&D (CCPS, 2007).

Para processos que são contemplados pela OSHA, as empresas devem compilar e manter informações de segurança de processos de químicos e a tecnologia usada no processo. Entre outros dados, as informações devem conter: dados físicos, dados de reatividade, dados de estabilidade química e térmica e outras informações (OSHA, 2000). Contudo, como já observado anteriormente, o dicloroisocianurato de sódio não é contemplado pelas regulações da OSHA. Assim, nenhuma empresa tinha esta obrigação legal.

5.1.2 Inadequação do pacote de tecnologia

A Clearon endereçou à Optima Belle um pacote de tecnologia como parte do contrato de terceirização do processo de desidratação de CDB-56®. Neste pacote, estavam inclusos (CSB, 2023):

- Instruções gerais de fabricação, qualidade, logística e segurança para a conversão de CDB-56® em CDB-63®;
- Informações de contato com o pessoal relevante da Clearon;
- "Boletins Técnicos do Produto" tanto para CDB-56® (a matéria-prima a ser desidratada) quanto para CDB-63® (o produto final);

- Ficha de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) da Clearon tanto para CDB-56® quanto para CDB-63®;
- Folha de especificação do produto para CDB-63®;
- Instruções para análise de controle de qualidade de laboratório de CDB-63®; e
- Curva de secagem de laboratório mostrando o teor de umidade vs. tempo de uma amostra de 5,6 gramas de CDB-56® desidratada a 130°C e à pressão atmosférica.

O pacote de tecnologia fornecido continha informações discutidas com a RCI e a Optima Belle até a data de emissão do pacote. Posteriormente, a Clearon enviou a ambas empresas um artigo técnico escrito em 1968 pelo Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento Inorgânico da FMC Corporation (FMC), intitulado em tradução livre "Estudos de Decomposição Térmica de CDB-63®". O artigo aborda a decomposição do CDB-63®. É importante ressaltar que o CDB-63® era o produto pretendido do processo de desidratação, e não a matéria prima, que era o CDB-56®.

O artigo técnico da FMC incluía, dentre outras informações, propriedades físicas do NaDCC (CDB-63®), descrição do processo de decomposição térmica da substância, discussão sobre os calores de dissolução, hidratação, desidratação, hidrólise, o efeito da água na decomposição de NaDCC em ambos sistemas fechado e aberto, e dados dos produtos da decomposição de CDB-63® (CSB, 2023).

Em março de 2022, para fins da investigação do acidente conduzida pelo CSB, a Clearon entregou à CSB outro artigo técnico. Escrito em 1989 pela Olin e diferentemente do primeiro, esse artigo continha tanto informações de decomposição térmica para o CDB-56®, que era a matéria prima para o processo de desidratação e a fonte da reação de decomposição para este acidente, como para o CDB-63®, o produto final. Este artigo não foi compartilhado com a Optima Belle como parte do pacote de tecnologia, pois, segundo a Clearon, continha informações duplicadas de outros materiais do pacote de tecnologia (CSB, 2023).

O artigo técnico escrito pela Olin em 1989 era um compilado de vários relatórios técnicos e análises realizadas pela empresa, começando aproximadamente em 1977 e continuando ao longo da década de 80. Dentre outras coisas, o relatório detalhava:

- Dados de Calorimetria da Taxa de Aceleração (ARC) e Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para o NaDCC dihidratado (CDB-56®);
- Várias circunstâncias que poderiam resultar na decomposição do NaDCC dihidratado (CDB-56®);
- O impacto do vapor d'água na decomposição do NaDCC dihidratado (CDB-56®);
- A fonte de dados para a restrição da temperatura de 60 °C de armazenamento do NaDCC dihidratado (CDB-56®);

- Detalhes sobre a quantidade e identificação dos gases produzidos na reação de decomposição do NaDCC dihidratado (CDB-56®);
- Dados detalhando as temperaturas de decomposição do NaDCC dihidratado (CDB-56®).

Ainda assim, segundo o CSB (2023), a Clearon acreditava que o artigo técnico da FMC de 1968 provia todas as informações e o contexto necessários pela Optima Belle para a análise e desenho do processo de desidratação do NaDCC dihidratado (CDB-56®). Contrariamente ao assertado pela Clearon, as informações sobre NaDCC dihidratado (CDB-56®) contidas neste relatório poderiam ter sido o alicerce central para o desenho e a operação do processo de desidratação que resultou em catástrofe. É crível pensar que a ausência destas informações foi um dos fatores contribuintes para a má compreensão do processo por parte da empresa contratada.

5.1.2.1 Inadequações na FISPQ das substâncias envolvidas

À época do acidente, a FISPQ para o CDB-56® da Clearon não continha informações cruciais, como, por exemplo, o fato da substância poder passar por uma reação de decomposição perigosa. Apenas mencionava que o contato com ácidos libera gases tóxicos.

O quadro 5.1 apresenta algumas informações específicas listadas por outros cinco fornecedores de NaDCC dihidratado disponíveis à época. Pode-se observar que há uma variedade de inconsistências, incluindo detalhes de decomposição. O texto em vermelho indica as inconsistências entre os diferentes fornecedores.

Quadro 5.1 - Comparação da FISPQ de outros 6 fornecedores para o NaDCC dihidratado

	Clearon	Fornecedor B	Fornecedor C	Fornecedor D	Fornecedor E	Fornecedor F
Meio de extinção adequado	Spray de água, névoa (em qtds. inundantes)	Inundar com grande quantidade de água	Água	Pó seco	Inundar com água	Água em grandes quantidades
Meio de extinção inadequado	Não usar agentes extintores halogenados ou espuma. Químicos secos ou CO ₂	NÃO usar ABC ou outros extintores químicos; CO ₂ ou outros agentes extintores halogenados	Não usar extintores químicos secos contendo compostos de amônia	Não usar jato de água		Não usar extintores químicos secos contendo compostos de amônia
Condições de armazenamento seguras	Manter compartimento bem fechado e seco em local bem ventilado	Armazenar no envase original e em área seca onde temperaturas não ultrapassem 52°C por 24h	Não armazenar em temperaturas superiores a 60°C	Manter compartimento bem fechado e seco em local bem ventilado	Manter temperatura que não ultrapasse 40°C	Temperatura não deve exceder 50°C
Temperatura de decomposição	240°C – 250°C	Decompõe em temperatura superior a 210°C com liberação de gases nocivos	Começa a perder 1 mol de água a aprox. 50°C; 2º mol de água a 95°C; Decompõe em 240°C – 250°C	240°C – (anidro) Propriedades explosivas podem levar a explosão com incêndio	Não aplicável. Propriedades explosivas: não explosivo. Propriedades oxidativas: depois de prolongada exposição acima de 40°C o produto pode decompor e liberar calor excessivo	Começa a perder 1 mol de água a aprox. 50°C; 2º mol de água a 95°C; Decompõe em 240°C – 250°C
Condições para evitar instabilidade	Estável. Contudo, pode decompor se aquecido	Material molhado pode gerar NC3 . Qualquer quantidade de NC3 é potencialmente explosiva. NC3 líquido explodirá se aquecido acima a 60°C ou mais	Aquecimento acima da temperatura de decomposição	Sem dados disponíveis	Depois de prolongada exposição acima de 40°C o produto pode decompor e liberar calor excessivo	Aquecimento acima da temperatura de decomposição
Decomposição ou subprodutos perigosos	Óxidos de nitrogênio (Nox), HCl gás, óxidos de carbono, óxidos de sódio	Cl, N, NCl ₃ , CNCl, óxidos de carbono, COCl ₂ , cloraminas	Cl, NCl ₃ , CO	Óxidos de carbono, Nox, HCl, óxidos de sódio e outros produtos de decomposição – sem dados disponíveis	Cl	Cl, NCl ₃ , CO
Sistema Globalmente Harmonizado¹		Aquecimento acima de 80°C pode iniciar uma decomposição auto-sustentável, liberando grandes quantias de calor e gás, incluindo fumaças tóxicas				

Fonte: Adaptado de CSB, 2023

O CSB (2023) concluiu que as informações de perigos químicos do NaDCC dihidratado variam substancialmente entre fornecedores. Contudo, as inconsistências por si só não apresentam um risco. O CCPS já observou que as informações de riscos químicos presentes na FISPQ de uma substância podem variar consideravelmente entre fornecedores (JOHNSON; RUDY; UNWIN, 2003). A EPA, em 1999, emitiu um alerta de segurança advertindo que “informações de riscos químicos [na FISPQ] podem variar substancialmente a depender do provedor” (EPA, 1999).

De acordo com CSB (2023), o fato da informação de decomposição do material não estar mais elaborada, incluindo outros cenários além dos indicados, na ficha é o problema. À época do acidente, a Clearon já conhecia outros cenários que causavam a liberação de gases tóxicos a partir do CDB-56®, incluindo contato com água, outros contaminantes orgânicos e pelo simples aquecimento da substância. **Nenhum destes cenários é mencionado na seção de perigos da FISPQ**, o que seria facilmente resolvido adicionando-as dentro de “Informações adicionais de perigo”.

Além disso, não havia indicações em nenhum lugar na FISPQ de ambas substâncias de que a temperatura máxima de armazenamento dessas substâncias era de 60 °C. O único lugar no pacote de tecnologia que continha essa informação era no boletim técnico de produto do

CDB-56®. Todavia, não havia nenhuma explicação ou contexto do porquê deste requerimento. Ao invés disso, apenas se dizia que:

“[CDB-56®] deve ser armazenado em uma área bem ventilada a prova de incêndios, fresca e seca, onde a temperatura nunca ultrapasse 60°C .” [...] [CDB-56®] se decompõe em 240-250°C” (Adaptado de CSB, 2023).

Assim, constata-se claramente, tanto no boletim técnico de produto, quanto na FISPQ das substâncias, que a temperatura de decomposição indicada era de aproximadamente 240°C. Nenhuma explicação é dada do porquê há uma diferença de temperatura de armazenamento (menos de 60°C) e a temperatura de decomposição apresentada (240-250°C) para o CDB-56®. Resultados após o acidente revelaram que o NaDCC dihidratado inicia um processo exotérmico descontrolado (indicativo de uma decomposição descontrolada) a aproximadamente 81°C quando aquecido em um recipiente fechado (CSB, 2023).

Dessa maneira, sem a informação de base contida no artigo técnico escrito pela Olin em 1989, é improvável que um leitor do pacote tecnológico do processo seja capaz de entender adequadamente as possíveis circunstâncias que levassem à uma decomposição perigosa do CDB-56® abaixo da temperatura de decomposição indicada. Não à toa, Optima Belle focou seus esforços de prevenção a esta decomposição em duas frentes: (i) evitando a entrada de água no secador, e (ii) evitando temperaturas superiores a 240°C, a temperatura de decomposição indicada no pacote de tecnologia.

O CSB, em 2023, concluiu que a FISPQ para o NaDCC dihidratado da Clearon era inadequada pelos seguintes motivos:

- Não refletia com precisão as temperaturas em que o composto poderia se decompor, sabido pela Clearon ser muito inferior à temperatura listada de decomposição de 240-250°C, com base em estudos realizados nas décadas de 1970 e 1980. Resultados de testes pós-incidente constataram que o NaDCC dihidrato inicia um processo exotérmico descontrolado (indicativo de uma decomposição descontrolada) a aproximadamente 81°C quando aquecido em um recipiente fechado;
- Não continha a restrição de temperatura de armazenamento da Clearon de 60°C;
- Não listava o gás cloro ou NCl₃ na lista de produtos de decomposição. Ambos os produtos da decomposição eram conhecidos pela Clearon;
- Afirmava que reações perigosas "Não ocorrerão", apesar de listar vários produtos químicos com os quais o NaDCC dihidratado é incompatível e listar múltiplos produtos de decomposição perigosos além do cloro e NCl₃;
- Afirmava que reações perigosas "Não ocorrerão", apesar do conhecimento da Clearon de que o NaDCC dihidratado pode passar por uma reação de decomposição perigosa;

- Afirmava que reações perigosas "Não ocorrerão", apesar de também afirmar que o composto "pode se decompor se aquecido";
- Não listava o material como um oxidante, apesar de ser classificado assim pela NFPA, e apesar dessa designação aparecer no boletim técnico do produto.

Em diversas respostas ao CSB a pedidos de informações, a Clearon insistiu que a FISPQ para o CDB-56® estava em conformidade com as regulações da OSHA. Contudo, a CSB não é capaz de concluir em seu relatório de investigação final a conformidade regulatória da FISPQ da Clearon. (CSB, 2023).

O CSB é capaz de concluir, entretanto, que (CSB, 2023):

- A FISPQ do CDB-56® da Clearon não refletia em sua integralidade os perigos conhecidos da substância;
- Dado que informações e contexto importantes estavam ausentes da ficha do CDB-56®, o usuário final do documento pode não ter sido capaz de compreender inteiramente a propensão da substância a decompor, as circunstâncias que poderiam levar a decomposição, ou as potenciais consequências de uma decomposição.

De acordo com CSB (2023), apesar das deficiências na FISPQ do CDB-56®, a Clearon incluiu outras informações no Pacote de Tecnologia que ofereceram algum contexto adicional e considerações específicas à decomposição. Os avisos contra entrada de calor localizada e temperatura excessiva, no entanto, não foram declarados quantitativamente. Não havia um meio explícito para o leitor compreender o que "temperatura excessiva" ou "entrada de calor localizada" significavam em termos de condições do processo.

Após avaliar o Pacote de Tecnologia, a Optima Belle chegou à conclusão de que a decomposição do CDB-56® devido ao superaquecimento não representava um risco credível. As circunstâncias a seguir levaram a essa conclusão incorreta:

- O Pacote de Tecnologia afirmava que o CDB-56® (i) não deveria ser armazenado em temperaturas inferiores a 60°C e (ii) se decompõe a 240°C;
- O Pacote de Tecnologia da Clearon afirmava que as temperaturas não deveriam exceder 140°C;
- O processo pretendia aquecer o material a temperaturas entre 100-130°C, o que a Optima Belle acreditava estar suficientemente abaixo da temperatura de decomposição listada na FISPQ de 240°C para evitar a decomposição;

Finalmente, a Optima Belle não garantiu a adequação dos sistemas de resfriamento e descompressão do secador. A empresa não realizou os cálculos necessários para verificar se o sistema de resfriamento do secador poderia remover calor suficiente no caso de uma potencial reação de decomposição do CDB-56®. Além disso, não realizou os cálculos para verificar se o sistema de descompressão do secador estava dimensionado adequadamente para remover gases

de decomposição e prevenir o acúmulo de pressão excessiva dentro do secador em caso de uma reação de decomposição. Para realizar tais cálculos, a Optima Belle teria necessitado:

- **Dados de decomposição térmica**, incluindo o calor de decomposição (a quantidade e a taxa de liberação de energia térmica durante a decomposição exotérmica), que a Optima Belle poderia ter comparado com a capacidade de remoção de calor do sistema de resfriamento existente do secador;
- **Cinética da reação de decomposição, estequiometria e balanços de massa**, que a Optima Belle poderia ter utilizado para determinar a quantidade e a taxa de geração de vapor e pressão durante uma reação de decomposição. Essas informações seriam necessárias para avaliar a adequação do sistema de descompressão existente do secador durante uma reação de decomposição;
- Na ausência dessas informações, dados de teste de DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura) e ARC (Calorimetria de Reação Auto-Acelerada) poderiam ter sido suficientes, já que o ARC pode determinar as taxas de geração de pressão, e o DSC pode determinar a geração de calor durante um exotérmico descontrolado (indicativo de uma decomposição descontrolada).

