

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química

Isabela Rodrigues Andrade

Análise de risco de reator empregado na fabricação de Formiato de Sódio: vazamento de gás reacional

Uberlândia, MG
2021

Isabela Rodrigues Andrade

Análise de risco de reator empregado na fabricação de Formiato de Sódio:
vazamento de gás reacional

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
2021

Isabela Rodrigues Andrade

Análise de risco de reator empregado na fabricação de Formiato de Sódio:
vazamento de gás reacional

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. Vinícius Pimenta Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química / UFU

Uberlândia, 09 de abril de 2021

2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, que é o meu maior e melhor orientador na vida.
Esse sonho é nosso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por desenhar cada parte do meu caminho da melhor forma para chegar até aqui.

Aos meus pais pelo apoio e suporte em todos os momentos, por não desistirem de mim.

Aos meus irmãos que sempre acreditaram em mim.

Ao Prof. Rubens Gedraite, que guiou desde minha entrada na UFU com muito apoio e sabedoria.

RESUMO

Neste trabalho foi elaborado o HAZOP do reator contínuo empregado na produção de Formiato de Sódio, considerando um cenário tipicamente encontrado em instalações industriais químicas. O foco do trabalho foi na análise do vazamento do gás reacional considerando a ruptura do casco do reator. A análise do risco foi realizada com base na metodologia tradicionalmente utilizada em HAZOP. Os resultados obtidos nos cálculos realizados indicam que haveria a tendência à vaporização do conteúdo do reator em decorrência dos desvios citados.

Palavras-chave: análise de risco, reator químico, Formiato de Sódio.

ABSTRACT

In this work the HAZOP of the continuous reactor used in the production of Sodium Formate was elaborated, considering a scenario typically found in chemical industrial installations. The focus of the work was on the analysis of leak of rational gas considering the rupture of reactor's shell. The risks analysis was developed based on a methodology traditionally used in HAZOP. The results obtained in the calculations performed indicate that there would be a tendency to vaporize the reactor contents due to the mentioned deviations.

Key words: risk analysis, chemical reactor, sodium formate.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** - Diagrama de blocos do balanço material do processo de produção de Formiato de Sódio **19**
- Figura 4.1** - Representação esquemática simplificada do reator típico..... **23**
- Figura 4.2** - Comportamento temporal da pressão do reator..... **30**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção e consumo de HCOONa	17
Tabela 2.2 – Dados de Processo do projeto	20

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1.A - D – HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa... **25**

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HAZOP	Hazard and Operability Studies
ABIQUM	Associação Brasileira da Indústria Química
NUCOP	Núcleo de Modelagem, Controle e Otimização de Processos
FEQUI	Faculdade de Engenharia Química
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
TC	Temperature Controller

LISTA DE SÍMBOLOS

$NaOH$ – Hidróxido de Sódio [-];

$HCOONa$ - Formiato de Sódio [-];

$HCOOH$ - Ácido Fórmico [-];

CO – Monóxido de carbono [-];

H_2O – Água [-];

ΔH – Variação da Entalpia [kcal];

S - Vazão de vapor de água saturada [$kg \cdot h^{-1}$];

λ – Calor latente do vapor [$kJ \cdot kg^{-1}$];

q – Taxa de calor [$kJ \cdot h^{-1}$];

Q - Calor [kJ];

Δt – Variação do tempo [h];

\tilde{n} – Vazão molar [$kmol \cdot h^{-1}$];

w_{CW} – Vazão da água de resfriamento [$kg \cdot h^{-1}$];

c_p – Calor específico da água [$kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$];

T - Temperatura [$^\circ C$];

M – Massa [kg];

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

v - Volume específico [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$];

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

T_e - Temperatura de equilíbrio [$^{\circ}\text{C}$];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
5	CONCLUSÃO.....	31
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32
	ANEXO A.....	33
	ANEXO B.....	34

1 INTRODUÇÃO

A crescente utilização de sistemas de controle automático no ambiente industrial vem transformando o processo de ensino e aprendizagem em vigor nos cursos de engenharia. Nos dias de hoje, não se concebe o ensino apenas com lousa e giz. É imperativo que os alunos realizem experiências didáticas, onde a coleta eletrônica das informações pertinentes seja feita de forma automática e rápida, visando uma posterior análise dos dados, com o emprego de planilhas eletrônicas. Este procedimento pode permitir tanto a análise das condições de operação do equipamento como o projeto de modificações, que se façam necessárias no mesmo. Complementarmente, este trabalho de conclusão de curso apresenta contribuição para as disciplinas Segurança e Análise de Riscos em Processos Industriais, Modelagem e Simulação de Processos e Controle de Processos Químicos, proporcionando uma visão aplicada do embasamento teórico apresentado por estas disciplinas, o que contribuirá para a melhoria da aprendizagem por parte dos alunos.

