

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA

VICTOR CAPODAGLIO ROCCO

ANÁLISE DE RISCOS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL DE
PRODUÇÃO DE POLIURETANO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA
HAZOP

São Carlos

2025

VICTOR CAPODAGLIO ROCCO

ANÁLISE DE RISCOS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL DE
PRODUÇÃO DE POLIURETANO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA
HAZOP

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.(a) Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares

São Carlos

2025

VICTOR CAPODAGLIO ROCCO

ANÁLISE DE RISCOS EM UMA PLANTA INDUSTRIAL DE
PRODUÇÃO DE POLIURETANO: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA
HAZOP

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Química e aprovado em sua forma
final pelo Curso Engenharia Química.

Local: São Carlos, 14 de julho de 2025.

Banca examinadora

Prof.(a) Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares
Orientadora

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
Instituição Universidade Federal de São Carlos

São Carlos, 2025.

RESUMO

O processo de produção de poliuretano apesar de ser conhecido e realizado a bastante tempo e de ser composto por poucas etapas, ainda assim é um processo de difícil controle devido à natureza da sua reação de formação; e que apresenta riscos significativos, tanto de danos materiais expressivos, quanto de danos às vidas das pessoas expostas. Tendo em vista esse cenário, uma análise de riscos para uma planta de produção industrial de tal produto demonstra-se essencial para identificar, avaliar e controlar os perigos dessa atividade visando proteger a integridade dos trabalhadores e das instalações de produção. Com base nisso, esse estudo tem como objetivo identificar os possíveis cenários de falha ou desvio das condições desejadas que possam comprometer a segurança do processo utilizando a metodologia de análise HAZOP (*Hazard and Operability Study*), e com isso propor medidas eficazes de mitigação e controle dos riscos identificados. Como resultado desse estudo, foram identificados 5 cenários críticos e 9 severos, totalizando 54% dos cenários analisados, todos eles tendo sugestões de como mitigar os riscos encontrados. Com isso ficou clara a importância da análise de segurança para o desenvolvimento desse processo e a complexidade que há em uma análise completa para a segurança satisfatória de uma instalação desse tipo.

Palavras chave: produção de poliuretano, análise de riscos, *Hazard and Operability Study* (HAZOP), mitigação e controle de riscos.

ABSTRACT

The polyurethane production process, despite being well known and carried out for a long time and consisting of few steps, it is still a difficult process to control due to the nature of its formation reaction; and it presents significant risks, both of significant material damage and of harm to the lives of exposed people. In view of this scenario, a risk analysis for an industrial production plant of such a product is essential to identify, evaluate and control the hazards of this activity in order to protect the integrity of workers and production facilities. Based on this, this study aims to identify possible failure scenarios or deviations from the desired conditions that may compromise the safety of the process using the HAZOP (Hazard and Operability Study) analysis methodology, and thus propose effective measures to mitigate and control the identified risks. As a result of this study, 5 critical and 9 severe scenarios were identified, totaling 54% of the scenarios analyzed, all of them having suggestions on how to mitigate those risks. This made clear the importance of safety analysis for the development of this process and the complexity of a complete analysis for the satisfactory safety of an installation of this type.

Keywords: polyurethane production, risk analysis, Hazard and Operability Study (HAZOP), risk mitigation and control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de projeção do mercado global de poliuretano.....	18
Figura 2 - Fluxograma simplificado das principais etapas da produção de poliuretano	20
Figura 3 - Equação geral da reação de formação da ligação uretânica.....	24
Figura 4 - Número de publicações sobre segurança de processo ao longo dos últimos 50 anos.....	28
Figura 5 - Critério de tolerabilidade para risco social.	30
Figura 6 - Matriz de classificação de risco - Severidade x Frequência	32
Figura 7 - Exemplo de combinação de palavra-guia com parâmetro para criação de um desvio.....	37
Figura 8 - Fluxograma procedimental de um HAZOP.	38
Figura 9 - Fluxograma do processo.	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 - P&ID pré-misturador D-100.....	44
Figura 11 - P&ID reator R-101.....	45
Figura 12 - Distribuição dos níveis de risco atribuídos.	54
Figura 13 - Distribuição das frequências atribuídas.	55
Figura 14 - Distribuição das severidades atribuídas.....	56

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades principais do poliuretano.	15
Quadro 2 - Aplicações do poliuretano.	17
Quadro 3 - Categorias de Frequência de ocorrência de um evento.	31
Quadro 4 - Categorias de severidade dos perigos identificados.	31
Quadro 5 - Combinações possíveis de palavras-guia e parâmetros.	37
Quadro 6 - Exemplo de quadro de documentação de HAZOP	39
Quadro 7 - Modelo de quadro de apresentação de HAZOP	40
Quadro 8 - Estudo de perigo e operabilidade: Adição de matéria prima.	47
Quadro 9 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Adição de matéria prima (continuação).	48
Quadro 10 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator.	49
Quadro 11 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).	50
Quadro 12 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).	51
Quadro 13 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).	52
Quadro 14 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Digestão.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa entre os tipos de poliols e isocianatos.	23
Tabela 2 - Frequência de evento iniciador por ano.....	33
Tabela 3 - Palavras-Guia originais do Manual de Estudo de HAZOP e seus significados	36
Tabela 4 - Parâmetros de processo comuns no estudo HAZOP	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
APPP	Análise Preliminar de Perigos do Processo
AQR	Análise Quantitativa de Riscos
CAGR	Taxa de Crescimento Anual Composta
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
DMRA	<i>Decision-Matrix Risk Assessment</i>
HAZOP	<i>Hazard an Operability Study</i>
LCQ	Laboratório de Controle de Qualidade
LOPA	<i>Layers of Protection Analysis</i>
NR	Norma Regulamentadora
P&ID	<i>Piping and Instrumentation Diagram</i>
PU	Poliuretano
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i>
SIS	<i>Safety Instrumented System</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	POLIURETANO	13
2.1.1	Caracterização	14
2.1.2	Aplicações	15
2.1.3	Mercado.....	17
2.2	PRODUÇÃO DO POLIURETANO.....	19
2.2.1	Matérias-primas	21
2.2.2	Reação.....	23
2.2.3	Preocupações do processo	25
2.3	HISTÓRICO DE EVENTOS	26
2.4	SEGURANÇA INDUSTRIAL	27
2.3.1	Perigo e risco	29
2.3.2	Gestão de risco e métodos usuais.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	ESTUDO DE PERIGOS E OPERABILIDADE (HAZOP).....	35
3.2	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE COM HAZOP	46
4.2	DISCUSSÕES	54
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o poliuretano consolidou-se como um dos polímeros mais versáteis e estratégicos da indústria química mundial. Resultado da reação entre polióis e isocianatos, esse material apresenta ampla variedade de aplicações, adaptando-se a diversas exigências de desempenho mecânico, térmico e químico. A sua flexibilidade de formulação permite a fabricação de produtos com diferentes densidades, elasticidades e resistências, sendo encontrado em espumas flexíveis e rígidas, adesivos, elastômeros, revestimentos, selantes e até mesmo dispositivos médicos e materiais para isolamento térmico. Tal diversidade de aplicações o torna indispensável em setores como construção civil, automotivo, eletrodomésticos, embalagens e mobiliário.

A cadeia industrial do poliuretano movimenta bilhões de dólares anualmente, com destaque para países como China, Estados Unidos, Alemanha e Japão, tanto na produção quanto no consumo. No Brasil, o setor também apresenta crescimento contínuo, sustentado pela demanda interna em setores como refrigeração industrial e colchões. Apesar de seus benefícios econômicos e funcionais, o processo de fabricação do poliuretano impõe uma série de desafios e riscos operacionais, principalmente devido ao uso de matérias-primas tóxicas e à natureza exotérmica da reação de formação da ligação uretânica.

Entre os principais riscos associados à produção do poliuretano, destacam-se a manipulação de isocianatos — substâncias sensibilizantes e potencialmente cancerígenas — e o risco de reações descontroladas (*runaway*), caso o processo não seja conduzido sob condições rigorosamente controladas. A liberação de gases tóxicos, o acúmulo de pressão e a possibilidade de explosões tornam imperativa a adoção de medidas preventivas e sistemas de segurança eficientes. Nesse contexto, a segurança de processo assume papel fundamental para a operação segura e sustentável de plantas químicas que produzem esse tipo de material.

Com o objetivo de mitigar esses riscos, diversas metodologias foram desenvolvidas para a identificação e avaliação de perigos em ambientes industriais. Dentre elas, destaca-se a técnica HAZOP (*Hazard and Operability Study*), amplamente reconhecida por sua capacidade sistemática de identificar falhas potenciais e pontos críticos de operação. O HAZOP é aplicado em projetos novos ou já existentes e permite uma análise aprofundada

das variáveis de processo, buscando antecipar cenários indesejáveis antes que possam causar acidentes ou prejuízos operacionais.

Diante da relevância do poliuretano para a indústria moderna e da necessidade crescente por processos seguros e controlados, este trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia HAZOP na análise de riscos de uma planta industrial de produção de poliuretano. Por meio desse estudo, busca-se contribuir para a melhoria das práticas de segurança, eficiência operacional e sustentabilidade no setor químico.

1.1 OBJETIVOS

Analisar os riscos presentes em uma planta de produção de poliuretano utilizando a metodologia de Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP); identificar e classificar os riscos para o cenário de produção em um reator de pré-polímero de poliuretano e propor ações mitigadoras para tais riscos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 POLIURETANO

O poliuretano (PU) é um polímero versátil amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e comerciais devido às suas excelentes propriedades físico-químicas, como flexibilidade, resistência mecânica, adesão e isolamento térmico. Desenvolvido pela primeira vez na década de 1930, esse material continua sendo um dos plásticos mais utilizados no mundo moderno, com um mercado global em constante crescimento (IPEA, 2010).

Os poliuretanos podem ser encontrados em diversas formas, incluindo espumas flexíveis, espumas rígidas, elastômeros, adesivos, revestimentos e fibras. Essa variedade de formas é possível graças à ampla gama de combinações entre os reagentes básicos: poliols e isocianato (BECKER; BRACKE, 2020). Na indústria de construção civil, por exemplo, o PU é amplamente empregado em sistemas de isolamento térmico e acústico. Já na indústria automotiva, é comum sua utilização em assentos, painéis e revestimentos internos.

A produção de poliuretano também apresenta desafios ambientais, especialmente em relação ao uso de isocianatos, substâncias tóxicas e potencialmente perigosas, além da dificuldade de reciclagem do material após seu uso (SILVA et al., 2018). Em resposta a essas preocupações, estudos recentes têm focado no desenvolvimento de poliuretanos a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental e aumentar a sustentabilidade da cadeia produtiva (GARCIA; MOURA; ALMEIDA, 2021).

O crescimento da demanda por poliuretano também está relacionado às inovações tecnológicas, especialmente no setor de espumas rígidas para refrigeração e isolamento térmico, contribuindo significativamente para a eficiência energética em edificações e eletrodomésticos (COSTA; SOUZA, 2019).

Dessa forma, o poliuretano se consolida como um material essencial para a indústria moderna, porém, requer atenção quanto aos riscos associados à sua produção e ao seu impacto ambiental, o que justifica a aplicação de metodologias de análise de risco, como o HAZOP, para garantir a segurança e eficiência de plantas industriais que o produzem.

2.1.1 Caracterização

O poliuretano (PU) é um polímero resultante da reação entre um poliol (composto com múltiplos grupos hidroxila) e um isocianato (geralmente diisocianato), formando ligações uretânicas. A estrutura química do PU pode ser amplamente modificada ao variar o tipo de poliol e isocianato utilizados, conferindo ao material uma grande diversidade de propriedades físico-químicas (COSTA; SOUZA, 2019).

Fisicamente, o poliuretano pode se apresentar em forma sólida, semirrígida, elastomérica ou como espuma (flexível ou rígida). Essa versatilidade é diretamente atribuída à microestrutura do polímero, que é formada por regiões duras e regiões macias. As regiões duras são compostas pelas cadeias uretânicas derivadas dos isocianatos, enquanto as regiões macias são derivadas dos poliéteres ou poliésteres usados como poliol. Essa estrutura de “bloco” permite ao PU exibir comportamento termorrígido ou elastomérico, dependendo da proporção entre as fases (BASTOS; LIMA, 2022).

Quimicamente, o PU é caracterizado por sua alta reatividade e pela presença de ligações de hidrogênio entre os grupos uretano, o que favorece forte coesão intermolecular. Isso resulta em materiais com alta resistência mecânica, boa aderência a diferentes substratos, e resistência a óleos, graxas e solventes (BECKER; BRACKE, 2020). Além disso, o material apresenta boas propriedades de isolamento térmico e acústico, especialmente na forma de espumas rígidas, devido à sua baixa condutividade térmica e estrutura celular fechada (SILVA; BARBOSA; TEIXEIRA, 2017).

Outra característica relevante é a possibilidade de ajuste de propriedades como dureza, elasticidade, densidade e resistência química, por meio da variação dos reagentes e aditivos utilizados na formulação. Isso permite que o PU seja projetado para atender a aplicações específicas, como absorção de impacto, isolamento térmico, ou resistência ao desgaste (CUNHA et al., 2020).

As propriedades térmicas do poliuretano também são de destaque. Espumas rígidas de PU, por exemplo, podem suportar temperaturas de até 120 °C sem perda significativa de desempenho, o que as torna adequadas para aplicações na construção civil e em sistemas de refrigeração (GARCIA; MOURA; ALMEIDA, 2021).

Portanto, as propriedades do poliuretano são resultado direto de sua estrutura química modular, o que o torna um material altamente adaptável e eficiente em diferentes contextos industriais, justificando sua ampla aplicação e relevância no setor produtivo

atual. Um resumo dessas propriedades, juntamente a algumas observações são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades principais do poliuretano.