Contudo, nenhuma dessas informações para o CDB-56® foi incluída no pacote de tecnologia fornecido pela Clearon. Optima Belle também não pediu por estas informações. A Clearon até incluiu dados de calorimetria para o CDB-63® no artigo técnico da FMC de 1968. O problema, no entanto, é o fato das propriedades térmicas destes componentes serem diferentes, como apresentado no quadro 5.2. Os dados apresentados no quadro abaixo foram obtidos pelo CSB a partir de testes realizados com NaDCC dihidratado e NaDCC após o acidente (CSB, 2023).

Quadro 5.2 – Comparação das propriedades físicas e térmicas do NaDCC dihidratado e do NaDCC

Nome químico	Dicloroisocianurato de sódio dihidratado (NaDCC dihidratado)	Dicloroisocianurato de sódio (NaDCC)
Sinônimos	Trocloseno de sódio dihidratado Dicloro-s-triazinatriona dihidratado	Trocloseno de sódio Dicloro-s-triazinatriona
Nome comercial	CDB-56 [®]	CDB-63 [®]
Chemical Abstracts Service (CAS)	51580-86-0	2893-78-9
Fórmula molecular	C ₃ H ₄ Cl ₂ N ₃ NaO ₅	C ₃ Cl ₂ N ₃ NaO ₃
Peso molecular	255,97 g/mol	219,94 g/mol
Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)		
Temperatura inicial da reação exotérmica	114,1°C	160,2°C
Energia exotérmica	1077 J/g	434 J/g
Calorimetria da Taxa de Aceleração (ARC)		
TD24	49,3°C	40,9°C
Temperatura da primeira reação exotérmica	81,9°C	117,8°C
Tempo até taxa máxima da primeira reação exotérmica	0,2 horas	6,4 horas
Taxa de pressão do teste	17,571 psi/min a 128,18°C	18,286 psi/min a 245°C

Fonte: Adaptado de CSB, 2023

Como os testes de DSC e ARC são conduzidos com amostras em células de teste fechadas, os resultados obtidos são diretamente aplicáveis aos produtos armazenados em recipientes fechados ou aquecidos em compartimentos fechados. Logo, estes testes buscam replicar o mesmo que aconteceu momentos antes da explosão em Optima Belle (CSB, 2023). Assim, pode-se imaginar que, estando em posse destes dados, a contratada poderia tomar decisões mais ajustadas para as características particulares de cada substância. Isto seria de grande valia especialmente para o NaDCC dihidratado, que era a matéria prima do processo e que a empresa não teve acesso a muitos dados.

Vale ressaltar que, apesar de possuírem moléculas similares, as substâncias possuem propriedades térmicas diametralmente opostas. Os resultados dos testes de DSC e ARC comprovam este fato. Os componentes possuem, por exemplo, diferentes energias de decomposição, tempo para taxa máxima e temperaturas na qual a geração máxima de pressão ocorre. Dessa maneira, os dados de ambas substâncias provavelmente dariam resultados

diferentes na hora de projetar sistemas de resfriamentos ou para analisar os piores cenários possíveis de sobrepresurização.

Assim, o CSB (2023) concluiu que:

- O pacote de tecnologia da Clearon, principalmente a FISPQ do NaDCC dihidratado da empresa, era inadequado e não apresentava informações críticas sobre a decomposição da substância. Consequentemente, impossibilitou a Optima Belle realizar uma avaliação assertiva de seus equipamentos para o processo;
- Se a Clearon tivesse fornecido o artigo técnico de 1989 da Olin ou outras fontes de dados sobre a decomposição da matéria prima, Optima Belle teria tido as informações e contexto necessários para entender as circunstâncias que levassem à decomposição do CDB-56®;
- O pacote de tecnologia da Clearon levou a contratada a um entendimento inadequado dos perigos do processo de desidratação do CDB-56®. Se eles tivessem feito um pacote robusto e entregue a informação previamente à Optima Belle, a mesma poderia ter feito uma melhor análise dos riscos e de desenho do processo e o acidente poderia ter sido evitado.

5.1.3 Sistema de gerenciamento de conhecimento de processo da Clearon

O CSB (2023) solicitou informações da Clearon referentes a procedimentos corporativos (ou orientações) que abrangessem a criação, revisão, aprovação e supervisão da FISPQ do NaDCC dihidratado da empresa. A resposta da Clearon indicou que usavam serviços terceirizados para esta tarefa. Além disso, não foi possível observar se a companhia havia algum processo ou procedimento que governasse como, quando e por quem o conteúdo da FISPQ era gerido, atualizado ou auditado para avaliar sua acurácia e/ou completude. É de responsabilidade da companhia fornecer à empresa terceira preparando a ficha com os dados necessários, uma vez que os terceirizados provavelmente terão nenhum ou limitado acesso a este tipo de informação.

No mais, a Clearon não apresentou provas contundentes ao CSB de que conduziram uma revisão bibliográfica das propriedades reativas do CDB-56® além do relatório de 1968 da FMC antes da Optima Belle iniciar o processo de desidratação

As lacunas nos sistemas de gerenciamento de conhecimento de processo da Clearon podem ser bem ilustradas pela ausência no pacote tecnológico de dados relevantes da matéria prima ou do artigo técnico de 1989 da Olin. Como observado pela investigação da CSB (2023) por meio de uma entrevista em março de 2022, o pacote foi construído por um único funcionário da Clearon. Quando perguntado se ele estava ciente de testes analíticos feitos com a matéria prima, ele respondeu “Não estou ciente” e “Não estou familiarizado com nenhum”.

É bem possível que o funcionário simplesmente não soubesse da existência do artigo técnico ou de outros dados relevantes que estivessem em posse da Clearon, como assertado na entrevista. Ainda assim, o desconhecimento de informações críticas por parte de um funcionário crucial ao processo indica problemas da Clearon na gestão do conhecimento de processos. O CCPS (2007) já menciona que as empresas devem implementar sistemas de gestão para manter conhecimento de forma a promover a tomada de decisão baseada em riscos e deveria compartilhar essa informação com outras unidades, inclusive, em alguns casos, competidores.

A Clearon, portanto, não tinha um processo ou procedimento formalizado pelo qual geria ou mantinha o pacote de tecnologia. Em uma resposta ao CSB, a empresa informou que criou um pacote de tecnologia especificamente para RCI e Optima e que este procedimento não fazia parte do seu foco de negócios. Além disso, mencionou a falta de experiência prévia trabalhando com terceirizadas como a razão para ausência destes procedimentos para transmitir informações relevantes às contratadas.

Como resultado, o funcionário responsável por compilar o pacote tecnológico não estava ciente do artigo técnico de 1989 da Olin, não o incluindo no pacote de tecnologia. Como já visto na seção anterior, este documento possuía informações chaves sobre a decomposição do NaDCC dihidratado, a matéria prima da desidratação. A Optima Belle poderia ter levado essas informações em consideração ao analisar o desenho e os riscos deste processo, o que poderia ter prevenido o acidente.

Assim, o CSB (2023) concluiu que Clearon não possuía práticas efetivas de gestão de conhecimento de processo. Essas práticas deveriam ter: (i) documentado e mantido informações essenciais para a desidratação segura do NaDCC dihidratado e (ii) tornado essas informações facilmente acessíveis. Como resultado das práticas ineficazes de gerenciamento do conhecimento do processo da Clearon, o Pacote Tecnológico da Clearon não possuía dados importantes sobre o processo e o produto, e a empresa não transmitiu as informações de segurança adequadamente à empresa contratada.

Como recomendação, a Clearon deveria desenvolver e implementar um abrangente sistema de gestão de conhecimento ou avaliar e revisar os procedimentos de gestão de segurança de processos existentes para garantir que sejam conformes boas práticas da indústria, como o RBPS do CCPS.

5.2 FALHAS EM RELAÇÃO À AVALIAÇÃO DE PERIGOS TÉRMICOS

Desde o século XIX, muitas substâncias químicas foram descobertas e desenvolvidas com o crescimento da indústria química moderna desde o século XIX. Substâncias químicas

com potenciais efeitos adversos sobre pessoas, propriedades e o meio ambiente são normalmente classificadas como "perigosas" (*'hazardous'*). O termo "*reactive chemicals*", em tradução livre "químicos reativos", refere-se a uma categoria de substâncias químicas que iniciam reações químicas por si próprias ou com outras substâncias (MOSLEY; NESS; HENDERSHOT, 2000).

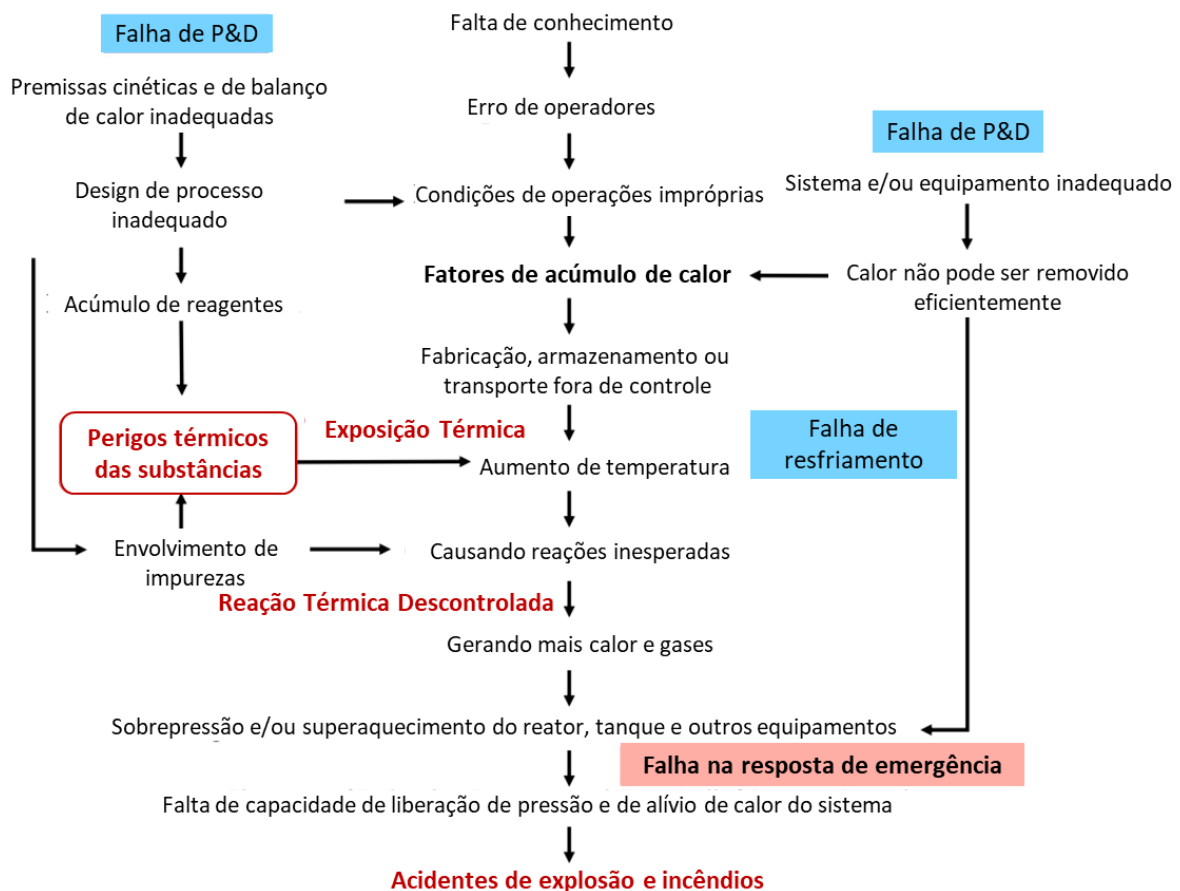
Essas reações geralmente são exotérmicas e podem produzir gases inflamáveis e/ou produtos explosivos, desencadeando acidentes com consequências severas. A reatividade desses produtos químicos pode ser provocada por atrito, choque, calor, entre outros. A reatividade relacionada ao calor é de grande preocupação para a comunidade de proteção contra incêndios (LEE, 2012).

A má compreensão precisa dos riscos térmicos dos produtos químicos reativos é uma causa importante de quase todos os acidentes de incêndio e explosão na indústria moderna (SALES; MUSHTAG; CHRISTOU; NOMEN, 2007). De acordo com Stoessel (1993), "o risco térmico associado a uma reação química é o risco de perda de controle da reação ou de desencadear uma reação descontrolada.

Portanto, é necessário compreender como uma reação pode 'mudar' do seu curso normal para uma reação descontrolada". Assim, a avaliação dos riscos térmicos e a gestão dos perigos de reatividade química são cruciais na indústria de processos químicos para auxiliar na identificação ou compreensão do risco envolvido nas operações de processamento químico. Evitar uma reação descontrolada é importante para reações químicas exotérmicas — reações químicas que liberam calor. Uma unidade química pode usar diferentes métodos prontamente disponíveis para identificar potenciais riscos de perigos reativos. Exemplos de métodos seriam análise térmica/calorimetria (GILL; MOGHADAM; RANJBAR, 2010), método de triagem preliminar (JOHNSON; RUDY; UNWIN, 2003), e *Chemical Reactivity Worksheet* (CRW) (AIChE, 2016).

A Figura 5.1 explica como os perigos térmicos dos produtos químicos reativos podem contribuir para estes incidentes, seguidos por acidentes de incêndio e explosão, em um cenário geral. Observar-se-á como que o acidente que ocorreu em Optima Belle passou por ambos caminhos da esquerda e da direita, que se inicia com a falha de P&D, passando pelo perigo térmico das substâncias, falha de resfriamento, exposição térmica, chegando a uma reação exotérmica descontrolada até, eventualmente, o acidente de explosão.

Figura 5.1 – Visão esquemática de como os perigos térmicos de produtos químicos reativos contribuem para acidentes de incêndio e explosão em um cenário geral de aplicação na indústria



Fonte: Adaptado de SUN et al., 2020

A compreensão precisa das propriedades físicas e térmicas dos produtos químicos é um pré-requisito para seu uso sustentável em todas as fases (laboratorial, piloto e produção). Contudo, estas propriedades não são o único fator que contribui para incêndios e explosões. Um processo de reação térmica geralmente é governado por três fatores]: (i) a geração de calor devido à reação (influenciada pela massa da mistura reativa e tamanho do reator), (ii) a troca de calor com o ambiente (como a superfície do reator) e (iii) a transferência interna de calor e massa (como o estado físico das substâncias e as propriedades termofísicas) (KOSSOY; BENIN; AKHMETSHIN, 2005).

