



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



VITÓRIA MARQUES DE MOURA

**Avaliação de falha de válvula de segurança sobre a pressão de
alimentação de reator de produção de formiato de sódio**

Uberlândia, MG
2021

Vitória Marques de Moura

Avaliação de falha de válvula de segurança sobre a pressão de alimentação de reator de produção de formiato de sódio

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química.

Área de concentração: Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Rubens Gedraite

Uberlândia, MG

2021

Vitória Marques de Moura

Avaliação de falha de válvula de segurança sobre a pressão de alimentação de reator de produção de formiato de sódio

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro habilitação Engenharia Química apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Engenharia Química

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rubens Gedraite

Orientador

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Instituto Federal de São Paulo – Campus Guarulhos

Eng. Rafael Yuri

Mestrando do PPGEQ / FEQUI / UFU

Uberlândia, 25 de novembro de 2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por sempre me guiar, por colocar no meu caminho pessoas do bem e dispostas a ajudar.

Agradeço imensamente aos meus pais Giovana e Brás, que são a minha base, pelo incessável apoio, confiança, por sempre estarem ao meu lado, torcendo e vibrando em cada etapa da minha vida. Ao meu irmão Tiago, por estar nessa caminhada ao meu lado.

Agradeço a todos os meus amigos e companheiros dessa jornada, pelo apoio e parceria durante todo o curso, aos que acompanharam de perto e também aos que sempre me deram forças à distância. Em especial às minhas amigas Rafaela e Thaís que sempre me apoiaram e me deram forças e ao meu companheiro Pedro por estar ao meu lado nessa jornada.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Rubens Gedraite pela oportunidade, pelos ensinamentos, por ser um exemplo de profissional, sempre de portas abertas e disposto a ajudar.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia e a todos os docentes da Faculdade de Engenharia Química por prezarem sempre pela qualidade e profissionalismo, por todos os ensinamentos e oportunidades de crescimento pessoal e profissional durante a graduação.

RESUMO

A automação industrial se fundamenta na projeção e implantação de sistemas que controlam processos materiais e gerenciam as tomadas de decisões, de forma a otimizar processos e reduzir esforços humanos. Com o avanço de tecnologias, essa automação está se expandindo cada vez mais e, paralelamente, nota-se um crescimento significativo das metodologias de análises de risco nas indústrias. A preocupação em relação à segurança do trabalhador e segurança ambiental é um dos principais fatores que contribuem para o avanço dessas análises. Para o presente estudo foi desenvolvido um HAZOP do reator contínuo empregado na fabricação de Formiato de Sódio com foco na análise do transiente de pressão devido ao fechamento rápido da válvula de controle instalada na tubulação. A análise de risco desse cenário foi realizada com base na metodologia tipicamente utilizada em HAZOP. Os resultados obtidos nos cálculos realizados mostram que haveria um súbito aumento da pressão na linha de alimentação do reator, a montante da válvula de controle e que esse aumento não colocaria a tubulação em risco em decorrência do desvio citado.

Palavras-chave: análise de risco; reator químico; válvula de controle; formiato de sódio.

ABSTRACT

The industrial automation is based on the design and implementation of systems that control material processes and manage decision-making, in order to optimize processes and reduce human efforts. With the advancement of technologies, this automation is expanding more and more and, in parallel, there is a significant growth of risk analysis methodologies in the industries. Concern for worker safety and environmental safety is one of the main factors that contribute to the advancement of these analyses. For the present study, a HAZOP of the continuous reactor used in the manufacture of Sodium Formate was developed, focusing on the analysis of the pressure transient due to the rapid closing of the control valve installed in the pipeline. The risk analysis of this scenario was performed based on the methodology typically used in HAZOP. The results obtained in the calculations performed show that there would be a sudden increase in pressure in the reactor supply line, upstream of the control valve, and that this increase would not put the piping at risk due to the aforementioned deviation.

Key words: risk analysis; chemical reactor; control valve; sodium formate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mercado Global de Formiato de Sódio.....	16
Figura 2.2 - Diagrama de blocos do balanço material do processo de produção de Formiato de Sódio	18
Figura 4.1 - Representação esquemática simplificada do reator típico.....	23
Figura 4.2 – Layout de parte do processo de produção de HCOONa.....	32

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 2.1 - Produção e consumo de HCOONa	16
Quadro 2.2 - Descrições das correntes da Figura 2.1.....	19
Tabela 2.1 - Dados de Processo do projeto	19
Quadro 4.1 - HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa.....	25-28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIQUM: Associação Brasileira da Indústria Química;

FEQUI: Faculdade de Engenharia Química;

HAZOP: Hazard and Operability Studies;

NUCOP: Núcleo de Modelagem, Controle e Otimização de Processos;

TC: Temperature Controller (controlador de temperatura);

UFU: Universidade Federal de Uberlândia.