O processo estudado neste trabalho é iniciado à temperatura ambiente e contempla a elevação gradual da temperatura da massa até que ela atinja a temperatura de reação. Uma vez iniciada a fase de reação a massa dentro do reator é continuamente alimentada e retirada dele. O resfriamento é realizado para manter a temperatura de reação no patamar desejado.

Embora distintas estratégias de controle sejam definidas para cada etapa do processo (rampa de aquecimento, controle da massa reacional e rampa de resfriamento), a transição entre uma etapa e outra pode causar oscilações no controle de temperatura, prejudicando a qualidade do produto, vida útil do reator, consumo desnecessário de energia e potenciais riscos à segurança do processo.

1.1. Objetivo deste trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar o risco apresentado à segurança do processo decorrente de ruptura do casco de reator contínuo, na região ocupada pelo gás reacional, considerando a variável de processo massa de gás interna ao reator, nas seguintes condições de ruptura no costado mais próxima do domo superior do reator.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Foi escolhido como processo a fabricação do Formiato de Sódio (HCOONa), que é um produto químico utilizado no mercado brasileiro como matéria-prima para a fabricação de ácido fórmico, além de ser empregado em curtumes e na indústria química de um modo geral (**SOUSA, 2019**).

Um dos principais usos do HCOONa é na produção de couro, por meio do processo de curtimento ao cromo. O HCOONa forma complexos com os metais trivalentes, tornando-os insolúveis. Com a sua adição nas soluções normais de curtimento ao cromo, a velocidade e a uniformidade do processo de curtimento são aumentadas, melhorando as propriedades do produto final.

Na indústria química, o HCOONa é usado como matéria-prima básica para a produção de Hidrossulfito de Sódio e de Ácido Fórmico (HCOOH). A produção de HCOOH responde pela maior demanda interna do HCOONa, por se tratar de uma commodity que possui diversas possibilidades de aplicação, apresentando boa flexibilidade de demanda no mercado interno. A produção e o consumo de HCOONa são apresentados na **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 - Produção e consumo de HCOONa

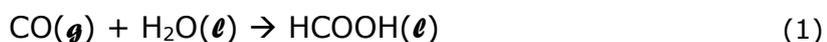
	2013	2014	2015	2016
	(toneladas/ano)			
Prod. Brasil	-	18.000	12.420	16.930
Importação	-	14.370	11.340	26.300
Exportação	-	-	-	1
Consumo Aparente	-	32.370	23.760	40.560

Fonte: adaptado de ABIQUIM (2021)

O HCOOH é o primeiro membro de uma série de homólogos dos ácidos carboxílicos derivados de cadeias de alcanos. Ele está naturalmente presente na secreção de diversos insetos, particularmente das formigas. Foi tido como produto de importância industrial modesta até meados de 1960, quando se tornou disponível

como um 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**).

Uma das rotas produtivas possíveis é a reação do Monóxido de Carbono (CO) com a água (H₂O), produzindo o ácido fórmico. Este, por sua vez, pode ser posto a reagir com uma solução de Hidróxido de Sódio (NaOH), dando origem ao Formiato de Sódio. As reações químicas apresentadas na sequência ilustram este processo.