5.2.1 Orientações do CCPS

O CCPS (2007) discute a importância da identificação de perigos e análise de riscos no RBPS. É explicado que, uma vez identificado um perigo, os riscos devem ser avaliados e mitigados. Conforme discutido na seção 5.1, uma revisão completa dos possíveis perigos deve ser baseada em um conhecimento preciso do processo. Cada recomendação feita pela(s) equipe(s) de análise de riscos deve ser formalmente ou endereçado pela implementação da

recomendação ou pela rejeição e, conseqüentemente, aceitação do risco. A justificativa para a rejeição ou aceitação do risco deve ser documentada.

5.2.2 Práticas de avaliação de riscos térmicos das companhias envolvidas

De acordo com CSB (2023), à época do acidente, nenhuma das três empresas (Optima Belle, RCI e Clearon) tinha uma política ou prática formalizada para avaliar as propriedades térmicas ou reativas.

Quando questionada, Optima Belle citou o programa de gestão da segurança de processos de sua empresa e o uso de *Process Hazard Analysis* (PHA), em tradução livre “análises de riscos de processos”, e afirmou:

"Como prática corporativa ao introduzir um novo processo de produção por encomenda, a Optima Belle identifica possíveis riscos de reatividade química e térmica das substâncias químicas a serem utilizadas. Além de confiar nos dados e informações do cliente/fabricante (por exemplo, o pacote de transferência de tecnologia), especificações, orientações, participação e direcionamento, a Optima Belle utiliza uma PHA (Checklist ou HazOp) para orientar sua avaliação dos possíveis riscos do processo".

Já a Clearon explicou que a empresa possui um sistema de gestão de segurança de processos em vigor, e várias políticas relacionadas à segurança de suas operações, utilizando a metodologia de operabilidade e perigosidade para avaliar pontos específicos ao longo de seu processo.

5.2.3 Lacunas de avaliação de reatividade por parte das companhias envolvidas

O CSB (2023) identificou três lacunas de avaliação de reatividade das substâncias por parte da Optima Belle, Clearon e RCI. São elas: (i) não utilização de ferramentas publicamente disponíveis para análise de riscos reativos, (ii) oportunidades mal aproveitadas para desenho de processos intrinsecamente mais seguros, e (iii) a crença, por parte da Optima Belle, de que a decomposição do NaDCC dihidratado não era um cenário crível. Abaixo, detalha-se cada uma delas.

A primeira lacuna é a não utilização de ferramentas para análise de riscos reativos disponíveis publicamente. Como visto na seção anterior, uma indústria química pode utilizar diversas ferramentas para identificar e avaliar riscos potenciais de perigos reativos. Evidentemente, os recursos necessários para cada uma delas varia de acordo com a ferramenta.

Ainda assim, de acordo com CSB (2023), nenhuma das três empresas utilizou alguma das ferramentas de análise térmica e de reatividade disponíveis. Após o acidente, a Clearon

entregou dados de decomposição do CDB-56® presentes no artigo técnico de 1989 da Olin. Contudo, este documento, como já observado, não foi disponibilizado à Optima Belle no momento da contratação e da operacionalização do primeiro lote. O CSB concluiu que se as empresas tivessem realizado uma extensiva análise dos riscos térmicos, compartilhando os dados do artigo da Olin ou outras informações relevantes disponíveis publicamente, todas as partes poderiam ter entendido os riscos associados à desidratação do NaDCC dihidratado e a explosão poderia ter sido evitada.

Na segunda lacuna, de desenho de processos intrinsecamente mais seguros, o CSB (2023) discute como sistemas de gestão de segurança mais robustos na Optima Belle poderiam ter evitado o acidente. Com isso, proteger-se-ia os trabalhadores e o público dos perigos da explosão e do incêndio. Considerações de *design* intrinsecamente mais seguras para o processo de desidratação também poderiam ter sido utilizadas. Por exemplo, o livro *Designing and Operating Safe Chemical Reaction Processes* (2000) diz que:

"A importância de rotas de síntese intrinsecamente mais seguras, que incluem: substituição de processos de reação em lote por processos semi-contínuos ou contínuos reduz a quantidade de reagente presente e controlar a taxa de adição pode interromper a reação no caso de surgimento de um perigo [...]"

A terceira lacuna é sobre como a Optima Belle descredibilizou a decomposição do NaDCC dihidratado como um cenário possível. O engenheiro químico responsável pelo processo de desidratação emitiu um resumo dos perigos aos trabalhadores das três empresas. No documento, foi dito que “se permitido o escape, NCl_3 não atinge níveis críticos, e a explosão não ocorre”. Ele ainda menciona que o processo de desidratação poderia ocorrer em segurança com “apenas alguns ajustes aos procedimentos normais de operação” (CSB, 2023). Exemplos de ajustes seriam limitar a concentração de NCl_3 (a partir de vácuo e purga de nitrogênio), resfriar a operação para menos de 50°C antes de finalizar o procedimento e minimizar a degradação do produto e a formação de NCl_3 a partir da secagem na menor temperatura possível. Logo, a formação de NCl_3 não era considerada provável dado estes “poucos ajustes” ao procedimento de operação da primeira batelada de CDB-56®. Contudo, um problema nesta abordagem, por exemplo, é a quantidade de nitrogênio para purga nunca ter sido determinada. Além disso, o engenheiro também havia dito ao CSB que “não se via necessidade [de se fazer a purga de nitrogênio]” (CSB, 2023).

Dessa maneira, é evidente que a Optima Belle não acreditava na decomposição da matéria prima devido ao aquecimento como cenário crível. O embasamento técnico para esta afirmação era o fato da temperatura do vapor d'água utilizado para aquecer a substância ser cerca de 100°C menor que a temperatura que se acreditava ser a de decomposição (240°C -

250°C). Todavia, como observado anteriormente, o NaDCC dihidratado pode decompor em temperaturas muito menores sob certas condições. Resultados obtidos com testes após o acidente mostraram que o material pode iniciar uma reação exotérmica descontrolada (indicativo de decomposição descontrolada) a aproximadamente 81°C quando aquecido em um recipiente fechado (CSB, 2023).

Assim, o CSB (2023) concluiu que:

- Nenhuma das partes envolvidas na contratação da desidratação do CDB-56® avaliou os riscos da operação ou do material (revisão bibliográfica inadequada, não identificação da decomposição da matéria prima como cenário possível e não utilização de métodos de avaliação de riscos disponíveis publicamente);
- A avaliação de riscos ineficiente da Optima Belle foi, em parte, por falta de conhecimento adequado do processo;
- Ainda que a Clearon não tenha enviado todas as informações relevantes acerca da decomposição do CDB-56®, a Optima Belle também não procurou adequadamente informações que pudessem levar a uma avaliação de riscos apropriada;
- O uso efetivo de métodos disponíveis publicamente para avaliação de riscos térmicos ou de dados comprados pela Clearon poderia ter levado a uma análise mais robusta e efetiva dos riscos da operação de desidratação, podendo ter evitado o acidente.

Como recomendação, o CSB (2023) recomendou à Optima Belle desenvolver e implementar um programa formal de gestão e avaliação de riscos reativos e térmicos. Este programa deveria estar em conformidade com as diretrizes da indústria, disponíveis em publicações de entidades como CCPS, OSHA, EPA e outras. O programa deveria pelo menos identificar o processo que a empresa utilizará para gerir riscos de reatividade química, recursos para coletá-los e avaliá-los e etapas para determinar como e quando testar a reatividade química da substância, requerimentos de documentação e treinamento.

5.3 FALHAS EM RELAÇÃO À SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS E AO DESIGN DE PROCESSO

Na indústria de processos químicos, a pesquisa científica sobre erros de design foi muito negligenciada até recentemente (Bourrier, 2005). De acordo com Busby (1998), havia uma dificuldade de se receber feedback construtivo. Os criadores dos processos não eram capazes de aprender a partir do pouco feedback que recebiam. Os motivos para esta dificuldade são diversos, mas credita-se principalmente a questões legais, imagem da companhia e motivos pessoais (KIDAM; HURME, 2012).

De acordo com o CCPS (2000), em um acordo contratual de terceirização de produção, como o que ocorreu entre Clearon e Optima Belle, ambas as partes devem se responsabilizar por escolher o equipamento adequado para o processo. Os equipamentos selecionados e o processo desenvolvido para a desidratação de CDB-56® não puderam prevenir a decomposição da substância e a consequente explosão do secador. Esta seção objetiva descrever as falhas na seleção de equipamentos e no desenvolvimento do processo.

5.3.1 Tecnologia do secador utilizado para converter CDB-56® em CDB-63®

Inicialmente a Clearon solicitou à RCI um secador de leito fluidizado para o processo com o sólido granulado clorado. Contudo, o CSB (2023) não encontrou evidências de que uma avaliação minuciosa tenha sido conduzida para substituir o equipamento especificado na solicitação por uma tecnologia de secagem alternativa, como um secador rotativo, para a desidratação do CDB-56®.

Nenhuma das três partes levantou preocupações de processo ou operacionais quanto ao uso de uma tecnologia de secagem diferente. A Clearon concordou, em última instância, com a proposta de usar um secador rotativo. No entanto, algumas preocupações com a construção do equipamento foram levantadas entre as partes. Como consequência, as empresas se reuniram, fizeram uma visita ao local e conduziram um estudo de compatibilidade, que gerou um consenso entre as partes.

O CCPS publicou em 2012 o *Guidelines for Engineering Design for Process Safety*. Há uma seção de design de equipamentos, com uma subseção para “secadores”. Nela, estuda-se acidentes passados envolvendo este equipamento, inclusive envolvendo reações exotérmicas que ocorreram com sobreaquecimento de material. Dentre as lições aprendidas, menciona-se (i) levar em consideração a utilização do secador que melhor controla a temperatura e (ii) a necessidade de entender a sensibilidade de temperatura do material a ser seco, bem como conhecer as características do meio de aquecimento utilizado.

Assim, o CSB (2023) consultou um expert com muitos anos de experiência na indústria de compostos de isocianurato clorado. Ele explicou que o NaDCC é um isolante relativamente bom, com uma condutividade térmica semelhante à borracha. Portanto, um leito estacionário poderia criar gradientes de temperatura significativos dentro do produto se houver aquecimento localizado. Dessa maneira, o CSB (2023) concluiu que:

- Um sensor de temperatura teria dificuldades de detectar um ponto de aquecimento que não esteja na vizinhança imediata do sensor em um leito estacionário; e

- O uso da tecnologia e equipamentos auxiliares adequados, que minimiza o potencial de sobreaquecimento, criando pontos de calor ou uma reação de decomposição do NaDCC dihidratado poderiam ter prevenido o acidente.

No caso da Optima Belle, o CSB (2023) identificou algumas diferenças chaves entre o secador rotativo usado pela empresa e o secador de leito fluidizado utilizado anteriormente pela Clearon. São elas:

1. Quando o secador rotativo estava parado, um grande volume do material era compactado. Como estudos anteriores descobriram, a configuração e a massa do CDB-56® armazenado afetam suas propriedades térmicas, inclusive a temperatura de decomposição;
2. Os secadores de leito fluidizado promovem altas taxas de transferência de calor e massa e uniformidade de temperatura e composição em todo o processo (COUPER; PENNEY; FAIR; WALAS, 2012), em contraste com o secador rotativo, no qual a temperatura pode ser menos uniforme; e
3. O secador de leito fluidizado operava a pressão atmosférica e o secador rotativo era um tanque pressurizado. Quaisquer gases produzidos no secador de leito fluidizado seriam varridos para fora do equipamento para a atmosfera. Porém, num secador rotativo com um sistema de alívio de pressão subdimensionado, haveria uma explosão do sistema caso houvesse uma decomposição descontrolada. Além disso, se a taxa de produção do gás for alta o suficiente, o fluxo dele poderá levar o produto para o sistema de ventilação, onde o produto poderá restringir ou bloquear o fluxo de gás.

Pode-se observar, dessa maneira, que as diferenças de *design* entre o secador de leito fluidizado e o secador rotativo, bem como suas consequências no material a ser seco não são desprezíveis. Ainda assim, as empresas não as avaliaram de maneira exaustiva.

Como recomendação, o CSB (2023) propôs à Optima Belle desenvolver e implementar um programa por escrito para o design de processos e seleção de equipamentos de produção terceirizada. Este programa poderia usar os documentos *Guidelines for Risk Based Process Safety* e *Guidelines for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations* como guias na escrita. Assim, poder-se-ia garantir um design adequado para qualquer nova contratação de terceirização. O material ainda deveria incorporar informações obtidas pela Optima Belle quanto à análise térmica e reativa de perigos para garantir que todos os perigos químicos foram inteiramente entendidos e controlados.

O CSB também emitiu uma recomendação à Clearon para desenvolver e implementar um programa formal para design de processos e requerimentos/especificações de equipamentos

ao terceirizar a produção. O objetivo é garantir que o design do equipamento seja adequado para qualquer novo processo, operação ou produto.

5.3.2 Design da camisa de resfriamento e aquecimento

Substâncias reativas podem ser mais sensíveis à temperatura que a outros parâmetros, como pressão, por exemplo (JOHNSON; RUDY; UNWIN, 2003). O NaDCC dihidratado é um desses casos. Ele requer controle de temperatura para evitar criar condições de elevada reatividade.

Coker, em seu livro *Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design*, menciona que a temperatura crítica, i.e., temperatura na qual o calor liberada pela reação não pode mais ser completamente removido, resultando em uma reação descontrolada, depende das: (i) taxa de geração de calor e (ii) taxa de resfriamento. Ambas estão intimamente relacionadas à dimensão do equipamento. Com o aumento do equipamento, o volume aumenta em uma taxa maior que a área superficial (COKER, 2001).

Dessa maneira, o CSB (2023) concluiu que o tamanho e a proporção de área pelo volume do equipamento devem ser considerados quando avaliando a geração de calor e a taxa de resfriamento envolvendo materiais reativos. O objetivo é assegurar que o material será suficientemente resfriado, prevenindo, assim, uma reação descontrolada.

Contudo, o CSB (2023) não identificou nenhuma evidência de que a Optima Belle calculou o resfriamento necessário no caso de geração de calor proveniente de uma reação de decomposição do CDB-56® no secador. A empresa não tinha (ou buscou ter) os dados de calorimetria necessários da substância para realizar os cálculos. Além do mais, a empresa não considerava uma reação de decomposição da matéria prima do secador como um cenário possível de acontecer.

Conforme descrito na seção 3.4.5, o suprimento de vapor da Optima Belle podia aquecer o secador e seu conteúdo interno a uma temperatura máxima de aproximadamente 130°C. Acreditava-se que essa temperatura fosse suficientemente alta para liberar a água de hidratação e reduzir o teor de umidade nominal do CDB-56®. Ela ainda seria suficientemente baixa para evitar a temperatura de decomposição publicada de 240°C a 250°C. Além disso, o procedimento prescrito da Optima Belle para o processo de desidratação do CDB-56® também dava instruções caso a rotação do secador de cone duplo parasse. Neste caso, o vapor deveria ser desligado imediatamente para remover o calor do recipiente. Adicionalmente, a gerência deveria ser procurada para avaliar a aplicação de água na camisa do secador. Ademais, o Pacote

de Tecnologia da Clearon advertiu a Optima Belle para evitar a criação de pontos localizados de calor dentro do secador durante a desidratação (CSB, 2023).