Propriedade	Faixa típica / Característica	Observações
Densidade	20 a 1.200 kg/m ³	Depende do tipo: espumas leves ou PU rígido/sólido
Dureza (Shore A/D)	20–95 (Shore A) / 30–80 (Shore D)	Ajustável conforme formulação
Temperatura de uso contínuo	Até 120 °C (espumas rígidas), 80–100 °C (elastômeros)	Pode variar com aditivos
Condutividade térmica	0,020 – 0,035 W/m·K (espumas rígidas)	Excelente isolante térmico
Absorção de água	Baixa (0,1 a 1,0%)	Depende da formulação
Resistência química	Boa a óleos, graxas e solventes alifáticos	Sensível a álcoois fortes e solventes aromáticos
Resistência à tração	1 a 50 Mpa	Elastômeros possuem maior resistência
Alongamento na ruptura	100% a 700%	Muito elástico dependendo da estrutura
Estrutura celular (espumas)	Celular aberta (flexíveis) ou fechada (rígidas)	Determina desempenho acústico ou térmico
Inflamabilidade	Inflamável, mas pode ser tratado com retardantes	Questão crítica para aplicações em construção e automotiva

Fonte: Adaptado de Becker e Bracke (2020); Cunha et al. (2020); Silva, Barbosa e Teixeira (2017); Costa e Souza (2019).

2.1.2 Aplicações

O poliuretano é amplamente aplicado na indústria moderna, com destaque para usos altamente específicos que exploram suas propriedades únicas, como isolamento térmico, resistência mecânica, elasticidade e aderência. Cada tipo de poliuretano — rígido, flexível, elastomérico ou em forma de revestimento — apresenta aplicações bem definidas e estratégicas nos mais diversos setores produtivos.

Um exemplo prático é o uso das espumas rígidas de poliuretano no setor de transporte refrigerado, especialmente no revestimento interno de caminhões frigoríficos e contêineres isotérmicos. Essas espumas atuam como isolantes térmicos altamente eficientes, mantendo a temperatura interna constante e reduzindo o consumo energético dos sistemas de refrigeração. Sua estrutura celular fechada proporciona baixa condutividade térmica e resistência à umidade, essenciais para a conservação de alimentos e medicamentos durante o transporte (SILVA; SANTOS; MARTINS, 2020).

Na indústria de móveis e colchões, as espumas flexíveis de poliuretano são utilizadas em colchões, estofados, travesseiros e encostos, devido à sua capacidade de se deformar sob pressão e retornar rapidamente à forma original. Essa característica proporciona conforto, distribuição equilibrada do peso e alta durabilidade. Estudos mostram que a densidade e resiliência dessas espumas podem ser ajustadas para atender diferentes padrões ergonômicos e de conforto, sendo amplamente empregadas em linhas premium de colchões e mobiliário (CUNHA et al., 2020).

Outro campo importante é o da indústria automotiva, onde o poliuretano é empregado em componentes como painéis de portas, volantes, bancos e painéis acústicos. Além de contribuir para o conforto dos ocupantes, esses componentes colaboram na absorção de impacto e na redução de ruídos no interior do veículo. Os elastômeros de poliuretano, por sua vez, são utilizados na fabricação de buchas de suspensão, coxins e rodas industriais, devido à sua resistência ao desgaste e à abrasão (MOREIRA; LIMA, 2018).

No setor da construção civil, os selantes e espumas expansivas de PU são aplicados em vãos de janelas, portas e estruturas metálicas, atuando como vedantes e isolantes. Esses materiais impedem a entrada de ar, água e ruído, além de contribuírem para a eficiência energética de edificações. A cura rápida e a excelente aderência a diferentes substratos tornam o PU um material indispensável em obras e reformas (GARCIA; ALMEIDA, 2021).

Na área médica, os poliuretanos biocompatíveis são utilizados na fabricação de cateteres, próteses vasculares e curativos avançados, especialmente aqueles com liberação controlada de fármacos. A flexibilidade, estabilidade térmica e resistência química do PU, associadas à possibilidade de esterilização, tornam-no adequado para esses usos sensíveis e críticos (LIMA et al., 2019).

O quadro 2 apresenta um resumo dos tipos de poliuretano e suas respectivas áreas de aplicação.

Quadro 2 - Aplicações do poliuretano.

Tipo de Poliuretano	Setor de Aplicação	Exemplo Específico
Espuma rígida	Transporte refrigerado	Revestimento interno de caminhões frigoríficos e contêineres térmicos
Espuma rígida	Construção civil	Isolamento térmico em paredes, telhados e entre esquadrias
Espuma flexível	Indústria moveleira	Colchões, sofás, almofadas e travesseiros
Espuma flexível	Automotiva	Assentos e painéis internos com propriedades de absorção de impacto
Elastômero	Indústria automotiva	Buchas de suspensão, coxins e rodas industriais
Selantes e espumas expansivas	Construção civil	Vedação de janelas, portas e juntas de dilatação
PU biocompatível	Área médica	Cateteres, curativos inteligentes e próteses vasculares

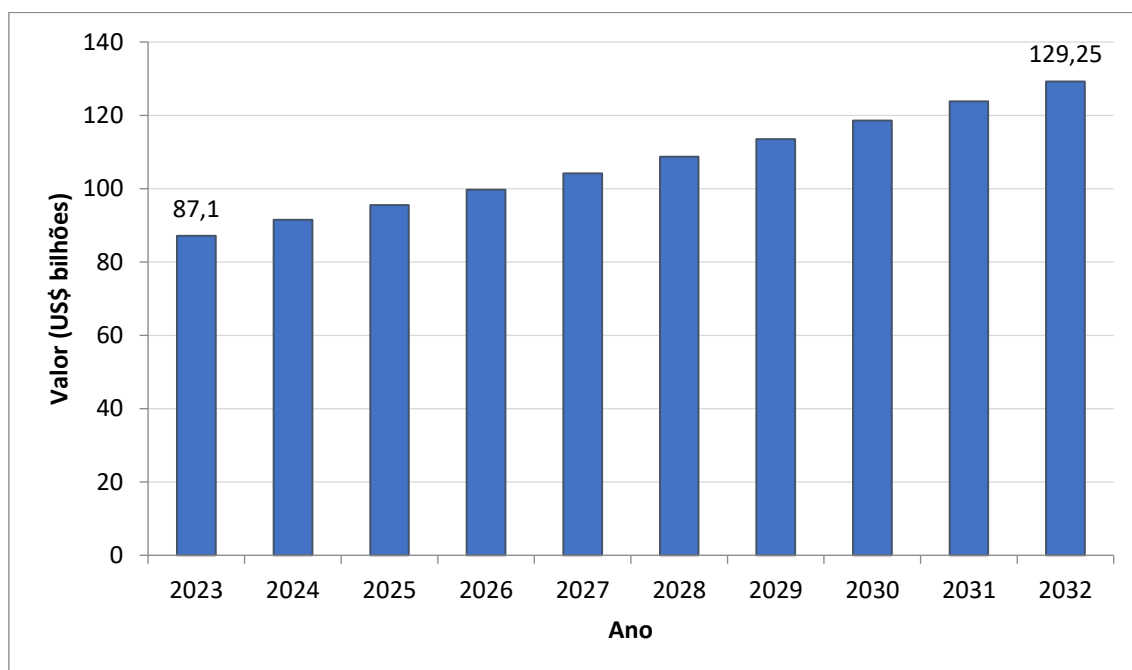
Fonte: Adaptado de Cunha et al. (2020); Silva, Santos e Martins (2020); Garcia e Almeida (2021); Lima et al. (2019); Moreira e Lima (2018).

Dessa forma, pode-se afirmar que as amplas e direcionadas aplicações do poliuretano, sustentadas por sua capacidade de ser moldado para funções específicas com alta eficiência, reafirmam sua importância estratégica em setores que exigem desempenho técnico, durabilidade e conforto.

2.1.3 Mercado

O mercado global de poliuretano tem demonstrado um crescimento constante, impulsionado pela demanda em setores como construção civil, automotivo, mobiliário e eletrodomésticos, como demonstra o gráfico apresentado na figura 1. Em 2024, o mercado foi avaliado em aproximadamente US\$ 91,49 bilhões, com projeções indicando um crescimento para US\$ 135,08 bilhões até 2032, representando uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 4,4%.

Figura 1 - Gráfico de projeção do mercado global de poliuretano.



Fonte: Adaptado de Fortune Business Insights (2024)

A região da Ásia-Pacífico lidera o mercado, detendo cerca de 45,89% da participação global em 2023, impulsionada pelo crescimento industrial e urbanização em países como China e Índia.

As principais empresas atuantes no mercado global incluem a BASF SE (Alemanha), Covestro AG (Alemanha), Huntsman International LLC (EUA), Wanhua Chemical Group Co. Ltd (China) e Mitsui Chemicals, Inc. (Japão). Essas empresas são reconhecidas por sua atuação em diversos segmentos do poliuretano, desde espumas até elastômeros e revestimentos.

Já no contexto nacional, o Brasil destaca-se como um dos principais produtores e consumidores de poliuretano na América Latina. Estima-se que o país possua uma capacidade instalada significativa para a produção de poliuretano, atendendo tanto ao mercado interno quanto às demandas de exportação. Segundo dados da ComexStat, as exportações brasileiras de poliuretano têm se mantido estáveis, com os principais destinos sendo países da América Latina e Estados Unidos.

Entre as principais empresas produtoras de poliuretano no Brasil, destacam-se a Braskem S.A., Dow Brasil, BASF S.A. e Covestro Brasil. Essas empresas operam unidades industriais em diversos estados, contribuindo para a cadeia produtiva do poliuretano no país.

O mercado de poliuretano está passando por transformações significativas, impulsionadas por inovações tecnológicas e demandas por materiais mais sustentáveis. Algumas das tendências que mais se destacam são:

- **Poliuretanos à base de fontes renováveis:** A busca por alternativas sustentáveis tem levado ao desenvolvimento de poliuretanos derivados de fontes renováveis, com projeções indicando um crescimento de 14,73% ao ano até 2030.
- **Aplicações em mobilidade elétrica:** O avanço dos veículos elétricos está impulsionando a demanda por materiais leves e duráveis, como os poliuretanos, para componentes internos e baterias.
- **Eficiência energética na construção civil:** A utilização de espumas rígidas de poliuretano como isolantes térmicos está em ascensão, visando à melhoria da eficiência energética em edificações.

2.2 PRODUÇÃO DO POLIURETANO

A produção do poliuretano envolve uma série de etapas químicas e operacionais que visam controlar com precisão a reação entre dois principais componentes: o poliol e o isocianato. Esses dois reagentes, ao serem misturados, desencadeiam uma reação de polimerização que resulta na formação de poliuretano, podendo originar desde espumas (flexíveis ou rígidas) até elastômeros ou adesivos, dependendo da formulação e das condições reacionais empregadas (CUNHA et al., 2020; GARCIA; ALMEIDA, 2021).

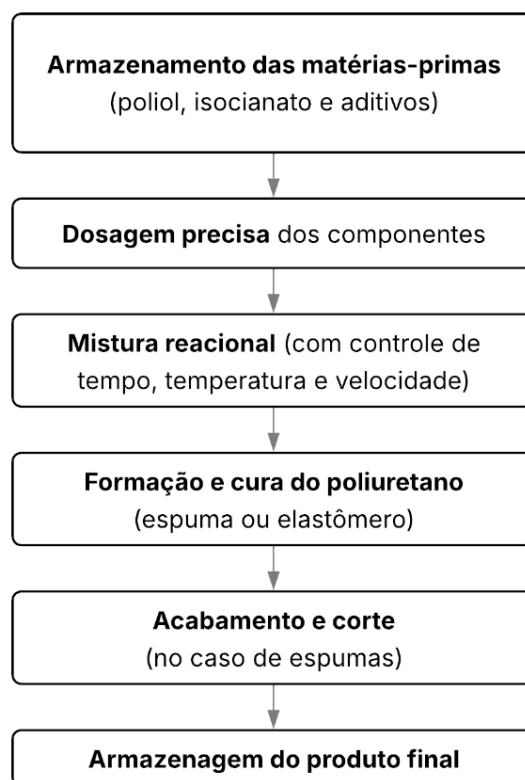
Uma planta típica de produção de poliuretano conta com sistemas de armazenamento e alimentação de matérias-primas, seguidos por sistemas de mistura e reação. Os poliol e isocianato são normalmente armazenados em tanques pressurizados, com controle de temperatura e proteção contra umidade, visto que a presença de água pode interferir negativamente na reação, produzindo gás carbônico e bolhas indesejadas (BASTOS; LIMA, 2022).

A etapa central da produção é a reação de polimerização entre o grupo hidroxila do poliol e o grupo isocianato (-NCO). Essa reação ocorre geralmente em um reator ou câmara de mistura de alta pressão, com adição simultânea de aditivos como catalisadores, agentes espumantes, surfactantes, estabilizantes, pigmentos e retardantes de chama, dependendo do tipo de produto final desejado (BECKER; BRACKE, 2020). A proporção

estequiométrica entre os reagentes é crítica para garantir a formação adequada da cadeia polimérica.

No caso da produção de espumas, o processo pode ocorrer de forma contínua ou em batelada, utilizando sistemas como máquinas de espumação tipo “*slabstock*” para espumas flexíveis, ou injeção direta em moldes fechados para espumas rígidas e peças técnicas (SILVA; BARBOSA; TEIXEIRA, 2017). Já para elastômeros de poliuretano, o processo pode envolver temperaturas e pressões mais elevadas, com uso de moldes metálicos e ciclos de cura térmica controlados (MOREIRA; LIMA, 2018). Estas etapas estão representadas no fluxograma da figura 2.

Figura 2 - Fluxograma simplificado das principais etapas da produção de poliuretano



Fonte: Adaptado de Cunha et al. (2020); Garcia e Almeida (2021); Becker e Bracke (2020) Lima et al. (2019); Moreira e Lima (2018).

Esta etapa de formação da espuma e injeção em moldes é muitas vezes realizada em uma planta diferente da que realiza a reação de polimerização em si. Isso ocorre pois até a etapa de reação, a produção para todas as aplicações de poliuretano é muito similar, porém a etapa final de formação do produto depende da função específica que o produto irá desempenhar, e consequentemente necessita de maquinário e instalações diferentes para cada um.

Além do processo químico, há forte preocupação com segurança operacional, principalmente devido à toxicidade do isocianato e à necessidade de evitar reações com umidade atmosférica. Sistemas de ventilação, sensores de vazamento e controle automatizado são comuns em unidades industriais modernas (LIMA et al., 2019).