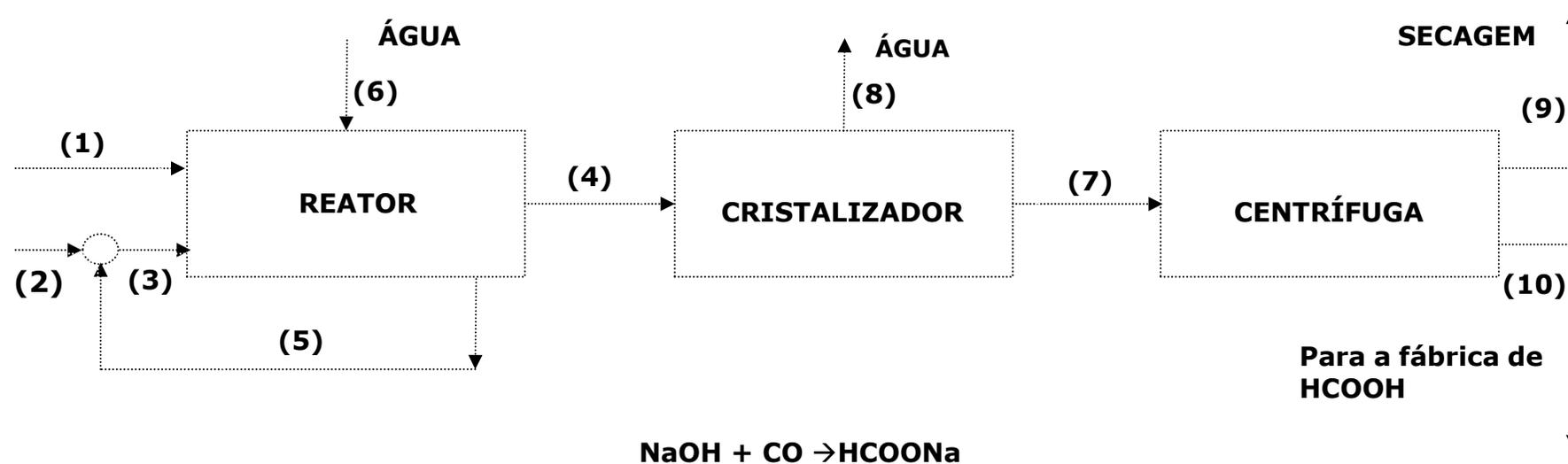
Deve ser ressaltado o fato de que a reação do CO com a H₂O apresenta um equilíbrio altamente desfavorável sob o ponto de vista do balanço energético, pois $\Delta H_{298K} = -7 \text{ kcal}$.

Uma rota 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. A reação química considerada é apresentada a seguir.



Neste trabalho, esta última rota produtiva é aquela que será adotada. O diagrama de blocos apresentado na **Figura 2.1** resume o balanço global de massa para as principais etapas do processo de fabricação do Formiato de Sódio.

BALANÇO GLOBAL DE MASSA – Fabricação de HCOONa



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

Corrente	Descrição
(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

Figura 2.1- Diagrama de blocos do balanço material do processo de produção de Formiato de Sódio

Na **Tabela 2.2** são apresentados os valores das correntes de processo do diagrama da **Figura 2.1 (SOUSA, 2018)**.

Tabela 2.2 - Dados de Processo do projeto

Corrente	Descrição	Valor (kg/h)
(1)	Solução de NaOH a 50% alimentada	20.000,00
(2)	Monóxido de carbono fresco alimentado	7.000,00
(3)	Monóxido de carbono alimentado	8.000,00
(4)	Formiato de sódio produzido em solução	15.890,00
(5)	Monóxido de carbono reciclado	1.000,00
(6)	Água alimentada	4.982,68
(7)	Formiato de sódio produzido em cristais	3.000,00

A análise de risco é comumente identificada pela abreviatura em inglês **HAZOP**, que significa **Hazard and Operability Studies**. Na realidade, a análise de risco seria mais bem classificada como Estudo de Perigos e Operabilidade. Ao longo do texto, se fará uso do termo HAZOP por ser este amplamente conhecido e difundido em nossa cultura industrial.

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**).

O principal objetivo do HAZOP é investigar de forma minuciosa e metódica cada segmento de um processo, focalizando os pontos específicos dele – denominados de **nós** - um de cada vez. O resultado esperado é descobrir todos os possíveis desvios das condições normais de operação, identificando as causas responsáveis por tais desvios e as respectivas consequências. Uma vez verificadas as causas e as consequências de cada tipo de desvio, deve-se propor medidas para eliminar ou controlar o perigo ou para sanar o problema de operabilidade da instalação (**CROWL; LOUVAR, 2015**).

Importante destacar que o HAZOP enfoca tanto os **problemas de segurança**, buscando identificar os perigos que possam colocar em risco os operadores e aos equipamentos da instalação, como também 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 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para realização deste trabalho foram utilizados basicamente as informações disponibilizadas por **Sousa (2018)**, em seu relatório de estágio supervisionado realizado no NUCOP/FEQUI/UFU.

