

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química

Gustavo Denardi

Análise de risco de reator empregado na fabricação de formiato de sódio

Uberlândia, MG
2020

Gustavo Denardi

Análise de risco de reator empregado na fabricação 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
2020

Gustavo Denardi

Análise de risco de reator empregado na fabricação 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. Sérgio Mauro da Silva Neiro

Faculdade de Engenharia Química / UFU

Prof. Dr. Rodrigo Sislian

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo / IFSP

Uberlândia, 17 de dezembro de 2020

RESUMO

Neste trabalho foi elaborado o HAZOP do reator contínuo empregado na produção de Formiato de Sódio, considerando dois cenários tipicamente encontrados em instalações industriais químicas. O foco do trabalho foi na análise da temperatura da massa reacional considerando dois desvios diferentes aplicados em variáveis de processo diferentes. O primeiro desvio foi causado por uma falha na condição aberta da válvula de controle instalada na tubulação de vapor de água saturado utilizado para o aquecimento inicial do reator e o segundo desvio foi causado por uma falha na condição fechada da válvula de controle instalada na tubulação de água de resfriamento utilizada durante a operação normal do reator. 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 two scenarios typically found in chemical industrial installations. The focus of the work was on the analysis of the temperature of the reaction mass considering two different deviations applied to different process variables. The first deviation was caused by a failure in the open condition of the control valve installed in the saturated steam pipe used for the initial heating of the reactor and the second deviation was caused by a failure in the closed condition of the control valve installed in the cooling water pipe used during normal reactor operation. 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	17
Figura 4.1.1 - Representação esquemática simplificada do reator típico.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Produção e consumo de HCOONa **15**

Tabela 2.2 – Dados de Processo do projeto **18**

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.3.1 – HAZOP parcial do reator de produção de HCOONa.....	23
--	-----------

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 [$kg\ h^{-1}$];

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 [$kJ\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$];

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

M – Massa [kg];

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

$\dot{V}$ - volume específico [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$];

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

T_e - temperatura de equilíbrio [K];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28
	ANEXO A.....	29
	ANEXO B.....	31
	ANEXO C.....	32
	ANEXO D.....	34
	ANEXO E.....	35

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. Objetivos deste trabalho

Avaliar o risco apresentado à segurança do processo decorrente de falhas na operação de reator contínuo, considerando variável de processo temperatura interna do reator, nas seguintes condições: (i)- na etapa de aquecimento da massa

reacional composta essencialmente pela solução de NaOH a 50% em massa, durante a partida do reator, em decorrência da falha na válvula de controle instalada na tubulação de vapor de água saturado e (ii)- na etapa de funcionamento normal do reator, em decorrência de falha na válvula de controle instalada na tubulação de água de resfriamento.

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 insolúvel. 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

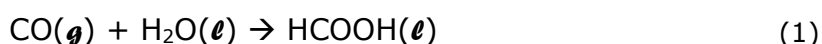
	2013	2014	2015	2016
	(toneladas/ano)			
Prod. Brasil	-	18.000	12.420	16.930
Importação	-	14.370	11.340	26.300
Exportação	-	-	-	1
Consumo Aparente	-	32.370	23.760	40.560

Fonte: adaptado de Anuário da ABIQUIM - A indústria química brasileira – comportamento e perspectivas (2013 e 2016)

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 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**).

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, 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