Para controlar a temperatura interna do secador, vapor, água de resfriamento ou nitrogênio podiam ser injetados usando válvulas manuais. É importante ressaltar que vapor deveria ser removido da camisa do secador antes de se aplicar a água de resfriamento. Isto era feito pela purga de nitrogênio. O vapor, a água de resfriamento ou a alimentação de nitrogênio para o revestimento era, automaticamente regulado a partir da sala de controle por meio de um sistema de controle distribuído.

O sistema de resfriamento e aquecimento da camisa não continha: (i) alarmes de elevação rápida de temperatura, (ii) alarmes de taxa de mudança de temperatura ao longo do tempo, ou (iii) intertravamentos para controlar a temperatura do secador. Por volta das 21:40 do dia do acidente, a válvula de controle para a purga de nitrogênio do secador havia sido aberta para depois permitir a injeção da água de resfriamento, como indicava o procedimento. Ao mesmo tempo, um rápido aumento da temperatura interna continuou até ocorrer a explosão. Não há evidências suficientes para determinar se a água chegou a ser aplicada à camisa antes da explosão (CSB, 2023).

O CSB (2023) questionou a Optima Belle se havia alguma ação de controle automática ou intertravamento em ação para prevenir uma ação de decomposição descontrolada da matéria prima na primeira batelada. Segundo a empresa, dadas as informações de perigo térmico providas pela Clearon, a contratada implementou um processo intrinsecamente seguro contra o sobreaquecimento de CDB-56®, já que ele ficava pelo menos 100°C abaixo da temperatura mínima de decomposição identificada pela Clearon de 240°C. Havia um bloqueio mecânico (um regulador de pressão de vapor) para prevenir o sobreaquecimento do material para além das temperaturas estabelecidas pela contratante. Também havia um alarme no sistema de controle distribuído caso o secador parasse de rotacionar. Assim, o operador poderia ser notificado para parar o aquecimento.

Dessa maneira, o CSB (2023) concluiu que:

- Optima Belle acreditava incorretamente que tinha desenvolvido um processo intrinsecamente seguro. Pensavam ser improvável atingir as condições que levariam à decomposição do CDB-56®, com base em sua compreensão inadequada da temperatura de decomposição térmica do CDB-56®. Como resultado, os sistemas existentes de aquecimento e resfriamento da Optima Belle não conseguiram evitar a decomposição do CDB-56® conforme projetado;
- O projeto do sistema de resfriamento da camisa do secador da Optima Belle provavelmente não era dimensionado adequadamente para controlar uma decomposição do CDB-56®;

- O projeto do sistema de aquecimento e resfriamento do camisa do secador da Optima Belle não possuía controles automáticos de engenharia para monitorar e controlar adequadamente a temperatura do secador durante a desidratação do CDB-56®;
- Se as empresas tivessem compreendido melhor as condições em que o CDB-56® poderia se decompor perigosamente, a Optima Belle poderia ter implementado melhores prevenções para impedir que o material atingisse sua temperatura de decomposição.

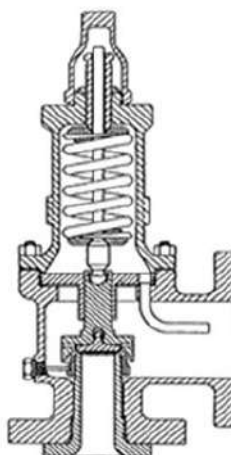
Como recomendação, o CSB (2023) propôs à Optima Belle desenvolver e implementar um programa por escrito para o design de processos e seleção de equipamentos de produção terceirizada. Este programa poderia usar os documentos *Guidelines for Risk Based Process Safety* e *Guidelines for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations* como guias na escrita. Assim, poder-se-ia garantir um design adequado para qualquer nova contratação de terceirização. O material ainda deveria incorporar informações obtidas pela Optima Belle quanto à análise térmica e reativa de perigos para garantir que todos os perigos químicos foram inteiramente entendidos e controlados.

5.3.3 Dispositivos de segurança de alívio de pressão

A Seção VIII do *Boiler and Pressure Vessel Code* (BPVC) da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME) requer que todos os tanques pressurizados estejam devidamente protegidos contra sobrecarga (ASME, 2019). *Pressure Safety Valves* (PSV), em tradução livre “válvulas de pressão de segurança”, e discos de ruptura são os dispositivos de alívio mais comumente utilizados para este tipo de proteção (PARRY, 1992). Eles são projetados para o alívio automático de pressão excessiva.

A válvula de segurança de mola carregada, uma válvula de segurança convencional (Figura 5.2), é o dispositivo de alívio mais amplamente utilizado na indústria de processamento químico para proteção contra sobrecarga (PARRY, 1992). Geralmente, ela é equipada com um bico completo abaixo do assento, uma capa ao redor da mola e anéis de ajuste. Um disco de ruptura é um dispositivo não reciclável e deve ser substituído após se romper. As válvulas de segurança e discos de ruptura devem ser cuidadosamente dimensionados para permitir o fluxo máximo gerado por condições de emergência. O secador de cone duplo foi equipado com uma PSV de 3 polegadas e discos de ruptura de 3 polegadas em série.

Figura 5.2 – Válvula de pressão de segurança



Fonte: Parry, 1992

O BPVC da ASME também requer que o usuário identifique todos os cenários de sobrepresurização. Deve estabelecer como o equipamento será protegido para cada cenário e garantir que a proteção contra sobrepresurização exigida seja instalada adequadamente antes da operação inicial.

Para casos em que há a possibilidade de uma reação descontrolada, demanda-se, frequentemente, um dispositivo de alívio consideravelmente maior do que outros cenários de alívio podem requerer. A base do projeto de alívio de pressão deve incluir uma revisão de todos os caminhos de reação intencionais e não intencionais, independentemente da probabilidade deles (CCPS, 2012). O *Standard 521* do *American Petroleum Institute* (API) para Sistemas de Alívio de Pressão e Despressurização também especifica requisitos e orientações na análise das causas da sobrepresurização e na determinação das taxas de alívio para condições ou ocorrências comuns, incluindo reações químicas (API, 2020).

As orientações das boas práticas da indústria, como as contidas na Seção VIII do BPVC da ASME, no padrão API 521 e em publicações do CCPS, todas teriam exigido ou sugerido que a Optima Belle considerasse um caso de alívio de reação de decomposição de NaDCC dihidratado. Isto seria necessário mesmo se a liderança técnica considerasse o caso como pouco provável, como ocorreu neste acidente. No entanto, a Seção VIII do BPVC da ASME não é um requisito regulatório obrigatório para o estado de West Virginia, nos EUA (CSB, 2009; CSB, 2023).

5.3.3.1 *Preliminary Hazard Analysis* (PHA) da desidratação de CDB-56® da Optima Belle

Apesar do NaDCC dihidratado não ser abrangido tanto pelos padrões PSM da OSHA, como pelas regras RMP da EPA, a Optima Belle voluntariamente conduziu uma análise

preliminar de riscos para a desidratação de CDB-56®. Isso ocorreu pois a empresa possui um procedimento de gestão de risco de processos que obriga novos processos serem avaliados antes da operação para determinar se serão abrangidos pelos padrões PSM.

Havia um item da PHA para revisar o tamanho da PSV para o caso de reação de decomposição auto acelerada. Como é sabido, o secador de cone duplo rotativo e suas peças foram originalmente projetados para aplicação em outros processos. A Optima Belle informou ao CSB (2023) que o único cenário crível de sobrepressurização considerado foi a geração de vapor. Ao avaliá-lo, concluíram que este caso não resultaria no atingimento da pressão de 30 psig máxima da PSV. O líder técnico da empresa para o processo de desidratação também comentou que um caso de incêndio externo para esta substância não foi considerado crível dado que não havia substâncias inflamáveis no prédio.

Os estudos de decomposição do CDB-63® fornecidos pela Clearon à Optima Belle continham informações sobre a produção de gases que a Optima Belle poderia ter usado para conduzir uma análise preliminar do sistema de alívio de pressão existente. Os dados poderiam ter sido suficientes para analisar um cenário de decomposição do CDB-63® (o produto final), mas não teriam sido suficientes para um cenário de decomposição do CDB-56® (a matéria prima). Isto se dá pois os dois compostos têm diferentes taxas máximas de geração de pressão e diferentes temperaturas em que ocorre a máxima geração de pressão (conforme apresentado no quadro 5.2). Para uma empresa exercer diligência suficiente no projeto de um processo envolvendo esses produtos químicos, dados relevantes para ambos os produtos seriam necessários. Como visto, eles não foram apresentados à época do acidente.

A Optima Belle não documentou seu processo de revisão da PSV para a desidratação do CDB-56®. Teoricamente deveria incluir os cálculos de dimensionamento existentes e avaliações de cenários de sobrepressurização. A empresa contratada também não realizou novos cálculos de dimensionamento de PSV para a desidratação do CDB-56®.

De acordo com o CSB (2023), o engenheiro responsável pelo processo de desidratação da Optima Belle conversou verbalmente com outro membro da equipe sobre a revisão do dimensionamento da PSV, uma atividade necessária durante a revisão de segurança antes do início das operações. Após a discussão, a ação foi considerada concluída. Como demonstrado pelo incidente, a PSV de 3 polegadas foi inadequada para evitar a sobrepressurização do secador que explodiu durante a reação de decomposição do CDB-56®.

O CSB (2023) avaliou o dimensionamento da PSV do secador de cone duplo para o processo de desidratação em lotes usando a razão de descarga recomendada e a pressão de descarga de um estudo de decomposição térmica do diclorocianurato de potássio de 1961 citado

no Pacote de Tecnologia fornecido à Optima Belle. Usando os critérios do estudo, notou-se que um disco de ruptura de 30 polegadas provavelmente teria sido necessário para proteger o secador da sobrepressurização, o que seria impraticável de instalar no recipiente cônico de cerca de 2,4 metros de diâmetro com uma escotilha de cerca de 61 centímetros e uma saída de 31 centímetros. O CSB também concluiu que se a Optima Belle tivesse conduzido essa avaliação ou avaliações preliminares similares de sobrepressurização, provavelmente teriam determinado que o secador de cone duplo não era uma seleção prática de equipamento para o processo de desidratação.

Assim, o CSB (2023) concluiu que:

- Optima Belle acreditava incorretamente que a geração de vapor era o único risco credível de sobrepressurização aplicável ao secador durante a desidratação do CDB-56®. Ela acreditava que a decomposição não era possível usando o meio de aquecimento selecionado para o processo de desidratação. Como resultado, não foi realizada nenhuma análise para determinar o tamanho necessário da PSV para prevenir a sobrepressurização durante uma reação de decomposição auto acelerada do CDB-56®.
- A avaliação inadequada da PSV pela Optima Belle foi consequência de informações insuficientes e compreensão incompleta da temperatura de decomposição e das características de decomposição do CDB-56®. A empresa também falhou em buscar informações adicionais necessárias para conduzir a avaliação da PSV.
- Se a Optima Belle, Clearon e RCI tivessem melhor compreensão das condições em que o CDB-56® poderia decompor de maneira perigosa, a Optima Belle poderia ter avaliado e identificado proteções adequadas para evitar a pressão excessivamente alta experimentada no secador de duplo cone que levou à sua falha.
- A Optima Belle deixou de fechar adequadamente um item de ação da PHA para revisar o dimensionamento do alívio de pressão para uma reação de decomposição auto acelerada.

5.3.4 Escala da operação de batelada

O controle de reações químicas é crítico para operar de forma segura na indústria de fabricação química (COKER, 2001). A literatura publicada, incluindo o documento do CCPS *Essential Practices for Managing Chemical Reactivity Hazards*, em tradução livre “Práticas Essenciais para Gerenciar Perigos de Reatividade Química”, fornece orientação sobre como prevenir reações químicas descontroladas. Ela explica que testes em pequena escala podem ser realizados para indicar se uma reação é esperada e que se deve ter cautela especial ao ampliar reações químicas para a escala de fabricação, já que uma "reação, que é inócua em escala

laboratorial ou de planta piloto, pode ser desastrosa em uma planta de fabricação em escala total" e deve ser controlada (COKER, 2001).

Fabricantes terceirizados, como a Optima Belle, devem usar as informações de segurança de processo fornecidas pelo cliente. Além disso, devem ter seus próprios processos de revisão de riscos para avaliar novos produtos químicos e produtos para determinar se o acordo de terceirização pode produzir o produto com segurança. Um artigo de 2017 na publicação *Chemical Engineering Progress* da AIChE, intitulado *Ensuring Process Safety in Batch Tolling* recomenda que instalações terceirizadas: (i) avaliem as informações de segurança dos produtos químicos envolvidos para determinar se eles podem ser usados com segurança na escala laboratorial, (ii) examinem o processo na escala laboratorial para determinar se o processo pode ser ampliado para um lote de teste ou produção completa, e (iii) envolvam pessoal de engenharia de segurança e processo para determinar se o processo pode ser conduzido com segurança na unidade industrial contratada em escala total com o equipamento existente (SEGGEMAN, 2017).

Nenhuma das três empresas realizou testes em pequena ou grande escala para desidratar o CDB-56® usando o processo de secador rotativo. Ao invés disso, a primeira tentativa de usar o método de secagem rotativa para desidratar o CDB-56® foi conduzida em escala de produção, com cerca de 4 toneladas de material. Vale ressaltar que a proposta da RCI assinada pela Clearon afirmava: "Os testes de secagem serão usados para determinar as configurações finais de vapor/temperatura e os tempos de ciclo resultantes".

O CSB (2023) concluiu que Clearon e Optima Belle basicamente experimentaram um novo método para remover a água de hidratação do CDB-56® em escala total de produção sem primeiro experimentar em escalas laboratoriais e piloto, e o resultado foi uma explosão catastrófica. O CSB também concluiu que se estudos em escala tivessem sido conduzidos, é provável que as empresas tivessem obtido dados adicionais de estabilidade térmica do NaDCC dihidratado, informações de reatividade e conhecimento do processo antes de executar o primeiro lote em escala de produção, o que poderia ter levado a mudanças no processo. Isto poderia potencialmente ter prevenido a reação de decomposição e a explosão.

O CSB (2023) emitiu uma recomendação à Optima Belle para desenvolver e implementar um programa escrito para o design de processos terceirizados e seleção de equipamentos para garantir que novos processos sejam avaliados quanto aos riscos potenciais do processo na escala laboratorial e/ou piloto antes da produção em escala total.

5.4 FALHAS EM RELAÇÃO À TERCEIRIZAÇÃO DE PRODUÇÃO ENVOLVENDO MATERIAIS PERIGOSOS

Clearon é a fabricante do CDB-56®. Ela contratou a Optima Belle, por meio da RCI, para desidratar cerca de quatro lotes de aproximadamente 4 toneladas de CDB-56® nas instalações da Optima Belle para produzir CDB-63®.

As empresas frequentemente aumentam a produção interna terceirizando processos químicos e operações de destilação, secagem, formulação, mistura e embalagem. Além disso, os fabricantes de produtos químicos frequentemente firmam acordos com empresas externas para processar materiais de grau industrial em produtos comerciais. Esses acordos são chamados de contratos de terceirização (“tolling”, em inglês). Embora a maioria desses serviços de *tolling* prossiga sem acidentes, não estão isentos de riscos. O plano de fabricação da Optima Belle foi o primeiro acordo de terceirização entre as três empresas e a primeira vez que a Optima Belle tentou desidratar o NaDCC dihidratado.

