

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANIELLE GUTSCHOW GAMEIRO

**SOLUÇÃO PARA CRISTALIZAÇÃO DE PRODUTO EM FORMULADOR À
BAIXAS TEMPERATURAS**

LONDRINA

2022

DANIELLE GUTSCHOW GAMEIRO

**SOLUÇÃO PARA CRISTALIZAÇÃO DE PRODUTO EM FORMULADOR À
BAIXAS TEMPERATURAS**

Solution for Product Crystallization in Formulator at Low Temperatures

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Felipi Luiz de Assunção Bezerra.

LONDRINA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DANIELLE GUTSCHOW GAMEIRO

**SOLUÇÃO PARA CRISTALIZAÇÃO DE PRODUTO EM FORMULADOR À
BAIXAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/junho/2022

Lucas Bonfim Rocha
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Felipe Cavalcanti Coelho Marqueze
Engenheiro Químico
ADAMA BRASIL S.A.

Felipi Luiz de Assunção Bezerra
Doutor em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2022

Dedico este trabalho à minha família, ao meu
namorado Pedro e aos meus amigos. Obrigada por
tudo!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipi Luiz de Assunção Bezerra pelo apoio e orientação durante esta trajetória.

Agradeço a todos os colaboradores da empresa, principalmente os engenheiros de processo Felipe Cavalcanti Coelho Marqueze e Marisa Gonçalves da Silva, que me receberam de braços abertos e sempre estavam dispostos a compartilhar conhecimento.

Aos meus amigos que nunca deixaram de me apoiar, principalmente Geysa Kawanishi e Thabata Cirino.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família e ao meu namorado Pedro Basseto: vocês foram fundamentais nesta conquista!

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste estudo de caso.

RESUMO

Em uma indústria de produção de defensivos agrícolas foi submetida a proposta de produção de um herbicida de uma empresa concorrente através de terceirização. Para isso será necessário adequar a planta atual da fábrica, evitando a cristalização do produto no formulador em dias frios e propor uma solução para o envase requerido em isotanques. A solução proposta foi a implantação de uma estação de envase, em isotanques, próxima a fábrica. E ao discutir-se diferentes soluções para evitar a cristalização de produto no formulador, a proposta mais adequada a necessidade da empresa, foi a instalação de um trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador. Nesta proposta foi incluído três sistemas de controle, sendo dois do tipo controle proporcional integral e derivativo (PID) e um do tipo *on-off*. Os controles PID foram avaliados no programa *Anaconda Distribution* (versão 2021.11) através de simulação em linguagem *python* e os valores de *setpoint* foram atingidos com o controle sugerido. Espera-se que através da solução proposta seja possível realizar a produção do produto requerido sem a ocorrência de cristalização e a inclusão de sistemas de controle aumenta a segurança e reduz o tempo de processo, aumentando a capacidade.

Palavras-chave: estudo de caso; cristalização; controle PID; python.

ABSTRACT

In a pesticide production industry, a proposal was submitted to produce a herbicide from a competing company through outsourcing. For this, it will be necessary to adapt the current plant of the factory, avoiding the crystallization of the product in the formulator on cold days, and proposing a solution for the filling required in isotanks. The proposed solution was the implementation of a filling station, in isotanks, close to the factory. Moreover, when discussing different solutions to avoid product crystallization in the formulator, the most appropriate proposal for the company's needs was the installation of a plate heat exchanger in the formulator's recirculation line. This proposal included three control systems, two of the proportional integral and derivative control type (PID), and one of the on-off type. The PID controls were evaluated in the Anaconda Distribution program (version 2021.11) through simulation in python language and the setpoint values were reached with the suggested control. Through the proposed solution, it is possible to carry out the production of the required product without the occurrence of crystallization and the inclusion of control systems increases safety and reduces process time by increasing capacity.

Keywords: study case; crystallization; PID control; python.

SUMÁRIO

1	ESTUDO DE CASO	8
2	SOLUÇÕES PROPOSTAS	10
2.1	Limitação do tempo de operação.....	10
2.2	Inserção de resistência elétrica no formulador	10
2.3	Instalação de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador	10
2.4	Substituição do formulador por vaso com agitação e camisa	11
3	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	12
3.1	Herbicidas	12
3.2	Contaminação cruzada e descontaminação	13
3.3	Cristalização	14
3.4	Trocadores de calor	14
3.5	Balancos de massa e de energia	19
3.6	Isotânques	20
3.7	Diagrama de instrumentação e tubulação	21
3.8	Controle automático.....	22
4	DISCUSSÃO DAS SOLUÇÕES.....	25
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS.....	40
	APÊNDICE A - Diagrama P&ID da planta atual da fábrica	42
	APÊNDICE B - Diagrama P&ID da proposta de instalação de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador	44
	APÊNDICE C - Diagrama P&ID da proposta de envase em isotânques	46
	APÊNDICE D - Código em <i>python</i> para simulação de sistema de controle no reator - aquecimento.....	48
	APÊNDICE E - Código em <i>python</i> para simulação de sistema de controle no reator – resfriamento	52
	APÊNDICE F - Código em <i>python</i> para simulação de sistema de controle no formulador	56

1 ESTUDO DE CASO

Na indústria de produção de defensivos agrícolas DA, localizada no sul do Brasil, foi submetida a proposta de produção do herbicida HerbX de uma empresa concorrente na forma de terceirização. O HerbX é um produto que será utilizado como base na formulação de outro herbicida em outra fábrica pela empresa concorrente.