3.2 Metodologia empregada

Inicialmente, com base em **Gedraite (2019)** foi realizado o HAZOP do reator, visando identificar os pontos que apresentam interesse de análise visando minimizar os riscos existentes no equipamento em questão. Os resultados do HAZOP estão apresentados na Seção 4 deste trabalho.

Na sequência, com base no balanço material apresentado na seção 2 deste trabalho, foi desenvolvido o balanço de massa simplificado para avaliar o impacto do vazamento de gás na massa reacional. As informações complementares necessárias para o desenvolvimento do balanço de energia estão apresentadas no **Anexo A**.

Com base nas informações citadas nos parágrafos anteriores, foi desenvolvido o modelo matemático simplificado do processo em estudo, considerando a relação entre a massa reacional e a vazão de gás extravasado do reator através da ruptura. Foi assumido que a ruptura tenha geometria circular, com diâmetro fixo.

O modelo matemático simplificado para o estado estacionário (**Garcia, 2005; Melo Jr e Pinto, 2008**) 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, contemplando as variáveis de processo diretamente envolvidas na análise, a saber: a vazão de água de resfriamento e a vazão de vapor de água saturado utilizados na partida do equipamento.

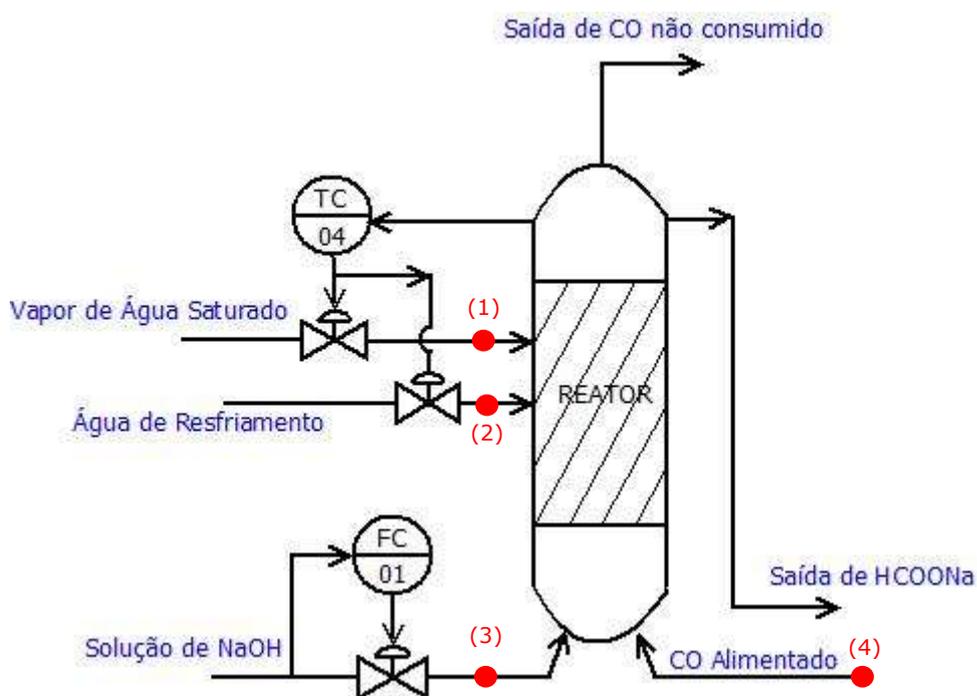


Figura 4.1 – Representação esquemática simplificada do reator típico

O controlador de temperatura identificado pelo *tag* TC-04 é o instrumento que desempenha a função principal no funcionamento do reator durante as etapas de partida e de parada dele. Importante destacar que a malha de controle apresentada na **Figura 4.1** é do tipo malha de controle de faixa dividida.

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 objeto de estudo deste trabalho, contemplando as possíveis falhas e as respectivas ações mitigatórias para as variáveis consideradas.

Quadro 4.1.A – 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: Isabela Andrade	Data: 26/02/2021
Parâmetro: Vazão de vapor de água saturado			Nó: 1	Página: 01
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providencias
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.B – HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa (cont.)