LISTA DE SÍMBOLOS

NaOH: Hidróxido de Sódio [-];

NaCl: Cloreto de Sódio [-];

HCOONa: Formiato de Sódio [-];

HCOOH: Ácido Fórmico [-];

CO: Monóxido de carbono [-];

H₂O: Água [-];

ΔH : Variação da Entalpia [kcal];

S: Vazão de vapor de água saturada [kg h⁻¹];

λ : Calor latente do vapor [kJ kg⁻¹];

q: Taxa de calor [kJ h⁻¹];

Q: Calor [kJ];

Δt : Variação do tempo [h];

\tilde{n} : Vazão molar [kmol h⁻¹];

w_{cW} : Vazão da água de resfriamento [kg h⁻¹];

cp: Calor específico da água [kJ kg⁻¹ °C⁻¹];

T: Temperatura [°C];

M: Massa [kg];

ρ : Densidade média global da solução de NaOH a 50% [kg m^{-3}];

\hat{V} : Volume específico [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$];

T_s : Temperatura de saída [$^{\circ}\text{C}$];

T_e : Temperatura de equilíbrio [K];

w_1 : Vazão de alimentação de NaOH [kg s^{-1}];

w_2 : Vazão de alimentação de CO [kg s^{-1}];

w_3 : Vazão de saída do CO [kg s^{-1}];

w_4 : Vazão de saída da fase líquida do reator (HCOONa e NaOH) [kg s^{-1}];

w_4' : Vazão de saída da fase líquida do reator com vazamento no estado estacionário (HCOONa e NaOH) [kg s^{-1}];

w_5 : Vazão de líquido reacional que vaza pela ruptura [kg s^{-1}];

w_5^{ss} : Vazão de líquido reacional que vaza pela ruptura no estado estacionário [kg s^{-1}];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DA LITERATURA	15
3	METODOLOGIA.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
	ANEXO A	37
	ANEXO B	38

1 INTRODUÇÃO

A crescente automação de sistemas para controle de ambientes industriais vem provocando uma maior preocupação com a segurança e qualidade do processo. Essa automação reflete também na transformação dos métodos de ensino empregados nos cursos de Engenharia. Nos dias de hoje, a didática teórica com lousa e giz vem dando lugar ao ensino prático, associado à coleta eletrônica e processamento de informações de maneira rápida e automática. Essa mudança de método permite o primeiro contato dos discentes com análises relacionadas às condições de operação de equipamentos e projetos e seus riscos associados. Portanto, este trabalho de conclusão de curso contribui com algumas disciplinas obrigatórias no curso de Engenharia Química, proporcionando uma visão aplicada do embasamento teórico e colaborando para um melhor aprendizado.

As indústrias estão cada vez mais demandando operações seguras nas suas instalações pois o funcionamento correto de uma válvula de segurança é essencial para garantir a segurança do processo, evitando perdas de vidas e de recursos financeiros em decorrência de acidentes evitáveis.

O objeto de estudo deste trabalho é a produção de Formiato de Sódio em um reator contínuo. Durante o processo empregam-se estratégias de controle como rampas de temperatura (para promover mudanças gradativas de valores) e controle de massa reacional (por se tratar de um reator contínuo), porém mesmo com essas medidas podem ocorrer oscilações no controle durante a transição entre etapas. As variações que desviam do previsto podem ser prejudiciais ao processo, afetando diretamente na qualidade do produto, vida útil dos equipamentos e consumo de energia, além de trazer potenciais riscos à segurança em relação ao meio ambiente e à saúde dos operadores.

No presente trabalho de conclusão de curso (TCC) foi realizado um HAZOP (Hazard and Operability Study), que consiste em um procedimento baseado em uma

metodologia para identificação, avaliação e mitigação de potenciais riscos em um determinado processo industrial, que possam resultar em danos ambientais ou socioeconômicos (**ROSSING et al., 2010**).

O presente trabalho visa avaliar e identificar os potenciais riscos apresentados à segurança do processo decorrente de falha na condição fechada da válvula de controle de vazão de solução de hidróxido de sódio alimentado ao reator contínuo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de fabricação do Formiato de Sódio (HCOONa) foi escolhido como tema de estudo deste trabalho devido a sua importância no mercado brasileiro como um produto químico que é empregado nos mais diversificados setores da indústria (**SOUSA, 2019**).

2.1 Aplicações e Mercado do HCOONa

Dentre as principais aplicações do HCOONa , encontramos a indústria de couro, no processo de curtimento ao cromo, proporcionando maiores velocidades e uniformidade ao processo, melhorando as propriedades do produto final (**COPENOR, 2021**). O uso extensivo de formiato de sódio em diferentes indústrias de usuários finais levou ao crescimento do mercado global de formiato de sódio. Vários órgãos reguladores, como a Food and Drug Administration (FDA), confirmaram que o formiato de sódio é seguro para uso como aditivo alimentar no setor de nutrição animal após a proibição de diferentes antibióticos promotores de crescimento. O formiato de sódio também tem uma ampla gama de aplicações nas indústrias de impressão e têxtil. A neutralização alcalina eficaz e o controle de PH do formiato de sódio, juntamente com a natureza ecológica, o tornam popular no mercado de impressão digital (**ALLIED, 2011**).

A importância do HCOONa para a indústria química é vinculada à produção de Hidrossulfito de Sódio e de Ácido Fórmico (HCOOH). A produção de HCOOH é responsável pela maior demanda interna do HCOONa , por ser um produto que possui boa flexibilidade de demanda no mercado interno, devido às suas diversas aplicações. O ácido fórmico é um importante produto químico comercial, que assim como o HCOONa é amplamente utilizado como agente conservante na alimentação animal, agente de curtimento na indústria do couro e como importante intermediário na síntese química (**ZHAO; JOÓ, 2011**).

O Ácido Fórmico é o primeiro membro de uma série de homólogos dos ácidos carboxílicos derivados de cadeias de alcanos e pode ser encontrado na secreção de

diversos insetos, particularmente das formigas. O HCOOH ganhou importância industrial em meados de 1960, quando se tornou um disponível como subproduto do processo de fabricação do Ácido Acético pela oxidação – em fase líquida – de hidrocarbonetos. Desde então, processos que utilizam, o HCOOH tem sido desenvolvidos e a capacidade produtiva mundial tem atingido valores tão elevados como 330.000 toneladas anuais (**SOUSA, 2019**).