Para o setor de produção é requerido avaliar se a unidade industrial existente está adequada ao processo e se alterações seriam necessárias. A empresa concorrente forneceu para a empresa DA as seguintes informações: dossiê do produto, incluindo sua composição, rota de processo e propriedades finais do produto.

O produto HerbX apresenta uma reação de neutralização, na qual o princípio ativo ácido A é misturado com hidróxido de B em presença de água com adição de outros itens da formulação. Esta reação de neutralização deve ser realizada com aquecimento. O produto apresenta pH final de 7,5 a 9,0, requer filtração e seu envase deve ser realizado em isotanques de volume não confirmado, mas em torno de 25.000 L.

O produto apresenta tendência de cristalizar em temperaturas iguais ou inferiores a 15°C. A presença de cristais nos equipamentos afeta o processo de descontaminação, que ocorre em todas as fábricas da empresa DA após cada campanha de produto. Contudo a presença de cristalização não afeta o uso posterior do produto pela empresa concorrente, já que os isotanques são aquecidos antes do descarregamento.

A planta atual da fábrica é composta por reator agitado e encamisado com opção de aquecimento ou resfriamento. Neste reator é possível carregar matérias-primas líquidas por uma bomba pneumática próxima a uma balança e as matérias-primas sólidas através de boca de carga com o uso de uma talha pneumática. Após reator, a linha apresenta um filtro do tipo cesto, uma bomba centrífuga e um filtro do tipo bolsa (sistema GAF). Esta linha segue para formulador, sem agitador e sem camisa, no qual é realizado a recirculação através de bomba centrífuga.

Após o formulador, o produto segue para envase em uma linha até um ponto de conexão na fábrica chamado de *manifold*. O envase é realizado em bombonas (1L, 5L e 20L) e containers IBC - *Intermediate Bulk Container* (1.000L) em uma fábrica exclusiva para envase. O diagrama P&ID (*Piping and Instrumentation*) da planta atual

pode ser visualizado no Apêndice A e os valores de volume e vazão dos equipamentos podem ser visualizados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Valores de volume e vazão dos equipamentos na planta

Equipamento	Identificador	Volume ou vazão
Bomba pneumática	P-001	27,5 m ³ /h
Reator	K-001	7,87 m ³
Bomba centrífuga	P-002	40 m ³ /h
Formulador	K-002	33 m ³
Bomba centrífuga	P-003	35 m ³ /h

Fonte: Setor de engenharia da empresa.

A partir destas informações, é observado a necessidade de adequar a planta atual da fábrica para evitar a cristalização do produto no formulador em dias frios e propor uma solução para o envase em isotanques.

2 SOLUÇÕES PROPOSTAS

A solução proposta para o envase em isotanques é implantação de uma estação de envase em isotanques próxima à fábrica.

Para a solução do problema de cristalização, pode-se sugerir algumas possíveis soluções: limitação do tempo de operação; inserção de uma resistência elétrica no formulador; instalação de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador; e substituição do formulador por vaso com agitação e camisa.

2.1 Limitação do tempo de operação

A primeira solução proposta é não alterar a planta atual e apenas restringir a operação com a condição de que não se deve realizar a produção em dias frios. O clima da cidade na qual a indústria está localizada é descrito como clima subtropical úmido, com temperatura do ar média do mês mais frio inferior a 18 °C e temperatura do ar média no mês mais quente, acima de 22 °C (SIBALDELLI; GONCALVES; FARIAS, 2021, p. 9-12). Contudo no ano de 2020 no mês mais frio, a temperatura mínima registrada foi de 4,1 °C com média de 13,3 °C (SIBALDELLI; GONCALVES; FARIAS, 2021, p. 9-12). À vista disso, nesta proposta a produção do produto seria restrita aos meses mais quentes e por segurança não deve ser realizada no período noturno, no qual as temperaturas podem atingir 15°C mesmo em meses quentes.

2.2 Inserção de resistência elétrica no formulador

A segunda solução proposta é inserir uma resistência elétrica no interior do vaso atual do formulador. Uma resistência elétrica converte energia elétrica em térmica por meio da dissipação de calor. A potência da resistência funcionaria como uma variável manipulada que controlaria a temperatura no sistema, fechando o *loop* de controle *feedback*. A medição de temperatura seria feita por um elemento de medição de temperatura localizado no interior do equipamento.

2.3 Instalação de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador

A terceira solução proposta é instalar um trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador atual. Um trocador de calor é um equipamento usado

para aquecer ou resfriar fluidos e é possível controlar a temperatura do produto no vaso com o uso de elemento medidor de temperatura e automação.