É importante observar que a indústria possui diretrizes de recomendação para uma contratação segura e efetiva de serviços terceirizados, como o documento *Guidance for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations* (CCPS, 2000). Além disso, vale ressaltar que terceirizar a produção ou o processamento de materiais perigosos não terceiriza a responsabilidade da segurança dos processos. Uma segurança efetiva de processos e a prevenção de incidentes catastróficos são responsabilidades que deveriam ser compartilhadas por todas as partes envolvidas no momento da contratação.

5.4.1 Gerenciamento de conhecimento de processo em operações terceirizadas

Pelas diretrizes do CCPS, normalmente a contratante (Clearon) prepara um pacote de tecnologia para a empresa contratada (Optima Belle). O pacote inclui especificações como: (i) dados relacionados à saúde, segurança e meio ambiente, (ii) informações sobre o processo químico, (iii) especificações da matéria prima e do produto final, e (iv) características dos rejeitos e instruções para despejo. O CCPS recomenda que o pacote esteja pelo menos parcialmente desenvolvido antes da pesquisa ativa por uma terceirizada (CCPS, 2000).

Como visto anteriormente na seção 5.1.2, o pacote de tecnologia final da Clearon não continha diversos componentes recomendados pelo CCPS. Desta maneira, o CSB (2023) concluiu que a Clearon não seguiu as melhores práticas da indústria ao desenvolver seu pacote de tecnologia. Isto deveria ocorrer independente do fato da Clearon, conforme assertou ao CSB, não preparar este tipo de documento frequentemente. Suplementarmente o documento foi

compilado por um único funcionário. Assim, logo se observou que a Clearon não possuía processos ou procedimentos formalizados que abrangiam a criação e manutenção deste tipo de material ou a transmissão desse pacote para parceiros de fabricação por contrato.

Isto não deveria ocorrer, dado que o desenvolvimento deste tipo de material poderia ser aprendido a partir de acidentes anteriores. Em abril de 1995 (aproximadamente três anos após a promulgação do padrão PSM pela OSHA, e aproximadamente um ano antes da promulgação da regra RMP pela EPA), a instalação da Napp Technologies em Lodi, Nova Jersey, EUA, sofreu uma explosão e incêndio que resultaram em cinco mortes. O incidente também resultou em danos significativos à propriedade, evacuação pública e contaminação do rio Saddle com água de combate a incêndios contaminada por produtos químicos. A EPA e a OSHA conduziram uma investigação conjunta do acidente e divulgaram o relatório em outubro de 1997 (OSHA, 1997). Este acidente, infelizmente, possui diversas circunstâncias comuns, fatores causais e lições aprendidas com o acidente de Optima Belle. Logo, é possível observar que a nenhuma das três empresas buscou investigar acidentes passados para garantir que as lições aprendidas foram todas implementadas no processo.

5.4.2 Identificação de perigos e análise de riscos em operações terceirizadas

As diretrizes de terceirização do CCPS também possuem recomendações para as partes conduzirem PHAs do projeto. O CCPS diz, em tradução livre, que:

“As análises de perigos do processo (PHA) são realizadas principalmente para reduzir perdas decorrentes de incidentes que podem ferir pessoal da planta ou o público, danificar ou destruir edifícios, equipamentos e materiais. Existem outras perdas menos mensuráveis que ocorrem após os incidentes. A reputação das empresas e da indústria e o efeito sobre clientes e o público estão em jogo. Para cada nova situação de fabricação por terceiros contratados, uma análise de perigos de processo deve ser conduzida usando uma das várias metodologias aceitáveis comumente utilizadas (CCPS, 2000).”

Para o CCPS (2000), a PHA é crucial para entender os perigos químicos e de processo. Ela é uma mandatória para substâncias reguladas. Todas as partes precisam estipular suas responsabilidades em diferentes assuntos, como, por exemplo, designar um líder e os membros para a PHA, quais metodologias de PHA serão aceitas, atualização e preparação das informações de seguranças de processo etc.

As diretrizes do CCPS recomendam a implementação de boas práticas de segurança mesmo se um projeto com uma terceirizada não for abrangido por alguma regulação. Listam, inclusive, ações a serem tomadas caso o processo ou as substâncias envolvidas não sejam reguladas pelo PSM ou pela RMP (CCPS, 2000).

Segundo o CSB (2023), a Optima Belle conduziu uma PHA do seu processo de desidratação seguindo as recomendações da indústria. No entanto, a PHA foi baseada em uma compreensão inadequada dos perigos do NaDCC dihidratado (CDB-56®). Em última instância, a PHA falhou em identificar ou mesmo considerar o potencial de superaquecimento do material levando a uma decomposição auto acelerada nas condições operacionais pretendidas. Além disso, a Clearon não participou ativamente da PHA, contrariando as boas práticas da indústria.

Após a etapa de análise, o CCPS recomenda uma atenção especial durante o aumento das características críticas do processo previamente planejadas nos testes piloto. Almeja-se garantir que as mudanças de ordem de magnitude no tamanho do recipiente e na quantidade de materiais que podem ter sido projetadas no novo processo sejam totalmente consideradas e avaliadas cuidadosamente. Ao ampliar processos exotérmicos ou de alta temperatura, a remoção de calor deve ser considerada, por questões de segurança. O projeto do processo piloto ou de bancada pode ser comprometido por uma menor relação entre superfície e volume no recipiente de reação. Isso pode ser um fator chave durante a seleção de equipamentos para o *scale-up* do projeto (CCPS, 2000).

No entanto, mais uma vez contrariando as diretrizes da indústria, a Clearon e a Optima Belle nunca realizaram estudos de *scale-up* para a desidratação de CDB-56® em um recipiente sob pressão. Em vez disso, a Clearon buscou produção “imediate” e em “larga escala”. É verdade que essas palavras estavam ligadas à solicitação inicial da Clearon para produção por meio de um secador de leito fluidizado. Contudo, em última análise, a Clearon concordou em prosseguir com o secador rotativo de duplo cone da Optima Belle na mesma escala de produção que originalmente buscava por meio de um secador de leito fluidizado (CSB, 2023). Isto se mostrou um erro, dado o acidente.

Buscando entender a motivação da Clearon para ignorar algumas dessas análises, o CSB entrevistou um gerente de implementação/melhoria de projetos da Clearon. Ele informou que "durante a pandemia, havia uma necessidade de produtos do tipo desinfetante... havia uma necessidade comercial para o [CDB-63®]". Outro líder da Clearon compartilhou que o CDB-63® estava na lista da EPA de desinfetantes para COVID-19, afirmando: "[a empresa] já o havia produzido no passado e estava procurando realizar testes e reiniciar a produção devido ao seu potencial como desinfetante" (CSB, 2023).

5.4.3 Outras responsabilidades das empresas envolvidas na terceirização

As diretrizes de melhores práticas do CCPS recomendam que o cliente garanta que a prestadora de serviços (Optima Belle) tenha programas de treinamento alinhados com as

diretrizes de segurança de processo e gerenciamento de riscos ambientais (CCPS, 2000). Contudo, o CSB não encontrou evidências que indiquem que ou Clearon ou RCI tenham revisado o programa de treinamento de funcionários da Optima Belle. Também não foi possível confirmar se houve solicitação de comprovação de treinamento adequado relacionado ao NaDCC dihidratado (CSB, 2023).

As diretrizes sugerem que o contratante conduza auditorias contínuas das operações da contratada para verificar a conformidade com os planos e obrigações acordados (CCPS, 2000). Apesar da duração prolongada e dos problemas emergentes de qualidade do produto durante o primeiro lote de desidratação, a supervisão técnica da Clearon não continuou no local. Conforme detalhado na seção 4.5.2, vários representantes da Clearon, incluindo o líder técnico para a desidratação do CDB-56® na Optima Belle, estavam presentes até aproximadamente às 17h30 do dia 8 de dezembro de 2020, dia do acidente. O líder técnico da Clearon mencionou que, embora as coisas estivessem progredindo um pouco mais lentamente do que o esperado para o primeiro lote de teste, estavam dentro das expectativas. Houve uma discussão sobre permanecer no local, mas foi acordado estar disponível por telefone (CSB, 2023).

5.4.4 Conclusões quanto à terceirização

O CSB (2023) concluiu que:

- A Clearon e a Optima Belle não seguiram adequadamente as orientações existentes da indústria sobre a condução segura das operações de prestação de serviços. Suas deficiências incluíram:
 - Troca inadequada de conhecimento do processo entre as partes envolvidas na prestação de serviços;
 - Envolvimento mútuo insuficiente na PHA;
 - Compreensão, caracterização e análise inadequadas dos perigos do NaDCC dihidratado e da operação de desidratação; e
 - Ausência de avaliação da mudança de tecnologia de um secador atmosférico de leito fluidizado para um secador rotativo pressurizado.
- Se a Clearon e a Optima Belle tivessem seguido as boas práticas da indústria para operações de prestação de serviços, este incidente poderia ter sido evitado.

Como empresa intermediadora do contrato de terceirização e gerente do projeto, servindo a ambas Clearon, empresa contratante, e Optima Belle, a contratada, RCI poderia ter sido de grande valia. RCI poderia ter atuado garantindo que ambas companhias estivessem cientes e seguindo as recomendações da indústria. Ao invés disso, RCI apenas garantiu que a

contratada recebesse o pacote de tecnologia da Clearon. De igual modo, o CSB não encontrou nenhuma evidência de que a RCI participou da revisão ou verificou se: (i) o pacote de tecnologia estava adequado, (ii) a PHA estava sendo bem conduzida, ou (iii) quaisquer outras atividades terceirizadas estavam adequadas (CSB, 2023).

Assim, o CSB (2023) concluiu que:

- Empresas intermediadoras de acordos de terceirização, como a RCI, podem desempenhar uma função importante entre as partes. RCI poderia ter garantido que as empresas estivessem cientes e aderissem às boas práticas da indústria de prestação de serviços;
- Estas empresas podem contribuir para disseminar o conhecimento das boas práticas da indústria de prestação de serviços, pois provavelmente participam de muitos acordos de prestação de serviços entre diversas empresas

O CSB (2023) recomendou a todas às três empresas a desenvolver e implementar um programa formal para o desenvolvimento de acordos de terceirização usando recursos como, por exemplo, o documento *Guidelines for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations* e *Guidelines for Risk Based Process Safety*, ambos do CCPS. Deve-se garantir que o programa aborde pelo menos os seguintes tópicos:

1. Identificação dos papéis e responsabilidades de todas as partes envolvidas, incluindo o cliente, a empresa contratada e qualquer outro fornecedor de serviços técnicos, para todas as fases do acordo proposto;
2. Apenas para a contratante e a contratada: avaliação dos requisitos/especificações de equipamentos para garantir que sejam adequados para a operação pretendida; e
3. Participação de todas as partes no desenvolvimento do processo de prestação de serviços, incluindo PHA e planejamento de emergência, e as etapas apropriadas das fases de pré-planejamento, pré-inicialização e produção.

5.5 FALHAS EM RELAÇÃO À COBERTURA REGULATÓRIA DE SUBSTÂNCIAS PERIGOSAS REATIVAS

O PSM da OSHA foi promulgado em 1992 e RMP da EPA em 1996. Ambas objetivavam gerenciar a segurança de processos químicos e ajudar a prevenir maiores incidentes. Juntas, obrigam as unidades fábricas a gerenciar a segurança de processos para proteger trabalhadores, a sociedade e o meio ambiente. Cada regulação cobre apenas alguns químicos. O PSM cobre processos que usam materiais inflamáveis e químicos individualmente listados que apresentam uma série de riscos. Já a EPA cobre substâncias baseada em inflamabilidade e toxicidade.

Apesar de ambas regulações terem ativamente melhorado a segurança de processo para diversas indústrias de processos químicos nos EUA, elas possuem uma lacuna de cobertura grave. Estas regras não cobrem diversos químicos que poderiam desencadear reações químicas altamente perigosas. Tanto que, apesar do NaDCC dihidratado e o NaDCC poderem desencadear este tipo de reação, liberando gases tóxicos (o que aconteceu no acidente de Optima Belle), nenhum dos dois materiais está coberto por ambas regulações. Logo, a empresa contratada não era obrigada a implementar elementos básicos do sistema de gerenciamento de segurança de processos para administrar a segurança de suas operações relacionadas a essas substâncias sob as regulamentações.

OSHA e EPA utilizam, atualmente, uma lista pré-definida de químicos para identificar processos sujeitos à cobertura dessas regulamentações. O CSB (2023) identificou que essas entidades não consideraram riscos de produtos químicos reativos. Como consequência, diversos ficaram de fora, inclusive os responsáveis por este acidente.

Essa lacuna na cobertura regulatória relacionada a produtos químicos reativos e seus riscos também: (i) aponta para uma fragilidade ao depender de listas fixas de produtos químicos para determinar a cobertura regulatória, (ii) contribuiu para este incidente e (iii) contribuiu para muitos outros incidentes com produtos químicos reativos ao longo das últimas três décadas. A OSHA também recorreu à citação de empresas por violações relacionadas à segurança sob sua Cláusula de Dever Geral após incidentes envolvendo produtos químicos reativos não abrangidos pelo seu padrão PSM. Essa abordagem não é proativa e não é adequada para a prevenção de acidentes. A OSHA investigou o incidente da Optima Belle e citou a empresa por violações da Cláusula de Dever Geral da Seção 29 CFR (5)(a)(1), resultando em um total de US\$ 12.288 em penalidades (CSB, 2023).

O CSB publicou um relatório em 2002 propondo melhorias no gerenciamento de perigos reativos. Nele, analisaram 167 acidentes com químicos reativos conhecidos que ocorreram entre 1980 e 2001. No relatório, o CSB concluiu, dentre outras coisas, que as regulamentações PSM e RMP possuem lacunas de cobertura de produtos químicos reativos significativas. Esta, inclusive, se configura como a causa da avaliação inadequada dos perigos de produtos químicos em vários dos acidentes analisados (CSB, 2002).

O CSB emitiu reiteradamente diversas recomendações tanto à OSHA, como à EPA, propondo emendas em suas respectivas regulamentações para abranger, dentre outros: (i) itens importantes de segurança de processos, (ii) métodos de análise de riscos de produtos químicos reativos, e (iii) outros produtos químicos reativos que atualmente não estão presentes nas regulamentações. Contudo, nenhuma das entidades implementou estas recomendações ou

melhorou seus dispositivos para aumentar a cobertura de produtos químicos reativos desde Novembro de 2022 (CSB, 2022).

6 ANÁLISE DO ACIDENTE SOB A ÓTICA DO RISK-BASED PROCESS SAFETY (RBPS)

O processo de secagem por lotes da Optima Belle não estava sujeito à regulamentação tanto pelo PSM da OSHA, quanto pelo RPM da EPA. Ainda assim, diversos grupos da indústria emitiram orientações extensas quanto às empresas poderem adotar voluntariamente a gestão de risco de seus processos químicos perigosos. Um desses grupos é o CCPS, dentro do *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE).