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Isabela Andrade	Data: 26/02/2021
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"> Falha no suprimento de água de resfriamento; Falha completamente fechada da válvula de controle. 	<ol style="list-style-type: none"> Não alimentar a camisa do reator na etapa de resfriamento; Não deixar o reator operacional. 	<ol style="list-style-type: none"> Instalar chave de fluxo na linha de água de resfriamento; 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 água de resfriamento 	<ol style="list-style-type: none"> Aumentar o tempo de partida 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 alta.
Mais	Mais vazão no nó	<ol style="list-style-type: none"> Falha completamente aberta na válvula; 	<ol style="list-style-type: none"> Resfriar o reator mais rapidamente do que o previsto no projeto; Temperatura muito baixa 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 baixa.

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

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Isabela Andrade	Data: 26/02/2021
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"> 1. Falha no suprimento de solução de NaOH; 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 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 solução de NaOH 	<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; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Produto fora de especificação na saída do reator; 2. Temperatura 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.D – HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa (cont.)

Análise de Perigos e Operabilidade				
Unidade: Produção de Formiato de Sódio				
Sistema: Reator de produção de HCOONa			Equipe: Isabela Andrade	Data: 26/02/2021
Parâmetro: Vazão de monóxido de carbono			Nó: 4	Página: 04
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providencias
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	3. Falha no suprimento monóxido de carbono; 1. Falha completamente fechada da válvula de controle.	1. Não alimentar o reator; 2. Não deixar o reator operacional.	3. Instalar chave de fluxo na linha de água de resfriamento; 1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa;
Menos	Menos vazão no nó.	3. Problema no funcionamento da válvula de controle; 1. Problema no suprimento de água de resfriamento	1. Produto fora de especificação na saída do reator; 2. Não atingir a temperatura requerida de reação.	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	1. Falha completamente aberta na válvula de controle;	2. Produto fora de especificação na saída do reator; 3. Temperatura alta no reator.	1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 2. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura alta.

4.2 Cálculo da vazão de gás reacional extravasado pela ruptura na região do domo superior do reator

O cálculo da vazão de gás reacional extravasado foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de massa simplificado apresentado no **Anexo B**.

4.3 Cenários de falha estudados

O **desvio** postulado leva em consideração a ruptura do costado do reator, próxima ao bocal de saída do gás reacional, no domo superior, na região ocupada pelo gás reacional não consumido. Foi considerado que a ruptura no costado apresente geometria que pode ser aproximada por um furo circular de diâmetro aproximadamente igual a 1 cm. O vazamento ocorrerá para a atmosfera, sendo o valor da vazão de gás extravasado assumido como sendo constante ao longo do tempo de ocorrência. Por simplicidade de análise o escoamento através do orifício da ruptura no costado do reator será assumido como sendo monofásico. O valor do coeficiente de descarga através do orifício será adotado como sendo aproximadamente igual a 0,6, por se tratar de um valor tipicamente encontrado na literatura (DELMÉE, 2005).

A vazão de gás reacional extravasada pelo orifício da ruptura é da ordem de **24,9 L/s** ou **89,6 m³/h**. A pressão do reator cairia de maneira muito acentuada considerando o desvio postulado, igualando a pressão atmosférica em aproximadamente **6 min**. Na Figura 4.2 é apresentado o comportamento temporal da pressão no interior do reator em estudo em resposta ao desvio considerado.

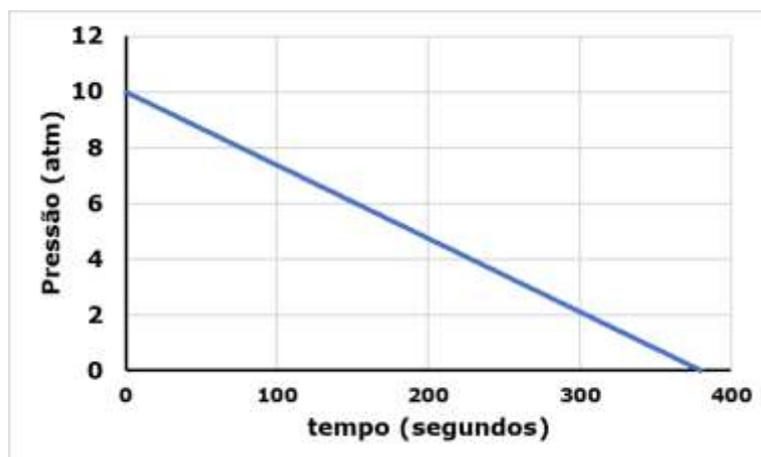


Figura 4.2 – Comportamento temporal da pressão do reator

A principal consequência do vazamento do gás reacional seria a implicação de reavaliar a classificação da área no entorno do reator, que passaria a ser uma área classificada em função do vazamento do monóxido de carbono. Ainda assim, seria uma área classificada como zona 2, a qual apresenta menor risco de explosão.

