



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA QUÍMICA

JÚLIA GABRIELA CABRAL PEDROSA

**ANÁLISE DE SEGURANÇA DE PROCESSOS
EM SISTEMAS DE CONTROLE NA PRODUÇÃO DE RESINAS ACRÍLICAS**

Recife
2023

JÚLIA GABRIELA CABRAL PEDROSA

**ANÁLISE DE SEGURANÇA DE PROCESSOS
EM SISTEMAS DE CONTROLE NA PRODUÇÃO DE RESINAS ACRÍLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Química na
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título do grau de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Felipe Pedro da Costa Gomes

Recife
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pedrosa, Júlia Gabriela Cabral.

Análise de segurança de processos em sistemas de controle na produção de resinas acrílicas / Júlia Gabriela Cabral Pedrosa. - Recife, 2023.

46 : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2023.

1. Sistemas de controle. 2. Resinas acrílicas. 3. Segurança de processos. 4. HAZOP. 5. Polimerização. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação). II. Título.

660 CDD (22.ed.)

JÚLIA GABRIELA CABRAL PEDROSA

**ANÁLISE DE SEGURANÇA DE PROCESSOS
EM SISTEMAS DE CONTROLE NA PRODUÇÃO DE RESINAS ACRÍLICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Química na
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título do grau de Bacharel em Engenharia
Química.

Aprovado em: 28 / 04 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. Andrelina Maria Pinheiro Santos (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. Michele Félix de Andrade (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

A todas as meninas que almejam trabalhar em indústrias e a todas as mulheres que já o fazem. Eu desejo que quebrems cada vez mais o paradigma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Dr. Felipe Gomes por ter aceitado o convite em me orientar na conclusão deste trabalho e ter me guiado com tranquilidade, sabedoria e paciência durante esse período.

Ao meu pai, Frederico, aos meus avós, Maria de Lourdes e José Cabral, e aos meus tios, em especial Jorge e Monalisa, que sempre apoiaram e contribuíram com a minha jornada.

À minha mãe, Christiane, em especial, por sua dedicação, cuidado, instrução e pelo intenso trabalho conjunto neste material.

Ao meu namorado, Alexandre, por todo o seu amor, humor, leveza, dedicação, companheirismo e suporte emocional.

Aos meus amigos da faculdade, em especial a Manuela Nader, por todos os nossos planejamentos de matrícula, trabalhos, projetos e relatórios, por todo o seu apoio, incentivo e suporte durante esses anos de graduação.

A todos do dia a dia no trabalho que colaboram diariamente com o meu aprendizado, em especial a Hilton, Daniel, Gabriel, supervisores, operadores de produção, químicos dos laboratórios de desenvolvimento e controle de qualidade e técnicos de manutenção.

À Universidade Federal de Pernambuco e em especial ao Departamento de Engenharia Química que forneceu os meios materiais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

A todos os professores e profissionais que contribuíram para minha formação, direta ou indiretamente.

"A segurança não é um exercício intelectual para nos manter no trabalho. É uma questão de vida e morte. É a soma das nossas contribuições para a gestão da segurança que determina se as pessoas com quem trabalhamos vivem ou morrem."
(APPLETON, 1990)

RESUMO

Um dos principais tipos de resina utilizada na produção de tintas imobiliárias é a resina acrílica, a qual é produzida através de polimerização exotérmica e demanda atenção ao controle e segurança do processo para evitar a ocorrência de reações descontroladas as quais podem provocar graves acidentes. A análise de segurança de processos em uma planta de produção de resinas demanda controles desde o nível básico até funções instrumentadas de segurança e sistemas de contenção. Nesse cenário, o estudo proposto no trabalho teve como objetivo avaliar o processo de produção de resinas acrílicas utilizando a técnica de análise HAZOP para identificar cenários perigosos, classificar o risco desses cenários e propor barreiras de segurança para tornar os riscos aceitáveis e sob controle. A planta foi separada em nós, para os quais foram avaliados desvios relacionados às principais variáveis a serem monitoradas e as consequências do desvio, formando então a análise HAZOP do processo. A fim de determinar as medidas de controle necessárias, cada nó foi avaliado separadamente em todos os níveis de controle de processo, em que foram propostas mudanças de design, instalação de instrumentos e equipamentos, alarmes de processo e funções instrumentadas de segurança. A partir da determinação do sistema de controle, foi possível elaborar o projeto de instrumentação consolidado no diagrama de instrumentação e tubulação, em que foram representados todos os instrumentos, malhas de controle e intertravamentos propostos no intuito de mitigar os riscos de segurança de processo da planta.

Palavras-chave: Sistemas de Controle. Resinas Acrílicas. Controle e segurança de processos. HAZOP.

ABSTRACT

One of the principal types of resin utilized in the production of house paints is acrylic resin, which is produced through exothermic polymerization and requires careful attention to process control and safety in order to prevent the occurrence of uncontrolled reactions that can result in severe accidents. Process safety analysis in a resin production plant demands controls spanning from the basic level to instrumented safety functions and containment systems. In this context, the proposed study aims to evaluate the process of acrylic resin production utilizing the HAZOP analysis technique to identify hazardous scenarios, classify the risks of said scenarios, and propose safety barriers to render risks acceptable and under control. The plant is subdivided into nodes, for which deviations related to the main variables to be monitored and their associated consequences are assessed, thus forming the HAZOP analysis of the process. In order to determine the necessary control measures, each node is evaluated separately across all levels of process control, where changes in design, installation of instruments and equipment, process alarms, and instrumented safety functions are proposed. Based on the determination of the control system, it is possible to develop an instrumentation design consolidated in the instrumentation and piping diagram, wherein all the instruments, control loops, and interlocks proposed to mitigate the process safety risks of the plant are represented.

Keywords: Control Systems. Acrylic Resins. Process Control and Safety. HAZOP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Processo de produção de resina vinil acrílica	18
Figura 2 –	Diagrama de Semenov	19
Figura 3 –	Representação do processo de produção de resina vinil acrílica	26
Figura 4 –	Fluxograma do processo	29
Figura 5 –	Divisão dos nós no fluxograma do processo	30
Figura 6 –	Nó 1 no diagrama	34
Figura 7 –	Nó 1 com modificações propostas	35
Figura 8 –	Nó 2 no diagrama	35
Figura 9 –	Nó 2 com modificações propostas	37
Figura 10 –	Nó 3 no diagrama	37
Figura 11 –	Nó 3 com modificações propostas	39
Figura 12 –	Nó 4 no diagrama	39
Figura 13 –	Nó 4 com modificações propostas	40
Figura 14 –	P&ID final do processo	43

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Palavras-guia padrão e seus significados genéricos	22
Quadro 2 –	Exemplos de possíveis parâmetros em operações	22
Quadro 3 –	Matriz de risco adaptada da norma IEC 61508 padrão para reações descontroladas	23
Quadro 4 –	Relação de TAGs, equipamentos e instrumentos	27
Quadro 5 –	Variáveis a serem controladas no processo apresentado	31
Quadro 6 –	Fragmento do HAZOP	32
Quadro 7 –	Funções instrumentadas de segurança do sistema	40
Quadro 8 –	Relação de TAGs de instrumentos e equipamentos após modificação proposta	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Acrilato de Butila
ABIQUM	Associação Brasileira da Indústria Química
AIChE	<i>American Institute of Chemical Engineers</i> (Instituto Americano de Engenheiros Químicos)
AV	Acetato de Vinila
CCPS	<i>Center of Chemical Process Safety</i> (Centro de Segurança de Processos Químicos)
CIA	<i>Chemical Industries Association</i> (Associação das Indústrias Químicas)
CSB	<i>Chemical Safety Board</i> (Conselho de Segurança Química)
HAZOP	<i>Hazard and Operability</i> (Perigos e Operabilidade)
ICCA	<i>International Council of Chemical Associations</i> (Conselho Internacional de Associações Químicas)
MIC	Metil isocianato
MV	<i>Manipulated Variable</i> (Variável Manipulada)
P&ID	<i>Pipe and Instrumentation Diagram</i> (Diagrama de Tubulação e Instrumentação)
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i> (Função Instrumentada de Segurança)
SIL	<i>Safety Integrity Level</i> (Nível de integridade de segurança)
SIS	<i>Safety Instrumented System</i> (Sistema Instrumentado de Segurança)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	ESTADO DA ARTE/REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	RESINAS ACRÍLICAS	16
2.2	SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS	19
2.3	CONSIDERAÇÕES ATUAIS DE SEGURANÇA DE PROCESSO ENVOLVENDO POLIMERIZAÇÕES	23
3	METODOLOGIA	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1	AVALIAÇÃO DO PROCESSO	26
4.2	ELABORAÇÃO DO HAZOP	30
4.2.1	Definição dos nós	30
4.2.2	Definição de variáveis a serem controladas e palavras-guia	30
4.2.3	Construção do HAZOP	31
4.3	AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DOS NÓS DO PROCESSO	33
4.3.1	Nó 1 - Transferência de pré-emulsão (R-01) para o reator (R-02)	34
4.3.2	Nó 2 - Sistema de resfriamento do reator	35
4.3.3	Nó 3 - Reator (R-02)	37
4.3.4	Nó 4 - Válvula de fundo do reator	39
4.3.5	Funções instrumentadas de segurança	40
4.4	PROJETO DA INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSO EM DIAGRAMA	41
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A base dos processos químicos foi desenvolvida de maneira empírica, o que por muitas décadas não se tratava da forma mais eficiente, segura e ambientalmente correta para a sociedade como um todo. O surgimento da Engenharia de Processos se deu a fim de sistematizar a síntese e a remodelagem dos processos, integrando eficiência com a segurança das pessoas, do meio ambiente e da propriedade (PERLINGEIRO, 2005).

Atualmente, a segurança de processos pode ser definida como a área responsável pela prevenção, preparação, mitigação, resposta, ou restauração de liberações catastróficas de produtos químicos ou energia de um processo associado a uma instalação (CCPS, 2016). Atrelado a isso, os monitoramentos de incidentes químicos vêm tomando destaque não só na iniciativa privada, a fim de gerar lições aprendidas e evitar que incidentes parecidos ocorram, como também em órgãos internacionais, os quais categorizam os incidentes reportados e geram importantes estatísticas para o mundo dos processos químicos.