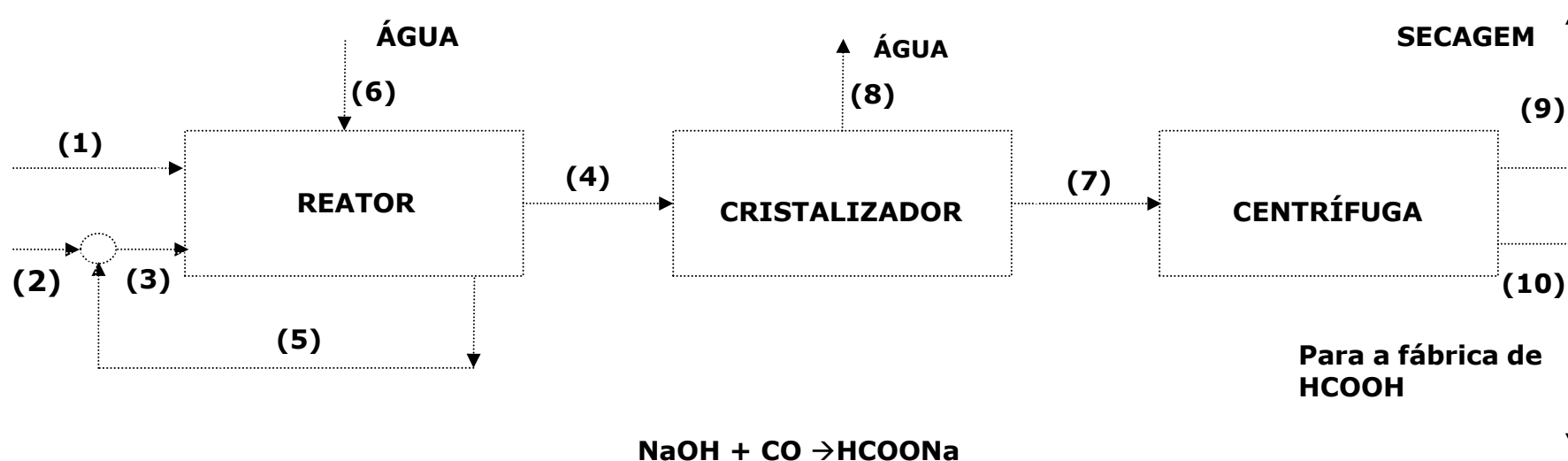


Figura 2.1- Diagrama de blocos do balanço material do processo de produção de Formiato de Sódio

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

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	20.009,00
(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 análise de risco é comumente identificada pela abreviatura em inglês **HAZOP**, que significa **Hazard and Operability Studies**. Na realidade, a análise de risco seria melhor 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 do mesmo – 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.

Na sequência, com base no balanço material apresentado na seção 2 deste trabalho, foi desenvolvido o balanço de energia simplificado para avaliar o consumo de utilidades a serem usadas na análise. 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 temperatura da massa reacional e a vazão de vapor de água saturado alimentada à camisa do reator.

O modelo matemático simplificado para o estado estacionário (**Garcia, 2005; Priamo 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 4.1.1 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.

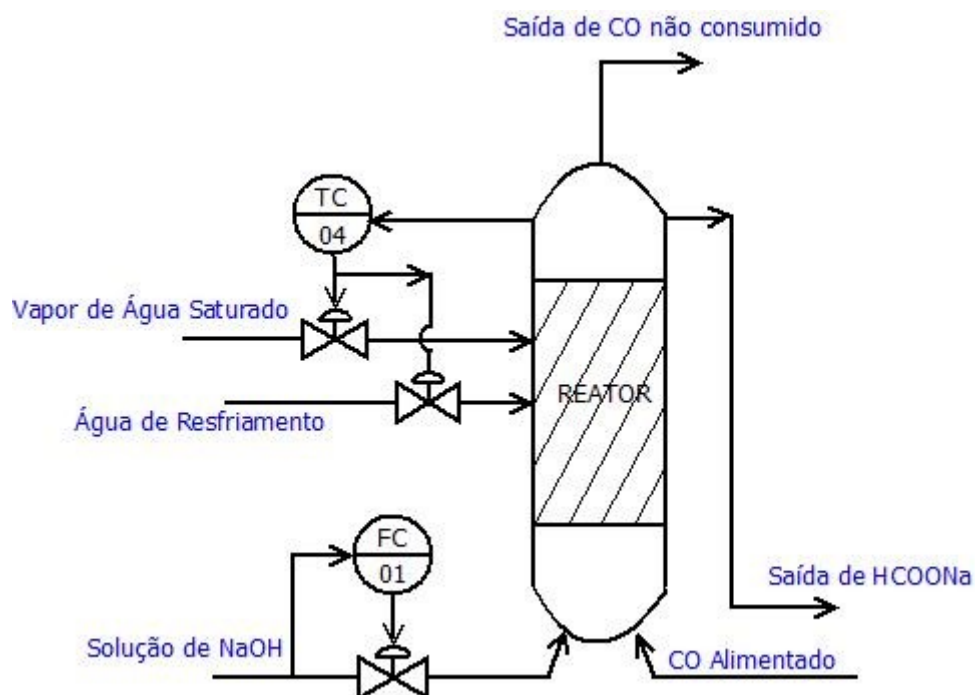


Figura 4.1.1 – Representação esquemática simplificada do reator típico

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 4.1.1 é do tipo malha de controle de faixa dividida.