Importante destacar, também, que o monóxido de carbono apresenta risco à saúde dos trabalhadores, particularmente à dos operadores de processo que trabalham em campo.

Um aspecto que atenuaria o impacto do incidente postulado neste trabalho seria o fato de que o monóxido de carbono apresenta densidade muito próxima à do ar atmosférico, minimizando o risco dele ficar concentrado na região próxima ao solo.

5 CONCLUSÃO

O HAZOP do reator contínuo empregado na produção de Formiato de Sódio foi realizado com sucesso, sendo os cenários avaliados representativos de situações tipicamente encontradas em instalações industriais químicas.

O foco do trabalho foi na análise da vazão de gás reacional que escapa de orifício formado na parede do reator, na região superior do mesmo. O vazamento causado pela ruptura postulada provocaria a rápida diminuição da pressão no interior do reator. Contudo, este aspecto não foi levado em consideração na análise, preferindo-se optar por manter a premissa de que a pressão seria suficientemente elevada para justificar o valor da vazão de escape através da ruptura em um valor praticamente constante.

Apesar do fato do vazamento ser significativo, não haveria o risco imediato de explosão, pois o monóxido de carbono tenderia a sofrer diluição no ar atmosférico ao redor do reator.

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. **O desempenho da indústria química brasileira – 2020**. Disponível em: < <https://abiquim.org.br/industriaQuimica> > Acesso em 24/01/2021 12:20.

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

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**. Comunicação pessoal. UFU, 2019, Uberlândia/MG.

MELO Jr., P.A.; PINTO, J. C. C. da S. **Introdução à Modelagem Matemática e Dinâmica Não Linear de Processos Químicos**. Rio de Janeiro, RJ: COPPE - UFRJ, 2008.

SILVA, A. B. **Análise de Risco do Processo de produção de resina para tinta automotiva**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFU, 2019, Uberlândia/MG.

SOUSA, D. G. **Projeto do processo de produção de Formiato de Sódio**. Relatório de Estágio Supervisionado. UFU, 2018, Uberlândia/MG.

SOUSA, V. L. **Ante-projeto de planta de produção de Formiato de Sódio**. Relatório de Iniciação Científica. UFU, 2019, Uberlândia/MG.

DELMEÉ, G. J. **Manual de Medição de Vazão** 3ª ed., Edgard Blücher, 2003, São Paulo/SP.

ANEXO A

DADOS & INFORMAÇÕES ÚTEIS:

- diâmetro interno do reator = 2,5 m
- altura interna total do reator = 7,0 m
- altura interna útil do reator = 6,0 m
- densidade média global da solução de NaOH a 50% = 1.530 kg/m³
- densidade média global do gás reacional (monóxido de carbono) = 7,23 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 CO que reagiu = 7.000 kg/h
- vazão mássica de CO não consumido = 1.000 kg/h
- vazão mássica de HCOONa produzida no reator = 23.800 kg/h

ANEXO B

CÁLCULO DA VAZÃO DE GÁS REACIONAL EXTRAVASADO PELA RUPTURA NO DOMO SUPERIOR DO REATOR

Aplicando um balanço global de massa ao reator, pode-se escrever a Equação (B.1).

$$w_1 + w_2 - w_3 - w_4 - w_{reagiu} - w_5 = \frac{dM(t)_{reator}^{GÁS}}{dt} \quad (B.1)$$

Assumindo que as vazões w_1 , w_{reagiu} e w_3 praticamente não sejam afetadas pelo desvio postulado e que inicialmente w_5 seja nulo e que somente terá um valor definido e constante após a ruptura do costado do reator, pode-se reescrever a equação anterior como segue:

$$w_2 - w_4 - w_{reagiu} - w_5^{SS} = \frac{dM(t)_{reator}^{GÁS}}{dt} \quad (B.2)$$

Como o produto formado é retirado pela região superior do reator, não haverá influência da altura da coluna de gás sobre os valores das vazões envolvidas. Desta maneira, uma vez conhecido o valor de w_5^{SS} pode-se calcular qual será o novo valor de w_4 que passará a ser denominado de w'_4 .