A vazão do fluido de aquecimento funcionaria como uma variável manipulada e controlaria a temperatura no sistema, fechando o *loop* de controle *feedback*. A medição de temperatura seria feita por um elemento de medição de temperatura (como um termopar), localizado na tubulação de saída do trocador de calor.

2.4 Substituição do formulador por vaso com agitação e camisa

A quarta solução proposta é substituir o vaso atual do formulador por vaso com agitação e encamisado, com opção de utilizar vapor ou água quente na camisa para aquecer o produto dentro dele. Nesta proposta também é necessário o uso de elemento de medidor de temperatura e automação para controlar a temperatura do produto no vaso.

A vazão do fluido de aquecimento funcionaria como uma variável manipulada que controlaria a temperatura no sistema, utilizando um controle *feedback*.

3 REFERÊNCIAL TEÓRICO

A indústria agroquímica se consolidou depois da Segunda Guerra Mundial com a comercialização dos primeiros herbicidas verdadeiramente seletivos para folhas largas: 2,4-D em 1945 e MCPA em 1946 (COBB; READE, 2010, p. 28).

Atualmente a agricultura global depende fortemente de defensivos agrícolas, como: herbicidas, fungicidas e inseticidas. Estes servem para aumentar o rendimento das colheitas no enfrentamento da insegurança alimentar, que tende a aumentar devido a população crescente (POPP; PETŐ; NAGY, 2013, p. 243).

Em 2019, o uso global de defensivos agrícolas foi de 4,2 toneladas e os herbicidas compõem mais de 50% deste consumo (FAO, 2021). De acordo com relatório de inteligência de negócios da “IndustryARC” (INDUSTRYARC, 2018), o mercado global de herbicidas foi de cerca de 30 bilhões de dólares em 2018 e a demanda de mercado deverá crescer com uma notável taxa de crescimento anual composta (CARG - *Compound Annual Growth Rate*) de 8% durante 2019 a 2025.

3.1 Herbicidas

Os herbicidas são definidos como substâncias químicas que em concentrações convenientes tem a finalidade de inibir o desenvolvimento ou provocar a morte de plantas consideradas daninhas (CORREIA, 2021, p. 48; ROMAN *et al.*, 2007, p. 5).

Os herbicidas são classificados por grupos químicos e de acordo com seu mecanismo de ação. O HerbX atua como inibidor da enzima protoporfirinogênio oxidase, PPO ou PROTOX (Tabela 2), bloqueando a produção de clorofila e grupamentos heme (necessários para a transferência de elétrons), e conseqüentemente leva a degradação das membranas das células vegetais (MARCHI, MARCHI, GUIMARÃES, 2008, p. 22).

Além do mecanismo de ação, é importante analisar a solubilidade e as propriedades ácidas dos herbicidas, pois estas propriedades físico-químicas afetam a absorção do composto pelas células e o movimento deste nas plantas, também chamado de translocação¹ (ROMAN *et al.*, 2007, p. 11).

¹ A translocação pode ocorrer por dois sistemas de transporte de nutrientes nas plantas: movimento de açúcares pelo floema e movimento de água pelo xilema (ROMAN *et al.*, 2007, p. 14).

Desta forma, é de extrema importância que o produto apresente as características físico-químicas pré-determinadas para que ele atue como o esperado no campo.

Tabela 2 – Grupo dos herbicidas inibidores de PROTOX

Grupo WSSA ²	Mecanismo de ação	Grupo químico	Ingrediente ativo	Nome comum
Grupo 14	Inibidores de PROTOX	Difeniléteres	Acifluorfen	Blazer
			Fomesafen	Flex
			Lactofen	Cobra, Naja
			Oxyfluorfen	Goal
		N-fenil-ftalimidas	Flumiclorac	Radiant
			Flumioxazin	Flumyzin, Sumisoya
		Triazolinona	Carfentrazone	Aurora
			Sulfentrazone	Boral, Solara
		Oxadiazol	Oxadiazon	Ronstar

Fonte: Roman *et al.* (2007, p. 7-8).

3.2 Contaminação cruzada e descontaminação

Outro fator de grande importância na fabricação de defensivos agrícolas é a prevenção de contaminação cruzada, principalmente em plantas industriais multipropósito. A contaminação de produtos por impurezas residuais pode resultar em efeitos adversos em cultivos sensíveis e tratados, ou em espécies não visadas. Além de gerar *recall*, descarte de produtos e custos mais altos de fabricação, existe possível risco ambiental e dano a reputação da marca (AFONSO, 2015, p. 10; MÉRIEUX NUTRISCIENCES, 2020, p.1).

Desse modo, é de extrema importância o compromisso com a proteção de culturas através da implementação de procedimentos adequados de descontaminação de plantas industriais, além do uso de processos analíticos apropriados que assegurem a eficácia dos procedimentos de limpeza (MÉRIEUX NUTRISCIENCES, 2020, p.1).