É o caso, por exemplo, do *Chemical Safety Board* (CSB), que reúne os incidentes reportados em indústrias estadunidenses. Entre os anos de 1980 e 2001, foram reportados cerca de 167 incidentes, dos quais 130 foram ocasionados por processos reacionais conhecidos. Uma das principais reações causadoras foram as de polimerização, com um total de 21 dos 130 incidentes. Além disso, um terço dos eventos com polimerização envolveram monômeros acrílicos, representando 4,2% do total de incidentes. Esse tipo de reação é a base para a produção de resinas acrílicas, amplamente utilizadas na indústria de tintas imobiliárias.

Em suma, um dos principais tipos de resina acrílica utilizada na produção de tintas imobiliárias é a resina vinil acrílica, composta pelos monômeros acrilato de butila e acetato de vinila, dispersos em meio aquoso, com o auxílio de uma substância chamada de iniciador, responsável por formar radicais livres, juntamente com outros monômeros funcionais e alguns aditivos oxidantes e redutores (FAZENDA, 2009).

A via mais comum de produção de resinas acrílicas é por meio de um processo reacional em semi batelada, em que a reação ocorre entre os monômeros envolvidos e o iniciador, em meio aquoso, em um reator agitado, que deve ser mantido a temperatura constante. No entanto, essa polimerização é exotérmica, o

que demanda atenção ao controle e à segurança do processo, a fim de evitar a ocorrência de reações descontroladas (*runaway reactions*) que podem acarretar graves acidentes (AGOSTINI, 2006).

Será realizada uma avaliação do processo de produção de resina acrílica de um estudo de caso proposto por Agostini (2006), em que se espera identificar os cenários perigosos no processo de produção de resinas acrílicas através da avaliação ponto a ponto, classificar o risco desses cenários e, com isso, propor barreiras de segurança por meio da indicação de estratégias de monitoramento, tornando os riscos nos formatos aceitáveis e sob controle. Dessa forma, evitam-se os perigos intrínsecos ao processo, como por exemplo reações descontroladas (*runaway reactions*), e contribui-se para a redução de incidentes de segurança de processo na produção de resinas acrílicas, além da otimização da pesquisa e projetos tanto de profissionais quanto de estudantes e pesquisadores da área da indústria química.

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar o processo de produção de resinas acrílicas propondo melhorias à segurança do processo na planta da BASF em Guaratinguetá apresentada por Agostini (2006). E como objetivos específicos: analisar o processo geral de produção de resinas acrílicas, especificar as etapas do processo, identificando os riscos associados a desvios nas variáveis e propor o projeto de segurança necessário para cada etapa, contemplando *Safety Instrumented Function* (SIFs), instrumentação e automação relativa à segurança de processo e representar o diagrama de instrumentação do processo.

2 ESTADO DA ARTE/REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESINAS ACRÍLICAS

Na antiguidade, os egípcios e os gregos já entendiam sobre a composição de polímeros nos produtos naturais que quando combinados com os minerais produziam alguns tipos de tintas. Há exemplos desses produtos tem-se o leite, a goma, a cera e o piche. Acrescentando-se a isso no período da Idade Média, a polimerização térmica já ocorria no ato de cozinhar o óleo de linhaça com algumas resinas naturais tais como: âmbar, copal, breu etc., seu uso se intensificou até os dias atuais, esse cozimento (polimerização) derivou em resinas que propiciava o resultado de distintas tintas adequadas para os mais diversos fins (FAZENDA, 2009).

Ainda sobre polímero, Fazenda (2009, p.8) corrobora afirmando que:

O primeiro polímero sintético foi o poli (cloreto de vinila) – (PVC) como resultado de uma polimerização acidental; em 1839 foi descoberto o poliestireno, tão logo o estireno havia sido sintetizado. Nesse mesmo ano, Charles Goodyear criou a vulcanização da borracha, através da qual as propriedades do polímero natural são modificadas, permitindo a obtenção de uma série de produtos com grande utilidade prática.

Posteriormente, Baekeland desenvolveu, no princípio do século XX, o polímero denominado de resina fenólica, o primeiro modelo de material polimérico de relevância para a crescente indústria de tintas, uma vez que proporcionaram uma notória melhoria nas propriedades de “vernizes e tintas” da época.

É sabido, que as resinas sintéticas são polímeros formados por um ou mais tipos de monômeros e diferem quanto às propriedades, características e finalidades. Alguns dos tipos de resinas são as alquídicas, poliésteres, epóxi, acrílicas, vinílicas, melamínicas e ureicas, que são escolhidas para serem utilizadas de acordo com a aplicação e superfície específicas. Também podem ser caracterizadas como homopolímeros, quando o polímero é formado a partir de um único tipo de monômero, ou copolímeros, no caso em que há a polimerização de duas ou mais espécies monoméricas (FAZENDA, 2009).

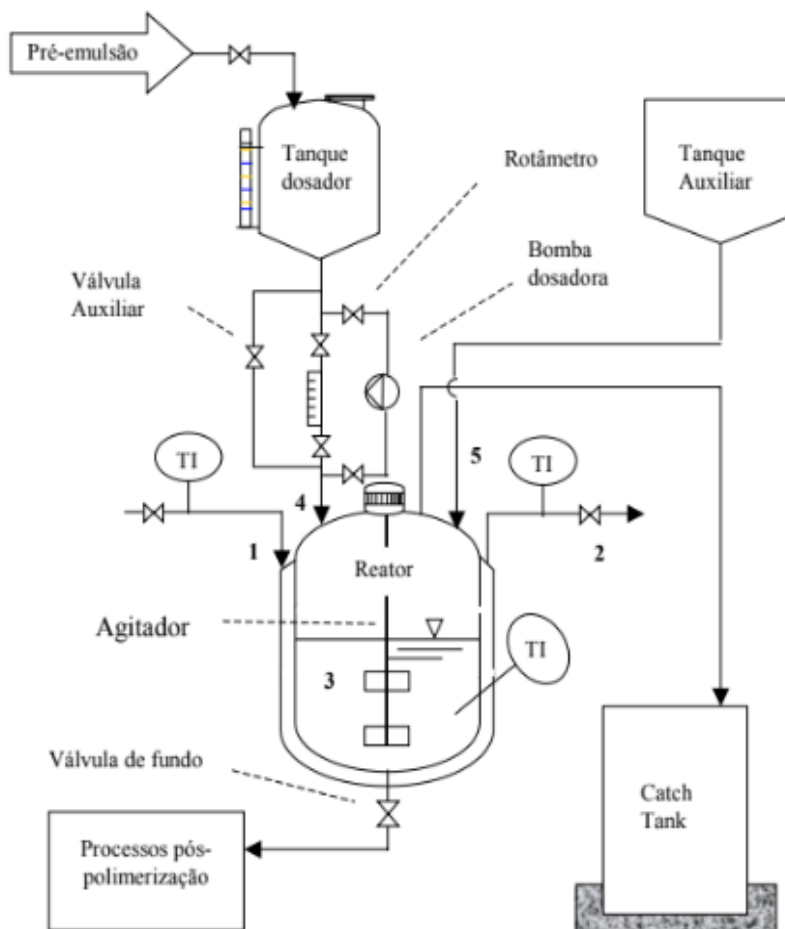
Os polímeros foram classificados em duas grandes categorias por Carothers (1929) de acordo com o mecanismo de polimerização: adição ou condensação. A polimerização em adição é realizada a partir da adição sucessiva de monômeros à

cadeia polimérica principal, havendo primeiramente a iniciação (formação de radical livre no monômero induzida pela substância iniciadora através da quebra de ligação de carbono do monômero), em seguida, a propagação (incremento de monômeros à cadeia) e, por fim, a terminação (fechamento do último radical pela substância iniciadora). Já a polimerização por condensação prevê a liberação de uma substância simples como água ou ácido clorídrico a partir da reação entre monômeros (CANEVAROLO, 2006).

Billmeyer (1984) também apresenta outra classificação importante quanto ao processo de polimerização, que, dentre outros, pode ser em suspensão ou em emulsão. Na polimerização em suspensão o monômero está disperso no sistema aquoso, e o iniciador é dissolvido nessa fase. Já na polimerização em emulsão há a presença de duas fases líquidas, uma aquosa, contendo o iniciador, e uma não aquosa, contendo os monômeros e polímero formado, e há a necessidade de adição de um agente emulsionante para promover a interação entre as fases e a polimerização dentro das micelas.

Sendo assim, no processo de produção da resina acrílica por adição em emulsão, é necessário que haja a presença dos monômeros, o iniciador, que é responsável pela formação de radicais livres, o emulsionante, e alguns outros aditivos de processo como agentes oxidantes e redutores. Monômeros e iniciador são adicionados, e a massa precisa ser mantida a temperatura constante, para garantir que a reação ocorra adequadamente. Tendo em vista que na polimerização por adição ocorre a quebra de uma dupla ligação, o processo em si libera energia, ou seja, a reação é exotérmica, e tem uma entalpia de polimerização associada ao consumo de monômeros (AGOSTINI, 2006). A Figura 1 mostra um fluxograma simplificado do processo de produção de resina vinil acrílica proposto por Agostini.