A produção e o consumo de HCOONa entre 2014 e 2016 são apresentados no **Quadro 2.1**. e na **Figura 2.1** é mostrada a perspectiva para o mercado global de Formiato de Sódio entre 2020 e 2027.

Quadro 2.1: Produção e consumo de HCOONa

	2014	2015	2016
	(toneladas/ano)		
Prod. Brasil	18.000	12.420	16.930
Importação	14.370	11.340	26.300
Exportação	-	-	1
Consumo Aparente	32.370	23.760	40.560

Fonte: ABIQUIM (adaptada) - O Desempenho da Indústria Química Brasileira (2020)

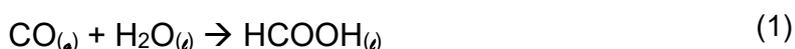


Figura 2.1: Mercado Global de Formiato de Sódio

Fonte: DMCA, 2020

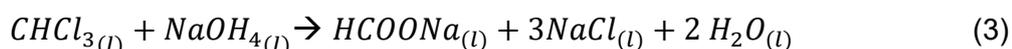
2.2 Rotas de Produção

Dentre as possíveis rotas de produção para a obtenção do HCOONa, temos a neutralização do ácido fórmico com NaOH, que se inicia com a reação do Monóxido de Carbono (CO) com a água (H₂O), produzindo o ácido fórmico. O HCOOH formado reage com uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH), produzindo o Formiato de Sódio. Conforme representação abaixo:



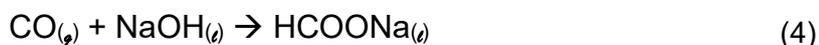
No entanto, a reação (1) apresenta um equilíbrio altamente desfavorável sob o ponto de vista do balanço energético, pois $\Delta H_{298K} = -7$ kcal.

Em laboratório, o formiato de sódio pode ser obtido pela reação do clorofórmio com a solução alcoólica de hidróxido de sódio, conforme a representação a seguir:



O formiato de sódio também é inevitavelmente formado como um subproduto na etapa final da síntese do pentaeritritol e na reação cruzada de Cannizzaro de formaldeído com o produto da reação de aldol trimetilol acetaldeído [3-hidroxi-2,2-bis(hidroximetil) propanal] (**STRING, 2021**).

Uma alternativa é a reação do CO diretamente com a solução de NaOH. Esta reação ocorre com contração de volume sendo, portanto, favorecida pelo aumento da pressão parcial do CO. Este é o principal inconveniente deste processo (**SANTOS, 2019**). A reação química considerada é apresentada a seguir.



Neste trabalho, adotou-se a rota produtiva representada pela reação (4), devido a seu grande uso para produção comercial do Formiato de sódio. O diagrama de blocos apresentado na **Figura 2.2** representa o balanço global de massa para as principais etapas do processo de fabricação do Formiato de Sódio.

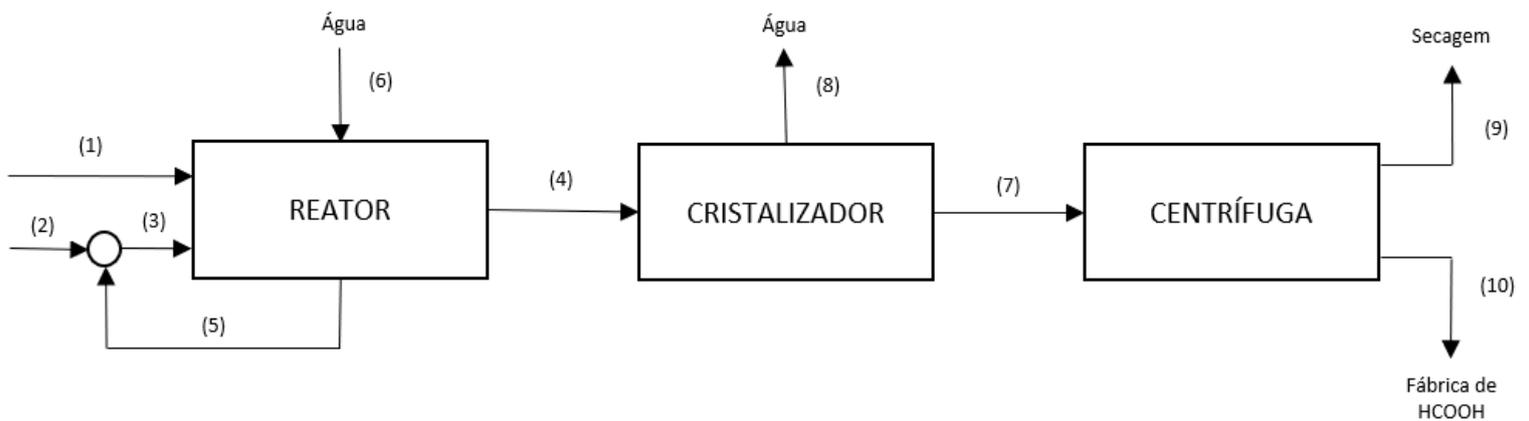


Figura 2.2: Diagrama de blocos do processo de produção de Formiato de Sódio

No **Quadro 2.2** e na **Tabela 2.1** são apresentados respectivamente as correntes de processo e os valores destas considerando o diagrama de blocos da **Figura 2.2** (SOUSA, 2018).