2.2.1 Matérias-primas

A produção do poliuretano depende fundamentalmente da reação entre duas classes de compostos: os polióis e os isocianatos. Cada um possui características físico-químicas próprias, que impactam diretamente nas propriedades do poliuretano formado, como elasticidade, resistência térmica, densidade, entre outras (CUNHA et al., 2020; BECKER; BRACKE, 2020).

2.2.1.1 Poliol

Os polióis são compostos químicos caracterizados pela presença de múltiplos grupos hidroxila (-OH) em sua estrutura molecular. Essa funcionalidade química é essencial, pois permite a reação com grupos isocianato (-NCO) durante a formação do poliuretano (BECKER; BRACKE, 2020).

Os polióis são classificados principalmente em:

- Polióis poliéteres: obtidos pela reação de óxidos de alquilenos (como óxido de etileno ou propileno) com compostos iniciadores contendo grupos hidroxila. São amplamente utilizados devido à boa resistência à hidrólise e flexibilidade do material gerado (CUNHA et al., 2020).
- Polióis poliésteres: produzidos a partir da reação entre ácidos dicarboxílicos e diálcoois. Têm maior rigidez estrutural, sendo empregados em aplicações que requerem maior resistência mecânica e térmica (SILVA; BARBOSA; TEIXEIRA, 2017).

A estrutura molecular dos polióis influencia diretamente a estrutura da cadeia polimérica do poliuretano. Polióis de maior peso molecular produzem cadeias mais longas e, por consequência, poliuretanos mais flexíveis, enquanto os de menor peso molecular originam materiais mais rígidos (GARCIA; ALMEIDA, 2021).

De forma geral, os polióis apresentam baixa toxicidade aguda. No entanto, o contato direto pode provocar irritação ocular e cutânea. A inalação de vapores em ambientes confinados também deve ser evitada (FISPQ, 2023a). Por isso, o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) é essencial durante o manuseio industrial.

2.2.1.2 Isocianato

Os isocianatos são compostos orgânicos que contêm o grupo funcional -NCO, sendo altamente reativos com grupos hidroxila. São os principais responsáveis pela formação das ligações uretânicas durante o processo de polimerização (BECKER; BRACKE, 2020).

Os principais tipos de isocianato usados para produção de poliuretano são:

- TDI (diisocianato de tolueno): Utilizado predominantemente na produção de espumas flexíveis.
- MDI (diisocianato de difenilmetano): Aplicado na fabricação de espumas rígidas e elastômeros, por sua estrutura mais estável (LIMA et al., 2019).

Os isocianatos possuem uma reatividade muito alta, exigindo controle rigoroso de temperatura e umidade no processo produtivo, pois a presença de água pode causar o início de uma reação descontrolada como ocorreu no caso do acidente de Bhopal, incidente detalhado na seção 2.3 deste trabalho.

Diferente dos polióis, os isocianatos são classificados como substâncias perigosas, com potencial de causar sensibilização respiratória e dermatite de contato (FISPQ, 2023b). A exposição prolongada pode desencadear asma ocupacional e danos pulmonares (GARCIA; ALMEIDA, 2021). O manuseio deve sempre ocorrer em ambiente com ventilação forçada, utilizando respiradores apropriados, luvas nitrílicas e proteção ocular.

A tabela 1 apresenta uma comparação resumida entre os principais pontos relacionados aos 2 tipos de matérias primas.

Tabela 1 - Tabela comparativa entre os tipos de polioliol e isocianato.

Polióis			Isocianatos	
Composto	Polioliol Poliéter	Polioliol Poliéster	MDI (Difenilmetano Diisocianato)	TDI (Tolueno Diisocianato)
Características Principais	Alta flexibilidade, boa resistência à hidrólise	Maior rigidez e resistência térmica	Estável, reatividade controlada	Alta reatividade, baixa viscosidade
Aplicações Comuns	Espumas flexíveis, selantes	Espumas rígidas, revestimentos	Espumas rígidas (isolamento térmico)	Espumas flexíveis (colchões, estofados)
Observações de Segurança	Baixa toxicidade, irritação leve	Necessita ventilação adequada	Tóxico, requer EPI rigoroso	Altamente tóxico por inalação

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Cunha et al. (2020), Becker e Bracke (2020), Silva, Barbosa e Teixeira (2017), FISPQ (2023).

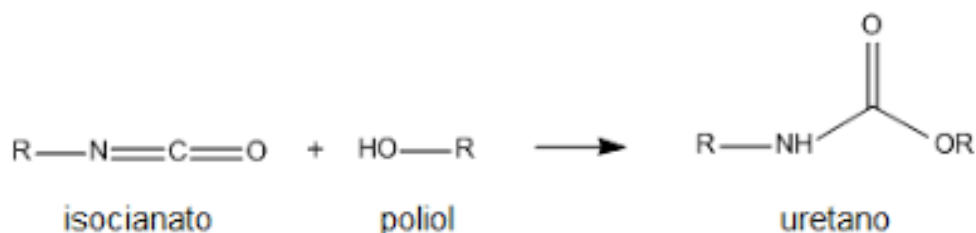
O conhecimento aprofundado das propriedades químicas e toxicológicas das matérias-primas utilizadas no processo de fabricação do poliuretano é fundamental para o desenvolvimento seguro e eficiente do produto. Enquanto os polióis determinam a flexibilidade e densidade do material final, os isocianatos conferem estrutura e resistência. A combinação adequada desses componentes, aliada a práticas seguras de manuseio, é indispensável para garantir a qualidade e a sustentabilidade do processo industrial (BECKER; BRACKE, 2020).

2.2.2 Reação

A síntese do poliuretano ocorre por meio da reação química entre os grupos funcionais altamente reativos de suas matérias primas: o grupo hidroxila (-OH), presente nos polióis, e o grupo isocianato (-NCO), presente nos isocianatos. Essa reação é uma adição nucleofílica, na qual o oxigênio do grupo hidroxila ataca o carbono eletrofílico do grupo isocianato, resultando na formação de uma ligação uretânica (-NH-CO-O-), principal estrutura do poliuretano (BECKER; BRACKE, 2020).

A equação geral simplificada da reação pode ser representada conforme apresentado na figura 3.

Figura 3 - Equação geral da reação de formação da ligação uretânica.



Fonte: Penha (2017)

Essa reação ocorre em temperatura ambiente ou levemente aquecida e não gera subprodutos, o que a classifica como uma polimerização por adição limpa (CUNHA et al., 2020). Por essa razão, o processo de fabricação de poliuretano é considerado eficiente e versátil.

O mecanismo ocorre em duas etapas principais:

- **Ataque nucleofílico:** o par de elétrons do grupo hidroxila do poliol ataca o carbono do grupo isocianato, que é parcialmente positivo devido à ligação com o oxigênio e o nitrogênio eletronegativos.
- **Formação da ligação uretânica:** após o ataque nucleofílico, forma-se a ligação –NH–CO–O–, resultando na unidade estrutural básica do poliuretano (LIMA et al., 2019).

Esse processo pode ocorrer em massa ou em sistemas com solventes, dependendo do tipo de aplicação. Em sistemas expandidos, como espumas, é comum adicionar água, que reage com parte do isocianato, gerando CO₂ e causando expansão do material (SILVA; BARBOSA; TEIXEIRA, 2017).

A eficiência da reação depende de três principais variáveis:

- **Relação molar NCO/OH:** A estequiometria entre os grupos reativos determina se o material final será mais rígido ou flexível.
- **Temperatura de reação:** Embora a reação possa ocorrer em temperatura ambiente, aquecimentos leves (30–80°C) aceleram o processo.

- Presença de catalisadores: Compostos como aminas terciárias e compostos metálicos (ex.: estanho) podem acelerar a formação da ligação uretânica (BECKER; BRACKE, 2020).

A ligação uretânica formada confere ao polímero estabilidade térmica, devido à estrutura rígida do grupo carbonila; boa resistência química, especialmente a solventes orgânicos; e versatilidade estrutural, permitindo a criação de espumas, adesivos, revestimentos e elastômeros (GARCIA; ALMEIDA, 2021).

2.2.3 Preocupações do processo

A reação de formação do poliuretano, embora amplamente utilizada e bem compreendida, requer atenção especial quanto às condições de operação, principalmente devido ao seu caráter exotérmico. A energia liberada pela reação entre os grupos isocianato (-NCO) e hidroxila (-OH) pode, sob determinadas condições, levar a um fenômeno conhecido como *runaway reaction*, ou reação descontrolada (TAVARES; OLIVEIRA, 2022).

A formação da ligação uretânica libera calor em grande magnitude. Em sistemas bem dimensionados e com controle térmico adequado, esse calor é dissipado com segurança, porém em casos em que há falhas na remoção de calor, por exemplo, em reatores com insuficiente troca térmica, ocorre acúmulo de energia térmica no sistema (KIRK-OTHMER, 2020).

Esse acúmulo provoca aumento da temperatura local, que por sua vez acelera a velocidade da reação — já que a reação entre poliálcool e isocianato segue uma cinética do tipo Arrhenius — criando um ciclo vicioso que pode resultar na perda de controle do processo (GARRIDO et al., 2020).

A presença de catalisadores, como aminas terciárias ou compostos metálicos de estanho, intensifica ainda mais a velocidade da reação. Embora sejam necessários para aplicações industriais, quando utilizados em excesso ou de forma mal distribuída, podem agravar a instabilidade térmica do sistema (BECKER; BRACKE, 2020).

Adicionalmente, proporções inadequadas entre isocianato e poliálcool também podem aumentar o risco. Um excesso de isocianato, por exemplo, pode reagir com traços de água, produzindo CO₂ e levando à formação descontrolada de espuma e pressão (SILVA; BARBOSA; TEIXEIRA, 2017).

A ocorrência de um *runaway* pode gerar consequências graves, como por exemplo:

- Aumento brusco de temperatura e pressão no reator;
- Ruptura de vasos de pressão e linhas de processo devido à pressão excessiva;
- Incêndios e explosões, principalmente se houver contato com materiais inflamáveis;
- Emissão de gases tóxicos, como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e vapores de isocianato (TAVARES; OLIVEIRA, 2022).

Além dos riscos à instalação industrial, esses cenários representam ameaças diretas à saúde dos operadores, exigindo a instalação de sistemas de alívio de pressão, monitoramento contínuo de temperatura e pressão e aplicação de barreiras de segurança, como intertravamentos automáticos e sensores de detecção térmica.

Estudos de acidentes industriais com poliuretano mostram que, na maioria dos casos, a falta de controle térmico, falhas de instrumentação e ausência de análise prévia de riscos (como HAZOP ou FMEA) foram as causas determinantes para que ocorresse o descontrole da reação (GARRIDO et al., 2020).

Para mitigar esses riscos, recomenda-se: operar a reação em temperaturas moderadas e constantes; garantir a eficiência da remoção de calor (como uso de mantas térmicas ou trocadores de calor); utilizar sistemas de contenção e alívio de pressão; e implementar procedimentos de emergência e treinamentos regulares para operadores.

2.3 HISTÓRICO DE EVENTOS

Ao longo da história da indústria química muitos eventos ocorreram antes de haver a preocupação que se tem nos dias de hoje com a segurança de processos. Dentre estes acidentes, uma categoria encontrada por toda a indústria são os eventos causados por uma reação descontrolada. Um dos eventos mais conhecidos dessa categoria é o Desastre de Bhopal, que apesar de ter ocorrido em uma planta em que não se produz poliuretano, o químico causador do desastre é largamente utilizado na produção de poliuretano, podendo haver tanques de estocagem similares ao envolvido naquele trágico evento.

O desastre de Bhopal ocorreu em dezembro de 1984 e é considerado por muitos como o pior acidente industrial da história. Aproximadamente 40 toneladas de gás metil isocianato (MIC) vazaram da planta de pesticidas da Union Carbide India Limited

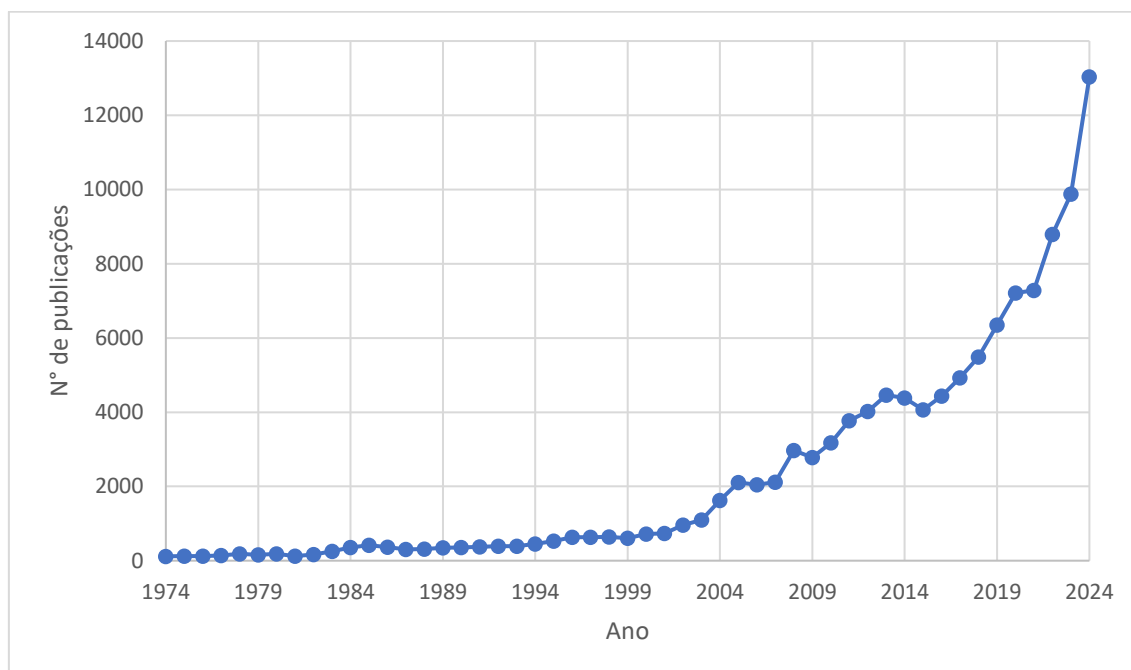
(UCIL), expondo mais de 500.000 pessoas a uma nuvem tóxica. Estima-se que entre 3.800 e 8.000 pessoas morreram nas primeiras semanas, e outras milhares sofreram sequelas permanentes. A principal causa do desastre foi a reação descontrolada do isocianato com água no tanque de armazenamento E610, que continha cerca de 42 toneladas de MIC. A entrada accidental da água no tanque iniciou uma reação exotérmica violenta, elevando rapidamente a temperatura e a pressão interna, o que resultou na liberação do gás tóxico para a atmosfera (AIChe, 2024).