O processo de descontaminação de equipamentos é prejudicado pela presença de superfícies não lisas e de cantos, o que pode favorecer a cristalização e incrustação de resíduos.

² Numeração de acordo com classificação da *Weed Science Society of America* (WSSA).

3.3 Cristalização

A cristalização é a conversão de uma ou mais substâncias do estado gasoso, líquido ou sólido amorfo para o estado cristalino. Este processo geralmente ocorre em um sistema multicomponente e multifásico com troca simultânea de calor e massa entre as fases (COSTA; GIULIETTI, 2010, p. 15). O tamanho e a forma do material particulado formado são afetados pela forma como o processo ocorre e pela presença de impurezas na solução (COSTA; GIULIETTI, 2010, p. 15-16). No processo estudado a presença de cristalização: desfavorece o processo de descontaminação de equipamentos e pode afetar o uso final do produto, por impactar na absorção do herbicida pelas plantas de interesse.

3.4 Trocadores de calor

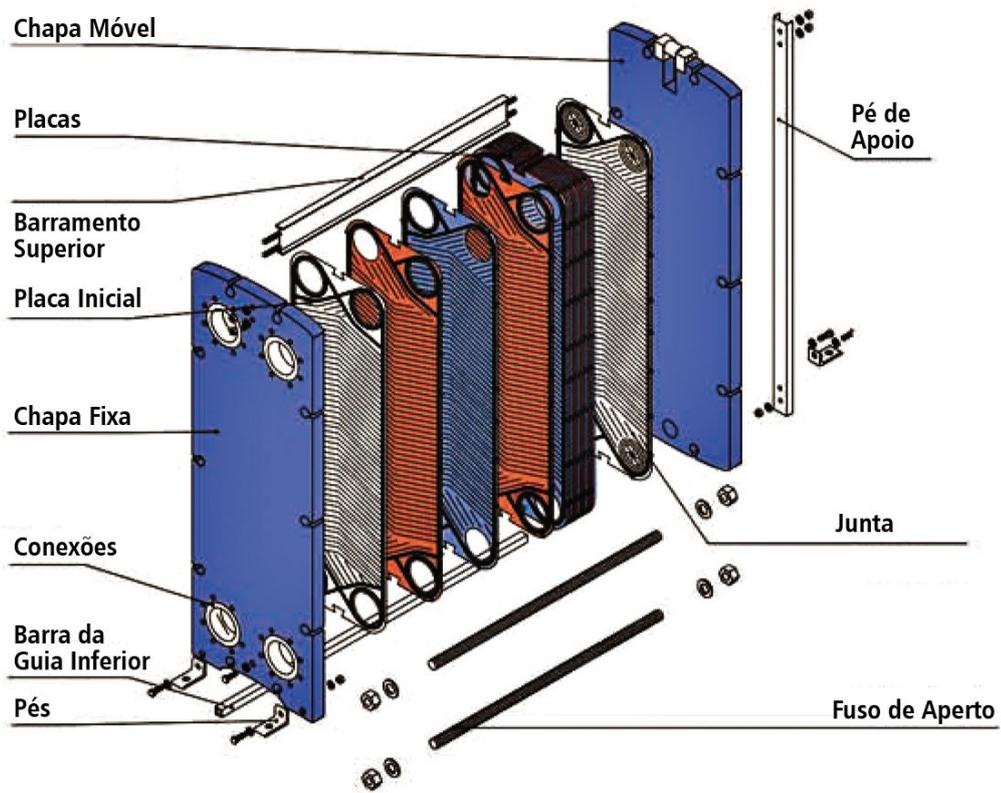
Diversas etapas nos processos de produção requerem o uso de trocadores de calor para realizar operações unitárias de aquecimento, resfriamento, condensação, evaporação, secagem, entre outras.

Estes equipamentos são usados para efetuar a troca térmica entre duas ou mais correntes em diferentes temperaturas sem que ocorra a mistura entre elas (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 644). Estes dispositivos são usados em diversas aplicações como: em sistemas de aquecimento e resfriamento de ambientes, em processos químicos, na produção de potência e na recuperação de calor em processos (BERGMAN, 2019, p. 418).

Os trocadores de calor são classificados usualmente em função da configuração de escoamento e do tipo de construção. De acordo com Tadini *et al.* (2018, p. 355) alguns dos fatores que influenciam na seleção do tipo utilizado são: custo global, requisitos do processo, facilidade de manutenção e limpeza, característica dos fluidos quente e frio, desempenho térmico, perda de carga, espaço ocupado, entre outros.

Os trocadores de calor do tipo placas são constituídos por um pacote de finas placas metálicas que formam canais de escoamento entre cada par de placas (Figura 1) e os fluidos quente e frio escoam alternadamente por esses canais (TADINI *et al.*, 2018, p. 359). Este tipo de trocador permite uma grande variedade de arranjos de escoamento e proporciona excelentes coeficientes de transporte de calor, logo, é compacto e de baixo peso (TADINI *et al.*, 2018, p. 360).