Quadro 2.2: Descrições das correntes da **Figura 2.2**

Corrente	Descrição
(1)	Solução de NaOH a 50% alimentada
(2)	CO fresco alimentado
(3)	CO total alimentado
(4)	Sol. aquosa contendo o HCOONa produzido
(5)	CO reciclado
(6)	H ₂ O alimentada
(7)	Sol. aquosa de HCOONa e H ₂ O
(8)	Água retirada do cristalizador
(9)	HCOONa produzido na forma de cristais
(10)	Solução aquosa residual contendo HCOONa

Tabela 2.1: Dados de Processo do projeto

Corrente	Descrição	Valor (kg/h)
(1)	Solução de NaOH a 50% alimentada	20.009,00
(2)	Monóxido de carbono fresco alimentado	2.100,95
(3)	Monóxido de carbono alimentado	7.003,15
(4)	Formiato de sódio produzido em solução	15.890,00
(5)	Monóxido de carbono reciclado	4.902,21
(6)	Água alimentada	4.982,68
(7)	Formiato de sódio produzido em cristais	3.000,00

A rota representada pela reação (4), utiliza como reagentes duas substâncias químicas que devem ser manuseadas com cautela. A solução de Hidróxido de Sódio, é produto que apresenta riscos tanto à saúde das pessoas, quanto ao meio ambiente.

É uma base forte com alto poder corrosivo, podendo causar graves queimaduras em contato com a pele. O segundo reagente é o monóxido de carbono, um gás incolor, inodoro e tóxico não irritante que é facilmente absorvido pelos pulmões. A quantidade absorvida varia de acordo com a duração da exposição e as concentrações relativas entre CO e oxigênio no ar (**ERNST; ZIBRAK, 1998**).

2.3 Análise de Risco

A análise de risco é comumente conhecida pela abreviatura em inglês HAZOP, que significa Hazard and Operability Study (Estudo de Risco e Operabilidade). Na década de 1970 foram iniciados estudos de operabilidade, baseados na hipótese de que um problema existe apenas quando há um desvio do que é normalmente esperado (**ROSSING et al., 2010**).

O HAZOP é o procedimento que gera perguntas de maneira estruturada e sistemática através do uso apropriado de um conjunto de palavras-guias aplicadas a pontos críticos do sistema em estudo (**SILVA, 2019**).

Essa análise proporciona uma metodologia sistemática, que possibilita a identificação, avaliação minuciosa e mitigação de possíveis riscos de cada parcela do processo, sobretudo de alguns pontos específicos (os chamados nós) que podem causar graves perdas humanas, ambientais e econômicas. Diferentes métodos são praticados em vários estágios durante o ciclo de vida da planta (**SWANN; PRESTON, 1995**).

Dessa forma, a saída esperada de um HAZOP é a descoberta de todos os possíveis desvios das condições normais de operação, identificando as causas responsáveis por tais desvios e as respectivas consequências. Em seguida, deve-se propor medidas para eliminar ou controlar o perigo ou para sanar o problema de operabilidade da instalação (**CROWL; LOUVAR, 2015**).

O HAZOP considera dois principais problemas como foco de estudo. Sendo assim, deve-se mapear tanto problemas de segurança, buscando identificar os

perigos que possam colocar em risco os operadores e aos equipamentos da instalação, quanto os problemas de operabilidade que embora não sejam perigosos, podem causar perda de produção ou que possam afetar a qualidade do produto ou a eficiência do processo.

3 METODOLOGIA

Com base nas informações disponibilizadas por **Sousa (2018)**, em seu relatório de estágio supervisionado no NUCOP/FEQUI/UFU, realizou-se o HAZOP do reator empregado no processo, conforme é apresentado em **Gedraite (2019)**. Com o objetivo de identificar os principais pontos de análise, visando mitigar os riscos existentes no equipamento em questão. Os resultados do HAZOP estão apresentados na Seção 4 deste TCC.

Foi desenvolvido o balanço de energia mecânica simplificado para avaliar o impacto do fechamento abrupto da válvula de controle de vazão instalada na tubulação usada para o transporte da solução de NaOH, baseado no balanço material apresentado anteriormente, na seção 2. As informações complementares necessárias para o desenvolvimento do balanço de energia mecânica estão apresentadas no **Anexo A**.

Com base nas informações citadas nos parágrafos anteriores, um modelo matemático simplificado do processo em estudo foi desenvolvido, considerando a relação entre a pressão na tubulação e a vazão de alimentação.

O modelo matemático simplificado para o estado estacionário (**GARCIA, 2005**) desenvolvido assim como os resultados obtidos estão apresentados na Seção 4 deste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de HAZOP parcial do reator

Na **Figura 4.1** é apresentada a representação esquemática simplificada de um dos estágios de reação, com malha de controle do tipo faixa dividida. Além disso, contempla as variáveis de processo diretamente envolvidas na análise: a vazão de água de resfriamento, de vapor de água saturado utilizados na partida do equipamento, e a alimentação de solução de NaOH e monóxido de carbono.