Um outro evento mais recente, também causado por uma reação descontrolada, foi a explosão na planta da Fu-Kao Chemical no norte de Taiwan, em maio de 2001. A empresa especializada na produção de resinas acrílicas por meio de reações de polimerização em batelada operava um reator de 6 toneladas, contendo monômeros como metacrilato de metila, ácido acrílico e peróxido de benzoíla (BPO) como iniciador. A reação de polimerização saiu do controle quando a temperatura interna do reator aumentou rapidamente de 60 °C para entre 170 °C e 210 °C, resultando na formação de uma nuvem de vapor inflamável. A ignição dessa nuvem causou uma explosão equivalente a 1.000 kg de TNT, seguida por incêndios que destruíram a planta e causaram danos significativos às instalações vizinhas. Como resultado disso, uma pessoa veio a óbito e mais de 100 outras ficaram feridas. Além disso mais de 46 fábricas nas redondezas foram danificadas (CHANG, 2003).

2.4 SEGURANÇA INDUSTRIAL

A segurança industrial é um tema que vem ganhando cada vez mais relevância, tanto dentro da área acadêmica como dentro da própria indústria. Isso pode ser evidenciado na área acadêmica pelo número crescente de artigos publicados relacionados aos assuntos *Process Safety* e *Engineering* simultaneamente, como mostra a figura 4. É possível notar o grande crescimento de interesse no assunto a partir dos anos 2000, saindo de um número de publicações anuais abaixo de 1000 para 13000 publicações no ano de 2024.

Figura 4 - Número de publicações sobre segurança de processo ao longo dos últimos 50 anos



Fonte: Adaptado de Scopus (ScienceDirect)

Nessa mesma época entre o fim dos anos 90 e início dos anos 2000, muitas empresas de relevância passaram a adotar a segurança como um valor indispensável, como por exemplo a BASF com seu lema “*We never compromise on safety.*” (“Nunca comprometemos a segurança.”); a General Electric com o uso do slogan “*Safety is first. Always.*” (“Segurança em primeiro. Sempre.”) e no Brasil a Petrobras com o lema “Segurança, sempre.”.

Dentro desse tema geral pode-se fazer distinções mais específicas dentre ramos como segurança de processos, segurança de pessoas, segurança do trabalho; diferenciando-se uns dos outros no foco que cada um dá para as causas e consequências do objeto de estudo. Em uma análise ou estudo sobre um mesmo determinado evento ou processo, um estudo de segurança de pessoas estará preocupado com as possíveis consequências que o evento pode gerar sobre a vida dos envolvidos, enquanto um estudo de segurança de processos pode estar mais interessado em saber qual foi a causa do evento e quais mudanças no processo poderiam ajudar a evitar que o evento ocorresse. Ao final,

ambas as análises estão sob o escopo da segurança industrial, e visam criar um ambiente mais seguro para todos os envolvidos.

2.3.1 Perigo e risco

A definição dos termos risco e perigo é de alta importância para o melhor entendimento de qualquer estudo de segurança industrial ou de segurança de processos.

Crawley (2015) define perigo como “uma situação física com potencial para gerar danos a propriedade, ao meio ambiente, lesão a vida humana ou uma combinação desses.”. Já o risco “é a probabilidade de que um evento específico e indesejado ocorra dentro de especificados período de tempo e circunstâncias.”.

No Brasil, a Norma Regulamentadora NR-01 que versa sobre o gerenciamento de riscos ocupacionais, define perigo como “Fonte com o potencial de causar lesões ou agravos à saúde. Elemento que isoladamente ou em combinação com outros tem o potencial intrínseco de dar origem a lesões ou agravos à saúde.” E risco como “Combinação da probabilidade de ocorrer lesão ou agravo à saúde causados por um evento perigoso, exposição a agente nocivo ou exigência da atividade de trabalho e da severidade dessa lesão ou agravo à saúde.”

Comparando-se as definições apresentadas nota-se que a NR brasileira possui um foco maior nos danos à saúde humana, já que se trata de uma norma sobre riscos ocupacionais. Mas o que se destaca em ambas as definições trazidas é a diferenciação do risco ao perigo pela probabilidade do evento ocorrer, sejam lá quais forem as consequências consideradas.

Essa diferenciação entre perigo e risco traz à tona a importância de se ponderar a frequência ou a probabilidade de um evento ocorrer, frente a sua severidade.

2.3.2 Gestão de risco e métodos usuais

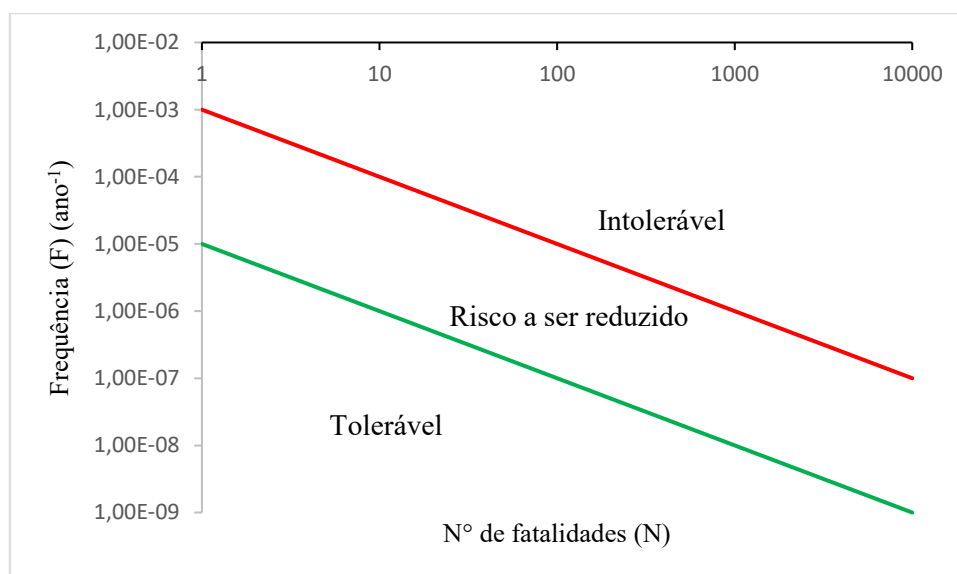
Tendo em vista a diferenciação entre perigo e risco, podemos afirmar que o risco está presente em todo e qualquer processo, assim como afirma a norma ISO 31000 (ABNT, 2018). De acordo com essa norma, o risco é uma parte inerente de todas as atividades organizacionais, e a gestão de riscos visa minimizá-lo e controlá-lo de maneira eficaz.

Uma parte muito importante da gestão de risco é a utilização de um critério para se entender qual será o limite de risco tolerado. Uma das opções para se fazer essa

diferenciação é o uso de uma matriz de tolerabilidade de risco. Essa técnica consiste em combinar a frequência e a severidade do evento analisado. O resultado dessa combinação de fatores determina quais possíveis eventos podem ou não ser tolerados e define a prioridade das ações a serem tomadas.

Outra ferramenta comumente utilizada para determinar limites são as curvas F-N, que consistem em curvas plotadas de Frequência vs. Número de Mortes. Essas curvas mostram como a probabilidade de um acidente (F) diminui à medida que o número de mortes (N) aumenta. Além disso, essas curvas formam certas zonas no gráfico, que determinam se o risco está em um nível aceitável ou não. A classificação das zonas aceitável / não aceitável varia de acordo com a localização, e critérios da própria organização. Existem normas governamentais que indicam o critério mínimo a ser obedecido. Um exemplo de curva F-N é a classificação dada pela CETESB de aceitabilidade de risco social no estado de São Paulo (Brasil), presente na norma técnica P4.261 (CETESB, 2011). As curvas e zonas dessa norma são apresentadas na Figura 5.

Figura 5 - Critério de tolerabilidade para risco social.



Fonte: CETESB (2011)

Em seu estudo sobre metodologias de análise de risco, Aguiar (2001) fornece categorias de frequência e severidade separadas em algumas faixas, como demonstrado nos quadros 3 e 4. Segundo o autor, essas categorias são frequentemente utilizadas na realização de uma Análise Preliminar de Perigo (APP). Elas também podem ser utilizadas para constituir uma matriz de classificação de risco, que também é apresentada na Figura 6.

Quadro 3 - Categorias de Frequência de ocorrência de um evento.

Categoria	Denominação	Faixa de Frequência (anual)	Descrição
A	EXTREMAMENTE REMOTA	$f < 10^{-4}$	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação.
B	REMOTA	$10^{-4} < f < 10^{-3}$	Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo/instalação.
C	IMPROVÁVEL	$10^{-3} < f < 10^{-2}$	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação.
D	PROVÁVEL	$10^{-2} < f < 10^{-1}$	Esperado ocorrer até uma vez durante a vida útil do processo/instalação.
E	FREQUENTE	$f > 10^{-1}$	Esperado de ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo/instalação.

Fonte: Aguiar (2001)

Quadro 4 - Categorias de severidade dos perigos identificados.

Categoria	Denominação	Descrição/ Características
I	DESPREZÍVEL	- Sem danos ou danos insignificantes aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente; - Não ocorrem lesões/mortes de funcionários, de terceiros (não funcionários) e/ou pessoas (indústrias e comunidade); o máximo que pode ocorrer são casos de primeiros socorros ou tratamento médico menor;
II	MARGINAL	- Danos leves aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente (os danos materiais são controláveis e/ou de baixo custo de reparo); - Lesões leves em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade;
III	CRÍTICA	- Danos severos aos equipamentos, à propriedade e/ou ao meio ambiente; - Lesões de gravidade moderada em empregados, prestadores de serviço ou em membros da comunidade (probabilidade remota de morte); - Exige ações corretivas imediatas para evitar seu desdobramento em catástrofe;
IV	CATASTRÓFICA	- Danos irreparáveis aos equipamentos, à propriedade e/ ou ao meio ambiente (reparação lenta ou impossível); - Provoca mortes ou lesões graves em várias pessoas (empregados, prestadores de serviços ou em membros da comunidade).

Fonte: Aguiar (2001)

Figura 6 - Matriz de classificação de risco - Severidade x Frequência

		Frequência				
		A	B	C	D	E
Severidade	IV	2	3	4	5	5
	III	1	2	3	4	5
	II	1	1	2	3	4
	I	1	1	1	2	3

Fonte: Aguiar (2001)

Para as classificações de risco, Aguiar as nomeia como: 1 - Desprezível, 2 - menor, 3 - moderado, 4 - severo e 5 - crítico; conforme o nível do risco aumenta. Tendo isso em vista, qualquer cenário que for classificado como nível 5 deve ser tomada alguma medida de mitigação desse risco imediatamente. Após isso a prioridade de ações deve ser alinhada conforme o nível de risco dos cenários diminui.

Em paralelo a essa classificação sugerida por Aguiar, pode-se utilizar a tabela 2 fornecida pela SAFEChE para auxiliar a caracterizar o evento analisado com relação a frequência, baseado nas causas atribuídas a ele.

Tabela 2 - Frequência de evento iniciador por ano.

Evento Iniciador	Frequência (por ano)
Falha residual do vaso de pressão	10^{-6}
Vazamento na tubulação	10^{-3}
Falha no tanque atmosférico	10^{-3}
Intervenção de terceiros (por exemplo, colisão de veículo externo)	10^{-2}
Válvula de segurança abre inesperadamente	10^{-2}
Falha na água de resfriamento	10^{-1}
Falha na vedação da bomba	10^{-1}
Falha no circuito do instrumento do sistema de controle básico de processo (BPCS)	10^{-1}
Incêndio externo	10^{-1}
Falha do operador	10^{-2} /oportunidade

Fonte: Adaptado de SAFEChE

O uso desse tipo de análise deve ser combinado com outras técnicas de identificação de perigos, como por exemplo o próprio HAZOP, para se obter uma visão mais completa do processo analisado.

Muitas vezes, mais de uma análise pode ser feita para o mesmo cenário, conforme as ações de mitigação vão sendo tomadas. Nesses casos, um cenário que inicialmente era classificado como risco crítico pode receber o apoio de uma válvula de segurança e ao ser reavaliado, considerando-se a instalação desse dispositivo, receber uma classificação menor, tornando aquela operação mais viável.

Por fim, existem muitos métodos populares que podem ser utilizados no processo de avaliação de riscos, como demonstrado por AB Rahim (2024). Em sua revisão sobre os métodos de avaliação de risco mais utilizados, o autor apresenta diversos exemplos de métodos, como APPP (Análise Preliminar de Perigos do Processo), HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade), Análise *What If*, LOPA (Análise por Barreiras de Proteção), AQR (Análise Quantitativa de Riscos), entre outras; cada uma com suas particularidades e vantagens. Como resultado de sua revisão, AB Rahim apontou o HAZOP como o método mais comumente utilizado para avaliação exclusivamente de segurança de processos.

Considerando a eficiência do método e a grande disponibilidade de informação, características apoiadas pela popularidade do seu uso, optou-se por utilizar o HAZOP como método principal de avaliação deste trabalho. Crawley (2015) aponta que dependendo de fatores como a complexidade e os perigos da instalação avaliada, pode ser necessário considerar outros métodos complementares, mas à primeira vista pode ser feita

uma avaliação com o HAZOP e a partir dos resultados a necessidade de maior profundidade deve ser discutida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ESTUDO DE PERIGOS E OPERABILIDADE (HAZOP)

Segundo Marhavilas (2011), o Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP) é uma metodologia formalizada e estruturada usada para identificar e analisar os perigos inerentes ao processo analisado. Para ele a metodologia se apoia no uso do pensamento imaginativo para fazer uma análise muito sistemática dos documentos de projeto que descrevem a instalação e o processo.

Assim como ele, Crawley (2015) também cita o HAZOP como uma forma estruturada de identificar os perigos do processo, e adiciona ao poder de identificação de perigos da ferramenta a capacidade de diagnosticar possíveis problemas operacionais. Além disso, o autor cita a expansão do uso da metodologia, que inicialmente era usada apenas para novas instalações e passou a ser aplicada para instalações existentes e modificações. Crawley confere a essa alta gama de usos, juntamente a sua eficiência, o motivo para o HAZOP ser a técnica escolhida para tantos estudos.