Figura 1 – Processo de produção de resina vinil acrílica

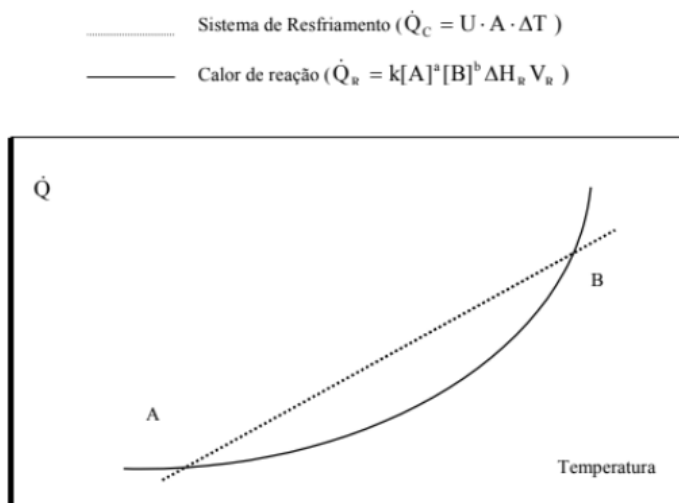


Fonte: Agostini (2006)

A demanda por manutenção de temperatura constante associada à liberação de energia na forma de calor faz com que seja necessário um rígido controle de temperatura, não somente para garantir uma reação adequada e consequentemente um tamanho de partícula esperado, mas principalmente em termos de segurança de processos. Um dos termos mais conhecidos na área de processos químicos é o de reação descontrolada, ou *runaway reaction*, que ocorre quando reações exotérmicas geram calor a uma taxa superior à taxa de remoção de calor do sistema de refrigeração do reator, causando um rápido aumento de temperatura reacional sem permitir um tempo de resposta operacional para contorno da situação (CCPS, 2016). Isso pode ocorrer devido a um aumento indevido de vazão de reagentes, falha no sistema de resfriamento, falha no controle de temperatura do reator, etc.

O diagrama de Semenov, conforme apresentado na Figura 2, é um bom método para demonstrar a relação entre a taxa de geração de calor de uma reação exotérmica perante a taxa de remoção de calor do sistema de resfriamento (STOESSEL, 1993; SMITH, 1982, 1984; O'BRIAN *et al.*, 1982, apud AGOSTINI, 2006).

Figura 2 – Diagrama de Semenov



Fonte: Agostini (2006)

O ponto A demarca o início do processo, e é percebido que, quando há aumento da temperatura, o sistema de resfriamento possui uma taxa de remoção de calor maior do que a taxa de geração, até que se chega no ponto B. Este é crítico, já que há um aumento significativo da taxa de geração de calor, a qual é superior à capacidade do sistema de resfriamento, e consequentemente gera um rápido aumento de temperatura. Isso impossibilita que haja tempo hábil para alguma ação operacional, o que pode ocasionar sérios incidentes de processo como explosões e liberação de químicos, colocando em risco a segurança das pessoas, do ambiente e das instalações, evidenciando-se assim a extrema necessidade da atenção para a segurança de processos nas indústrias químicas.

2.2 SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS

Segundo Sanders (2015), os registros das primeiras transformações de materiais para um determinado fim são datados desde 5000 a.C., quando os seres humanos utilizavam argila moldada e posteriormente aquecida para obtenção de

ferramentas e utensílios necessários. Desde então, a necessidade da espécie humana de tornar a vida melhor ou mais fácil impulsionou diversas descobertas e novas transformações. No entanto, foi somente durante a revolução industrial, no século XVIII, que surgiu o primeiro processo químico em larga escala: o processo de LeBlanc, responsável pela produção de carbonato de sódio a partir do sal de cozinha (cloreto de sódio) (SANDERS, 2015).

Até esse momento, apenas 14 elementos químicos haviam sido descobertos, já durante o século XIV, já se tinha conhecimento de pelo menos 100 elementos químicos. As duas guerras mundiais foram responsáveis pelo rápido desenvolvimento da indústria química no século XX, devido à necessidade de fabricação de munições, explosivos e combustíveis. Ao longo das décadas, os processos químicos se desenvolveram cada vez mais, com a utilização e criação de substâncias corrosivas, tóxicas, inflamáveis, bem como a necessidade de operar processos com temperaturas e pressões cada vez mais altas (SANDERS, 2015).

No entanto, a concretização desses processos indiscriminadamente, isto é, sem uma preocupação com a segurança, desencadeou uma série de explosões, incêndios, liberações de substâncias tóxicas e alguns acidentes trágicos entre as décadas de 70 e 90. Um deles foi o desastre de Bhopal, na Índia, que matou mais de 2000 civis e ficou conhecido como o maior desastre químico da história. A planta da Union Carbide produzia pesticidas, sendo um dos compostos intermediários do processo o Metil isocianato (MIC), substância bastante tóxica, volátil (temperatura de ebulição de 39,1°C a 1 atm), duas vezes mais densa que o ar atmosférico e que reage exotermicamente com água. Na noite de 3 de dezembro de 1984, o tanque de armazenamento de MIC foi contaminado com alguma solução aquosa, elevando a temperatura do sistema à temperatura de ebulição do MIC. O tanque continha um sistema de alívio de pressão, um purificador e um flare, responsável pela queima do vapor em caso de liberação. No entanto, nem o purificador nem o flare estavam em operação, e cerca de 25 toneladas de vapor tóxico foram liberadas para a cidade de Bhopal (CROWL; LOUVAR, 2001).

A partir de então, a sociedade passou a temer e condenar as indústrias químicas, e tanto a fim de reverter essa imagem quanto de prevenir a ocorrência de mais desastres, organizações como o *International Council of Chemical Associations* (ICCA) e o *American Institute of Chemical Engineers* (AIChE) voltaram ações com

foco em segurança de processos, como a criação de iniciativas como o Responsible Care® e o *Center of Chemical Process Safety* (CCPS)? (CCPS, 2016).

No Brasil, a Associação Brasileira da Indústria Química (ABQUIM) incorporou à sua missão o Programa Atuação Responsável®, programa que segue os elementos-chave do Responsible Care®, do ICCA, e serve de guia para as empresas associadas, estabelecendo os requisitos (indispensáveis e complementares) para desenvolver os temas relacionados à saúde, à segurança e ao meio ambiente a serem integrados ao sistema de gestão da empresa (ABQUIM, 2022).

O AIChE define a segurança de processos como a área responsável pela prevenção de incêndios, explosões e liberações acidentais de químicos em instalações de processos químicos. Os cenários mencionados podem gerar acidentes, cuja definição se trata da ocorrência de uma sequência de eventos que produzem a lesão não intencional, morte e/ou danos materiais. Segundo Crowl e Louvar (2001) “Perigo é uma condição física ou química que tem o potencial de causar danos às pessoas, à propriedade ou ao meio ambiente. E risco é uma medida de lesão humana, dano ambiental, ou perda econômica em termos tanto da probabilidade de incidente quanto da magnitude da perda ou lesão”.

A fim de mapear e controlar os riscos existentes em determinados processos, é necessário fazer o uso de metodologias de análises de risco, como por exemplo o estudo do *Hazard and Operability* (HAZOP). Segundo Crawley (2015), este é um método desenvolvido na década de 60 pelo ICI e divulgado pelo guia de 1977 da *Chemical Industries Association* (CIA) para a avaliação dos riscos de um processo bem definido, seja um projeto ou processo existente. O HAZOP consiste em uma análise realizada por um time multidisciplinar a respeito de uma operação, segmentada por nós, que nada mais são que pontos do processo, utilizando determinadas palavras-guia combinadas a parâmetros do processo para cercar variações significativas da operação padrão. As palavras-guia comumente utilizadas e seus significados estão presentes no Quadro 1, e o Quadro 2 revela possíveis parâmetros de processos a serem considerados.

Quadro 1 – Palavras-guia padrão e seus significados genéricos

Palavra-guia	Significado
Não (não, nenhum)	A intenção do projeto não é alcançada/Nenhuma das intenções do projeto é alcançada
Mais (mais de, maior)	Aumento de quantitativo em um parâmetro
Menos (menos de, menor)	Diminuição de quantitativo em um parâmetro
Bem como (mais do que)	Uma atividade adicional ocorre
Parte de	Somente parte da intenção do projeto é alcançada
Reversão	Ocorre o oposto lógico da intenção do projeto
Diferente de (outro)	Substituição completa - outra atividade ocorre ou uma atividade não usual ocorre ou a existência de condição incomum
Onde mais	Aplicável a fluxos, transferências, origens e destinos
Antes/depois	A etapa (ou parte dela) é executada fora da sequência
Cedo/tarde	O momento é diferente da intenção
Mais rápido/mais lento	A etapa é realizada/não realizada no momento correto

Fonte: Crawley (2015).

Quadro 2 – Exemplos de possíveis parâmetros em operações

Vazão	Transferência	Composição	Tempo
Pressão	Nível	Adição Velocidade	Tamanho de partícula
Temperatura	Viscosidade	Monitoramento	pH
Agitação	Reação	Separação	Sinal

Fonte: Crawler (2015) (adaptado pela autora)

Com o intuito de categorizar e definir níveis de segurança necessários para cada etapa do processo, é recomendado associar análises de risco como o HAZOP a uma análise que relaciona probabilidade e severidade do risco, para que seja possível definir o nível de integridade de segurança, ou *Safety Integrity Level* (SIL) e assim avaliar corretamente o *Safety Instrumented System* (SIS) necessário para reduzir o risco.

A determinação do SIL geralmente é realizada com base nas diretrizes das normas europeias IEC 61511 e IEC 61508 as tratam do padrão internacional de funções de segurança para a indústria. Uma adaptação da matriz de risco associada

ao SIL adaptada por LEE *et al.*, (2019) para situações de reações descontroladas está representada no Quadro 3.

Quadro 3 – Matriz de risco adaptada da norma IEC 61508 padrão para reações descontroladas

Probabilidade	Severidade			
	Insignificante	Média	Crítica	Catastrófica
Frequente	SIL 2	SIL 4		
Provável	SIL 1	SIL 3		
Ocasional		SIL 2	SIL 3	SIL 4
Baixa		SIL 1	SIL 2	SIL 3
Remota			SIL 1	SIL 2
Improvável				SIL 1

Fonte: LEE et al. (2019)

Os campos em branco são considerados insignificantes, os campos em cinza claro são considerados toleráveis e os riscos que se enquadram nos campos em cinza escuro são considerados como intoleráveis, posto que correspondem a riscos que não podem ser reduzidos por um SIS sozinho. A avaliação do SIL proporciona a base para a determinação das funções instrumentadas de segurança (SIF) e *Safety Instrumented System* (SIS) necessários.

2.3 CONSIDERAÇÕES ATUAIS DE SEGURANÇA DE PROCESSOS ENVOLVENDO POLIMERIZAÇÕES

Estudos recentes afirmam que uma das principais causas para incidentes de segurança de processo em reações exotérmicas (como algumas polimerizações, por exemplo) é o acúmulo de reagentes ou intermediários no reator visto isto pode gerar aumento rápido e expressivo na temperatura da massa reacional, configurando uma reação descontrolada (LEE *et al.*, 2019).