Os nós de interesse para este trabalho são os nós (1) e (2), localizados nas tubulações de alimentação de vapor de água saturado e de água de resfriamento, respectivamente.

No quadro 4.3.1 é apresentado o HAZOP objeto de estudo deste trabalho, contemplando as possíveis falhas e as respectivas ações mitigatórias para as variáveis consideradas.

4.2 Cálculo da vazão de vapor de aquecimento na partida do reator

O cálculo da vazão de vapor de aquecimento na partida do reator foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de energia simplificado apresentado no **Anexo B**.

4.3 Cálculo da vazão de água de resfriamento durante a operação em regime estacionário

O cálculo da vazão de água de resfriamento na condição de operação em regime estacionário foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de energia simplificado apresentado no **Anexo C**.

.

Quadro 4.3.1 – 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: Gustavo Denardi.	Data: 06/07/2020
Parâmetro: Vazão de vapor de água saturado			Nó: 1	Página: 01
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	1. Falha no suprimento de vapor de água; 2. Falha completamente fechada da válvula de controle.	1. Não alimentar a camisa do reator na etapa de aquecimento Inicial; 2. Não deixar o reator operacional.	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.	1. Problema no funcionamento da válvula de controle; 2. Problema no suprimento de vapor	1. Aumentar o tempo de partida 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 no reator, com alarme de temperatura baixa.
Mais	Mais vazão no nó	1. Falha completamente aberta na válvula;	1. Aquecer o reator mais rapidamente do que o previsto no projeto; 2. Temperatura excessiva no reator.	1. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 2. Instalar medidor de temperatura no reator, com alarme de temperatura alta.

Quadro 4.3.1 – 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: Gustavo Denardi.	Data: 06/07/2020
Parâmetro: Vazão de água de resfriamento			Nó: 2	Página: 02
Palavra guia	Desvio	Causas	Consequências	Providências
Nenhuma	Ausência de vazão no nó.	3. Falha no suprimento de água de resfriamento; 4. Falha completamente fechada da válvula de controle.	3. Não alimentar a camisa do reator na etapa de resfriamento; 4. Não deixar o reator operacional.	3. Instalar chave de fluxo na linha de água de resfriamento; 4. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão muito baixa;
Menos	Menos vazão no nó.	3. Problema no funcionamento da válvula de controle; 4. Problema no suprimento de água de resfriamento	3. Aumentar o tempo de partida do reator; 4. Não atingir a temperatura requerida de reação.	3. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão baixa; 4. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura alta.
Mais	Mais vazão no nó	2. Falha completamente aberta na válvula;	3. Resfriar o reator mais rapidamente do que o previsto no projeto; 4. Temperatura muito baixa no reator.	3. Instalar medidor de vazão com alarme de vazão alta; 4. Instalar medidor de temperatura na camisa do reator, com alarme de temperatura baixa.

4.4 Cenários de falha estudados

Foram estudados dois cenários de falha associados ao sistema de aquecimento do reator, assumindo que o aquecimento da massa de solução de NaOH a 50% transferida para o reator tenha sido iniciado normalmente e que na sequência ocorram os desvios postulados nos parágrafos a seguir.

O **primeiro desvio** postulado leva em consideração a falha na posição totalmente aberta da válvula de controle instalada na tubulação de vapor de água saturado. Este desvio acontece no final da etapa inicial de aquecimento (com duração de aproximada de 2 horas), com a válvula de controle permanecendo totalmente aberta por 40 minutos adicionais. Neste cenário, o reator estaria sendo operado à pressão atmosférica e todo o calor transportado pelo vapor de aquecimento seria transferido para a massa da solução de NaOH a 50% inicialmente alimentada ao reator. O cálculo do valor da temperatura alcançada pela massa de solução de NaOH a 50% contida no reator foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de energia simplificado apresentado no **Anexo D**.

Importante destacar que foi assumida a hipótese de comportamento adiabático do reator na etapa inicial de aquecimento. Neste primeiro desvio, haveria a possibilidade de ocorrer a vaporização do conteúdo do reator devido ao elevado valor de alcançado pela temperatura interna do reator, estimado em aproximadamente 231,67°C.