Apesar de ser tão utilizada, a metodologia HAZOP pode necessitar de técnicas complementares a depender do nível de risco do processo. Por ser um método de análise qualitativa, ele cumpre seu papel na identificação dos riscos e pode ser complementada por outras ferramentas de avaliação de risco como DMRA e AHP, como indicado por Marhavilas (2019).

Marhavilas (2011) ainda comenta algumas características comumente encontradas em um estudo HAZOP. Normalmente o estudo é conduzido por um time multidisciplinar para poder abordar o máximo de visões possíveis sobre o processo, já que o estudo inteiro é feito apenas pela consideração de cenários conduzidos pelas palavras guia, com as informações fornecidas pelos documentos de projeto. O segundo ponto característico de um estudo HAZOP é justamente a necessidade dos documentos de projeto precisamente detalhados e atualizados. Esses documentos geralmente são P&IDs, fluxogramas de processo, procedimentos operacionais (para o caso de um estudo sobre um procedimento em específico).

O início do estudo HAZOP se dará a partir do ponto em que o time que realizará o estudo tiver um completo entendimento do processo a ser analisado, e para isso é necessária uma descrição completa do processo, incluindo parâmetros chave. Partindo do

pressuposto que essa etapa foi realizada, inicia-se o uso metodologia estruturada do HAZOP.

O primeiro passo é identificar uma etapa ou equipamento do processo a ser analisado, que é denominado de nó. Uma vez definido o nó de estudo, os avaliadores deverão considerar cada um dos parâmetros envolvidos naquele nó e para cada um desses parâmetros considerar seus possíveis desvios e consequências.

À primeira vista essa parece ser uma tarefa impossível. Justamente para isso o método oferece uma tabela com os possíveis parâmetros que podem ser avaliados e um conjunto de palavras-guia, que devem ser associados a esses parâmetros para formar um possível desvio. Marhavilas (2011) cita que o uso desse conjunto de parâmetros e palavras-guia é o que garante a cobertura de todos os possíveis defeitos no processo pelo método.

Um exemplo dos parâmetros a serem considerados e das palavras-guia utilizadas é dado pelo Centro de Segurança de Processos Químicos (CCPS) nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 - Palavras-Guia originais do Manual de Estudo de HAZOP e seus significados

Palavras-Guia	Significado
Não	Negação da intenção do projeto
Menos ou Menos de	Diminuição quantitativa
Mais ou Mais de	Aumento quantitativo
Parte de	Diminuição qualitativa
Assim como	Aumento Qualitativo
Reverso	Oposto lógico da intenção
Outro que	Substituição completa

Fonte: CCPS (2014)

Tabela 4 - Parâmetros de processo comuns no estudo HAZOP

Fluxo	Tempo	Frequência	Mistura
Pressão	Composição	Viscosidade	Adição
Temperatura	pH	Tensão	Separação
Nível	Velocidade	Informação	Reação

Fonte: CCPS (2014)

Outro exemplo, também fornecido pelo CCPS, é dado na figura 7 para a criação de um desvio usando a combinação de um parâmetro com uma palavra-guia.

Figura 7 - Exemplo de combinação de palavra-guia com parâmetro para criação de um desvio

<u>Palavras-Guia</u>		<u>Parâmetro</u>		<u>Desvio</u>
NÃO	+	FLUXO	=	NENHUM FLUXO
MAIS	+	PRESSÃO	=	PRESSÃO ALTA
ASSIM COMO	+	UMA FASE	=	DUAS FASES
OUTROS QUE	+	OPERAÇÃO	=	MANUTENÇÃO

Fonte: CCPS (2014)

É importante ressaltar que nem todos os parâmetros vão ter um encaixe que faça sentido com todas as palavras guia, o importante é que todas as combinações sejam consideradas e ao serem detectadas as incoerências elas podem ser descartadas. Um exemplo de algumas combinações válidas é fornecido por Crawl (2015) no quadro 5.

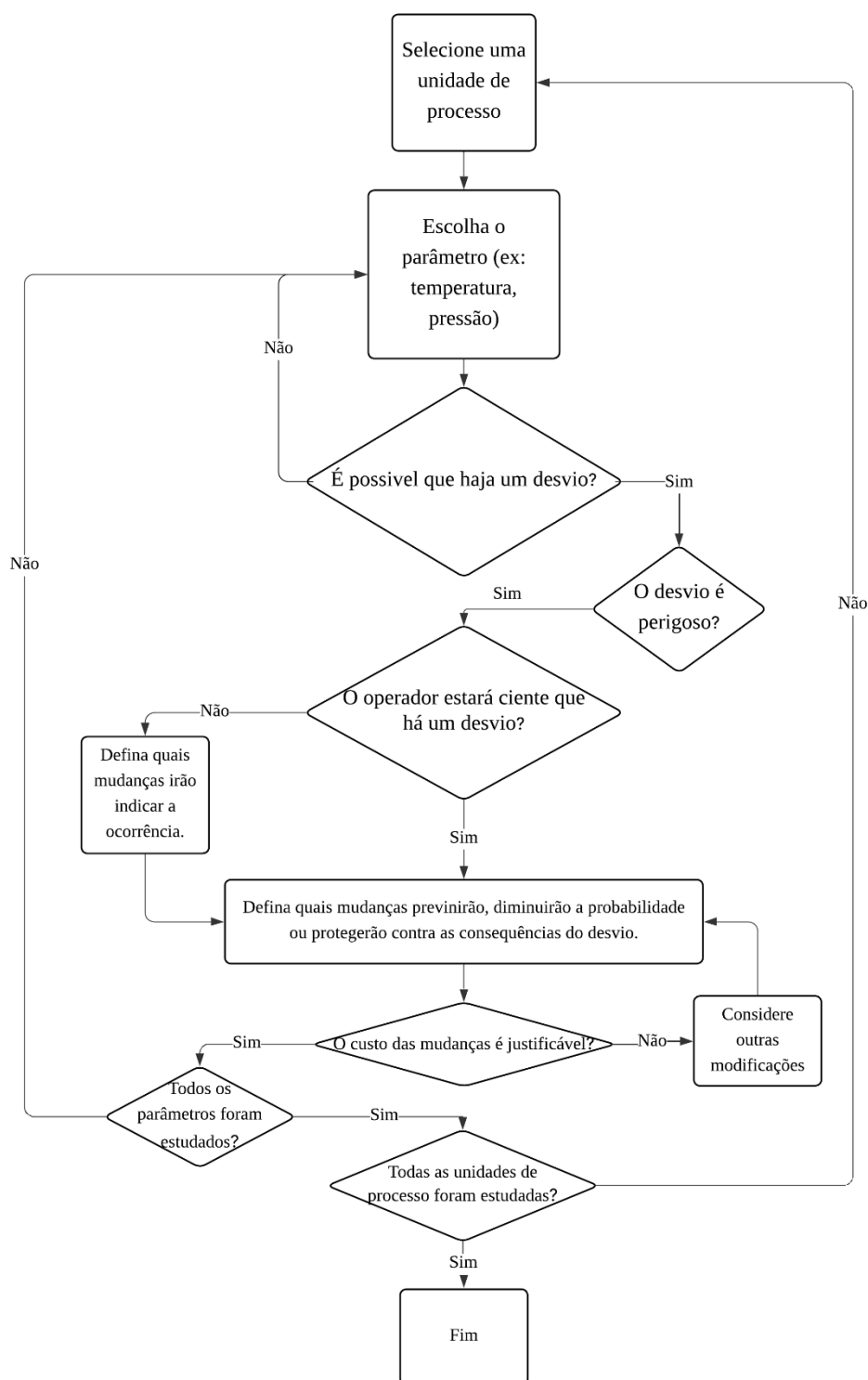
Quadro 5 - Combinações possíveis de palavras-guia e parâmetros.

Parâmetros de processo	Não, nenhum	Mais, maior	Menos, menor	Bem como, também	Parte de	Inverso	Outro que	Mais cedo	Mais tarde
Fluxo	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nível	x	x	x	x	x		x	x	x
Temperatura		x	x					x	x
Pressão		x	x	x				x	x
Concentração	x	x	x	x	x		x	x	x
pH		x	x					x	x
Viscosidade		x	x					x	x
Estado				x			x	x	x
Agitação	x	x	x		x	x		x	x
Reação	x	x	x				x	x	x
Amostra	x			x	x		x	x	x

Fonte: Adaptado de Crawl (2015)

Um resumo de forma mais visual do procedimento de realização de um estudo HAZOP é apresentado no fluxograma da figura 8.

Figura 8 - Fluxograma procedimental de um HAZOP.



Fonte: Marhavilas (2011).

Como produto final da análise de cada um dos nós de estudo deve ser gerado um quadro descrevendo a análise realizada. Esse quadro pode variar de estudo para estudo, alguns contendo informações a mais, porém todos devem apresentar qual foi o nó

estudado, as combinações de palavra-guia e parâmetro analisados, os desvios gerados e as consequências. Crowl (2015) fornece um exemplo demonstrado no quadro 6.

Quadro 6 - Exemplo de quadro de documentação de HAZOP

Nome do projeto:					Data:	Página de	Concluído: ↓		
Processo:							Nenhuma ação: ↓		
Seção:					Desenho de referência:		Data da resposta: ↓		
Item	Ponto de estudo (nó)	Parâmetros do processo	Desvios palavra-guia	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação necessária	Atribuída a: ↓		

Fonte: Crowl (2015)

Para a documentação dos resultados do estudo realizado nesse trabalho, o Quadro 7, de registro das análises será utilizado. A escolha por esse modelo personalizado se dá pela adição das colunas de frequência, de severidade e de risco de ocorrência do evento/consequência, analisado. Os conceitos dessas 3 informações adicionais foram mais profundamente abordados na seção 2.3 desse estudo.

Quadro 7 - Modelo de quadro de apresentação de HAZOP

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo							HAZOP			
Documentos de referência							DATA			
Equipe responsável							REV			
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção

Fonte: Elaborado pelo autor

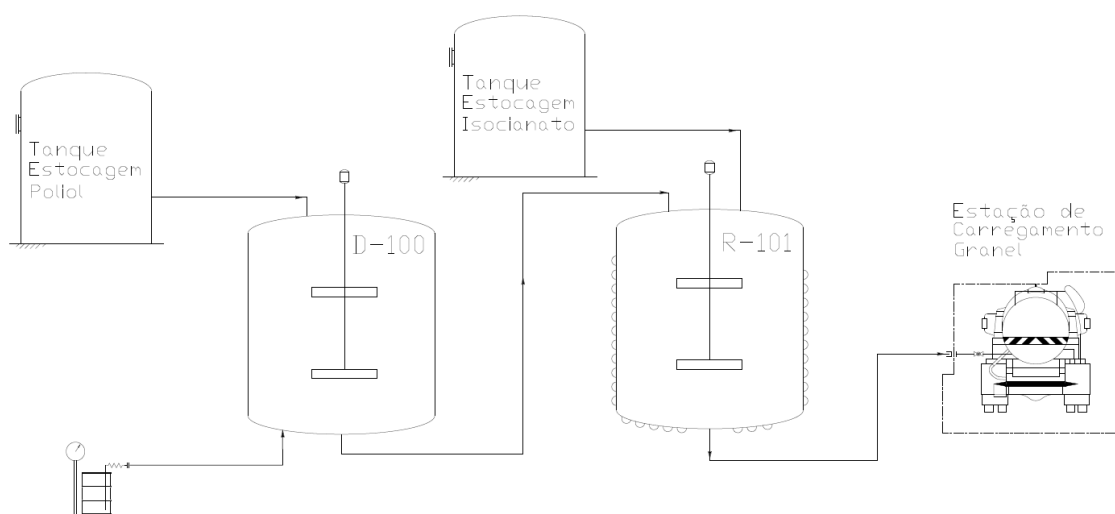
3.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Em uma planta industrial de produção de poliuretano geralmente são produzidos alguns diferentes tipos de produtos, os quais apresentam pequenas particularidades em seus processos. Contudo, para o escopo do estudo a ser realizado foi selecionada a produção de um produto em específico, sendo ele um pré-polímero de poliuretano flexível. O processo foi selecionado por ser o mais crítico do ponto de vista de segurança presente na planta usada como base para o estudo.

Essa produção consiste da mistura dos dois materiais precursores do poliuretano, poliol e isocianato, juntamente com um aditivo que fornece características específicas ao produto final. Por questões de confidencialidade da receita do produto, trataremos as matérias primas como um poliol genérico, um isocianato genérico e um aditivo de cadeias mais longas, que ajuda o produto a ter a característica flexível desejada. Essa consideração não afetará a qualidade do estudo, já que as características das matérias primas é bem representada por esses representantes genéricos de cada uma delas, assim como as interações entre elas.

O processo completo é conduzido em dois vasos de pressão interligados, como pode ser visto no fluxograma do processo na figura 9. O primeiro vaso (D-100) é chamado de pré-misturador, e o segundo vaso é o reator (R-101). Ambos os vasos podem receber matéria prima diretamente, porém o reator pode receber material transferido do pré-misturador, enquanto o contrário não é possível. Essa matéria prima carregada diretamente nos vasos pode vir de um destamporamento (processo de adição manual realizado pelo operador utilizando um mangote pescador) ou de um tanque de estocagem de matéria prima (chamada de adição automática). Por fim, o produto final pode ser envasado localmente por um processo similar ao do destamporamento, utilizando mangotes para encher os tambores ou contêineres IBC; ou pode ser envasado diretamente em caminhão a granel.

Figura 9 - Fluxograma do processo



Fonte: Crawl (2015)

Apesar de ser um processo simples que consiste apenas de uma mistura, sua criticidade se dá pela natureza da reação entre o poliol e isocianato, assim como pela alta toxicidade do isocianato. Por conta disso, o foco do estudo será nas etapas de adição das matérias primas, mistura e reação; deixando a etapa de envase como um possível ponto de estudo futuro complementar.