Lee *et al.* (2019) estudou a instalação de um *Safety Instrumented System* (SIS) na prevenção de reações descontroladas em um reator de batelada a partir da simulação das condições de processo que ocasionaram um incidente na Coreia em 2014. Foi realizada inicialmente uma análise teórica do risco térmico de uma reação descontrolada, em que foram definidas as severidades e probabilidades a fim de estabelecer o SIL para os riscos estabelecidos. Ao simular as condições de

processo do incidente em paralelo a outras velocidades de agitação, verificou-se que caso este parâmetro ultrapasse 100 rpm, há a geração de uma reação descontrolada. Foi determinado um SIL 4 para o caso, e o SIS indicado envolveu a detecção de temperatura alta por meio de sensores, aliada à parada do agitador e adição de uma solução inibidora à massa e/ou a inserção de um fluido refrigerante na serpentina do reator.

Silva (2019) discutiu sobre os riscos relacionados à produção de resina acrílica para tinta automotiva em reator do tipo batelada, com base na análise da operação e falhas das válvulas de alimentação e retirada de óleo térmico do sistema de aquecimento do reator. O primeiro cenário levou em consideração a falha que provocaria a abertura completa da válvula de óleo térmico a 300 °C, e identificou-se a circunstância de uma reação descontrolada, visto que a massa atingiria a temperatura normal de processo (144 °C) em $\frac{1}{6}$ do tempo de reação usual. Já o segundo cenário simulou o mesmo cenário mantido por 1 (uma) hora e verificou-se que, apesar da possibilidade de manter a temperatura da massa abaixo da temperatura normal de processo, houve valores intermediários indesejados, aproximadamente 280 °C. E por fim, o terceiro cenário representou a falha gradual na posição totalmente aberta da válvula por 28 minutos e foi identificado um cenário igualmente perigoso com a provocação de uma reação descontrolada. Os cenários mencionados reiteram a importância de uma criteriosa análise de segurança de processos para garantir a minimização dos riscos envolvendo as polimerizações exotérmicas.

Pereira e Pedrosa (2022) analisaram e discutiram recomendações de segurança de processos a partir da reação descontrolada que implicou no acidente na planta da *T2 Laboratories, Inc.* em 2007. A primeira recomendação pautou-se na revisão da análise de risco do processo (HAZOP) antes da modificação realizada em relação ao aumento na concentração dos reagentes, o que teria como resultado indicações da necessidade de sistema secundário de resfriamento, por exemplo, para o nó “vazão maior”. Outra recomendação tratou da implementação do controle em cascata entre a variável controlada e a variável manipulada MV (vazão de fluido refrigerante na camisa do reator) para que haja uma compensação na MV motivada por distúrbios no próprio sistema de resfriamento, antes que seja necessário um efeito na variável controlada (temperatura da massa).

3 METODOLOGIA

Para condução do trabalho será utilizado o estudo de caso proposto por Agostini (2006), que se trata de um incidente de segurança de processo ocorrido na produção de uma resina vinil acrílica.

- **Elaboração do HAZOP**

Para a construção do HAZOP é preciso:

1. Realizar a definição dos nós do processo;
2. Identificar os principais parâmetros de operação relativos ao processo presente no estudo de caso e, assim, definir as variáveis a serem avaliadas em cada nó;
3. Definir quais os desvios serão considerados para cada variável com base em palavras-guia;
4. Realizar uma análise de possíveis causas para os desvios;
5. Definir as possíveis consequências dos desvios;
6. Estabelecer medidas de controle.

- **Avaliação dos sistemas de instrumentação e controle das etapas do processo**

Após realizada a análise de risco, é necessário a determinação de medidas de controle, o que incluirá a proposta de sistemas de instrumentação e controle tanto em malha aberta quanto em malha fechada, como instalação de válvulas, intertravamentos de transmissores de temperatura com linhas de alimentação, sistemas de emergência, etc.

- **Projeto da instrumentação de processo em diagrama e relação de alarmes e interlocks**

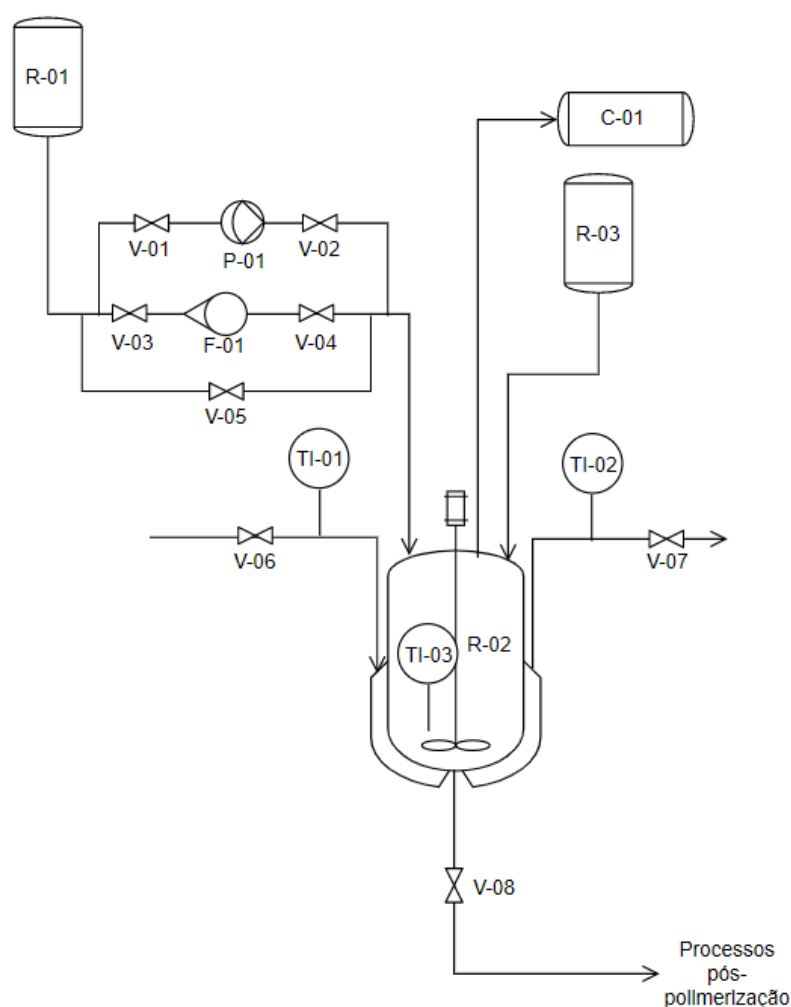
Por fim, os equipamentos definidos como parte integrante do sistema de controle necessário serão representados em um Diagrama de Instrumentação e Tubulação, ou *Pipe and Instrumentation Diagram*, (P&ID), a partir do editor gráfico online *Draw.io*, bem como a elaboração da relação de alarmes e interlocks necessários para garantir a eficácia na segurança do processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO DO PROCESSO

A planta utilizada neste trabalho tem como objetivos a produção de resina estirenada e resina vinil acrílica. A última é produzida em dispersão 50% em meio aquoso, e sua síntese se dá por meio de polimerização por adição entre os monômeros acetato de vinila (AV) e acrilato de butila (AB). Agostini (2006) apresentou a representação do processo produtivo que pode ser vista na Figura 1.

Figura 3 – Representação do processo de produção de resina vinil acrílica



Fonte: AGOSTINI, 2006 (adaptado)

Quadro 4 – Relação de TAGs, equipamentos e instrumentos

TAG	Descrição do equipamento ou instrumento
R-01	Tanque dosador de pré-emulsão
R-02	Reator
R-03	Tanque auxiliar
C-01	<i>Catch tank</i>
P-01	Bomba dosadora
F-01	Rotâmetro
V-01	Válvula manual à montante da bomba
V-02	Válvula manual à jusante da bomba
V-03	Válvula manual à montante do rotâmetro
V-04	Válvula manual à jusante do rotâmetro
V-05	Válvula auxiliar
V-06	Válvula manual da entrada da água de resfriamento
V-07	Válvula manual de saída da água de resfriamento
V-08	Válvula de fundo
TI-01	Indicador de temperatura da entrada da camisa do reator
TI-02	Indicador de temperatura da saída da camisa do reator
M-01	Agitador do reator

Fonte: AGOSTINI, 2006 (adaptado pela autora)

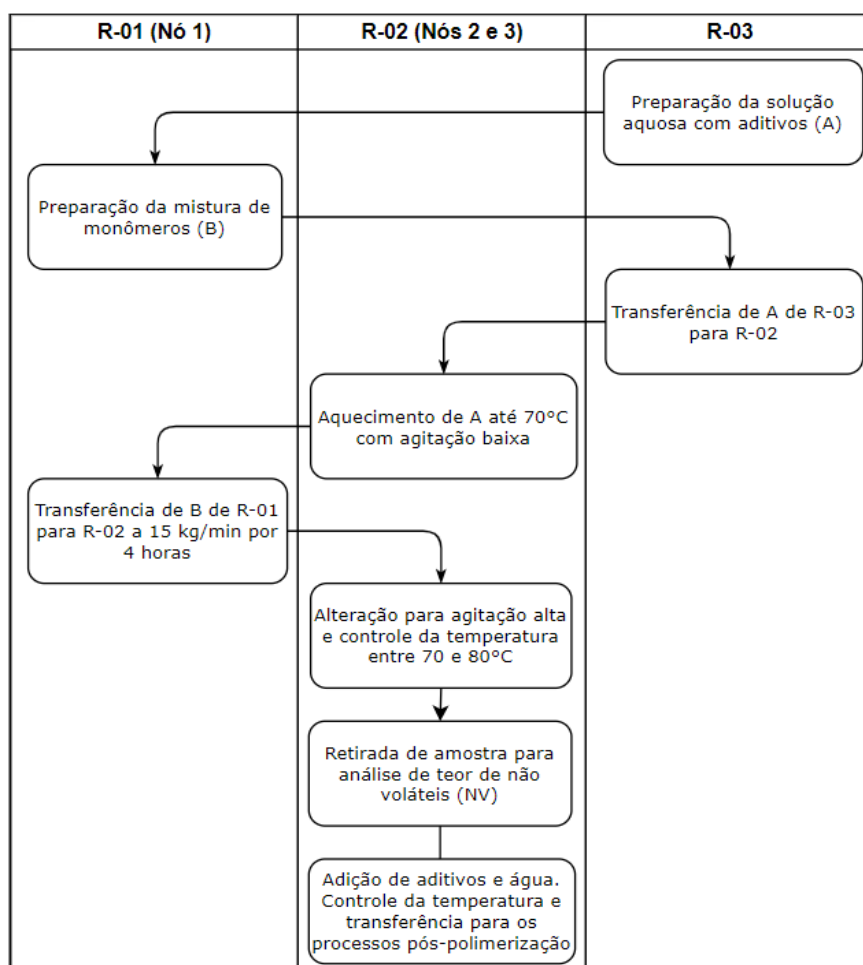
A produção é realizada em semi batelada, em que uma mistura de monômeros, também chamada por pré-emulsão, é adicionada a um fluxo constante em um reator, o qual opera à pressão atmosférica, contendo uma solução aquosa de iniciador pré-aquecida. Conforme demonstrado na Figura 1, no reator, há cinco principais correntes e fluidos envolvidos, são eles:

- Correntes 1 e 2: correntes de entrada e saída de água de resfriamento na serpentina do reator, respectivamente;
- Fluido 3: massa reacional;
- Corrente 4: corrente de entrada de pré-emulsão;
- Corrente 5: corrente do tanque auxiliar para o reator contendo água e aditivos com funções de iniciador, oxidante e redutora.

Além disso, o sistema conta com três indicadores de temperatura: o primeiro na corrente de entrada da água de resfriamento do reator, o segundo na saída e o terceiro na massa reacional. Há ainda a presença de um *catch tank*, que consiste em um vaso de contenção separado destinado a reter vapores formados durante o processo e pode receber uma descarga de emergência de uma reação descontrolada, por exemplo, proveniente de dispositivos e tubulações de alívio presentes no reator do processo. Para completar o sistema, existe um rotâmetro, responsável por possibilitar o ajuste da vazão de pré-emulsão ao reator.

Entre o tanque dosador e o reator existem 3 vias para transferência do produto, a linha que conta somente com a válvula auxiliar, a linha do rotâmetro e a linha com a bomba dosadora. Segundo Agostini (2006), para a produção da resina vinil acrílica, é utilizada apenas linha que contém o rotâmetro, e a válvula auxiliar é mantida fechada com cadeado durante a produção de todos os tipos de resinas, e só é aberta quando há falha no sistema de alimentação do reator via bomba na produção da resina estirenada. As etapas do processo de produção e as condições do processo estão representadas no fluxograma da Figura 4 e na Tabela 1 de acordo com Agostini (2006), respectivamente.

Figura 4 – Fluxograma do processo



Fonte: A autora.

Tabela 1 – Condições do processo

Variável	Valor
Temperatura inicial [°C]	70°C
Fração dos monômeros AV/AB [% peso]	80/20
Água [%]	50%
Aditivos [%]	4%
Vazão de monômeros [kg/min]	15 kg/min
Tempo de reação [h]	4 horas
Faixa de temperatura de reação	70°C < T < 80°C

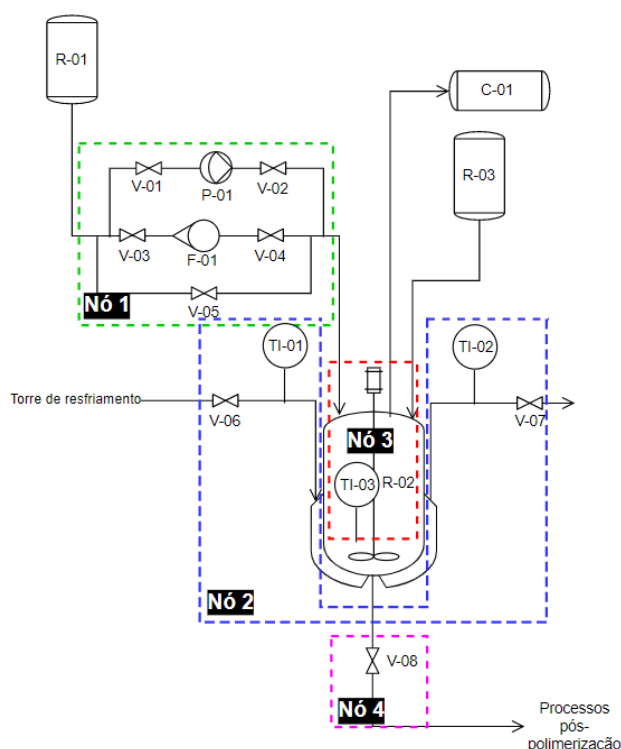
Fonte: AGOSTINI, 2006 (adaptado pela autora).

4.2 ELABORAÇÃO DO HAZOP

4.2.1 Definição dos nós

O diagrama do processo proposto por Agostini (2006) foi dividido em 4 nós, conforme observado na Figura 5, em que o primeiro nó se trata da transferência de pré-emulsão para o reator, o segundo nó é o sistema de resfriamento, o terceiro nó é o reator em si e o quarto e último nó é a válvula de fundo do reator.

Figura 5 – Divisão dos nós no fluxograma do processo



Fonte: A autora.

4.2.2 Definição de variáveis a serem controladas e palavras-guia

A partir do conhecimento do processo a ser estudado, é importante realizar a definição das variáveis que podem ocasionar consequências caso desviem de valores de controle e por isso devem ser monitoradas. Para reações de polimerização, é importante que variáveis como vazão, pressão, temperatura e agitação sejam monitoradas. O aumento da vazão de monômeros, por exemplo, pode levar a uma reação descontrolada. Uma agitação baixa ou nula pode ocasionar

acúmulo de monômeros e levar também a uma reação descontrolada. O aumento da temperatura de reação é a consequência para uma das causas já levantadas. As variáveis avaliadas em cada nó encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 – Variáveis a serem controladas no processo apresentado

Nó	Variável	Sistema/Tubulação
1	Vazão	Pré-emulsão
2	Vazão	Água de resfriamento
	Temperatura	Entrada da água de resfriamento
		Saída da água de resfriamento
3	Pressão	Reator
	Temperatura	Reator
	Agitação	Reator
	Nível	Reator
	Composição	Reator

Fonte: A autora.

Além disso, foi possível determinar as palavras-guia a serem utilizadas na construção do HAZOP. Foi decidido utilizar as palavras Nenhum, Menos e Mais.

4.2.3 Construção do HAZOP

Definidos os nós, as variáveis e as palavras-guia, realizou-se a elaboração do HAZOP, o qual foi segregado também pelos nós. Algumas observações em relação ao estado inicial da planta foram feitas para definir as possíveis causas dos desvios, são elas:

- Agostini (2006) aponta que todas as operações com as válvulas presentes no diagrama são manuais, logo infere-se que todas as válvulas são manuais;
- Os indicadores de temperatura são instrumentos de campo, ou seja, toda a verificação de temperatura é feita pelo operador em campo através da leitura dos instrumentos;
- A transferência de pré-emulsão para o reator é realizada por gravidade devido à ausência de bomba na linha principal de dosagem (linha do rotâmetro);
- Não há um sistema de automação.

O HAZOP elaborado encontra-se disponível no Quadro 6, conforme apresentado a seguir:

Quadro 6 – Fragmento do HAZOP

Nó	Variável	Palavra-guia	Desvio	Causas	Consequências
1	Vazão de pré-emulsão	Nenhum	Ausência de fluxo	Bloqueio indevido de uma das válvulas da linha do rotâmetro Obstrução completa na linha do rotâmetro	Parada na dosagem de pré-emulsão, que leva a parada na reação, a qual, dependendo do tempo de parada, pode levar ao abaixamento da temperatura da massa reacional e perda do lote que está no reator
1	Vazão de pré-emulsão	Menos	Vazão menor que 15 kg/min	Bloqueio indevido da válvula de saída do rotâmetro Obstrução na linha do rotâmetro Vazamento de produto Rotâmetro descalibrado	Aumento no tempo de reação e possível não atingimento da temperatura de reação adequada levando à não polimerização e perda do material
1	Vazão de pré-emulsão	Mais	Vazão maior que 15 kg/min	Abertura indevida da válvula auxiliar Abertura maior que o necessário da válvula pós-rotâmetro Abertura das válvulas da via da bomba dosadora Rotâmetro descalibrado	Aumento rápido da quantidade acumulada de monômeros, liberação de calor excessiva, reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
2	Vazão de água de resfriamento	Nenhum	Ausência de fluxo	Bloqueio indevido das válvulas de água de resfriamento Obstrução completa na linha de resfriamento	Taxa de remoção de calor nula, superaquecimento do reator, reação descontrolada e sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
2	Vazão de água de resfriamento	Menos	Vazão menor	Bloqueio indevido da válvula de resfriamento Obstrução na linha de resfriamento Vazamento de água	Diminuição da taxa de remoção de calor e consequente aumento da temperatura reacional, reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
2	Vazão de água de resfriamento	Mais	Vazão maior	Abertura maior que o necessário da válvula de resfriamento	Aumento da taxa de remoção de calor e consequente diminuição da temperatura reacional, o que pode fazer com que o processo não chegue à temperatura de reação e a polimerização não aconteça, levando à perda do material
2	Temperatura de entrada da água de resfriamento	Menos	Temperatura baixa (abaixo de 28°C)	Falha no indicador de temperatura Temperatura ambiente baixa	Dependendo de quão baixa, pode levar aumento da taxa de remoção de calor e consequente diminuição da temperatura reacional, o que pode fazer com que o processo não chegue à temperatura de reação e a polimerização não aconteça, levando à perda do material
2	Temperatura de entrada da água de resfriamento	Mais	Temperatura alta (acima de 28°C)	Falha no indicador de temperatura Temperatura ambiente alta Falha operacional ao não reverter de aquecimento para resfriamento do reator	Aumento na dificuldade de troca térmica, o que pode levar a uma diminuição na taxa de remoção de calor e consequente aumento da temperatura reacional, reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Temperatura da reação	Menos	Temperatura baixa (menor que 70°C)	Falha no indicador de temperatura Abertura maior que o necessário da válvula de resfriamento Temperatura de entrada da água de resfriamento baixa Vazão de pré-emulsão baixa ou nula	Ineficiência da polimerização, que pode levar à perda do material que está no reator
3	Temperatura da reação	Mais	Temperatura alta (maior que 80°C)	Falha no indicador de temperatura Falta de fluido refrigerante (fechamento indevido de válvulas da camisa) Ineficiência de troca térmica	Mudança na composição dos produtos, reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão

				com a camisa por incrustações internas à parede do reator Temperatura de entrada do fluido refrigerante alta Vazão de pré-emulsão alta	
3	Agitação do reator	Não	Sem agitação	Falha no motor do agitador Falha operacional em não ligar o agitador	Acúmulo de monômeros, geração de reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Agitação do reator	Menos	Agitação baixa	Falha no motor do agitador Falha operacional em selecionar vazão mais baixa que a indicada no descritivo de processo Alta viscosidade da massa reacional	Acúmulo de monômeros, geração de reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Agitação do reator	Mais	Agitação alta	Falha no motor do agitador Falha operacional em selecionar vazão mais alta que a indicada no descritivo de processo	Aceleração da reação, geração de reação descontrolada, sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Pressão	Mais	Pressão alta	Reação descontrolada	Sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Nível	Mais	Nível alto	Adição de mais produto que o indicado (pré-emulsão ou aditivos) Reação descontrolada	Sobrepressão no reator e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão
3	Composição	Menos	Composição menor (teor de NV menor que 50%)	Polimerização insuficiente	Perda do material do reator
4	Fluxo	Diferente de zero	Há fluxo	Abertura indevida da válvula de fundo durante ou antes processo reacional	Processo reacional ocorrendo na tubulação de transferência de produto a qual não possui resfriamento nem agitação. Sobrepressão na tubulação e sua ruptura, expulsão de produtos, com potencial de explosão e/ou explosão

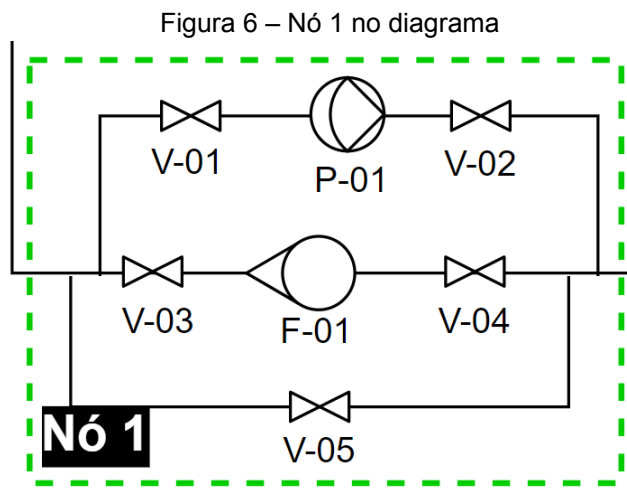
Fonte: A autora.

A omissão da coluna de medidas de controle no HAZOP foi proposital, já que estas serão abordadas de forma mais detalhada no próximo tópico.

4.3 AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE DAS ETAPAS DO PROCESSO

Foi realizada a proposição de medidas de controle para cada nó com base em camadas de design de processo, sistema de controle básico do processo, alarmes críticos, funções instrumentadas de segurança, dispositivos de alívio e contenções para os desvios identificados no HAZOP.

4.3.1 Nó 1 - Transferência de pré-emulsão (R-01) para o reator (R-02)



Fonte: A autora.

O nó 1 representa a etapa de dosagem de pré-emulsão no reator, a qual poderia ocorrer por 3 vias, segundo Agostini (2006).

1. Design do processo

A fim de garantir que haja apenas uma via para realização desta operação de transferência, é indicado que haja a desativação e remoção física das linhas periféricas.

2. Sistema de controle básico do processo

É necessário que haja a instalação de uma válvula de controle atuada, um medidor de vazão e uma válvula atuada após o medidor. É fundamental a utilização de controladores para que a variável manipulada (percentual de abertura da válvula de controle) possa responder às variações de processo tais como interlocks.

3. Alarmes críticos e intervenções humanas

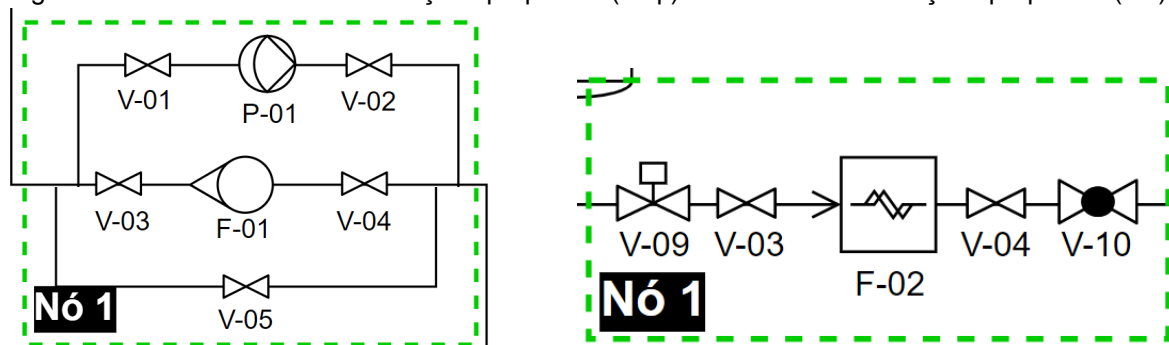
Em relação a alarmes críticos, para este nó foi definido apenas um alarme de vazão alta como superior a 15 kg/min + limite de erro admissível do instrumento de medição, já que, como definido no HAZOP, esse tipo de desvio pode gerar consequências com potencial de explosão.

4. Funções instrumentadas de segurança (SIF)

Os instrumentos do nó 1 estão atrelados a SIFs estabelecidas para os outros nós seguintes.

Sendo assim, a nova configuração do nó 1 com as modificações propostas está representada na Figura 7.

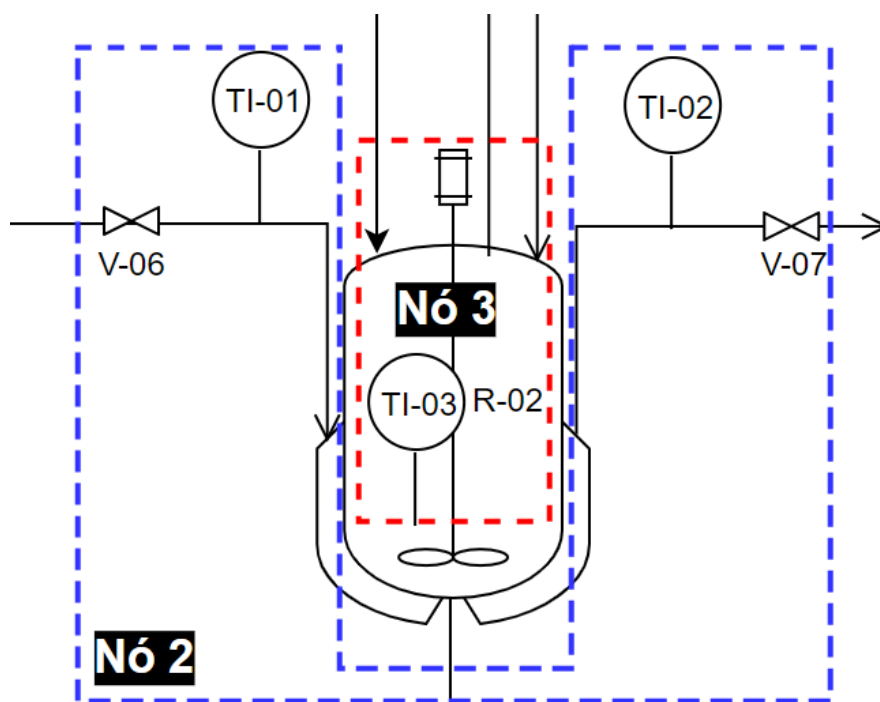
Figura 7 – Nó 1 antes das modificações propostas (esq.) e nó 1 com modificações propostas (dir.)



Fonte: A autora.

4.3.2 Nó 2 - Sistema de resfriamento do reator

Figura 8 – Nó 2 no diagrama



Fonte: A autora.

O nó 2 representa o sistema de resfriamento do reator, o qual conta com a alimentação de água proveniente da torre de resfriamento, serpentina que envolve o reator e saída com retorno para a torre, além de dois indicadores de temperatura.

1. Design do processo

Para garantir que o resfriamento atue mesmo que haja uma falha do sistema de controle, é importante construir mais duas linhas como backup, uma com uma válvula automática on-off e outra com uma válvula manual com sensor de posição, para garantir possibilidade de atuação mesmo se a válvula atuada falhar.

2. Sistema de controle básico do processo

Devido à importância do sistema de resfriamento por se tratar de uma reação exotérmica, é sugerido que haja, na linha de entrada principal, uma válvula de controle, um medidor de vazão mássica e dois transmissores de temperatura (em redundância). Já na saída, é importante que haja também dois transmissores de temperatura e uma válvula atuada. É fundamental a utilização de controladores para que a variável manipulada (percentual de abertura da válvula de controle) possa responder às variações de processo tais como a temperatura do reator.