Desta maneira, não havia exigência além das respectivas "obrigações gerais" dessas organizações para que a Optima Belle possuísse um sistema de gerenciamento de segurança de processo. Contudo, nada impedia qualquer uma das três empresas envolvidas no acidente de possuir sistemas de gestão em linha com o recomendado pelos diferentes grupos da indústria.

A avaliação do acidente ocorrido na instalação da Optima Belle, em Belle, nos EUA, em 2020, à luz do Sistema de Gestão RBPS, proposto pelo CCPS, visa identificar os componentes do sistema que ou não foram corretamente implementados antes do evento acidental, ou falharam por motivos desconhecidos à época. Mesmo que diversos elementos da metodologia possam ter apresentado deficiências desde o início do contrato e durante a operação de desidratação, a análise concentra-se nos principais fatores que contribuíram para o acidente de 2020. Ainda vale ressaltar que, por mais que apenas uma falha possa ter ocorrido, os elementos do RBPS estão conectados e não são mutuamente excludentes, ou seja, diversos elementos podem ter sido impactados por uma única falha.

O propósito deste capítulo é evidenciar que as possibilidades de ocorrência do acidente em Belle, West Virginia, poderiam ter sido consideravelmente menores caso as organizações envolvidas tivessem adotado um sistema de gestão eficaz, fundamentado em abordagens de gestão de riscos, como o RBPS, por exemplo. Se cada elemento do RBPS tivesse sido implementado adequadamente, diversos fatores contribuintes para o acidente poderiam ter sido prevenidos. Serão apresentadas as falhas em relação a nove elementos do sistema de gestão, e como elas poderiam ter sido amenizadas ou evitadas em sua integralidade. Os nove elementos que falharam foram:

1. Competência em Segurança de Processos
2. Gestão do Conhecimento de Processos
3. Identificação de Perigos e Análise de Riscos
4. Procedimentos Operacionais
5. Integridade e confiabilidade dos equipamentos
6. Gestão da Mudança

7. Disciplina Operacional
8. Gestão da Emergência
9. Investigação de acidentes

6.1 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “COMPETÊNCIA EM SEGURANÇA DE PROCESSOS”

Segundo o CCPS (2007), o elemento “Competência em Segurança de Processos” consiste em desenvolver, sustentar e aprimorar a competência em segurança de processos da organização. Desenvolver e manter a competência em segurança de processos abrange três ações inter-relacionadas: (1) aprimorar continuamente o conhecimento e a competência, (2) garantir que informações apropriadas estejam disponíveis para as pessoas que delas necessitam e (3) aplicar consistentemente o que foi aprendido.

Com base nestes critérios e pelo exposto no capítulo anterior, a Clearon, a Optima Belle e a RCI não buscaram aprimorar continuamente o conhecimento e a competência de segurança de processos. Não buscaram informações adicionais sobre os perigos dos produtos químicos que trabalharam ou fizeram cálculos adicionais para garantir a segurança das medidas de proteção contra sobrepessurização. Ainda que se considere o artigo técnico de 1989 da Olin como uma tentativa da Clearon de fazer esta busca, ela não foi capaz de garantir que esta informação estivesse disponível no pacote de tecnologia, o que será abordado na próxima falha.

De igual modo, nenhuma das três empresas tentou garantir que as pessoas adequadas possuíssem todas as informações necessárias em relação ao procedimento, às substâncias e seus riscos associados. Dizia-se para entrar em contato com a gerência da Optima Belle para avaliar casos de parada do secador. De igual modo, não buscaram a assertividade necessária para garantir que todos os riscos do processo, como, por exemplo, outros cenários de reações de decomposição auto acelerado do NaDCC dihidratado, fossem sabidos e devidamente tratados. A informação estava disponível, como mostrava o artigo técnico da Olin de 1989.

6.2 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DE CONHECIMENTO DOS PROCESSOS”

Este elemento é complementar ao “Competência em Segurança de Processos”. A competência em segurança de processos busca atingir dois objetivos: (i) compreensão e a correta interpretação das práticas de segurança de processo, e (ii) garantir que o conhecimento seja repassado para diferentes grupos ao longo do tempo. O termo conhecimento de processo será usado para se referir à coleção de informações que podem ser facilmente registradas em

documentos (logo, o conhecimento). Exemplos são: documentos técnicos e especificações por escrito, desenhos e cálculos de engenharia, especificações para projeto, fabricação e instalação de equipamentos de processo, e (4) outros documentos escritos, como as FISPQs de substâncias.

Assim, o elemento de conhecimento envolve atividades de trabalho associadas à compilação, catalogação e disponibilização de um conjunto específico de dados que normalmente são registrados em formato físico ou eletrônico. No entanto, conhecimento implica compreensão, não apenas a simples compilação de dados. Nesse aspecto, o elemento de competência complementa o elemento de conhecimento, ajudando a garantir que os usuários possam interpretar e entender adequadamente as informações coletadas como parte desse elemento.

Este pilar do RBPS é um dos principais elementos que falhou e culminou no acidente de Optima Belle em 2020. Dois fatores demonstram falhas na documentação e atualização dos dados que abrangem as características químicas, físicas e térmicas das substâncias envolvidas, bem como a segurança e operação do processo.

O primeiro fator foi, como observado na seção 5.1.2, a incapacidade da FISPQ da Clearon de refletir os perigos do NaDCC dihidratado em sua integralidade. A ficha não continha informações críticas da substância, como, por exemplo, o fato dela poder passar por uma reação de decomposição perigosa. Além disso, não havia a menção da restrição de temperatura de armazenamento de 60°C devido à possibilidade desta reação ocorrer. Inclusive, a liderança técnica da Optima Belle considerava improvável a ocorrência deste cenário, como comentado pelo supervisor do processo. Vale ressaltar que todas estas informações estavam disponíveis à Clearon graças ao artigo técnico de 1989 da Olin, contudo, não foram compartilhadas com o time responsável pelo processo da empresa contratada. É possível observar, assim, como este elemento se conecta com o elemento de “Competência em Segurança de Processos”.

O outro fator foi o sistema de gerenciamento de processos inadequado da Clearon. De acordo com o CSB (2023), não houve evidências da existência de algum processo ou procedimento que governasse como, quando e por quem o conteúdo da FISPQ era gerado, atualizado ou auditado em termos de acurácia ou completude. Também não puderam constatar que a Clearon executou uma diligente revisão bibliográfica das propriedades reativas do NaDCC dihidratado, constatado, por exemplo, pela existência e posse pela empresa contratante, do artigo técnico de 1989 da Olin. O fato de haver apenas um funcionário responsável por compilar o pacote tecnológico a ser enviado para a terceirizada também evidencia a falha no sistema. Caso a Clearon tivesse uma gestão de processos adequada, o pacote tecnológico poderia ter sido

mais robusto, fornecendo as informações necessárias à Optima Belle e, potencialmente, evitado o acidente.

6.3 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS E ANÁLISE DE RISCOS”

Este é o elemento central no bloco de Compreensão de Perigos e Riscos. A Identificação de Perigos e Análise de Riscos é um termo coletivo que engloba todas as atividades envolvidas na identificação de perigos e na avaliação de riscos em instalações ao longo de seu ciclo de vida. Estas atividades, por sua vez, buscam garantir que os riscos identificados para as diferentes partes (por exemplo, os funcionários, o público, o meio ambiente etc) sejam consistentemente controlados dentro da tolerância ao risco da organização. Nenhuma das três empresas foi capaz de implementá-lo corretamente, o que pode ser constatado por vários fatos, descritos abaixo.

Um primeiro fator para a falha que é muito crítico e facilmente constatado é o fato de nenhuma das três empresas, à época do acidente, ter uma política clara e formalizada para avaliação de propriedades térmicas e reativas das substâncias químicas envolvidas nos processos. Como justificativa para esta ausência, Optima Belle afirmou que o faz por meio de sua PHA. Já a Clearon afirmou que o faz por meio de seu sistema de gerenciamento de processos que, como visto, era inadequado. Portanto, pode-se classificar este cenário como uma falha desse elemento.

Outra causa para a falha em relação a esse elemento é a presença de várias lacunas na análise de reatividade das substâncias envolvidas no processo. As empresas: (i) não utilizaram ferramentas publicamente disponíveis para análise de riscos reativos, como o método de triagem preliminar e a CRW, (ii) não aproveitaram as oportunidades presentes para o design de processos intrinsecamente mais seguros, segundo recomendações da indústria, como a publicação *Designing and Operating Safe Chemical Reaction Processes* do CCPS. Adicionalmente, havia o fato da Optima Belle não acreditar no cenário de decomposição do NaDCC dihidratado como possível.

Estes fatores, se devidamente endereçados, poderiam ter prevenido o acidente de Optima Belle, dado que estão diretamente relacionados à causa raiz da catástrofe.

6.4 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS”

O elemento “Procedimentos Operacionais” é o primeiro do pilar “Gestão de Riscos”. Como visto no capítulo 2, o CCPS (2007) o define como um conjunto de procedimentos escritos. Estes documentos listam sequências de atividades adequadas para realizar certa tarefa, além de descrever como elas devem ser executadas. Normalmente são desenvolvidos para detalhar rotinas que devem ser seguidas pelos operadores durante um processo. Um exemplo de atividade é a limpeza periódica de equipamentos, resolução de problemas técnicos (*troubleshooting*) e manutenção técnica e preventiva.

De acordo com o CSB (2023), a Optima Belle não implementou, de maneira extensiva e exaustiva, rotinas explícitas a serem seguidas pelos operadores durante a inicialização do processo de desidratação de CDB-56®. Consequentemente, é possível identificar fatores relacionados ao elemento de procedimentos operacionais que contribuíram para a ocorrência da explosão em 2020. Em casos de parada do secador rotativo, por exemplo, não era claro qual procedimento (o desenvolvido pela Optima ou o procedimento de *shutdown*) deveria ser seguido. Se a Clearon ou a Optima Belle tivesse avaliado adequadamente os riscos da desidratação com o material, seria possível apontar qual procedimento deveria ser seguido em caso de reação de decomposição da substância.

Além disso, seria possível identificar outros procedimentos que pudessem ser necessários. Procedimentos operacionais que tratam da resolução de problemas técnicos estão inclusos neste elemento. O CSB (2023) concluiu que no dia do acidente a equipe de operação e a liderança técnica não estava equipada adequadamente com estes documentos. O pacote tecnológico da Clearon propunha, por exemplo, que ficasse a cargo do líder técnico da operação avaliar quanto ao resfriamento da camisa. Esta decisão deveria ser baseada em dados bem definidos previamente com o auxílio das informações de reatividade e risco dos produtos químicos.

6.5 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “INTEGRIDADE E CONFIABILIDADE DOS EQUIPAMENTOS”

O elemento “integridade e confiabilidade dos equipamentos” procura assegurar que eles estejam adequadamente projetados, preparados e instalados de acordo com as suas especificações e permaneçam aptos para uso até serem aposentados. Uma boa implementação deste elemento permitirá: (i) prevenir a liberação catastrófica de um material perigoso ou uma liberação súbita de energia e (ii) garantir alta disponibilidade (ou confiabilidade) de sistemas

críticos de segurança ou utilidades que previnem ou mitigam os efeitos desses tipos de eventos (CCPS, 2007). Ao examinar as condições anteriores ao acidente e os materiais fornecidos pelas empresas, é evidente a presença de fatores que sugerem falhas nesse aspecto do RBPS.

A primeira observação é o fato da Optima Belle não ter garantido a adequação dos sistemas de resfriamento e descompressão do secador. A empresa não efetuou os cálculos requeridos para determinar se o sistema de resfriamento do secador seria capaz de dissipar calor suficiente em uma possível reação de decomposição do CDB-56®. Da mesma forma, não realizou os cálculos para avaliar se o sistema de alívio de pressão do secador estava dimensionado adequadamente para liberar gases de decomposição e prevenir um acúmulo excessivo de pressão dentro do equipamento, caso ocorresse uma reação de decomposição. Dados relevantes para o cálculo, como, por exemplo, dados de decomposição térmica do NaDCC dihidratado, deveriam estar no pacote tecnológico providenciado pela empresa contratante. Contudo, este não foi o caso. Observa-se, dessa maneira, como o elemento “gestão de conhecimento do processo” está conectado com “integridade e confiabilidade dos equipamentos”.

Outro exemplo da falha neste elemento é o fato da liderança técnica da Optima Belle não ter acreditado na reação de decomposição da matéria prima do processo como um cenário crível. Como consequência, a Optima Belle não calculou o resfriamento necessário no caso de geração de calor proveniente de uma reação de decomposição do CDB-56® no secador. A empresa não tinha (ou buscou ter) os dados de calorimetria necessários da substância para realizar os cálculos. O CSB (2023) não encontrou evidências da realização destes cálculos. De igual maneira, a inadequação do sistema de alívio de pressão no caso de sobrepressurização por reações de decomposição, como exposto na seção 5.3.3, foi outra consequência desta incredulidade quanto a este cenário. Caso essa possibilidade tivesse sido devidamente levada em consideração, uma reavaliação dos projetos da camisa do secador e dos mecanismos de alívio de pressão poderia ter sido feita, e, possivelmente, inviabilizado a catástrofe.

Logo, é possível observar que, se o objetivo deste elemento é prevenir uma liberação súbita de energia e/ou garantir a confiabilidade de sistemas críticos de segurança, ele não foi atingido, vide o exposto acima. Contudo, vale o questionamento se os fatores apontados não são apenas erros de cálculo e/ou de projeto, ao invés de serem fatores contribuintes para a falha desse pilar. Uma falha de projeto não implicaria, necessariamente, em erro na integridade e confiabilidade do equipamento *per se*. Por outro lado, segundo a definição deste elemento de acordo com o CCPS, exposta na seção 2.1.3.3 e no primeiro parágrafo desta seção, e não com

a concepção destas palavras de acordo com a língua portuguesa, pode-se entender essas falhas como, de fato, contribuintes à falha.

6.6 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DA MUDANÇA”

A gestão de mudanças engloba procedimentos e avaliações fundamentais para garantir que as alterações propostas em uma planta de processos não levem, inadvertidamente, a novos riscos ou a um aumento de riscos já existentes. Exemplos de avaliações seriam a análise de projetos de equipamentos e de procedimentos operacionais. Este elemento também busca assegurar que a comunicação sobre a mudança seja feita adequadamente a todos os funcionários que possam ser afetados por ela.

A gestão da mudança é outro elemento que falhou no acidente da Optima Belle. Neste acidente, este elemento está intrinsecamente relacionado ao elemento anterior, “Integridade e Confiabilidade dos Equipamentos”. Nenhuma das empresas envolvidas no acordo de produção foram capazes de constatar a necessidade de realizar o procedimento de gestão da mudança de maneira adequada.

O secador rotativo de cone duplo e a camisa que o revestia eram equipamentos chaves para o processo de desidratação do CDB-56® dado que estavam diretamente ligados ao resultado final da operação, ou seja, remover água por meio do aquecimento da molécula de NaDCC dihidratado para convertê-la em NaDCC anidro. O CSB (2023) não pôde comprovar que as avaliações fundamentais para garantir a segurança de ambos equipamentos foram devidamente realizadas pela equipe técnica das empresas envolvidas. As avaliações em questão são: (i) análise das diferenças entre secador rotativo de cone duplo e secador de leito fluidizado a pressão atmosférica, e (ii) análise do resfriamento necessário a ser fornecido pela camisa no caso de uma reação de decomposição do CDB-56®.