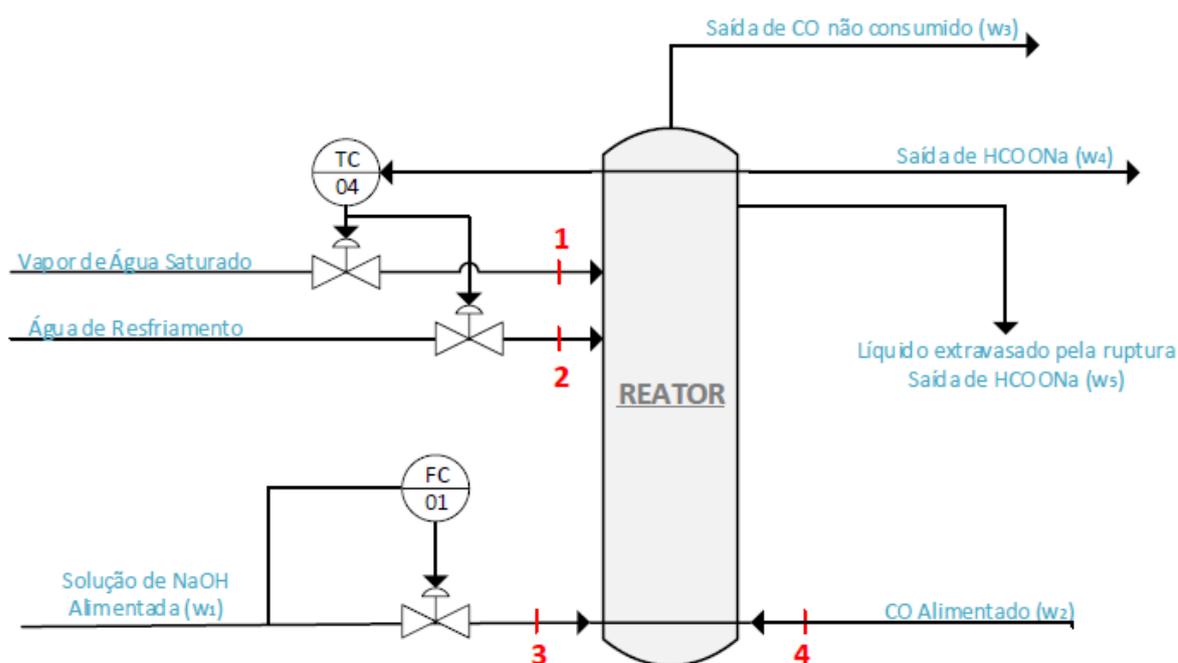


Figura 4.1: Representação esquemática simplificada do reator

Durante as etapas de partida e parada do reator, o controlador de temperatura, identificado pelo *tag* TC-04, tem um papel fundamental para o funcionamento.

Os nós de interesse para este trabalho são os nós (1), (2), (3) e (4) localizados na tubulação de alimentação de vapor de água saturado, na tubulação de água de resfriamento, na tubulação de alimentação da solução de NaOH e na tubulação de alimentação de CO, respectivamente.

No **Quadro 4.1** é apresentado o HAZOP do reator, objeto de estudo deste trabalho, levando em consideração as possíveis falhas do processo e as respectivas ações mitigatórias para as variáveis consideradas.

4.2 Cálculo da pressão na linha de alimentação do reator devido ao fechamento brusco da válvula de controle de vazão.

O cálculo da pressão foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de energia mecânica simplificado apresentado no **Anexo B**.

Quadro 4.1: HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Vitória Marques Moura	Data: 10/10/2021
Parâmetro: Vazão de vapor de água saturado			Nó: 1	Página: 01
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha no suprimento de vapor de água; 2. Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não alimentar a camisa do reator na etapa de aquecimento Inicial; 2. Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar chave de fluxo na linha de vapor; 2. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa.
Menos	Menos vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Problema no funcionamento da válvula de controle; 2. Problema no suprimento de vapor. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar o tempo de partida do reator; 2. Não atingir a temperatura requerida de reação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura baixa.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha completamente aberta na válvula. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aquecer o reator mais rapidamente do que o previsto no projeto; 2. Temperatura excessiva no reator. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura alta.

Quadro 4.1 (cont.): HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Vitória Marques Moura	Data: 10/10/2021
Parâmetro: Vazão de água de resfriamento			Nó: 2	Página: 02
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha no suprimento de água de resfriamento; 2. Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não alimentar a camisa do reator na etapa de resfriamento; 2. Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar chave de fluxo na linha de água de resfriamento; 2. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa.
Menos	Menos vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Problema no funcionamento da válvula de controle; 2. Problema no suprimento de água de resfriamento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumentar o tempo de partida do reator; 2. Não atingir a temperatura requerida de reação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; 2. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura alta.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha completamente aberta na válvula. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Resfriar o reator mais rapidamente do que o previsto no projeto; 2. Temperatura muito baixa no reator. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 2. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura baixa.

Quadro 4.1 (cont.): HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Vitória Marques Moura	Data: 10/10/2021
Parâmetro: Vazão de solução de NaOH			Nó: 3	Página: 03
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> Falha no suprimento de solução de NaOH; Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> Não alimentar o reator; Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar chave de fluxo na linha de solução de NaOH; Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa.
Menos	Menos vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> Problema no funcionamento da válvula de controle; Problema no suprimento de solução de NaOH. 	<ol style="list-style-type: none"> Produto fora de especificação na saída do reator; Não atingir a temperatura requerida de reação. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura baixa.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> Falha completamente aberta na válvula. 	<ol style="list-style-type: none"> Produto fora de especificação na saída do reator; Temperatura alta no reator. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura alta.

Quadro 4.1 (cont.): HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Vitoria Marques Moura	Data: 10/10/2021
Parâmetro: Vazão de monóxido de carbono			Nó: 4	Página: 04
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha no suprimento monóxido de carbono; 2. Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Não alimentar o reator; 2. Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar chave de fluxo na linha de monóxido de carbono; 2. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa.
Menos	Menos vazão no nó.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Problema no funcionamento da válvula de controle; 2. Problema no suprimento de monóxido de carbono. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Produto fora de especificação na saída do reator; 2. Não atingir a temperatura requerida de reação. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; 2. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura baixa.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> 1. Falha completamente aberta na válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Produto fora de especificação na saída do reator; 2. Temperatura alta no reator. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 2. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura alta.