Figura 1 – Componentes de um trocador de calor de placas



Fonte: Bermo (2022).

Outra característica deste tipo de trocador é sua fácil desmontagem, desta forma, são os mais adequados em termos de limpeza mecânica e higienização e são muito utilizados na indústria alimentícia (TADINI *et al.*, 2018, p. 359-360).

De acordo com Tadini *et al.* (2018, p. 361), é importante observar algumas restrições que este tipo de equipamento apresenta como: vida útil limitada das gaxetas; não são recomendados para usos em pressões e/ou temperaturas elevadas (acima de 2.000 kPa e 300 °C); uso em fluidos com presença de fibras ou partículas em suspensão, devido ao risco de entupimentos; e uso em líquidos de alta viscosidade devido a possibilidade de que a perda de carga seja proibitiva.

Um trocador de calor geralmente envolve o escoamento de dois fluidos (aqui denominados fluido frio e fluido quente) separados por uma parede sólida e a transferência de calor ocorre por convecção em cada fluido e por condução através da parede que separa os fluidos, sendo que os efeitos de radiação geralmente são incluídos no coeficiente de transferência de calor por convecção (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 648).

De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a taxa de transferência de calor do fluido quente é igual a taxa de transferência de calor do fluido frio (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 655). Isto é:

$$\dot{Q} = \dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,saída} - T_{f,entrada}) = \dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,entrada} - T_{q,saída}) \quad (1)$$

Na qual \dot{Q} é a taxa de transferência de calor (W), \dot{m} é a vazão mássica (kg/s), C_p é o calor específico (J/kg·K), T é a temperatura (K) e as letras subscritas q e f representam o fluido quente e o fluido frio, respectivamente.

Na análise de trocadores de calor é interessante utilizar o coeficiente global de transferência de calor (U) de unidade W/m²·K representa a contribuição de todos esses efeitos sobre a transferência de calor (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 648).

Desta forma, podemos determinar o valor de U através da seguinte equação considerando os fluidos quente e frio:

$$\frac{1}{U \cdot A} = R_{total} = R_q + R_p + R_f \quad (2)$$

Na qual U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m²·K), A é a área da superfície envolvida na troca térmica (m²), R_{total} representa a resistência térmica global (K/W), R é a resistência associada a convecção em cada fluido (K/W) e R_p é a resistência condutiva na parede (K/W).

O desempenho dos trocadores de calor é afetado com o passar do tempo devido ao acúmulo de depósitos nas superfícies de transferência de calor, seja pela deposição de impurezas dos fluidos ou pela formação de ferrugem ou outras reações entre fluido e material que compõe a parede (BERGMAN, 2019, p.420; ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 650).

A formação de filme ou de incrustações sobre a superfície representa uma resistência adicional à transferência de calor. Para considerar este efeito, utiliza-se um fator de incrustação (R_d), de unidade m²·K/W, que é definido como “a medida da resistência térmica introduzida pelas incrustações” (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 650) e seu valor depende da temperatura de operação, da velocidade do fluido e do tempo de serviço do trocador de calor (BERGMAN, 2019, p.420).

Conseqüentemente, a equação 2 pode ser rescrita como:

$$\frac{1}{U \cdot A} = R_{total} = R_q + \frac{R_{d,q}}{A} + R_p + \frac{R_{d,f}}{A} + R_f \quad (3)$$

Na qual U é o coeficiente global de transferência de calor (W/m²·K), A é a área da superfície envolvida na troca térmica (m²), R_{total} representa a resistência térmica

global (K/W), R é a resistência associada a convecção em cada fluido (K/W), R_d é o fator de incrustação ($m^2 \cdot K/W$) e R_p é a resistência condutiva na parede (K/W).

A taxa de transferência de calor (\dot{Q}) entre os dois fluidos também pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{total}} = U_q A_q \Delta T = U_f A_f \Delta T \quad (4)$$

Na qual R_{total} representa a resistência térmica global (K/W), A é a área da superfície envolvida na troca térmica (m^2), U é o coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2 \cdot K$) e ΔT é a diferença entre as temperaturas dos fluidos (K).

É importante observar que $U_q \cdot A_q$ é igual a $U_f \cdot A_f$ contudo se A_q diferente de A_f , como por exemplo se um dos lados da parede é aletado e o outro não é, U_q é diferente de U_f (ÇENGEL; GHAJAR, 2012, p. 648). Para trocadores de calor de placas, as áreas nos lados quente e frio são iguais.