Outro fator que explicita a falha no elemento é a mudança, sem uma justificativa embasada em dados, do tipo de secador utilizado previamente para o mesmo processo de desidratação do CDB-56®. Anteriormente a Clearon já havia feito o procedimento usando um secador de leito fluidizado a pressão atmosférica (CSB, 2023). Apesar de ter pedido à RCI pela mesma tecnologia, a contratante concordou, em última instância, com a utilização de um secador rotativo de cone duplo. O CSB (2023) não encontrou evidências de que houve um estudo acerca desta mudança que a justificasse. Na investigação do acidente, o CSB identificou diferenças relevantes entre as tecnologias. Se as empresas tivessem feito as mesmas avaliações, poderiam ter tomado a decisão mais consciente dos riscos da mudança e, possivelmente, evitado o acidente.

Além disso, um acordo entre as partes de um contrato de terceirização sobre como gerenciar mudanças, incluindo alterações de pessoal, processo, propriedade, monitoramento de desempenho e manuseio de materiais deve ser estabelecido. Isto deve ocorrer independentemente se o processo ou instalação “estiver sob um mandato regulatório para gerenciar mudanças” (CCPS, 2000). Qualquer mudança requer que a empresa contratante e a contratada abordem os riscos e perigos associados à mudança. Contudo, o CSB (2023) não encontrou evidências de que a Clearon ou a Optima Belle tenham conduzido uma revisão de gerenciamento de mudanças para a alteração de tecnologia de um secador de leite fluidizado por um rotativo de cone duplo. A Clearon possuía amplo conhecimento da tecnologia e experiência no processo.

6.7 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “DISCIPLINA OPERACIONAL”

Desenvolver e manter padrões elevados na condução das operações consiste na execução de tarefas operacionais e de gerenciamento de maneira deliberada e estruturada. A condução das operações institucionaliza a busca pela excelência na realização de cada tarefa e minimiza as variações no desempenho. Consequentemente, minimiza-se os riscos também. Contudo, este foi mais um elemento que falhou no acidente de Optima Belle. Estas falhas podem ser exemplificadas por dois fatores, apresentados abaixo.

A primeira falha foi no controle das atividades operacionais, que é o âmago do elemento de disciplina operacional. É esperado que a equipe de trabalhadores seja capaz de, por exemplo, seguir procedimentos escritos, seguir práticas de trabalho seguras, formalizar a comunicação entre grupos de trabalho etc. Contudo, isto não foi feito pelas empresas envolvidas no acidente. Uma evidência disso é a ambiguidade existente entre o procedimento desenvolvido pela Optima Belle no caso de parada no secador rotativo usado para a desidratação de CDB-56®, nunca antes feito pela empresa, e o procedimento de *shutdown* de emergência: o primeiro dizia para consultar a gerência caso se julgue necessário aplicar água à camisa; o segundo apenas instruir a operação a aplicar água fria na camisa. Não é especificado qual procedimento deve ser seguido caso a rotação do secador parasse. Outra evidência é a falta de formalização de comunicação entre os grupos de trabalho da Clearon e da Optima Belle. Como observado pelo CSB (2023) no seu relatório de investigação do acidente, a equipe da Clearon saiu da unidade fabril por volta de 17h30, estando disponível por telefone. Contudo, há menção a trocas de mensagens e telefonemas para esclarecer dúvidas quanto ao processo. Não há evidências da definição de um canal oficial de comunicação para cada tipo de comunicação.

A segunda falha foi no desenvolvimento das habilidades e/ou condutas necessárias para o processo. Duas evidências comprovam esta falha. A primeira é o fato da Optima Belle necessitar entrar em contato com a Clearon diversas vezes ao longo do dia de inicialização do procedimento. Isto demonstra que a empresa contratante não foi capaz de treinar e/ou informar devidamente a empresa contratada dos procedimentos operacionais e os riscos associados que se deveria atentar. Além disso, o CSB (2023) afirmou que os operadores mencionaram tanto a observação de uma coloração amarelada, quanto um forte cheiro de cloro ao abrir o secador. À época desconhecido por ambas as empresas, este é um produto da reação de decomposição do NaDCC dihidratado. O fato desta informação ser desconhecida pelas empresas é um problema por si só, como visto na falha em relação ao elemento “gestão de conhecimento do processo”. Porém é problemático de igual forma os operadores não serem capazes de se atentar a este detalhe e identificar um potencial risco à operação.

Caso este elemento tivesse sido devidamente endereçado, é possível que o acidente pudesse ter sido evitado. A observação de uma reação de decomposição da matéria prima no secador deveria servir de alarme imediato dos riscos de explosão, ainda mais considerando que se utiliza um secador rotativo de cone duplo pressurizado. Assim, observa-se como o elemento “disciplina operacional” se conecta também com o elemento “gestão de conhecimento do processo”.

6.8 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “GESTÃO DE EMERGÊNCIA”

De acordo com o CCPS (2007), desenvolver capacidades apropriadas de gestão e resposta a emergências inclui: (1) planejamento para possíveis emergências, (2) provisão de recursos para executar o plano, (3) prática e melhoria contínua do plano, (4) treinamento ou informação para funcionários, contratados, vizinhos e autoridades locais sobre o que fazer, como serão notificados e como relatar uma emergência e (5) comunicação eficaz com as partes interessadas no caso de ocorrer um incidente. Este foi mais um elemento que apresentou falhas críticas e que, se devidamente implementado, poderia ter evitado o acidente de Optima Belle. Há evidências que comprovam esta falha, explicitadas abaixo.

A Optima Belle realizou o devido planejamento para possíveis emergências. Afinal, não considerava a reação de decomposição do NaDCC dihidratado como um cenário possível de emergência. Como já constatado anteriormente na seção 6.2, isso se deve ao fato da Clearon não ter fornecido as informações adequadas no pacote tecnológico do perfil de reatividade dos materiais utilizados no procedimento de desidratação contratado. Evidentemente, nenhuma das empresas foi capaz de identificar cenários de acidente baseados nos riscos das substâncias

químicas utilizadas, avaliar corretamente os cenários críveis e planejar ações de resposta ao acidente. Além disso, como constatado pelo CSB (2023), não houve o envolvimento mútuo necessário na execução das *Process Hazard Analysis*, que são críticas para este planejamento. Portanto, elas falharam neste item. Estas são algumas das ações vitais para que uma empresa se prepare adequadamente para emergências.

Outra comprovação de falha neste elemento é a escrita do procedimento de *shutdown* em caso de emergência. Como observado na seção 6.7, não é explícito para a operação qual procedimento se deve seguir em caso de parada na rotação do secador rotativo. É de se esperar que se o cenário descrito se classifica como uma emergência, seus procedimentos operacionais, a comunicação e o tempo para atuação serão diferentes dos procedimentos rotineiros, dado a gravidade da situação. Contudo, estas percepções não são possíveis de se observar dado que não há uma formalização em relação a qual procedimento se deve priorizar de maneira extremamente objetiva e clara.

6.9 FALHAS EM RELAÇÃO AO ELEMENTO “INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES”

Por fim, mas não menos importante, é possível observar que o estudo e a investigação de acidentes passados é mais um elemento do RBPS que apresentou falhas no acidente da Optima Belle. A investigação de acidentes é um processo para relatar, rastrear e investigar incidentes, analisando seus dados e investigações para identificar incidentes recorrentes e relevantes para as organizações. Uma análise adequada de acidentes passados envolvendo reações de decomposição (auto aceleradas) poderia ter ajudado as empresas envolvidas no acidente a implementar medidas de segurança mais robustas e, possivelmente, evitar o acidente.

Uma evidência de que um procedimento adequado de investigação de acidentes poderia resultar em melhores medidas de segurança é o fato de já ter havido um acidente com semelhanças marcantes em relação ao acidente da Optima Belle. O acidente em questão envolveu a *Napp Technologies* em Lodi, Nova Jersey, nos EUA, em abril de 1995, com 5 fatalidades (quatro no local e uma dias no hospital, dias após o acidente, em decorrência de ferimentos causados pela catástrofe). Neste caso, houve, a explosão e o conseqüente incêndio da unidade fabril durante uma operação de mistura envolvendo químicos reativos à água: hidrossulfito de sódio e alumínio em pó. Similarmente ao caso da Optima Belle, ambas substâncias (hidrossulfito de sódio e alumínio em pó) eram cobertas, à época do acidente, pela regra RMP da EPA ou pelo padrão PSM da OSHA. Após a catástrofe na *Napp Technologies*, ambas entidades reguladoras conduziram uma investigação conjunta sobre o incidente. Entre a lista completa de conclusões, o Relatório Conjunto de Investigação de Acidentes Químicos da

EPA/OSHA contém os seguintes fatos e conclusões, que espelham de perto as circunstâncias e conclusões apresentadas no caso da Optima Belle (EPA; OSHA, 1997):

1. O incidente envolveu um produto químico reativo à água não regulamentado pelo padrão PSM ou pela regra RMP;
2. O incidente envolveu operações de terceirização (*tolling*) entre múltiplas empresas;
3. As empresas realizaram uma PHA inadequada e não tomaram ações preventivas apropriadas;
4. O equipamento selecionado para o processo era inadequado;
5. Informações insuficientes sobre segurança e riscos levaram à PHA inadequada.

7 CONCLUSÕES

O trabalho buscou analisar o acidente catastrófico ocorrido em 2020 na planta da Optima Belle, em Belle, West Virginia, nos Estados Unidos, sob a ótica das diretrizes do RBPS, framework de segurança de processos desenvolvido pelo CCPS. Na época, Optima Belle havia sido contratada pela Clearon, por meio da RCI, para desidratar quatro lotes totalizando cerca de 4 toneladas de dicloroisocianurato de sódio dihidratado. Este procedimento já havia sido feito pela empresa contratante em uma configuração de processos diferentes e nunca havia sido feito pela contratada, em nenhuma configuração.

Para tal, foi necessário entender o processo produtivo e as substâncias envolvidas, o acidente per se e os fatores causais do acidente. O objetivo do trabalho, foi demonstrar que a aplicação adequada dos elementos propostos pelas diretrizes de RBPS, do CCPS, poderia ter reduzido significativamente a chance do acidente ocorrer. Além disso, buscou-se ressaltar recomendações para que acidentes futuros possam ser evitados com base nas lições aprendidas neste caso.

Pelo estudo de acidentes passados em diversas indústrias, sistemas de gestão de segurança ganharam notoriedade com o passar dos anos. A utilização ativa deles na operação de uma indústria se mostra crucial para estar de acordo com boas práticas da indústria, bem como evitar acidentes e perdas. O framework Risk Based Process Safety, proposto pelo CCPS em 2007. É composto por 4 blocos fundamentais e 20 elementos. Estes elementos, juntos, englobam uma série de atividades e métodos que buscam garantir a eficiência e efetividade dos sistemas já existentes, bem como a formalização de um sistema caso a unidade fabril ainda não possua.

Entre os fatores causais do acidente, foram observadas falhas por parte da Clearon, como, por exemplo, o não fornecimento adequado de dados de calorimetria da matéria prima para o processo. De igual maneira, houve falhas por parte da Optima Belle, como, por exemplo, o desenvolvimento inadequado dos procedimentos operacionais que gerou dúvidas sobre qual ação tomar no caso de parada de rotação do secador. Por fim, a RCI, como mediadora do contrato de terceirização de produção, poderia ter atuado de maneira mais próxima de ambas as partes, se certificando de que medidas de segurança de acordo com os padrões da indústria estavam sendo tomadas.

Pôde-se identificar, assim, falhas notáveis em 9 dos 20 elementos do RBPS. Estes elementos, caso devidamente implementados pelos sistemas de gerenciamento de segurança das empresas envolvidas no acordo comercial, poderiam ter prevenido o acidente. Os elementos

que apresentaram falha são: “Competência em Segurança de Processos”, “Gestão do Conhecimento de Processos”, “Identificação de Perigos e Análise de Riscos”, “Procedimentos Operacionais”, “Integridade e confiabilidade dos equipamentos”, “Gestão da Mudança”, “Disciplina Operacional”, “Gestão da Emergência” e “Investigação de acidentes”.

Por fim, houve uma falha na cobertura regulatória de produtos químicos que apresentam riscos reativos por ambas reguladoras americanas OSHA e EPA em seus respectivos padrões/regras que regem sobre segurança de processos. O CSB já havia recomendado em outras investigações de acidentes e estudos independentes a importância destas entidades revisarem a lista de produtos químicos que utilizam para identificar quais processos estão sujeitos à cobertura dessas regulamentações. Contudo, até a publicação do relatório final do acidente, nenhuma das instituições havia implementado estas recomendações. Como consequência, o NaDCC dihidratado, material responsável pela explosão, não estava, e continua não estando, sob cobertura regulatória. Por consequência, as empresas não são obrigadas a seguir as recomendações do PSM e do RMP em operações envolvendo este (e muitos outros) materiais com perigos de reatividade.

8 REFERÊNCIAS

A. KAYODE COKER. Modeling of Chemical Kinetics and Reactor Design. [s.l: s.n.].

ABBASI, T. et al. Types of accidents occurring in chemical process industries and approaches to their modeling Types of accidents occurring in chemical process industries and approaches to their modelling. International Journal of Engineering, Science and Mathematics, v. 6, 2017.

AICHE. Terms and Conditions | AIChE. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/terms-and-conditions>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

AICHE; BRENDA SEGGEMAN. Guidelines for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations. , 2017.

ALLIAN, A. D. et al. Process safety in the pharmaceutical industry-part I: Thermal and reaction hazard evaluation processes and techniques. Organic Process Research and Development, v. 24, n. 11, p. 2529–2548, 20 nov. 2020.

ALTAIR SANTOS; INÊS BATTAGIN. Cumprir normas técnicas evita confrontos com a lei | Cimento Itambé. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/cumprir-normas-tecnicas-evita-confrontos-com-a-lei/>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING. CCPS Process Safety Glossary | AIChE. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary?title=process+safety+management+system#views-exposed-form-glossary-page>>. Acesso em: 1 dez. 2023.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING. Self-Accelerating Decomposition Temperature (SADT) | AIChE. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/self-accelerating-decomposition-temperature-sadt>>. Acesso em: 2 dez. 2023.

AMYOTTE, P. R. et al. Incorporation of inherent safety principles in process safety management. Process Safety Progress, v. 26, n. 4, p. 333–346, 10 dez. 2007.

ANAC. PSO-BR Programa Brasileiro para a Segurança Operacional da Aviação Civil. [s.l: s.n.].

ANAC. Programa de Segurança Operacional (PSO-BR) — Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Disponível em: <<https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/seguranca-operacional/programas-de-seguranca-operacional/pso-br>>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ANAC. What is Safety Management Systems? — ANAC National Civil Aviation Agency - Brazil. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/en/safety/what-is-safety-management-systems>>. Acesso em: 12 nov. 2023.