3. Alarmes críticos e intervenções humanas

Para este nó foram definidos dois alarmes com base nos desvios que geram consequências com potencial de explosão:

- Vazão baixa de água de resfriamento (abaixo de 20% da vazão usualmente utilizada)
- Temperatura alta de entrada de água de resfriamento (acima de 35°C)

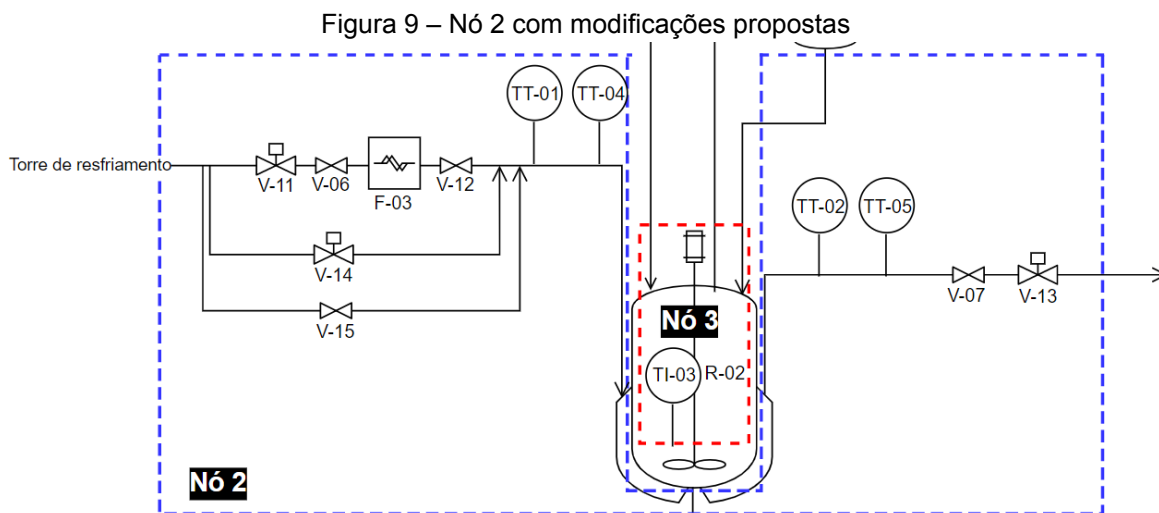
4. Funções instrumentadas de segurança (SIF)

Para o sistema de resfriamento, foi definida uma função instrumentada de segurança relacionada a:

- Temperatura
 - Diferença entre os transmissores de temperatura da entrada da camisa do reator maior que 4°C.

A função promove o seguinte comportamento no sistema: fechamento das válvulas de alimentação do reator e abertura 100% das válvulas da linha de resfriamento para mitigar a geração de calor imposta por uma reação descontrolada.

Sendo assim, a nova configuração do nó 2 com as modificações propostas está representada na Figura 9.

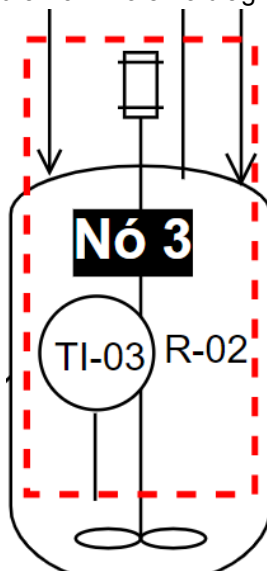


Fonte: A autora.

4.3.3 Nó 3 - Reator (R-02)

O nó 3 (Figura 10) representa o reator e as variáveis vinculadas a ele. O reator conta com a alimentação de pré-emulsão (detalhada no nó 1), a alimentação de aditivos, a tubulação para o *catch tank*, a saída para os processos pós-polimerização, um agitador, um indicador de temperatura e nele é realizada a amostragem para análise do teor de não-voláteis.

Figura 10 – Nó 3 no diagrama



Fonte: A autora.

1. Design do processo

Não foi proposta nenhuma modificação no design do processo para o nó 3.

2. Sistema de controle básico do processo

Para o nó 3, é proposta a instalação de dois transmissores de temperatura, um transmissor de pressão e um sensor de nível. É fundamental a utilização de controladores para que a variável de resposta (temperatura da massa) possa fornecer os sinais que impliquem na manipulação de outras variáveis como percentual de abertura da válvula de resfriamento e interlocks.

3. Alarmes críticos e intervenções humanas

Para este nó foram definidos dois alarmes com base nos desvios que geram consequências com potencial de explosão:

- Pressão alta (10% acima da pressão de operação)
- Nível alto (acima de 90% da capacidade do reator)

4. Funções instrumentadas de segurança (SIF)

Para o reator, foram definidas 3 funções instrumentadas de segurança, são elas relacionadas a:

- Vazão
 - Vazão alta de monômeros (acima de 10% da vazão de operação)
- Temperatura
 - Temperatura alta do reator (acima de 84°C)
 - Diferença entre os medidores de temperatura do reator (acima de 4°C)
- Agitação
 - Agitação baixa ou desligada

Todas as funções promovem o mesmo comportamento no sistema: fechamento das válvulas de alimentação do reator e abertura 100% das válvulas da linha de resfriamento para mitigar a geração de calor imposta por uma reação descontrolada.

5. Proteção física (dispositivos de alívio)

Devido ao fato de a API RP 520 (1990) e API RP 521 (1990) não recomendarem válvulas de alívio para reações descontroladas em reatores tipo

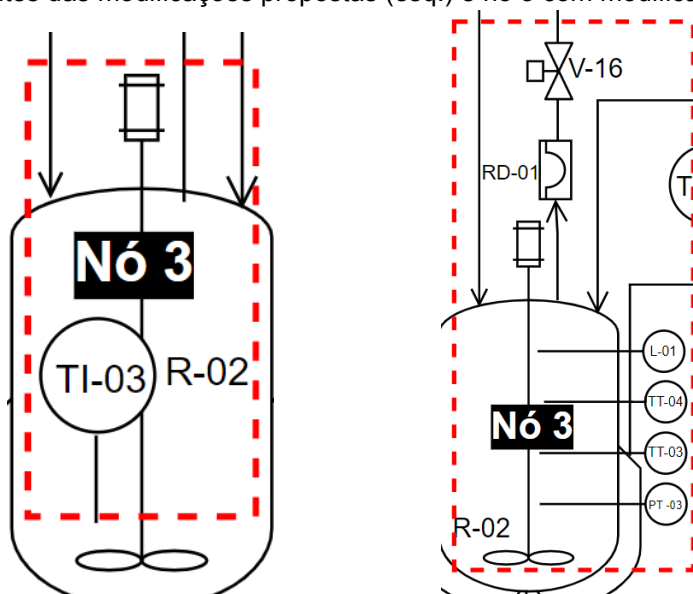
batelada, mas sim medidas de segurança em redundância para a prevenção da reação descontrolada, não foi proposto nenhum dispositivo de alívio.

6. Proteção física para liberações (contenções)

O processo atual já conta com a presença do *catch tank* C-01 para contenção de possíveis reações descontroladas. É proposta a adição no diagrama do processo do disco de ruptura e da válvula de segurança na tubulação que vai para o *catch tank*.

Sendo assim, a nova configuração do nó 3 com as modificações propostas está representada na Figura 11.

Figura 11 – Nó 3 antes das modificações propostas (esq.) e nó 3 com modificações propostas (dir.)

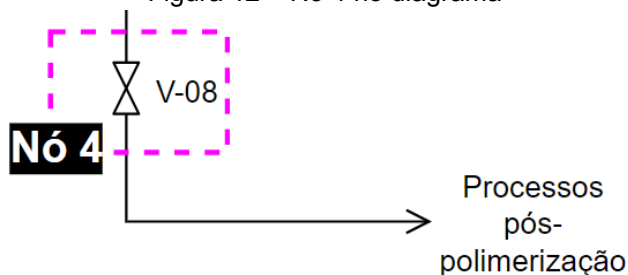


Fonte: A autora.

4.3.4 Nó 4 - Válvula de fundo do reator

O nó 4 representa a tubulação pós reator, que conta com uma válvula manual.

Figura 12 – Nó 4 no diagrama



Fonte: A autora.

1. Design do processo

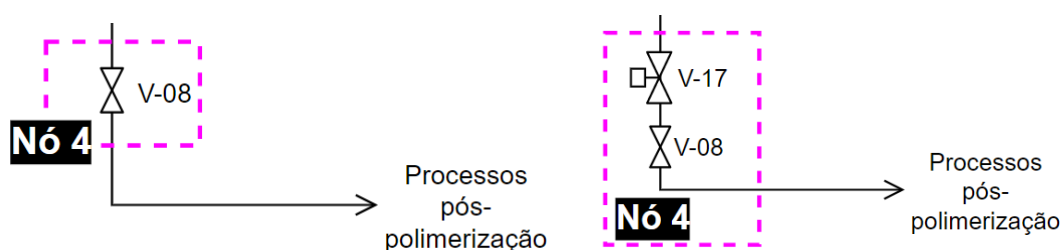
Não foi proposta nenhuma modificação no design do processo para o nó 4.

2. Sistema de controle básico do processo

Para o nó 3, é proposta a instalação de uma válvula atuada e é fundamental a utilização de controladores para que o sinal de abertura ou fechamento da válvula possa servir de condição para interlocks.

Sendo assim, a nova configuração do nó 4 com as modificações propostas está representada na Figura 13.

Figura 13 – Nó 4 antes das modificações propostas (esq.) e nó 4 com modificações propostas (dir.)



Fonte: A autora.

4.3.5 Funções instrumentadas de segurança

Conforme posto anteriormente, foram determinadas algumas funções instrumentadas de segurança para os dois nós mais críticos do processo: o sistema de resfriamento e o reator.

Quadro 7 – Funções instrumentadas de segurança do sistema

Nó	Função	Descrição
2	SIF 1	Diferença entre os medidores de temperatura do reator maior que 4°C
3	SIF 2	Vazão alta de monômeros acima de 10% da vazão de operação
3	SIF 3	Temperatura alta do reator acima de 84°C
3	SIF 4	Diferença entre os medidores de temperatura do reator maior que 4°C
3	SIF 5	Agitação baixa ou desligada

Fonte: A autora.

As SIFs promovem o seguinte comportamento no sistema: fechamento das válvulas de alimentação do reator e abertura 100% das válvulas da linha de resfriamento para mitigar a geração de calor imposta por uma reação descontrolada.