Outra hipótese simplificadora que pode ser assumida no cenário de desvio considerado é que logo no início do vazamento a pressão do reator ainda seria mantida, uma vez que ele possui um controlador de pressão instalado e este irá atuar no sentido de contrabalançar a tendência de diminuição da pressão. Assim sendo, é possível afirmar que a massa de gás no domo superior permaneceria praticamente constante. Neste contexto, a Equação (B.2) poderia ser reescrita na forma apresentada na Equação (B.3).

$$w_2 - w'_4 - w_{reagiu} - w_5^{SS} = 0 \quad (B.3)$$

O valor da vazão da corrente (5) pode ser calculado com base na metodologia proposta por **Crowl; Louvar (2015)**, por meio do emprego da Equação (B.4).

$$w_5^{SS} = C \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \bar{p} \cdot P_{reator}} \quad (B.4)$$

Importante destacar que foram assumidas hipóteses simplificadoras para representar o vazamento em estudo, a saber: (i)- a pressão interna não sofrerá grande alteração em seu valor de estado estacionário; (ii)- o nível de gás reacional permanece praticamente constante, não sendo afetado de maneira significativa

pelo vazamento; (iii)- a vazão que escoar pelo orifício da ruptura será praticamente constante e formada essencialmente pelo gás reacional; (iv)- a ruptura foi modelada como tendo geometria circular e diâmetro igual a 1 cm e (v)- o valor do coeficiente de descarga foi assumido como igual a 0,6.

O valor médio da densidade do gás reacional foi assumido ser praticamente constante e é apresentado no Anexo A. Daí, resulta que,

$$w_5^{ss} = 0,6 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot 7,23 \cdot (10 \cdot 101325)} \cong 0,18 \frac{kg}{s} \quad (B.4)$$

Voltando à Equação (B.3) e substituindo-se os valores conhecidos de w_2 e w_5^{ss} , pode-se obter o valor de w'_4 , que é o novo valor da vazão mássica de monóxido de carbono não reagido.

$$w'_4 = 2,22 - 1,94 - 0,18 \cong 0,10 \frac{kg}{s} \quad (B.5)$$

Importante destacar que antes do desvio em estudo, $w_4 = 0,28 \frac{kg}{s}$. Desta maneira, o impacto do vazamento postulado sobre a produção do reator pode ser assumido ser pequeno.

Uma vez conhecidos os valores das vazões mássicas das correntes de processo estudadas e, também, lembrando que o volume ocupado pelo gás reacional praticamente não varia, pode-se reescrever a Equação (B.2) como segue.

$$w_2 - w'_4 - w_5^{ss} = \frac{V_{reator}^{GÁS} \cdot MM_{gás\ reacional}}{R \cdot T_{reator}} \cdot \frac{dP(t)_{reator}^{GÁS}}{dt} \quad (B.6)$$

Considerando o emprego de variáveis-desvio, a Equação (B.6) pode ser reescrita como apresentado na Equação (B.7).

$$-\hat{w}'_4 = \frac{V_{reator}^{GÁS} \cdot MM_{gás\ reacional}}{R \cdot T_{reator}} \cdot \frac{d\hat{P}(t)_{reator}^{GÁS}}{dt} \quad (B.7)$$

Será assumido que \hat{w}'_4 sofra uma alteração brusca em seu valor a partir do início do vazamento. Esta variação será do tipo degrau. A amplitude do degrau será dada pela diferença entre os valores de w_4 e de w'_4 , sendo igual a $0,10 \frac{kg}{s}$.

Substituindo-se os valores conhecidos na Equação (B.7) e resolvendo a equação resultante, obtém-se a solução apresentada na Equação (B.8).

$$P(t)_{reator}^{GÁS} = P(t=0)_{reator}^{GÁS} - 0,0263 \cdot t \quad (B.8)$$

Sendo o valor de $P(t = 0)_{\text{reator}}^{\text{GÁS}} = 10 \text{ atm}$.

Portanto, como assumido inicialmente, a variação da pressão do gás reacional no interior do reator afetado pelo desvio seria muito significativa, pois em aproximadamente **6 min.** de vazamento a pressão do reator seria igual à pressão externa.