O **segundo desvio** leva em consideração a falha na posição totalmente fechada da válvula de controle utilizada para ajustar a vazão de água de resfriamento após o início da reação química, a qual é fortemente exotérmica. Importante destacar que neste cenário o reator já estaria pressurizado a 10 *atm*. Foi postulado que o desvio teve duração de 1 hora aproximadamente. O cálculo do valor da temperatura alcançada pela massa de solução reacional contida no reator foi feito com base nas informações técnicas disponibilizadas no **Anexo A** e no balanço de energia simplificado apresentado no **Anexo E**.

Neste segundo desvio, também haveria a possibilidade de ocorrer a vaporização do conteúdo do reator devido ao elevado valor de alcançado pela temperatura interna do reator, estimado em aproximadamente 397,86°C.

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 temperatura da massa reacional considerando dois desvios diferentes. O primeiro desvio, causado por uma falha na condição aberta da válvula de controle instalada na tubulação de vapor de água saturado, mostrou que há a tendência indesejada de aumento acentuado da temperatura da massa reacional, que poderia alcançar valores capazes de promover a vaporização do conteúdo do reator, lavando o mesmo a uma condição de perda de controle com riscos iminentes à saúde e integridade física do trabalhador. O segundo desvio, causado por uma falha na condição fechada da válvula de controle instalada na tubulação de água de resfriamento, utilizada para resfriar o reator durante a sua operação normal, mostrou risco ainda maior de ocorrência de temperatura excessiva, com consequências similares às anteriormente citadas.

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

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;

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
- 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) → HCOONa(sol)
- vazão mássica de NaOH alimentado ao reator = 14.000 kg/h
- vazão mássica de CO alimentado ao reator = 8.000 kg/h

Resultado

Temperatura do vapor saturado	188.015	°C ▼
Calor latente do vapor	1985.09	kJ/kg ▼
Entalpia específica do vapor saturado	2783.81	kJ/kg ▼
Entalpia específica do vapor superaquecido	798.721	kJ/kg ▼
Volume específico do vapor saturado	0.163077	m³/kg ▼
Volume específico da água saturada	0.00113857	m³/kg ▼

ANEXO B

CÁLCULO DO CONSUMO HORÁRIO DE VAPOR DE ÁGUA SATURADO (S) À PRESSÃO DE 11 kgf/cm² NA ETAPA DE AQUECIMENTO INICIAL

$$S \cdot \lambda_{cond} - q_{aquecim} = 0$$

mas,

$$q_{aquecim} = \frac{Q_{aquecim}}{\Delta t_{aquecim}}$$

e,

$$Q_{aquecim} = 16.787.591,95 \text{ kJ}$$

portanto,

$$q_{aquecim} = \frac{16.787.591,95 \text{ kJ}}{2 \text{ h}} = 8.393.795,98 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Donde, resulta que,

$$S = \frac{2.331,68.8.393.795,98 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}}{1.985,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 4.228,42 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

ANEXO C

CÁLCULO DA VAZÃO DE ÁGUA DE RESFRIAMENTO DURANTE A OPERAÇÃO EM REGIME ESTACIONÁRIO

$$q_{\text{reação}} = \tilde{n}_{\text{HCOONa}_{\text{formado}}} \cdot \Delta H_{\text{reação}}$$

mas, com base na estequiometria da reação, tem-se que:

$$\tilde{n}_{\text{HCOONa}_{\text{formado}}} = \frac{5.885 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{68 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 86,54 \frac{\text{kmols}}{\text{h}}$$

e, consultando as informações disponibilizadas no **Anexo A**, resulta:

$$q_{\text{reação}} = 86,54 \frac{\text{kmols}}{\text{h}} \cdot 102.100 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol de HCOONa formado}}$$

portanto,

$$q_{\text{reação}} = 8.835.734,98 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

Donde, resulta que, a vazão de água de resfriamento pode ser calculada por meio da seguinte equação:

$$q_{\text{reação}} - q_{\text{transf água resfriam.}} = 0$$

onde,

$$q_{\text{transf água resfriam.}} = w_{\text{CW}} \cdot cp_{\text{CW}} \cdot (T_{\text{saida}_{\text{CW}}} - T_{\text{entrada}_{\text{CW}}})$$

consultando as informações disponibilizadas no **Anexo A**, resulta:

$$q_{\text{transf água resfriam.}} = 8.835.734,98 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = w_{\text{CW}} \cdot 4,184 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (45^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

Ou seja,

$$w_{cw} = \frac{8.835.734,98 \frac{kJ}{h}}{4,184 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (45^\circ C - 25^\circ C)} = \mathbf{105.589,57 \frac{kg}{h}}$$