4.4 PROJETO DA INSTRUMENTAÇÃO DE PROCESSO EM DIAGRAMA

A partir da consolidação de todas as modificações propostas para cada nó em termos de instalação de instrumentos e intertravamentos, foi possível projetar no editor gráfico *Draw.io* o diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID) que está representado na Figura 14, em que os instrumentos e malhas em azul fazem parte do projeto de instrumentação proposto no presente trabalho, e a nova relação com todos os TAGs de equipamentos e instrumentos está presente no Quadro 8, conforme se apresenta a seguir:

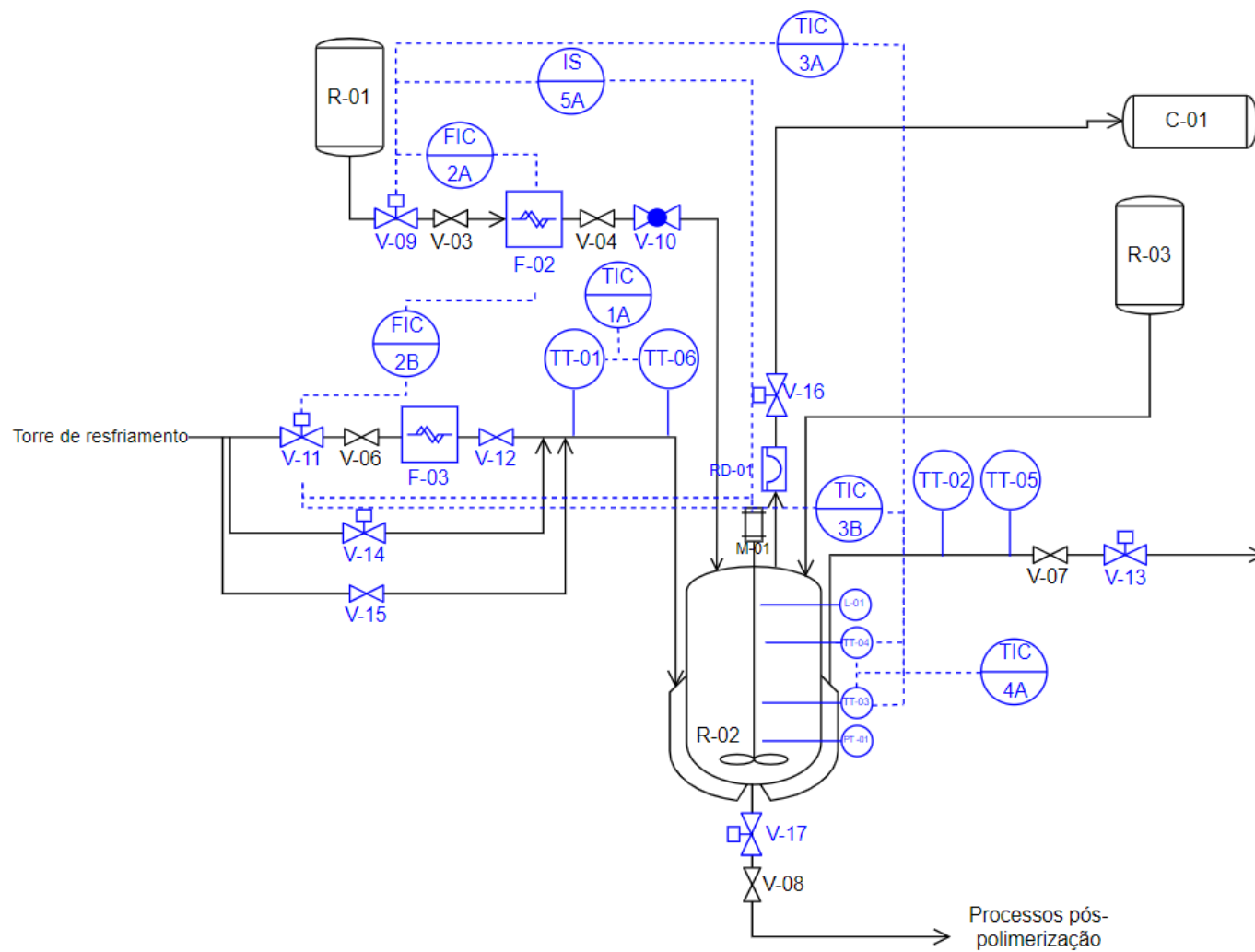
Quadro 8 – Relação de TAGs de instrumentos e equipamentos após modificação proposta

TAG	Descrição do equipamento ou instrumento
R-01	Tanque dosador de pré-emulsão
R-02	Reator
R-03	Tanque auxiliar
C-01	<i>Catch tank</i>
F-02	Medidor mássico de vazão de pré-emulsão
F-03	Medidor mássico de vazão de água
FIC-2A FIC-2B	Controladores de fluxo da SIF 2
V-03	Válvula manual à montante do medidor mássico de pré-emulsão
V-04	Válvula manual à jusante do medidor mássico de pré-emulsão
V-06	Válvula manual da entrada da água de resfriamento
V-07	Válvula manual de saída da água de resfriamento
V-08	Válvula manual de fundo do reator
V-09	Válvula de controle atuada pós tanque de pré-emulsão
V-10	Válvula atuada pós medidor mássico de pré-emulsão
V-11	Válvula de controle atuada na entrada da linha principal de resfriamento

V-12	Válvula manual pós medidor mássico de água na entrada da linha principal de resfriamento
V-13	Válvula de controle atuada na saída da linha principal de resfriamento
V-14	Válvula de controle atuada na entrada da linha secundária de resfriamento
V-15	Válvula manual na entrada da linha terciária de resfriamento
V-16	Válvula de segurança na saída do reator para o <i>catch tank</i> C-01
V-17	Válvula atuada no fundo do reator
TT-01	Transmissor de temperatura da entrada da camisa do reator
TT-02	Transmissor de temperatura da saída da camisa do reator
TT-03	Transmissor de temperatura do reator
TT-04	Transmissor de temperatura do reator (redundância do TT-03)
TT-05	Transmissor de temperatura da saída da camisa do reator (redundância do TT-02)
TT-06	Transmissor de temperatura da entrada da camisa do reator (redundância do TT-01)
TIC-1A	Controlador de temperatura da SIF 1
TIC-3A TIC-3B	Controladores de temperatura da SIF 3
TIC-4A	Controlador de temperatura da SIF 4
RD-01	Disco de ruptura
L-01	Sensor de nível do reator
PT-01	Transmissor de pressão do reator
M-01	Agitador do reator
IS-5A	Intertravamento de segurança da SIF 5

Fonte: A autora.

Figura 14 – P&ID com modificações propostas



Fonte: A autora.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um projeto de segurança de processo para uma planta de produção de resina acrílica apresentada por Agostini (2006) no site da BASF em Guaratinguetá. Para este desenvolvimento foi realizada uma análise do processo, construção do HAZOP, definição dos sistemas de instrumentação e controle, funções instrumentadas de segurança e projeto da instrumentação de processo em diagrama. Na análise de risco realizada, o HAZOP, foram definidos 4 nós do processo, sendo eles a transferência de pré-emulsão, o sistema de resfriamento, o reator e a transferência do reator para os processos de pós-polimerização. Destes nós, foram definidas cinco funções instrumentadas de segurança ao todo para o resfriamento e para o reator, as quais são as etapas mais críticas do processo.

Foram sugeridas modificações no design do processo, como na unificação de linhas de dosagens, no controle básico do processo, como na instalação de válvulas atuadas, medidores mássicos e transmissores de temperatura, alarmes críticos, como de nível alto no reator, e intertravamentos associados às funções instrumentadas de segurança estabelecidas. Além disso, foi realizado o projeto da instrumentação do processo em diagrama com a representação de todos os instrumentos e equipamentos propostos. Ao todo foi sugerida a instalação de oito válvulas, dois medidores mássicos, seis transmissores de temperatura, um transmissor de pressão e um sensor de nível, necessários para garantir a segurança do processo produtivo.

Por fim, a elaboração do presente trabalho permitiu a implementação de um sistema completo de segurança de processos para a produção de resinas acrílicas com a avaliação de medidas de controle em todas as camadas de proteção, a fim de garantir controlar os riscos envolvidos no processo produtivo, prevenindo acidentes graves e contribuindo para a melhoria da segurança na indústria química. A adoção de barreiras de segurança eficazes, baseadas em estratégias de monitoramento e controle de variáveis críticas, é fundamental para minimizar os riscos e manter a segurança operacional. Além disso, a aplicação dessas medidas de segurança pode trazer benefícios adicionais, como a otimização dos processos produtivos e a formação de profissionais mais capacitados e conscientes dos riscos envolvidos na produção de resinas acrílicas e em outras atividades da indústria química.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA (ABIQUM). **Apresentação - Atuação Responsável**. Disponível em <https://www.congressoar.com.br/apresentacao/>. Acessado em: 20 jan. 2023.
- AGOSTINI, Maria Stella *et al.* **Análise de riscos envolvendo reações exotérmicas**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.
- APPLETON, Brian. **Chemical process safety: fundamentals with applications**. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- BILLMEYER Jr., F. W. **Science of polymerization**. New York: Wiley-Interscience, 1984.
- CCPS, C. F.C. P.S. **Introduction to Process Safety for Undergraduates and Engineers**. Hoboken, New Jersey: John Wiley Sons, Inc., 2016.
- CANEVAROLO, Sebastião V. **Polímeros: ciência e tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- CRAWLEY, Frank; TYLER, Brian. **HAZOP: Guide to best practice**. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2015.
- CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. **Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- FAZENDA, João L. C. **Tecnologia e inovação em materiais poliméricos**. São Paulo: Blucher, 2009.
- LEE, Hyungsub; HAN, Insu; BAEK, Jongbae. **A Study on Preventing Runaway Reaction of Batch Reactor by Installing the Safety Instrumented System (SIS)**. In: Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2018 International Conference on Safety Management and Human Factors, July 21-25, 2018, Loews Sapphire Falls Resort at Universal Studios, Orlando, Florida, USA 9. Springer International Publishing, 2019. p. 370-381.
- PEREIRA, Letícia Freitas; PEDROSA, Thiago Henrique Brasileiro. **Influência da cinética química e do controle e instrumentação na segurança de processos: estudo de caso**. Rio de Janeiro, 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2022.
- PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. São Paulo: Editora Blucher, 2005.

SANDERS, Roy E. **Chemical process safety**: learning from case histories. 4. ed. Oxford. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2015.

SILVA, Ana Beatriz. **Análise de risco do processo de produção de resina para tinta automotiva**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2019.