A força motriz de troca térmica é a diferença entre as temperaturas dos fluidos (ΔT), entretanto esse potencial térmico varia ao longo da extensão do trocador e um valor médio deve ser considerado (TADINI *et al.*, p. 362). Este valor médio, denominado ΔT_{ml} ou MLDT, de unidade K, deve ser uma média logarítmica e sua equação depende se o escoamento é contracorrente ou concorrente. Para escoamento contracorrente, a ΔT_{ml} pode ser definida através da seguinte equação:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{q,saída} - T_{f,entrada}) - (T_{q,entrada} - T_{f,saída})}{\ln\left(\frac{T_{q,saída} - T_{f,entrada}}{T_{q,entrada} - T_{f,saída}}\right)} \quad (5)$$

Para escoamento concorrente, a ΔT_{ml} pode ser definida através da seguinte equação:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{q,entrada} - T_{f,entrada}) - (T_{q,saída} - T_{f,saída})}{\ln\left(\frac{T_{q,entrada} - T_{f,entrada}}{T_{q,saída} - T_{f,saída}}\right)} \quad (6)$$

À vista disso, a equação 4 pode assumir a seguinte forma:

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{ml} \quad (7)$$

A partir desta equação, observa-se que quando maior a diferença entre as temperaturas dos dois fluidos e/ou mais intensa for a troca térmica (maior valor de U), menor será a área necessária para atingir a demanda de calor, barateando o equipamento (TADINI *et al.*, 2018, p. 362).

Para um trocador de calor de placas, o escoamento é considerado misto: uma parte contracorrente e uma parte concorrente. Nesta situação, deve-se utilizar um

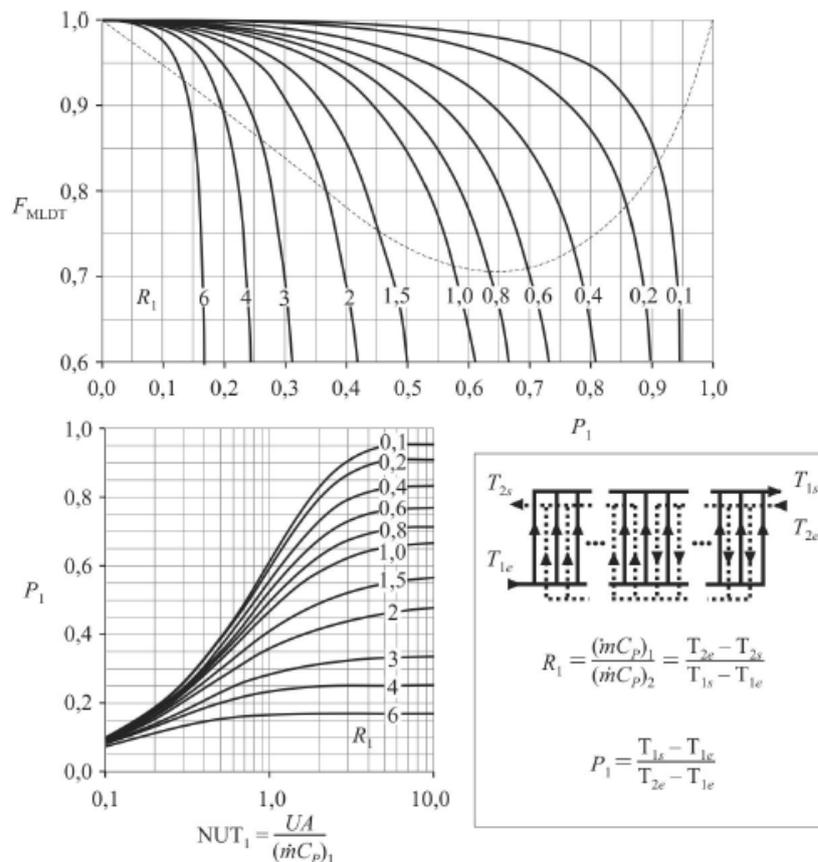
fator de correção para escoamento contracorrente (F_{MLDT}) e a equação 7 pode ser reescrita como:

$$\dot{Q} = UAF_{MLDT}\Delta T_{ml} \quad (8)$$

Na qual U é o coeficiente global de transferência de calor ($W/m^2 \cdot K$), A é a área da superfície envolvida na troca térmica (m^2), F_{MLDT} é o fator de correção da MLDT (adimensional) e ΔT_{ml} é calculada pela equação contracorrente (K).

De acordo com Tadini *et al.* (2018, p. 367), o F_{MLDT} de um trocador de calor de placas depende do número de placas, do arranjo de passes e da localização relativa entre as entradas dos fluidos quente e frio no pacote de placas. Contudo se o efeito dos canais nas extremidades e aqueles vizinhos às mudanças de passe for desprezado, assim desconsiderando o número de placas térmicas (n_{PI}), é possível utilizar a Figura 2 para determinar o F_{MLDT} de um trocador de calor de placas.

Figura 2 - Fator de correção da MLDT (F_{MLDT}) para um trocador de calor de placas com arranjo de passes 1/2 ou 2/1 e entrada em cantos diametralmente opostos do pacote de placas



Fonte: Tadini *et al.* (2018, p. 366).

3.5 Balanços de massa e de energia

O processo de balanço de massa e de energia em uma indústria tem como objetivo determinar as entradas e saídas de cada equipamento presente no fluxograma de processos.