ANEXO D

CÁLCULO DA TEMPERATURA FINAL DO REATOR CONSIDERANDO O PRIMEIRO DESVIO

$$S \cdot \lambda_{cond} - q_{aquecim} = 0$$

mas,

$$q_{aquecim} = \frac{Q_{aquecim}}{\Delta t_{aquecim}}$$

e,

$$Q_{aquecim} = M_{NaOH(sol)} \cdot cp_{NaOH(sol)} \cdot (T_{final_{NaOH(sol)}} - T_{inicial_{NaOH(sol)}}) \text{ kJ}$$

portanto,

$$q_{aquecim} = \frac{M_{NaOH(sol)} \cdot cp_{NaOH(sol)} \cdot (T_{final_{NaOH(sol)}} - T_{inicial_{NaOH(sol)}}) \text{ kJ}}{\left(2 + \frac{40}{60}\right) \text{ h}}$$

Lembrando que a vazão de vapor de água saturado já havia sido calculada no **Anexo B**, resulta que:

$$4.228,42 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.985,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 2,67 \text{ h} = M_{NaOH(sol)} \cdot cp_{NaOH(sol)} \cdot (T_{final_{NaOH(sol)}} - T_{inicial_{NaOH(sol)}})$$

Ou seja,

$$\frac{4.228,42 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1.985,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 2,67 \text{ h}}{45.062,22 \text{ kg} \cdot 2,41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} + 25^\circ\text{C} = T_{final_{NaOH(sol)}}$$

Logo,

$$T_{final_{NaOH(sol)}} = 231,67^\circ\text{C}$$

ANEXO E

CÁLCULO DA TEMPERATURA FINAL DO REATOR CONSIDERANDO O SEGUNDO DESVIO

$$\begin{aligned} \rho_{NaOH} \cdot \dot{V}_{NaOH} \cdot cp_{NaOH} \cdot Te_{NaOH} - \rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa} \cdot Ts_{HCOONa} + q_{reação} \\ = M_{massa} \cdot cp_{massa} \cdot \frac{dT_{s_{HCOONa}}}{dt} \end{aligned}$$

Utilizando o conceito de variáveis desvio tipicamente empregado na resolução de equações diferenciais por meio de Transformadas de Laplace, resulta que:

$$-\rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa} \cdot \hat{T}_{s_{HCOONa}} + \hat{q}_{reação} = M_{massa} \cdot cp_{massa} \cdot \frac{d\hat{T}_{s_{HCOONa}}}{dt}$$

ou seja,

$$\hat{q}_{reação} = M_{massa} \cdot cp_{massa} \cdot \frac{d\hat{T}_{s_{HCOONa}}}{dt} + \rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa} \cdot \hat{T}_{s_{HCOONa}}$$

Dividindo, membro a membro, por $\rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa}$, resulta:

$$\frac{\hat{q}_{reação}}{\rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa}} = \frac{M_{massa} \cdot cp_{massa}}{\rho_{HCOONa} \cdot \dot{V}_{HCOONa} \cdot cp_{HCOONa}} \cdot \frac{d\hat{T}_{s_{HCOONa}}}{dt} + \hat{T}_{s_{HCOONa}}$$

Substituindo os valores já calculados nos **Anexos B, C e D** e os valores fornecidos no **Anexo A**, resulta que:

$$\frac{\hat{q}_{reação}}{38.226,96} = 2,836 \cdot \frac{d\hat{T}_{s_{HCOONa}}}{dt} + \hat{T}_{s_{HCOONa}}$$

Que fornece a seguinte função de transferência,

$$\frac{\hat{T}_{s_{HCOONa}}(s)}{\hat{q}_{reação}(s)} = \frac{81,50}{0,35 \cdot s + 1}$$

Logo, resolvendo a equação anterior, resulta:

$$Ts_{HCOONa}(t) = Ts_{HCOONa_{ss}} + 231,14 \cdot (1 - e^{\frac{-t}{0,35}})$$

Lembrando que $Ts_{HCOONa_{ss}} = 180^{\circ}\text{C}$, resulta que

$$Ts_{HCOONa}(t) = 180 + 231,14 \cdot (1 - e^{\frac{-t}{0,35}})$$

Considerando o desvio com duração de 1 hora, resulta:

$$Ts_{HCOONa}(t = 1h) \cong 397,86^{\circ}\text{C}$$