Aprofundando-se nas etapas de interesse, tem-se o início da adição de matéria prima ao processo. Nesta etapa as adições do poliol ao pré-misturador e do isocianato ao reator podem ser feitas ao mesmo tempo, já que ocorrem separadas fisicamente. As proporções dos materiais podem variar de acordo com a característica desejada no seu pré-polímero, para o cenário de estudo será considerado um produto composto por isocianato, poliol, um poliol aditivo de cadeia longa e de Cloreto de Benzoila, que é adicionado em pequena quantidade ao isocianato para impedir a continuidade da reação antes da formação de espuma, já que ele é envasado sendo ainda um pré-polímero e terminará a formação do polímero apenas no cliente final.

Algumas precauções são indicadas para serem tomadas antes dessas adições, como verificar se ambos os vasos estão drenados, obter a aprovação do Laboratório de Controle de Qualidade (LCQ) sobre as matérias primas utilizadas, verificar o alinhamento das válvulas e instrumentos de ambos os vasos.

Uma vez que o poliol e o isocianato foram adicionados aos vasos, a agitação dos dois materiais é iniciada. Durante essa agitação podem ser então introduzidos o aditivo

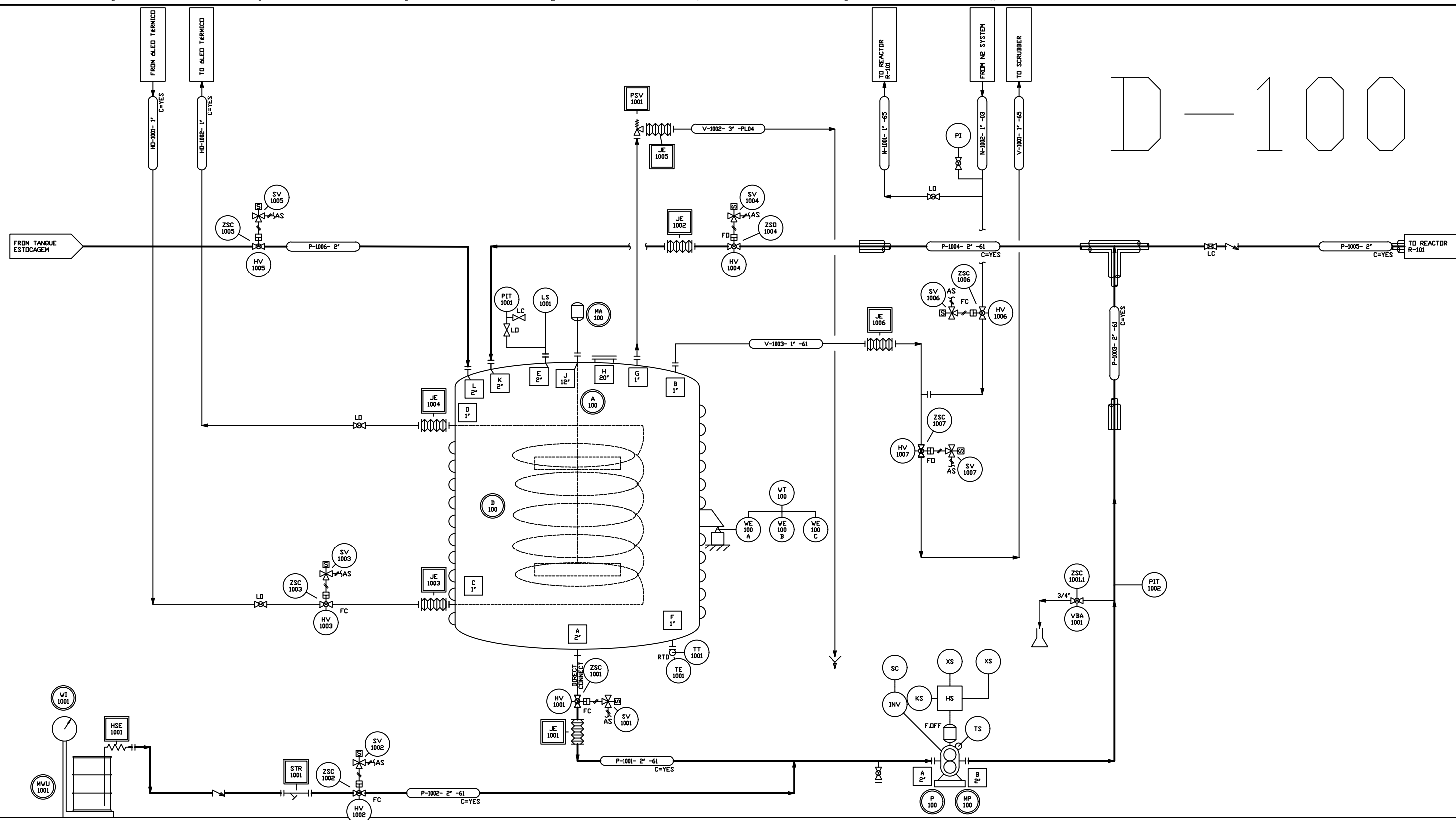
de cadeia longa e o Cloreto de Benzoila nas quantidades indicadas, ao poliol e isocianato respectivamente. Após um breve período de agitação são retiradas amostras de ambas as misturas e analisadas pelo LCQ, que deve dar a aprovação para a transferência do material do pré-misturador ao reator.

Essa etapa de transferência é a mais crítica do processo, na qual devem ser monitorados com atenção parâmetros como temperatura e pressão. Para ser realizada a transferência ambas as misturas devem estar na temperatura determinada de transferência para evitar um descontrole da reação. Além disso a velocidade da transferência do poliol para o reator deve ser controlada, pois uma adição muito rápida também pode levar ao descontrole da reação.

Realizada com sucesso a etapa de transferência, o produto deve passar por um período de digestão no reator, no qual a temperatura deverá continuar sendo monitorada e controlada pelo sistema de controle de processo, pois a reação estará terminando de acontecer. Após isso deverá ser retirada uma amostra final do conteúdo do reator, que sendo aprovada, libera o produto para a etapa de envase.

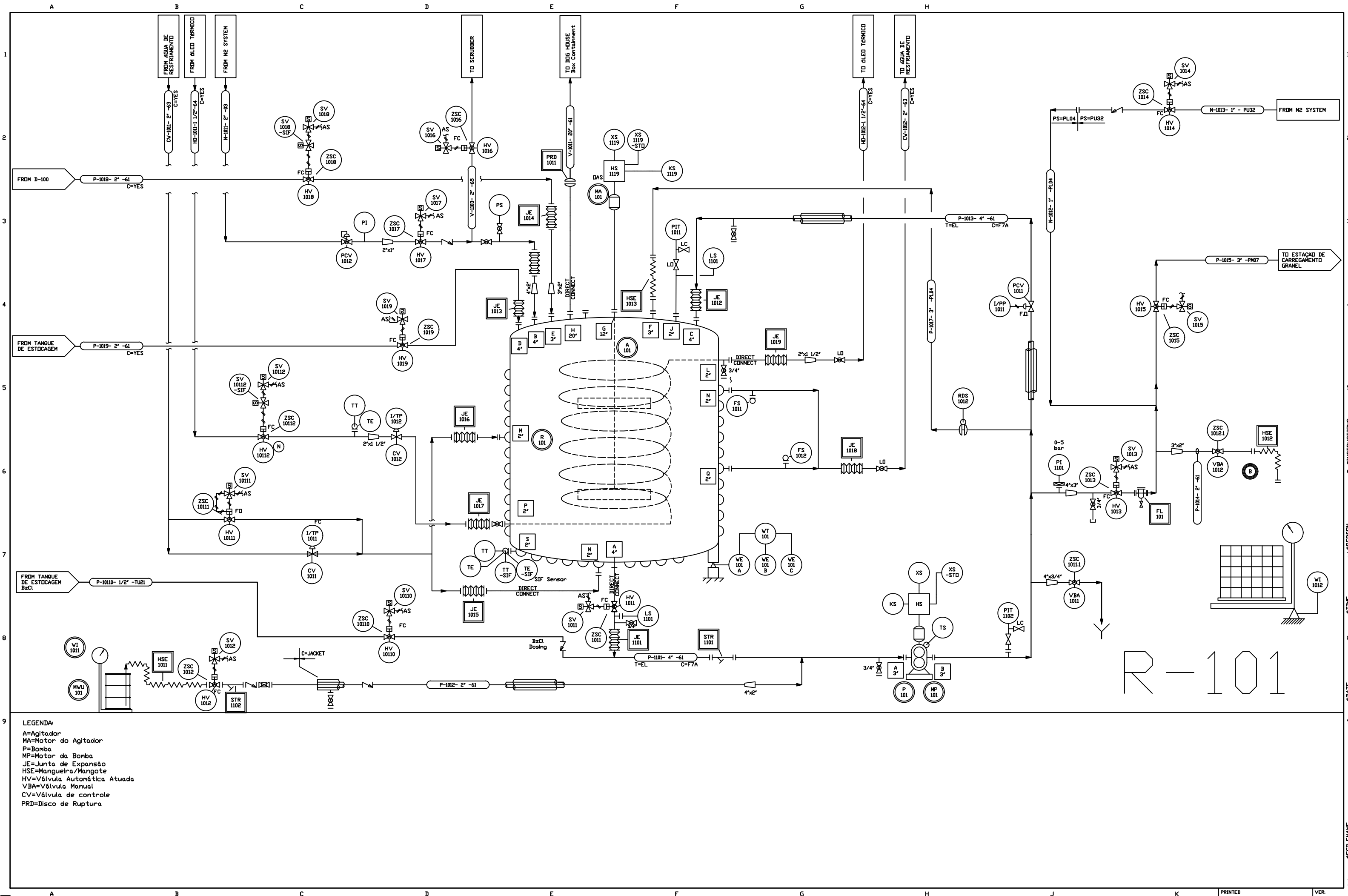
O processo considerado para o estudo de perigos e operabilidade já contém diversas medidas de segurança implementadas, como por exemplo os discos de ruptura PRD-1011 e PRD-1012; a válvulas de alívio PSV-1001; controle de temperatura por óleo térmico e água de resfriamento com bombas reserva; sistema de adição de nitrogênio e controle da atmosfera dos vasos feito pela válvulas de controle PCV-1012 no reator; um sistema de controle SIS com instrumentos SIF para caso de falha dos instrumentos comuns, exemplificado pelos transmissores e elemento primário de temperatura TT-SIF e TE-SIF respectivamente; e uma caixa de contenção para um cenário catastrófico de descontrole denominada “*Dog house*”. Os dispositivos mencionados podem ser vistos com melhor detalhe nos Diagramas de Tubulação e Instrumentação (P&IDs) apresentados nas figuras 10 e 11. Por conta disso pode ser que algumas das ações mitigadoras sugeridas como resposta a análise do estudo de HAZOP já tenham sido aplicadas a planta usada como base para o estudo.

Figura 10 - P&ID pré-misturador D-100.



LEGENDA:
 A=Agitador
 MA=Motor do Agitador
 P=Bomba
 MP=Motor da Bomba
 JE=Junta de Expansão
 HSE=Mangueira/Mangote
 HV=Válvula Automática Atuada
 VBA=Válvula Manual

Figura 11 - P&ID reator R-101.



Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o melhor desenvolvimento da avaliação de riscos, optou-se por apresentar primeiramente todo o registro da análise feita em seus quadros na seção 4.1, adicionando todos os comentários e discussões sobre os resultados apresentados posteriormente, na seção 4.2.

4.1 DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE COM HAZOP

Para o desenvolvimento da análise, optou-se por seguir a ordem das etapas do processo (adição de matéria prima, transferência para o reator e fase de digestão), selecionando cada equipamento presente como um nó e assim avançando com a análise da combinação de cada um dos parâmetros com as palavras-guia compatíveis como apresentado no quadro 5, que fizessem sentido para aquele nó em específico. Nós que não apresentaram risco não foram pontuados nos quadros, assim como nós repetidos (por exemplo a avaliação da serpentina no reator e a falha de controle de temperatura no reator se enquadram como o mesmo cenário).

Como a etapa de adição ocorre simultaneamente em ambos os vasos sua análise é muito similar entre eles, diferenciando-se com relação ao risco por conta da natureza dos produtos presentes em cada um deles. As nomenclaturas utilizadas seguiram o padrão dos P&IDs referentes a cada vaso.

Quadro 8 - Estudo de perigo e operabilidade: Adição de matéria prima.

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Adição de matéria prima				HAZOP		1	
Documentos de referência			PID D100.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
1	Pré-misturador D-100	Nível	Menor	Operar abaixo do nível mínimo	Falta de matéria prima; Falha na célula de carga.	1- Cavitação da bomba; 2- Má homogeneização do produto; 3- Troca térmica ruim.	D	I	2	1- Verificação da disponibilidade de material antes de iniciar a operação; 2- Manutenção preventiva em dia.
			Maior	Operar acima do nível máximo	Falha no fechamento de válvulas; Falha na célula de carga; Desatenção do operador na adição manual.	1- Risco de transbordo do material; 2- Exposição dos operadores ao material; 3- Impossibilidade de correção do batch; 4- Desperdício de matéria prima.	D	I	2	1- Chave de nível com intertravamento; 2- Manutenção preventiva em dia.
		Agitação	Não	Agitador fora de operação	Mau funcionamento do agitador; Falha de energia.	1- Má homogeneização do material.	D	I	2	1- Intertravamento da alimentação com falha do agitador.
		Amostra	Não	Não amostragem do material	Desatenção do operador.	1- Contaminação do vaso com material fora de especificação; 2- Desperdício de tempo e material para limpeza.	D	I	2	1- Exigência de aprovação do LCQ para início do batch.
2	Mangote HSE 1001	Pressão	Maior	Mangote pressurizado no momento da adição	Falta de drenagem na última utilização.	1- Splash de material no operador.	D	II	3	1- Incluir a drenagem ao final da produção no procedimento.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 9 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Adição de matéria prima (continuação).