ANP. Resolução 43 2007 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-43-2007?origin=instituicao&q=43/2007>>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ANP. Gerenciamento de Segurança Operacional (SGSO) — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/gerenciamento-de-seguranca-operacional-sgso>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

ANP. REGULAMENTO TÉCNICO DO SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA SEGURANÇA OPERACIONAL DAS INSTALAÇÕES MARÍTIMAS DE PERFURAÇÃO E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL. [s.l: s.n.].

ANUAR, N. I. P.; AZIZ, H. A.; AHMAD, R. Integrated chemical, technology & equipment process knowledge management system based on risk based process safety. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Anais...IOP Publishing Ltd, 9 dez. 2019.

API. API Standard 521. Disponível em: <<https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard521>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

ASME. SECTION VIII Rules for Construction of Pressure Vessels ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>>.

AZIZ, H. A.; SHARIFF, A. M.; RUSLI, R. Managing process safety information based on process safety management requirements. *Process Safety Progress*, v. 33, n. 1, p. 41–48, 7 mar. 2014.

BARTON; ROGERS. Accelerating Rate Calorimetry (ARC) | AIChE. Disponível em: <<https://www.aiche.org/ccps/resources/glossary/process-safety-glossary/accelerating-rate-calorimetry-arc>>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BELLE; WV. Fatal Chemical Decomposition Reaction and Explosion at Optima Belle LLC Investigation Report SAFETY ISSUES: • Process Knowledge Management • Thermal Hazard Assessment • Equipment Selection and Design • Tolling of Hazardous Materials • Regulatory Coverage of Reactive Hazards. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.csb.gov>.

BLOOMFIELD, S. F.; USO, E. E. The antibacterial properties of sodium hypochlorite and sodium dichloroisocyanurate as hospital disinfectants. *Journal of Hospital Infection*, v. 6, n. 1, p. 20–30, mar. 1985.

BOIN, A.; SCHULMAN, P. Assessing NASA's Safety Culture: The Limits and Possibilities of High-Reliability Theory. *Public Administration Review*, v. 68, n. 6, p. 1050–1062, 17 nov. 2008.

CANTÚ, R. et al. HPLC Determination of Cyanuric Acid in Swimming Pool Waters Using Phenyl and Confirmatory Porous Graphitic Carbon Columns. *Analytical Chemistry*, v. 73, n. 14, p. 3358–3364, 1 jul. 2001.

CANTÚ, R.; EVANS, O.; MAGNUSON, M. L. Rapid analysis of cyanuric acid in swimming pool waters by high performance liquid chromatography using porous graphitic carbon. *Chromatographia*, v. 53, n. 7–8, p. 454–456, abr. 2001.

CARDINALI, F.; LANTAGNE, D. S.; BLOUNT, B. C. Disinfection By-Product Formation and Mitigation Strategies in Point-of-Use Chlorination with Sodium Dichloroisocyanurate in Tanzania. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, v. 83, n. 1, p. 135–143, 1 jul. 2010.

CCPS. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, 2nd Edition>. Acesso em: 3 dez. 2023.

CCPS. Guidelines for Process Safety Metrics. [s.l.] Wiley, 2009.

CCPS. Chemical Process Quantitative Risk Analysis. Em: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. [s.l.] Wiley, 2010. p. 1–55.

CCPS. Guidelines for engineering design for process safety, 2nd edition (2012). *Process Safety Progress*, v. 31, n. 3, p. 320–321, 24 set. 2012.

CCPS. Guidelines for Process Safety in Outsourced Manufacturing Operations. 2020.

CCPS. A Summary of Risk Based Process Safety. [s.d.].

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Risk Based Process Safety. [s.l.] Wiley, 2007.

CETESB. Ficha de Informação Toxicológica. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/>>.

CETESB. Ficha de Informação de Produto Químico. Disponível em: <https://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=DICLOROISOCIANURATO%20DE%20S%D3DIO>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CHRISTIAN STADLER. Pandemic Winners: The 10 Best Performing U.S. Companies. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/christianstadler/2022/01/18/pandemic-winners-the-10-best-performing-us-companies/?sh=454bef4f7220>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

CHRISTINE HAUSER. Explosion Like a 'Bomb' Kills One and Injures Two at West Virginia Chemical Plant. 2020.

CISA. CFATS Risk-Based Performance Standard (RBPS) 11 — Training | CISA. Disponível em: <<https://www.cisa.gov/resources-tools/programs/chemical-facility-anti-terrorism-standards-cfats/cfats-risk-based-performance-standards-rbps/rbps-11-training>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

CSB. HAZARD INVESTIGATION - IMPROVING REACTIVE HAZARD MANAGEMENT. [s.l: s.n.].

CSB. Safety Message: Without Safeguards, Pressure Vessels Can Be Deadly - Safety Messages - News. Disponível em: <<https://www.csb.gov/safety-message-without-safeguards-pressure-vessels-can-be-deadly/>>. Acesso em: 19 nov. 2023.

CUTLER, D.; MILLER, G. The role of public health improvements in health advances: The twentieth-century United States. *Demography*, v. 42, n. 1, p. 1–22, 1 fev. 2005.

CYRIL F. PARRY. Relief Systems Handbook. [s.l: s.n.].

DOMINIC COOPER. Safety Culture - A model for understanding and quantifying a difficult concept. 2002.

EPA, U.; OF EMERGENCY MANAGEMENT, O. CHEMICAL SAFETY ALERT Use Multiple Data Sources Use Multiple Data Sources for Safer Emergency for Safer Emergency Response Response. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.epa.gov/ceppo/>.

EPA/OSHA JOINT CHEMICAL ACCIDENT INVESTIGATION REPORT. . [s.l: s.n.].

F. STOESEL. What is your thermal risk? Em: *Chemical Engineering Progress*. [s.l.] AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING, 1993. v. 89p. 68–75.

FRANK, W. L. Process safety culture in the CCPS risk based process safety model. *Process Safety Progress*, v. 26, n. 3, p. 203–208, 2 set. 2007.

GILL, P.; MOGHADAM, T. T.; RANJBAR, B. Differential Scanning Calorimetry Techniques: Applications in Biology and Nanoscience. [s.l: s.n.].

GREAT BRITAIN. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE. Designing and operating safe chemical reaction processes. [s.l.] HSE Books, 2000.

GROSSEL, S. S. Essential practices for managing chemical reactivity hazards. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 16, n. 6, p. 597–598, nov. 2003.

Guidelines on Occupational Safety and Health Management Systems (ILO-OSH 2001) SafeWork, ILO Geneva. . [s.l: s.n.].

HSE. Health and safety management systems: Overview - HSE. Disponível em: <<https://www.hse.gov.uk/managing/management-system/index.htm>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

ILO. Safety in the use of Chemicals at Work. 1993.

ILO. Guidelines on occupational safety and health management systems. [s.l: s.n.].

ILO. Occupational Safety and Health Management Systems (Occupational Safety and Health). Disponível em: <<https://www.ilo.org/safework/areasofwork/occupational-safety-and-health-management-systems/lang--en/index.htm>>. Acesso em: 4 dez. 2023.

IN, J. Introduction of a pilot study. Korean Journal of Anesthesiology, v. 70, n. 6, p. 601, 2017.

INÊS LARANJEIRA DA SILVA BATTAGIN. NORMA NÃO É LEI, MAS POR FORÇA DE LEI É OBRIGATÓRIA. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

JAMES R. COUPER et al. Chemical Process Equipment - Selection and Design. 3rd. ed. [s.l: s.n.].

JOSÉ TEIXEIRA FREIRE; GEISA ALBINI. TpicosEspeciaisemSistemasParticulados_Volume52. v. 5, 2019.

KIDAM, K.; HURME, M. Design as a contributor to chemical process accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 25, n. 4, p. 655–666, jul. 2012.

KIDAM, K.; HURME, M. Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 91, n. 1–2, p. 61–78, jan. 2013.

KOSSOY, A.; BENIN, A.; AKHMETSHIN, YU. An advanced approach to reactivity rating. *Journal of Hazardous Materials*, v. 118, n. 1–3, p. 9–17, fev. 2005.

LEGGETT, D. Chemical reaction hazard identification and evaluation: Taking the first steps. *Process Safety Progress*, v. 23, n. 1, p. 21–28, 30 mar. 2004.

LEONE PEREIRA; MARCOS SCALÉRCIO; TULIO MARTINEZ MINTO. NRs e Normas Nacionais e Internacionais de Saúde e Segurança no Trabalho Organizadas por Temas. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.professorleonepereira.com.br>.

LOTHROP, W. C.; HANDRICK, G. RICHARD. The Relationship between Performance and Constitution of Pure Organic Explosive Compounds. *Chemical Reviews*, v. 44, n. 3, p. 419–445, 1 jun. 1949.

LOUVAR, J. F. Improving the effectiveness of process safety management in small companies. *Process Safety Progress*, v. 27, n. 4, p. 280–283, 2008.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E DO EMPREGO; RICARDO BERZOINI. DIRETRIZES SOBRE SISTEMAS DE GESTÃO DA SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO. [s.l: s.n.]. MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. Normas Regulamentadoras - NR — Ministério do Trabalho e Emprego. 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: 1 dez. 2023.

MKPAT, E.; RENIERS, G.; COZZANI, V. Process safety education: A literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 54, p. 18–27, jul. 2018.

MOSLEY D.W.; NESS A.I.; HENDERSHOT D.C. Screen reactive chemical hazards early in process development. [s.l: s.n.]. v. 96

MURPHY, J. F. Safety Considerations in the Chemical Process Industries. Em: Handbook of Industrial Chemistry and Biotechnology. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 1805–1887.

NFPA. NFPA 400. Disponível em: <<https://www.nfpa.org/product/nfpa-400-code/p0400code>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

NRs e Normas Nacionais e Internacionais de Saúde e Segurança no Trabalho Organizadas por Temas. . [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.professorleonepereira.com.br>.

NSF; ANSI. NSF/ANSI Standard 60: Drinking Water Treatment Chemicals –... | NSF. Disponível em: <<https://www.nsf.org/knowledge-library/nsf-ansi-standard-60-drinking-water-treatment-chemicals-health-effects>>. Acesso em: 26 nov. 2023.

OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY ADMINISTRATION. Process Safety Management Guidelines for Compliance. 1994.

OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Process Safety Management. [s.l: s.n.].

OH, K.-S. et al. Effects of Disinfectants on Larval Development of *Ascaris suum* Eggs. The Korean Journal of Parasitology, v. 54, n. 1, p. 103–107, 26 fev. 2016.

OLIVE, C.; O’CONNOR, T. M.; MANNAN, M. S. Relationship of safety culture and process safety. Journal of Hazardous Materials, v. 130, n. 1–2, p. 133–140, mar. 2006.

OSHA. Report of the Small Business Advocacy Review Panel on OSHA’s Potential Revisions to the Process Safety Management Standard. 2016.

OSHA; EPA; CEPPPO. EPA/OSHA JOINT CHEMICAL ACCIDENT INVESTIGATION REPORT. , 1998.

PERKINSON, N. OFFICE OF CHEMICAL SAFETY AND POLLUTION PREVENTION. [s.l.: s.n.].

PERKINSON, N. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY WASHINGTON, DC 20460 PRIA Non-New-Use Label Acceptable v.20150320 OFFICE OF CHEMICAL SAFETY AND POLLUTION PREVENTION. [s.l.: s.n.].

POPELKA, H. OFFICE OF CHEMICAL SAFETY AND POLLUTION PREVENTION. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.cdc.gov/hai/outbreaks>.

PROTO, A. et al. Bactericidal and Fungicidal Activity in the Gas Phase of Sodium Dichloroisocyanurate (NaDCC). *Current Microbiology*, v. 73, n. 2, p. 287–291, 16 ago. 2016.

RUBIN, A. J.; AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. DIVISION OF ENVIRONMENTAL CHEMISTRY. Chemistry of water supply, treatment, and distribution. [s.l.] Ann Arbor Science Publishers, 1974.

SALES, J. et al. Study of Major Accidents Involving Chemical Reactive Substances. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 85, n. 2, p. 117–124, jan. 2007.

SALES, J. et al. Study of Major Accidents Involving Chemical Reactive Substances: Analysis and Lessons Learned. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 85, n. 2, p. 117–124, 1 jan. 2007.

SAM MANNAN. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*. [s.l.] Elsevier, 2012.

SEO, D.; JO, J. Humidifier disinfectant, sodium dichloroisocyanurate (NaDCC): assessment of respiratory effects to protect workers' health. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 15681, 3 ago. 2021.

SOLENIS; ABERNATHY C. Solenis to Acquire Clearon Corp. in pool market | Solenis. Disponível em: <<https://www.solenis.com/en/resources/news-releases/2022/solenis-to-acquire-clearon>>. Acesso em: 8 nov. 2023.

SUN, Q. et al. Assessment on thermal hazards of reactive chemicals in industry: State of the Art and perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 78, p. 100832, maio 2020.

THEODOROS VARZAKAS; CONSTANTINA TZIA. *Handbook of Food Processing - Food Preservation*. [s.l: s.n.].

UIJT DE HAAG, P. A. M.; ALE, B. J. M.; POST, J. G. The 'Purple Book'. Em: *Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries*. [s.l.] Elsevier, 2001. p. 1429–1438.

UMASS LOWELL. Making Massachusetts a safer place to live and work. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.turi.org/Our_Work/Business/Industry_Sectors/Food_and_Beverage>.

UNITED NATIONS. COMMITTEE OF EXPERTS ON THE TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS AND ON THE GLOBALLY HARMONIZED SYSTEM OF CLASSIFICATION AND LABELLING OF CHEMICALS. *Manual of tests and criteria*. [s.l: s.n.].

VISHNURADHAN, R. et al. On the emergence of a health-pollutant-climate nexus in the wake of a global pandemic. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 57, p. 85619–85631, 14 dez. 2022.

WAHMAN, D. G. Chlorinated Cyanurates: Review of Water Chemistry and Associated Drinking Water Implications. *Journal AWWA*, v. 110, n. 9, 2 set. 2018.

WHITMORE, M. W. ESTIMATION OF STABILITY TEMPERATURES FROM DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS AND THERMAL ACTIVITY MONITOR DATA IN COMBINATION. [s.l: s.n.].

WHO. Coronavirus disease (COVID-19) pandemic. Disponível em: <<https://www.who.int/europe/emergencies/situations/covid-19>>. Acesso em: 3 dez. 2023.

WÖHLER, F. Ueber die Zersetzung des Harnstoffs und der Harnsäure durch höhere Temperatur - *Annalen der Physik und Chemie*. [s.l: s.n.]. v. 15

WU, Q. et al. Sodium dichloroisocyanurate delays ripening and senescence of banana fruit during storage. *Chemistry Central Journal*, v. 12, n. 1, p. 131, 5 dez. 2018.

YILMAZ, Ü. T.; YAZAR, Z. Determination of Cyanuric Acid in Swimming Pool Water and Milk by Differential Pulse Polarography. *CLEAN – Soil, Air, Water*, v. 38, n. 9, p. 816–821, 31 set. 2010.

ZEKI BERK. *Food Process Engineering and Technology*. [s.l.] Elsevier, 2018.