4.3 Considerações sobre o cenário de falha estudado

Foi estudado o cenário de falha associado ao bloqueio da vazão de alimentação, considerando o fechamento brusco da válvula de controle de vazão, postulada no parágrafo a seguir.

Os diâmetros das tubulações foram calculados por **SOUSA (2019)**, que definiu o diâmetro comercialmente adequado, a classe de pressão à qual devem suportar e o material de construção delas.

Para realizar a especificação das tubulações, foi utilizado catálogo técnico disponibilizado na literatura, contendo as informações referentes às: *(i)*- principais normas técnicas aplicáveis; *(ii)*- composição química e as propriedades mecânicas dos tubos mais utilizados; *(iii)*- valores mínimos de limite de escoamento do material de construção dos tubos à temperaturas elevadas; *(iv)*- valores máximos de tensão/pressão permitidos a temperaturas elevadas; *(v)*- especificações das temperaturas de serviço recomendadas, além de outras informações complementares para permitir a especificação segura dos tubos (**MERCANTE, 2021**).

O primeiro aspecto avaliado diz respeito à pressão de trabalho das tubulações consideradas neste projeto. As tubulações estarão sujeitas a condições de pressão diferentes em uma mesma aplicação. Como exemplo, pode-se citar a tubulação empregada para o transporte da solução de hidróxido de sódio a 50%. No trecho compreendido entre o tanque intermediário de armazenamento e o bocal de sucção da bomba, a pressão será baixa, aproximadamente igual à pressão atmosférica local. Do bocal de descarga da bomba até a entrada do reator, a pressão será bem mais elevada, da ordem de 12 *atm*.

A partir do conhecimento dos valores de cada pressão de trabalho, do diâmetro externo do tubo e da tensão de escoamento do seu material de construção pode-se determinar qual deve ser a espessura da parede do tubo empregado no transporte do produto químico considerado. Importante destacar que informações técnicas adicionais são tradicionalmente empregadas no cálculo da espessura da parede do tubo (**RIBEIRO, s.d.**).

O cálculo da espessura da parede de um tubo com base na norma ANSI B31.3 é apresentado na **Equação (4.1)** (SILVA TELLES, 2001).

$$e_{min} = \frac{P \cdot D}{2 \cdot (S \cdot E + y \cdot P)} + C \quad (4.1)$$

na qual:

e_{min} = espessura mínima da parede do tubo;

P = pressão máxima interna aplicada ao tubo ou pressão de projeto;

D = diâmetro externo do tubo;

S = tensão admissível no material (determinada de acordo com a temperatura máxima de trabalho da tubulação ou com base na sua temperatura de projeto);

E = eficiência da junta longitudinal do tubo (costura);

y = fator de *creep* = 0,4 (até 480 °C);

C = sobre-espessura de corrosão

As condições de pressão e temperatura de trabalho das tubulações consideradas neste TCC estão apresentadas na **Tabela 4.1**. Os valores citados na referida tabela foram obtidos por meio de cálculos realizados no anteprojeto da instalação industrial (SOUSA, 2019).

Tabela 4.1: Pressões e temperaturas de trabalho das tubulações de processo

Corrente	Descrição	Pressão (atm)	Temperatura (°C)
(1)	Solução de NaOH a 50%, antes da bomba	1	25
	Solução de NaOH a 50%, depois da bomba	17	25
(2)	CO fresco alimentado, antes do compressor	1	25
(3)	CO total alimentado, depois do compressor	12	25
(4)	Solução de HCOONa, depois do reator	12	180
(5)	CO reciclado, depois do reator	10	180
(6)	H ₂ O <i>make-up</i> alimentada	12	25
(7)	Solução de HCOONa, depois do cristalizador	1	25

As espessuras mínimas das paredes dos tubos considerados neste relatório de estágio foram calculadas com base na **Equação (4.1)** e estão apresentadas na **Tabela 4.2**, conjuntamente com o índice schedule correspondente. Todas as informações

técnicas requeridas para o cálculo da espessura mínima também estão apresentadas na referida tabela.

O material de construção selecionado para os tubos empregados neste projeto foi o aço carbono, devido ao fato de os fluidos transportados não serem corrosivos e o custo deste material ser o mais acessível no mercado (**RIBEIRO, s.d.**).

Tabela 4.2: Espessuras mínimas das tubulações de processo

Corrente	Descrição	Espessura mínima (mm)
(1)	Solução de NaOH a 50%, antes da bomba	1,6
	Solução de NaOH a 50%, depois da bomba	2,3
(2)	CO fresco alimentado, antes do compressor	1,5
(3)	CO total alimentado, depois do compressor	6,8
(4)	Solução de HCOONa, depois do reator	2,7
(5)	CO reciclado, depois do reator	4,6
(6)	H ₂ O make-up alimentada	2,0
(7)	Solução de HCOONa, depois do cristalizador	1,6

4.4 Cálculo da variação da pressão na tubulação

Com base na especificação da tubulação do processo em estudo e considerando o *layout* da instalação, foi feito o cálculo da variação da pressão na tubulação visando definir o impacto causado pelo desvio postulado. O *layout* da instalação é apresentado na **Figura 4.2**, no qual pode ser visualizada a representação isométrica simplificada do processo.

A força aplicada sobre a válvula foi calculada com base no equacionamento apresentado no **Anexo B** e é igual a **7,8 N**. Com base nesse valor de força aplicada sobre a entrada da válvula, o fechamento inesperado da válvula provoca uma elevação do valor da pressão de amplitude aproximadamente igual a **2.500 N/m²**, podendo representar um risco aos trabalhadores e ao meio ambiente. Dentre as consequências de um eventual vazamento são apresentadas na sequência aquelas consideradas as mais representativas.