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Adição de matéria prima				HAZOP		1	
Documentos de referência			PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
3	Reator R-101	Nível	Menor	Operar abaixo do nível mínimo	Falta de matéria prima; Falha na célula de carga.	1- Cavitação da bomba; 2- Má homogeneização do produto; 3- Troca térmica ruim.	D	I	2	1- Verificação da disponibilidade de material antes de iniciar a operação; 2- Manutenção preventiva em dia.
			Maior	Operar acima do nível máximo	Falha no fechamento de válvulas; Falha na célula de carga; Desatenção do operador na adição manual.	1- Risco de transbordo do material; 2- Exposição dos operadores ao material; 3- Impossibilidade de correção do batch; 4- Desperdício de matéria prima.	D	III	4	1- Chave de nível com intertravamento; 2- Manutenção preventiva em dia.
		Agitação	Não	Agitador fora de operação	Mau funcionamento do agitador; Falha de energia.	1- Má homogeneização do material.	D	I	2	1- Intertravamento da alimentação com falha do agitador.
		Amostra	Não	Não amostragem do material	Desatenção do operador.	1- Contaminação do vaso com material fora de especificação; 2- Desperdício de tempo e material para limpeza.	D	I	2	1- Exigência de aprovação do LCQ para início do batch.
4	Mangote HSE 1011	Pressão	Maior	Mangote pressurizado no momento da adição	Falta de drenagem na última utilização.	1- Splash de material no operador.	D	III	4	1- Incluir a drenagem ao final da produção no procedimento.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator.

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Transferência do pré-misturador ao reator				HAZOP		2	
Documentos de referência			PID D100.pdf / PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
5	Bomba P-100	Fluxo	Maior	Velocidade de transferência alta	Falha no controlador de velocidade da bomba	1- Descontrole da reação.	C	IV	4	1- Manutenção preventiva em dia; 2- Intertravamento da bomba com aumento de massa no reator.
			Mais cedo	Início da transferência antes da hora	Erro nas etapas da receita no software de controle de processo.	1- Possível descontrole da reação devido a proporção errada de reagentes.	C	IV	4	1- Intertravamento da bomba com temperatura do reator.
		Pressão	Maior	Deadheading da bomba	Válvula na linha de descarga fechada: -por falha da válvula -por falha do controle de processo.	1- Possível ruptura da bomba ou da linha; 2- Vazamento do produto e exposição dos operadores.	C	III	3	1- Instalação de válvula de segurança (PSV) na linha; 2- Intertravamento da pressão na descarga com a bomba; 3- Manutenção em dia das válvulas.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Transferência do pré-misturador ao reator				HAZOP		2	
Documentos de referência			PID D100.pdf / PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
6	Pré-misturador D-100	Temperatura	Maior	Transferir o material acima da temperatura máxima	Falha do operador ao iniciar a transferência fora dos parâmetros.	1- Descontrole da reação.	D	IV	5	1- Encamisamento com água de resfriamento; 2- Intertravamento da bomba com temperatura do pré-misturador.
			Menor	Transferir o material abaixo da temperatura mínima	Falha do operador ao iniciar a transferência fora dos parâmetros; Falha do sistema de aquecimento com óleo térmico.	1- Acúmulo de material não reagido; 2- Descontrole da reação.	D	IV	5	1- Manutenção e inspeção em dia do sistema de aquecimento; 2- Intertravamento da bomba com temperatura do pré-misturador.
7	Reator R-101	Fluxo	Inverso	Refluxo de material do reator ao pré-misturador	Diferença de pressão entre os vasos por falha no controle de pressão.	1- Contaminação do pré-misturador; 2- Possibilidade de reação e incrustação das linhas.	C	II	2	1- Instalação de válvula de retenção entre os vasos; 2- Instalação de PSV nos vasos.
		Concentração	Outro que	Proporção incorreta de reagentes	Receita incorreta no software de controle de processo; Falha na célula de carga de um dos vasos.	1- Possível descontrole da reação; 2- Produto fora de especificação.	C	IV	4	1- Etapa de conferência da receita no procedimento de produção; 2- Manutenção e calibração em dia.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 12 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Transferência do pré-misturador ao reator				HAZOP		2	
Documentos de referência			PID D100.pdf / PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
7	Reator R-101	Pressão	Maior	Operar com pressão interna do reator acima do limite	Falha no sistema de exaustão.	1- Risco de liberação de gases tóxicos; 2- Risco de ruptura do vaso.	C	IV	4	1- Instalação de dispositivos de segurança como Disco de ruptura e PSV; 2- Manutenção em dia do sistema de exaustão.
			Menor	Operar com pressão interna do reator abaixo do limite	Falha no sistema de exaustão.	1- Risco de colapso do vaso.	C	IV	4	1- Instalação de válvulas de segurança; 2- Intertravamento da bomba com pressão do vaso; 3- Manutenção em dia do sistema de exaustão.
		Temperatura	Maior	Receber transferência com o material acima da temperatura máxima	Falha do operador ao iniciar a transferência fora dos parâmetros; Falha do sistema de resfriamento.	1- Descontrole da reação.	D	IV	5	1- Manutenção e inspeção em dia do sistema de resfriamento; 2- Intertravamento da bomba com temperatura do reator.
			Menor	Receber transferência com o material abaixo da temperatura mínima	Falha do operador ao iniciar a transferência fora dos parâmetros; Falha do sistema de aquecimento com óleo térmico.	1- Acúmulo de material não reagido; 2- Descontrole da reação.	D	IV	5	1- Manutenção e inspeção em dia do sistema de aquecimento; 2- Intertravamento da bomba com temperatura do reator.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 13 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Transferência do pré-misturador ao reator (continuação).

ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Transferência do pré-misturador ao reator				HAZOP		2	
Documentos de referência			PID D100.pdf / PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
7	Reator R-101	Agitação	Não / menos	Falha no agitador	Falha do agitador; Falta de energia.	1- Má homogeneização do material; 2- Acúmulo de material não reagido; 3- Descontrole da reação.	D	IV	5	1- Intertravamento da alimentação com o agitador; 2- Manutenção em dia; 3- Gerador de energia reserva para equipamentos críticos.
			Mais tempo	Agitador ligado por mais tempo que o necessário	Demora para retirada de amostra; Desatenção do operador.	1- Espumação do produto; 2- Produto fora de especificação.	D	I	2	1- Função de desligamento automático do agitador após certo tempo de agitação.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 14 - Estudo de Perigos e Operabilidade: Digestão.

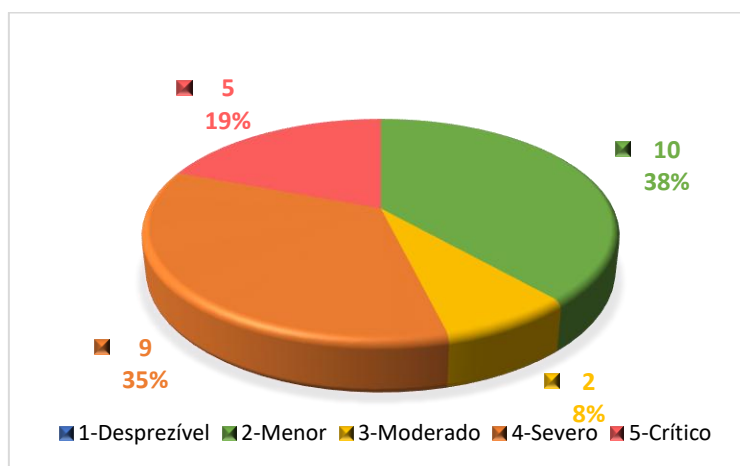
ESTUDO DE PERIGO E OPERABILIDADE (HAZOP)										
Etapa do processo			Digestão				HAZOP		3	
Documentos de referência			PID R101.pdf				DATA		30/05/2025	
Equipe responsável			Elaborado pelo autor				REV		A (Primeira versão)	
No.	Item	Parâmetro	Palavra-guia	Desvio/Perigo	Possível Causa	Evento/Consequência	F	S	R	Medida de proteção
8	Reator R-101	Temperatura	Maior	Aumento de temperatura acima da máxima	Falha do sistema de resfriamento.	1- Descontrole da reação.	C	IV	4	1- Manutenção e inspeção em dia do sistema de resfriamento. 2- Equipamentos reserva para o sistema de resfriamento.
		Pressão	Maior	Aumento de pressão acima do limite máximo	Falha no sistema de exaustão.	1- Risco de liberação de gases tóxicos; 2- Risco de ruptura do vaso.	C	IV	4	1- Instalação de dispositivos de segurança como Disco de ruptura e PSV; 2- Manutenção em dia do sistema de exaustão.
		Agitação	Não / menos	Falha no agitador	Falha do agitador; Falta de energia.	1- Má homogeneização do material; 2- Produto fora de especificação.	D	I	2	1- Manutenção em dia; 2- Gerador de energia reserva para equipamentos críticos.
Legenda: F = Frequência: A – Extremamente remota; B – Remota; C – Improvável; D – Provável; E – Frequente. S = Severidade: I – Desprezível; II – Marginal; III – Crítica; IV – Catastrófica. R = Risco: 1 – Desprezível; 2 – Menor; 3 – Moderado; 4 – Sério; 5 – Crítico.										

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 DISCUSSÕES

Como resultado do HAZOP desenvolvido para a produção de pré-polímeros de poliuretano, dos 26 possíveis eventos considerados na análise, obteve-se classificações de risco desde o nível 2, que representa um risco menor, ao nível 5 que é considerado crítico.

Figura 12 - Distribuição dos níveis de risco atribuídos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os cenários considerados de risco menor (nível 2) foram os mais numerosos, possuindo em comum consequências como a perda de produto, danos a pequenos equipamentos em específico ou exposição humana a químicos de baixa periculosidade; no caso o polioli. Esse alto número de cenários a princípio parece positivo, considerando que poderiam fornecer risco maior, porém não devem ser relevados e no futuro após a mitigação dos casos mais urgente também devem ser tratados. Com relação aos dois cenários de risco moderado, o nível de risco nesses casos é maior, pois o dano gerado aos equipamentos geraria um custo maior do que nos casos mencionados anteriormente, além de haver a possibilidade de uma lesão leve aos trabalhadores envolvidos.

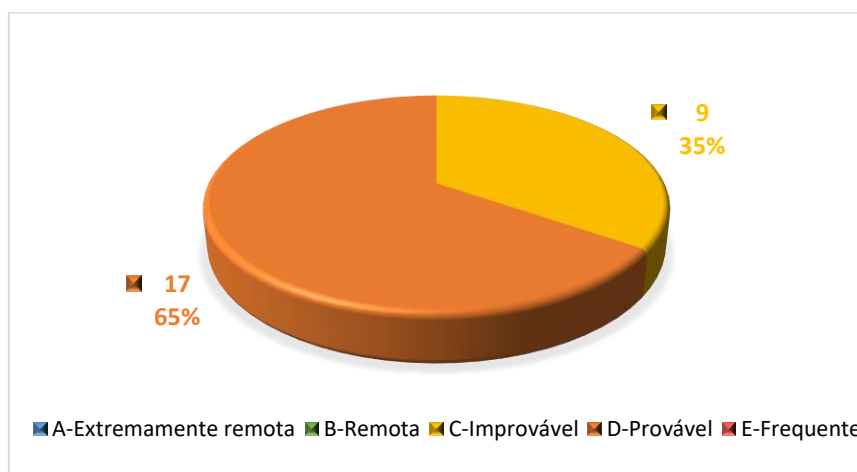
A classificação de risco severo se mostra muito presente, compondo 35% dos casos. Esse grupo inclui cenários onde há exposição de operadores ao isocianato e possibilidade de descontrole da reação quando combinada com uma probabilidade de ocorrência improvável. Esse detalhe da frequência dos cenários de descontrole da reação é o que diferencia os cenários classificados como severos dos casos críticos. É interessante ressaltar que para estes casos críticos, a planta na qual o estudo se baseou já possui medidas amenizadoras como os intertravamentos pelo sistema de controle, geradores de energia e bombas reserva para os sistemas de aquecimento e resfriamento do reator.

Por fim, foram identificados 5 cenários críticos, todos eles envolvendo um caso de descontrole da reação. Como já esperado e apontado na seção 2.2.3, o descontrole da reação é o ponto de maior preocupação do processo podendo gerar danos enormes, tanto materiais como a vida. Esses cenários devem ser prioritários quanto a tomada de ações mitigadoras de risco, sendo seguidos posteriormente pelos cenários severos e assim por diante.

Um ponto interessante a ser destacado é a distribuição dos níveis de risco entre as etapas do processo. Todos os cenários críticos estão na etapa de transferência do pré-misturador ao reator, enquanto que 70% dos cenários de risco menor estão na fase de adição de matéria-prima. Isso confirma a ideia de que a etapa mais crítica do processo é a transferência do material para o reator. Outra informação presente nesses dados é a influência da adição de matéria-prima na qualidade do produto. Essa etapa, apesar de não ser a mais importante no quesito segurança, pode gerar muitos prejuízos financeiros à produção, pois os cenários de risco dois em geral geram desperdício de produto e são muito frequentes devido ao erro humano inerente ao processo manual.

Tratando-se apenas da frequência dos cenários pontuados, esse parâmetro se alternou apenas entre as classificações C e D, que representam cenários improváveis e prováveis, respectivamente.

Figura 13 - Distribuição das frequências atribuídas.



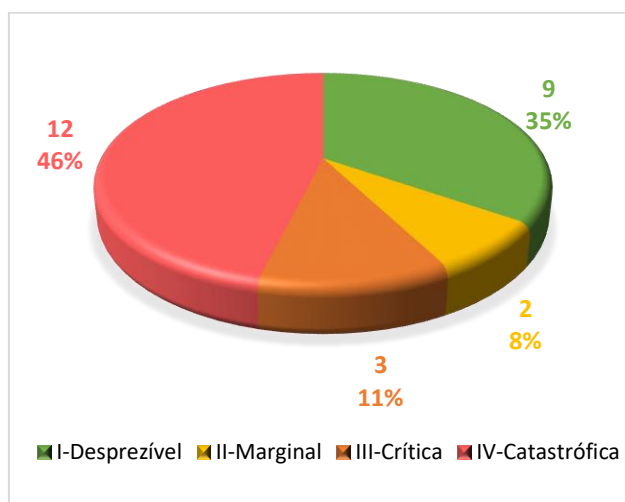
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa recorrência dos níveis de frequência é compatível com o fato da análise HAZOP considerar que apenas a falha de um equipamento já pode gerar a consequência final, não contando com a atuação de outras camadas de proteção. Além disso, a grande ocorrência de cenários com frequência considerada provável se deve a alta dependência

da atuação dos operadores em todas as tarefas, incluindo as críticas. Por conta disso o fator do erro humano aumenta a frequência de ocorrência de falhas, quando comparada a processos automatizados.