A equação geral para balanço de massa ou de energia é representada pela equação 1, onde o termo do acúmulo representa a variação de massa ou de energia em função do tempo e a entrada e a saída se referem a quantidade de massa ou de energia que entra e que deixa o volume de controle, respectivamente.

$$\text{Acúmulo} = \text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Geração} - \text{Consumo} \quad (9)$$

A geração e o consumo são definidos a partir de reações químicas exotérmicas ou endotérmicas, nas quais ocorre geração de produtos ou subprodutos e consumo de reagentes.

O balanço de massa global e genérico é:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{saída}} \quad (10)$$

Na qual \dot{m} é a vazão mássica.

Para trocadores de calor, considerando-se que não ocorre mudança de fase e nem reação dentro dos trocadores, observa-se que:

$$\dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{saída}} \quad (11)$$

Sendo que esta equação é válida tanto para fluido frio quanto para fluido quente.

O balanço de energia (E) geral e genérico é:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d(U+E_c+E_p)}{dt} \quad (12)$$

No qual U é a energia interna, E_c é a energia cinética e E_p é a energia potencial.

Considerando que os termos relacionados a energia potencial e energia cinética podem ser desprezados, o balanço de energia (E) para um sistema aberto sem reação para fluidos líquidos é o seguinte:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_e C_{p,e} (T_e - T_{ref}) - \dot{m}_s C_{p,s} (T_s - T_{ref}) + \dot{Q} + \dot{W}_s \quad (13)$$

Na qual \dot{m} é a vazão mássica, C_p é o calor específico, T é a temperatura, T_{ref} é uma temperatura de referência, \dot{Q} é o calor envolvido, \dot{W}_s é o trabalho envolvido e as letras subscritas e e s representam entrada e saída, respectivamente.

Para um volume de controle no qual considera-se a equação 11, \dot{W}_s nulo e que C_p e volume são constantes, a equação 13 passa a ser:

$$\frac{dT}{dt} = [\dot{m}C_p(T_e - T_s) + \dot{Q}]/\rho VC_p \quad (14)$$

Na qual \dot{m} é a vazão mássica, C_p é o calor específico, T é a temperatura, \dot{Q} é o calor envolvido, ρ é densidade, V é o volume e as letras subscritas e e s representam entrada e saída, respectivamente.

Para um volume de controle sem entrada e saída de material, a equação 14 passa a ser:

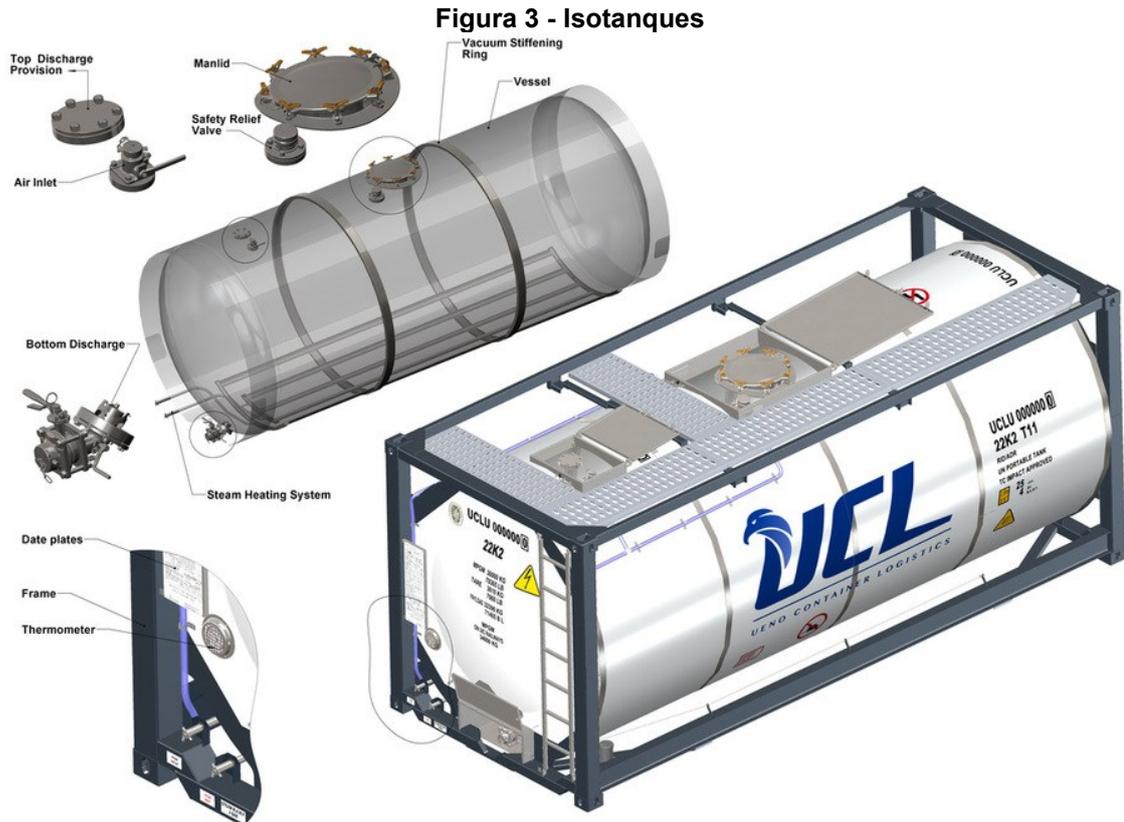
$$\frac{dT}{dt} = \dot{Q}/\rho VC_p \quad (15)$$

Na qual T é a temperatura, \dot{Q} é o calor trocado, ρ é densidade, V é o volume e C_p é o calor específico.