- A Soda Cáustica é um produto que deve ser tratado com extrema cautela devido ao seu elevado poder corrosivo sobre os tecidos da pele, olhos e mucosas, causando queimaduras graves no local de contato, que varia com o grau de exposição (**Japan Soda Industry Association, 2006**).
- Além disso, o NaOH pode contaminar cursos d'água, solo, fauna e flora. Ao entrar em contato com o ambiente, pode degradá-lo, por causar elevação do pH, descaracterizar águas e solos, trazendo prejuízos à fauna local (**CARBOCLORO, 2011; SILVA, 2012**).

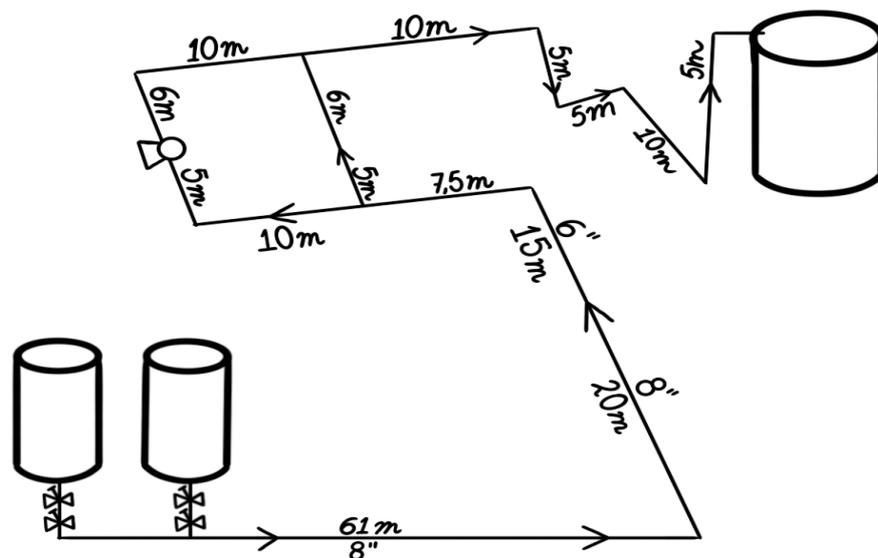


Figura 4.2: Layout simplificado de parte do processo de produção de HCOONa
 Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÃO

Estudos realizados neste trabalho, permitiram a avaliação de cenários característicos de situações encontradas em Indústrias Químicas. A Análise de Risco do reator contínuo empregado na produção de Formiato de Sódio foi realizada com sucesso, levantando medidas para mitigação dos possíveis riscos dessas instalações industriais.

O foco do trabalho foi na análise do valor da elevação da pressão da solução de hidróxido de sódio alimentado ao reator considerando o desvio provocado pelo fechamento brusco da válvula de controle de vazão. A análise realizada mostrou que o aumento de pressão não foi significativo, apesar de ter potencial para provocar vazamento e causar impacto ao meio ambiente e aos trabalhadores que estivessem nas proximidades.

O HAZOP foi desenvolvido com base em metodologia proposta na literatura e permitiu sugerir a instalação de instrumentos de segurança que atuarão no sentido de minimizar ou mesmo eliminar os riscos identificados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIED. **Mercado de formato de sódio: Análise de oportunidade global e previsão da indústria, 2020–2027.** Disponível em < <https://www.alliedmarketresearch.com/sodium-formate-market-A10474> > Acesso em 25/11/2021 13:45

ABIQUIM. **O desempenho da indústria química brasileira – 2020.** Disponível em: < <https://abiquim.org.br/industriaQuimica> > Acesso em 24/11/2021 12:20.

CARBOCLORO. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) – Soda Cáustica Líquida.** 2011

COPENOR. **Formiato de Sódio – Informações Técnicas.** Companhia Petroquímica do Nordeste. Disponível em: < <http://www3.copenor.com.br/site/index.php/formiatodesodioinformacoestecnicas/> > Acesso em 24/11/2021 12:20.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Segurança de Processos Químicos - Fundamentos e Aplicações.** 3ª ed., LTC. 2015.

DELMEE, G. J. **Manual de Medição de Vazão.** 3ª Ed., São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

ERNST, A.; ZIBRAK, J. D. **Carbon Monoxide Poisoning.** *The New England Journal of Medicine.* Volume 339. 1998. 1603-1608.

Fact.MR, **Sodium Formate Market Forecast, Trend Analysis & Competition Tracking: Global Market Insights 2019 to 2029,** 2019. Disponível em: <<https://www.factmr.com/report/3735/sodium-formate-market> > Acesso em 28/11/2021 11:50.

- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. São Paulo, SP: EDUSP, 2005, 678p.
- GEDRAITE, R. **Notas de aula da disciplina Segurança e Análise de Risco em Processos Industriais**. Uberlândia/MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2019. Comunicação pessoal.
- Japan Soda Industry Association. **Safe Handling of Caustic Soda (Sodium Hydroxide)**. Tokyo, 2006. 26 p.
- MELO Jr., P.A.; PINTO, J.C.C.S. **Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não Linear de Processos Químicos**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE - UFRJ, 2008.
- ROSSING, N.L.; LIND, M.; NIELS, J.; JØRGESEN, S.B. **A Functional HAZOP Methodology**. *Computers and Chemical Engineering* 34, 2010, 244-253.
- SANTOS, D.M. **Especialistas comentam sobre os riscos e segurança dos gases industriais**. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/assuntos/noticias/noticias/2019/10/especialistas-comentam-sobre-o-seminario-sobre-glp-gnv-monoxido-de-carbono-e-gases-naturais>>. Acesso em: 28/11/2021.
- SILVA, A.B. **Análise de Risco do Processo de produção de resina para tinta automotiva**. Uberlândia/MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.
- SILVA, I.M.C.B. **Métodos de preparação industrial de solventes e reagentes químicos: Hidróxido Sódio**. *Revista Virtual de Química*, v. 4, n. 1, 2012.
- SOUSA, D.G. **Projeto do processo de produção de Formiato de Sódio**. Uberlândia/MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2018. Relatório de Estágio Supervisionado.