Com relação a severidade dos cenários, as classificações se concentraram principalmente em desprezível ou catastrófica, somando 81% dos cenários. Como esperado a consequência mais detectada e a única que gerou uma classificação de severidade catastrófica foi o descontrole da reação.

Figura 14 - Distribuição das severidades atribuídas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do grande número de cenários severos catastróficos encontrados nessa avaliação, ele é condicionado por um fator já pontuado anteriormente ao longo do trabalho, que é a desconsideração de possíveis camadas de proteção prevenirem a consequência final a partir das causas apontadas. Por exemplo, para os cenários iniciados por falha humana, apenas a existência de um intertravamento corretamente aplicado diminui severamente a probabilidade de ocorrência daquele evento e consequentemente diminui o seu risco.

Considerando isso, durante o desenvolvimento de uma planta de produção de poliuretano, essa análise realizada seria apenas uma etapa inicial, na qual o HAZOP cumpre bem o seu papel de identificação dos riscos. Após essa identificação, a aplicação das medidas sugeridas pode ser considerada em uma próxima análise, a qual pode ser feita utilizando o mesmo método HAZOP, ou até mesmo outro método que se aprofunde mais ainda nos cenários considerados mais críticos. A intenção é que com essas medidas

a mais sendo consideradas a frequência considerada para cada cenário seja menor, até o ponto em que o risco esteja em um patamar aceitável.

As medidas de mitigação de risco mencionadas que deveriam ser consideradas para essa segunda etapa de avaliação são em geral práticas já comuns na indústria para planta com um cenário similar (reator com possibilidade de *Runaway*). Os principais itens que foram citados como recomendações no HAZOP são implementação de intertravamentos pela lógica de controle de processos; instalação de válvulas de alívio de pressão, discos de ruptura e outros dispositivos similares; instalação de alarmes; implementação de um plano de manutenção preventiva efetivo e implementação de procedimentos eficientes.

Uma das metodologias que se encaixa bem com essa ideia de considerar o efeito das medidas protetivas é a análise LOPA, na qual cada medida é considerada uma camada de proteção que combinadas aumentam a segurança do processo como um todo.

A importância das análises de riscos, como por exemplo a realizada neste estudo, muitas vezes só é percebida quando acontece um incidente como o desastre de Bhopal e a explosão da Fu-Kao Chemical no Taiwan, que foram detalhados na seção 2.3 deste trabalho. Só dentre estes dois casos, podemos notar que as possíveis causas consideradas neste HAZOP como a contaminação de um vaso que contém isocianato com um produto reativo (no caso de Bhopal água) gerando uma reação que perdeu o controle, e um problema no controle de temperatura do reator para o caso do Taiwan, realmente geram acidentes dessa magnitude.

Embora este trabalho tenha como objetivo aplicar de forma rigorosa a metodologia HAZOP para a análise de riscos em uma planta de produção de poliuretano, é importante reconhecer que a sua realização no contexto acadêmico, por um único estudante, impõe algumas limitações que diferem de uma análise conduzida em ambiente industrial real, com o envolvimento de uma equipe multidisciplinar.

Uma das principais limitações refere-se à falta de vivência operacional direta. Sem a imersão prática no cotidiano da planta industrial, torna-se inviável observar com precisão aspectos importantes relacionados à operação dos equipamentos, às rotinas dos operadores, às condições de manutenção e às particularidades do processo que poderiam impactar diretamente a identificação de riscos.

Além disso, o estudo enfrentou restrições quanto ao acesso a dados confidenciais, como históricos de falhas, registros de eventos operacionais críticos, relatórios de manutenção e especificações técnicas detalhadas de instrumentos e equipamentos. Essas informações são fundamentais para análises de risco mais realistas, mas normalmente são restritas às equipes internas da empresa por questões de segurança e sigilo industrial.

Outra limitação relevante é a ausência de uma equipe multidisciplinar, elemento essencial para a aplicação completa da metodologia HAZOP. Em contextos industriais, a análise é conduzida por grupos compostos por profissionais com formações e experiências complementares, como engenheiros de processo, operadores de planta, técnicos de segurança, instrumentistas e engenheiros de manutenção. A diversidade de perspectivas aumenta significativamente a abrangência da análise, possibilitando a identificação de falhas que poderiam passar despercebidas por uma única pessoa.

Por fim, o estudo foi conduzido com base em uma representação simplificada da planta de produção de poliuretano, a fim de torná-lo viável dentro do escopo acadêmico e dos recursos disponíveis. Essa simplificação, embora didaticamente útil, implica a omissão de sistemas auxiliares, intertravamentos, válvulas de alívio e outros elementos que, em uma planta real, impactam diretamente a operação e os riscos associados.

Apesar dessas limitações, a aplicação da metodologia HAZOP neste trabalho permitiu a identificação de potenciais desvios de processo e proporcionou uma importante experiência prática sobre o uso de ferramentas de análise de risco na engenharia química. Os resultados obtidos reforçam a relevância do tema e evidenciam o papel crucial da segurança de processo no ambiente industrial.

5 CONCLUSÃO

A aplicação da metodologia HAZOP permitiu identificar potenciais desvios de processo, analisar suas causas e consequências, e propor recomendações de segurança com foco na prevenção de acidentes e falhas operacionais. Mesmo com as limitações inerentes à realização de um trabalho acadêmico individual — como a ausência de uma equipe multidisciplinar e o uso de uma modelagem simplificada da planta —, os resultados obtidos demonstram a eficácia da metodologia como ferramenta sistemática e preventiva no contexto da segurança de processo.

Os resultados obtidos pela análise mostram que 5 dos 26 cenários considerados pelo HAZOP foram classificados como críticos, além da presença de mais 9 cenários severos. Esses resultados são condizentes com severidade da natureza do processo e da toxicidade do isocianato, porém as ações mitigadoras sugerem que sem grande esforço o risco pode ser mitigado baixando a frequência de ocorrência desses cenários.

Além de cumprir seu objetivo principal, o trabalho contribui para a difusão do conhecimento sobre análise de risco na engenharia química e reforça a importância da cultura de segurança no ambiente industrial. A compreensão dos riscos envolvidos na produção de poliuretano e a adoção de práticas proativas de identificação e mitigação de falhas são essenciais para garantir a integridade dos processos, dos trabalhadores e do meio ambiente.

Como oportunidade de estudo para futuros trabalhos realizados nessa área, fica como sugestão a integração com outras ferramentas complementares, como FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*) e LOPA (*Layer of Protection Analysis*). Também seria relevante a realização de simulações dinâmicas de cenários de falha, com base em dados operacionais reais, para avaliação mais precisa do comportamento do sistema em situações críticas.

REFERÊNCIAS

- AB RAHIM, M. S. et al. Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 88, p. 105274, abr. 2024.
- AGUIAR, Laís Alencar. **Metodologias de análises de riscos: APP&HAZOP**. Rio de Janeiro, 2001.
- AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. **Bhopal gas tragedy: Part III – Runaway reaction prevention**. *Chemical Engineering Progress*, dez. 2024. Disponível em: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2024/december/bhopal-gas-tragedy-part-iii-runaway-reaction-prevention> . Acesso em: 23 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000:2018 – Gestão de riscos – Diretrizes**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. [1]
- BASTOS, L. F.; LIMA, D. C. **Microestrutura e propriedades mecânicas de elastômeros de poliuretano**. *Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 32, n. 1, p. 1–9, 2022.
- BECKER, J.; BRACKE, J. **Polyurethane: Versatile Applications and Global Relevance**. Berlin: Springer, 2020.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 1**, de 30 de julho de 2019. Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-01> . Acesso em: 23 maio 2025.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Diretrizes para elaborar procedimentos para avaliação de perigos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2023. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 02 maio 2025.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Diretrizes para segurança de processos baseada em risco**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 02 maio 2025.
- CHANG, J. I.; LIN, C. C. **Acrylic reactor runaway and explosion accident analysis**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 14, n. 5, p. 417–423, 2001.
- CHANG, J. I.; LIN, C. C. **An explosion accident – causes and safety information management**. In: SYMPOSIUM SERIES No. 149. Rugby: Institution of Chemical Engineers, 2003. p. 591–600.
- COMEXSTAT. *Portal de Estatísticas de Comércio Exterior*. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/> . Acesso em: 29 maio 2025.
- COSTA, F. B.; SOUZA, L. R. **Eficiência energética e materiais isolantes: uma abordagem sobre as espumas rígidas de poliuretano**. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 6, n. 2, p. 45–52, 2019.
- CRAWLEY, F.; TYLER, B. **HAZOP: guide to best practice: guidelines to best practice for the process and chemical industries**. Third edition ed. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- CROWL, D.; LOUVAR, J. **Segurança de processos químicos**. Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2015.
- CUNHA, R. S. da et al. **Caracterização físico-química de espumas de poliuretano para aplicações industriais**. *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, p. e12566, 2020.
- FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos. **Isocianatos**. Disponível em: https://multimedia.3m.com/mws/mediawebserver?mwsId=SSSSSuUn_zu8l9uZMY_xPY_9ovVsN17zHvu9lxUb7SSSSSS-- . Acesso em: 1 jun. 2025.

FISPQ – Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos. **Polióis**. Disponível em: https://www.kaliumchemical.com.br/upload_arquivos/2023/10/2023100200002001697647636.pdf. Acesso em: 1 jun. 2025.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Polyurethane Market Size, Share, Growth Report | Trends [2032]**. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/polyurethane-pu-market-101801>. Acesso em: 29 maio 2025.

GARCIA, P. M.; ALMEIDA, R. M. **Aplicações industriais do poliuretano na construção civil: desempenho e eficiência**. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 8, n. 3, p. 66–74, 2021.

GARCIA, P. M.; MOURA, M. L.; ALMEIDA, R. M. **Desenvolvimento de poliuretanos a partir de fontes renováveis: panorama e perspectivas**. *Química Nova*, v. 44, n. 3, p. 234–242, 2021.

GARRIDO, I. J. A. et al. **Análise de riscos na produção de poliuretanos: estudo de caso em planta piloto**. *Revista Processos Químicos*, v. 14, n. 29, p. 73–84, 2020.

GUPTA, R. K.; KUMAR, R. **Thermal instability of methyl isocyanate: analysis of the Bhopal disaster**. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, [S.l.], v. 24, n. 2, p. 140–145, 2011.

INSTITUTION OF CHEMICAL ENGINEERS. **Bhopal incident summary – 03 Dec 1984**. Rugby: IChemE, 2010. Disponível em: <https://www.icheme.org/media/14094/bhopal-incident-summary-03-dec-84.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Indústria química no Brasil: evolução e perspectivas**. Brasília: IPEA, 2010.

KIRK-OTHMER. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 5. ed. New Jersey: Wiley, 2020. v. 19.

LIMA, F. G. et al. **Polímeros na área da saúde: poliuretanos para aplicações biomédicas**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 29, n. 2, p. e2019015, 2019.

MARHAVILAS, P. K. et al. The integration of HAZOP study with risk-matrix and the analytical-hierarchy process for identifying critical control-points and prioritizing risks in industry – A case study. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 62, p. 103981, nov. 2019.

MARHAVILAS, P. K.; KOULOURIOTIS, D.; GEMENI, V. Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 24, n. 5, p. 477–523, set. 2011.

MCINTOSH, R. D.; NOLAN, P. F. Review of the selection and design of mitigation systems for runaway chemical reactions. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 14, n. 1, p. 27–42, jan. 2001.

MORDOR INTELLIGENCE. **Bio-Based Polyurethane Market – Size, Analysis & Statistics**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/bio-based-polyurethane-market>. Acesso em: 29 maio 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. **Polyurethane Composites Market – Size, Share & Industry Analysis**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyurethane-composites-market>. Acesso em: 29 maio 2025.

MORDOR INTELLIGENCE. *Polyurethane Elastomers Market – Revenue, Share & Size*. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/polyurethane-elastomers-market> . Acesso em: 29 maio 2025.

MOREIRA, D. P.; LIMA, A. R. **Aplicações automotivas de poliuretano: desempenho e conforto**. *Revista Tecnologia e Inovação*, v. 5, n. 1, p. 15–23, 2018.

PENHA, Pamella Kunzendorff da. **Espumas de poliuretano à base de poliálcool de fonte renovável: estudo da biodegradação em meio enzimático e pela técnica de respirometria**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. **Norma Técnica P4.261: Risco de Acidente de Origem Tecnológica – Método para decisão e termos de referência**. 2. ed. São Paulo: CETESB, dez. 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4261-revisada.pdf>. Acesso em: 24 maio 2025.

SCOPUS. Resultados de busca por “process safety engineering” com filtro em artigos da área de Engenharia. Elsevier. Disponível em: <https://www.scopus.com/results/results.uri?st1=process+safety+engineering&st2=&s=TITLE-ABS-KEY%28process+safety%29&limit=10&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sot=b&sdt=cl&sessionSearchId=b6d20896281401d5c9a3ad92bbc6e5db&cluster=sco-subjabbr%2C%22ENGI%22%2Ct>. Acesso em: 29 maio 2025.

SILVA, A. P.; BARBOSA, F. R.; TEIXEIRA, M. A. **Propriedades térmicas e estruturais de espumas de poliuretano: análise por DSC e SEM**. *Revista Cerâmica*, v. 63, n. 366, p. 328–335, 2017.

SILVA, A. P.; SANTOS, E. R.; MARTINS, V. T. **Aplicações de espumas rígidas de PU no transporte refrigerado**. *Ciência e Engenharia*, v. 29, n. 2, p. 101–109, 2020.

SILVA, T. C. da et al. **Avaliação ambiental da produção de poliuretano: desafios e alternativas sustentáveis**. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 14, n. 35, p. 89–98, 2018.

TAVARES, M. C.; OLIVEIRA, R. A. **Segurança de processos químicos: riscos de reações exotérmicas não controladas**. *Revista Brasileira de Segurança de Processos*, v. 6, n. 2, p. 24–35, 2022.

YAHOO FINANCE. *Polyurethane Chemicals & Products in the Americas 2023–2027*. Disponível em: <https://finance.yahoo.com/news/polyurethane-chemicals-products-americas-2023-125300316.html> . Acesso em: 29 maio 2025.