SOUSA, V.L. **Anteprojeto de planta de produção de Formiato de Sódio.** Uberlândia/MG: Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Química, 2019. Relatório de Iniciação Científica.

STRING. **Formato de sódio.** Disponível em: <
https://stringfixer.com/pt/Sodium_formate> Acesso em: 29/11/2021 16:40.

SWANN, C.D.; PRESTON, M.L. **Twenty-five years of HAZOPs.** *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1995, 8(6), 349–353.

ZHAO, G.; JOÓ, F. **Free formic acid by hydrogenation of carbon dioxide in sodium formate solutions.** *Catalysis Communications* 14, 2011, 74-76.

ANEXO A

DADOS & INFORMAÇÕES ÚTEIS:

- Diâmetro nominal da tubulação de alimentação do reator = 2,5 polegadas
- Diâmetro interno do reator = 2,5 m
- Altura interna total do reator = 7,0 m
- Altura interna útil do reator = 6,0 m
- Altura da ruptura no casco do reator = 5,5 m
- Densidade média global da solução de NaOH a 50% = 1.530 kg/m³
- Calor específico médio global da solução de NaOH a 50% = 0,575 kcal/kg · °C
- Calor específico médio global da água de resfriamento = 1,0 kcal/kg · °C
- Temperatura inicial do reator = temperatura ambiente = 25°C
- Temperatura típica de operação do reator = 180°C
- Temperatura de alimentação dos reagentes = 25°C
- Temperatura de retirada do produto formado = 180°C
- Calor de reação liberado no reator = $-102.000 \frac{J}{mol \text{ de HCOONa formado}}$
- Tempo de aquecimento requerido na etapa inicial = 2 horas
- Temperatura de entrada da água de resfriamento na camisa do reator = 25°C
- Temperatura de saída da água de resfriamento na camisa do reator = 45°C
- Reação: $NaOH_{(sol)} + CO_{(g)} \rightarrow HCOONa_{(sol)}$
- Vazão mássica de NaOH alimentado ao reator = 14.000 kg/h
- Vazão mássica de CO alimentado ao reator = 8.000 kg/h
- Vazão mássica de HCOONa produzida no reator = 23.800 kg/h

ANEXO B

CÁLCULO DA PRESSÃO NA LINHA DE ALIMENTAÇÃO DO REATOR DEVIDO AO FECHAMENTO BRUSCO DA VÁLVULA DE CONTROLE DE VAZÃO

Aplicando um balanço global de energia mecânica à tubulação usada para a alimentação da solução de hidróxido de sódio no reator, pode-se escrever a **Equação (B.1)**.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_B = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \sum h_{perdas} \quad (\text{B.1})$$

Foi adotada como hipótese simplificadora, que $\sum h_{perdas} \cong 0$. Adicionalmente foram adotados como referenciais para aplicação da **Equação (B.1)**, o **ponto (1)** na superfície livre do líquido contido no interior do tanque pulmão e o **ponto (2)** na tubulação, imediatamente antes da entrada da válvula de controle.

Importante destacar as simplificações decorrentes dos referenciais adotados no parágrafo anterior:

1. z_1 = nível de solução de NaOH no interior do tanque pulmão (m).
2. p_1 = pressão relativa na superfície livre da solução de NaOH no interior do tanque pulmão = 0 (tanque atmosférico).
3. v_1 = velocidade do fluido na superfície livre da solução de NaOH no interior do tanque pulmão = 0 (nível mantido constante devido ao uso de malha de controle de nível).
4. z_2 = cota da tubulação de descarga da bomba montada no nível do solo $\cong 0$

Portanto, a **Equação (B.1)** pode ser reescrita como apresentado na **Equação (B.2)**.

$$z_1 + H_B = \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (\text{B.2})$$

Na ocorrência do desvio de **fechamento brusco da válvula de controle de vazão** instalada na tubulação de descarga da bomba (em termos do HAZOP, seria um desvio de nenhuma vazão), pode-se escrever que será aplicada uma força na entrada da válvula, como apresentado na **Equação (B.3)**.

$$Força = w_{NaOH} \cdot \Delta v \quad (B.3)$$

A variação de velocidade que o fluido em escoamento sofre pode ser calculada pela **Equação (B.4)**, assumindo que o escoamento do fluido cessará quando ocorrer o desvio, ou seja, $v_{2,depois\ do\ desvio} = 0$. A velocidade de escoamento do fluido antes do desvio foi calculada por **Sousa (2019)** e vale $v_{2,antes\ do\ desvio} = 2,0\ m/s$.

$$\Delta v = v_{2,antes\ do\ desvio} - v_{2,depois\ do\ desvio} \quad (B.4)$$

Portanto, a pressão aplicada na entrada da válvula pode ser calculada com base na **Equação (B.5)**.

$$p_{entrada\ válvula} = \frac{Força}{A_{seção\ transv.\ tubulação}} \quad (B.4)$$