3.6 Isotâncques

A fase final do processo de produção é o envase do produto que pode ser realizado em embalagens de diversos tamanhos: pequenos volumes em bombonas, tambores ou containers IBC ou em grandes volumes em isotâncques, entre outros formatos.

Um container do tipo ISO, também chamado de isotâncque, é um vaso pressurizado de aço inox em uma estrutura de tamanho padronizado de aço inox (Figura 3). Este vaso é amplamente utilizado para transporte e estocagem de grandes quantidades de produtos líquidos (UCL, 2022).



Fonte: UCL (2022)

3.7 Diagrama de instrumentação e tubulação

Um diagrama de instrumentação e tubulação, também denominado diagrama P&ID (*Piping and Instrumentation*), é uma representação gráfica do processo que inclui tubulações, equipamentos do processo e sistemas de controle (TOGHRAEI, 2019, p. 4). O diagrama P&ID não representa escala e localização física dos componentes (TOGHRAEI, 2019, p. 4), mas representa como os componentes e elementos na planta estão interconectados (FRANCHI, 2011, p. 47).

Existem diversos padrões para a simbologia utilizada em diagramas P&ID, como as normas: ISA (*International Society for Measurement & Control*), JIS (*Japanese Industrial Standards*), ISO (*International Standard Organization*), entre outras.

Estas normas estabelecem símbolos para a identificação de instrumentos, tubulações e equipamentos industriais e a escolha de padrão depende dos padrões já utilizados na empresa e das normas locais, sendo possível que algumas companhias utilizem uma convenção própria (FRANCHI, 2011, p. 46).

3.8 Controle automático

De acordo com Garcia (2018, p. 24), o controle automático é definido como a “técnica de balancear o fornecimento de matéria ou energia em função da demanda, ao longo do tempo, a fim de manter o processo em alguma condição de operação predefinida”. O controle automático de processos tem por objetivos reduzir variabilidade, aumentar eficiência e a segurança (FRANCHI, 2011, p. 22).

Em todos os sistemas de controle observa-se uma variável controlada, medida via sensor e transmissor, um controlador e uma variável manipulada que é a variável sobre a qual o controlador atua (GARCIA, 2018, p. 24).

A maioria dos sistemas de controle envolve as seguintes etapas e nomenclaturas:

- Medição de uma variável de um processo que seja de interesse, como pressão, temperatura, nível, entre outros;
- Um controlador toma uma ação com base no valor medido da variável de processo e no valor desejado da mesma, também chamado de *setpoint*;
- O sinal de saída resultante dos cálculos do controlador é utilizado para manipular uma variável do processo, aqui denominada variável manipulada;
- O processo reage a alteração da variável manipulada alterando os valores da variável de processo (FRANCHI, 2011, p. 23).

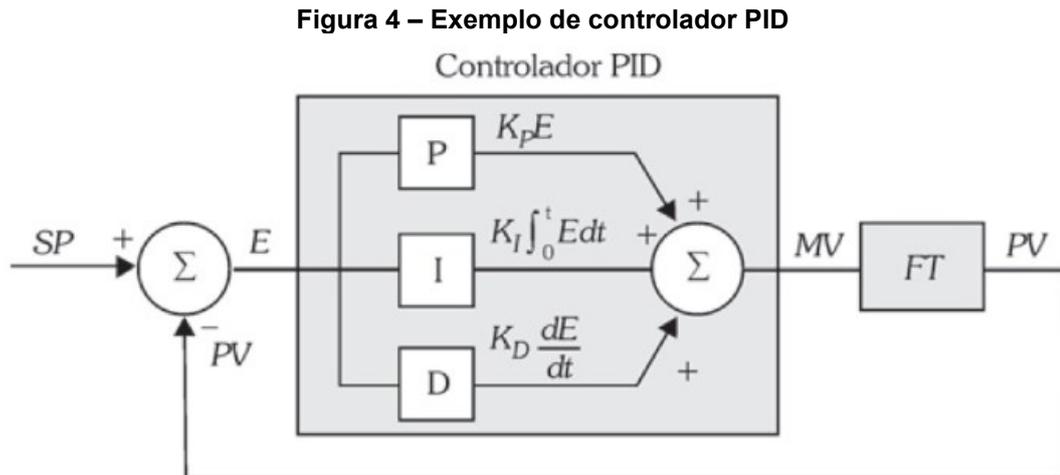
O principal objetivo de qualquer sistema de controle é minimizar ou eliminar o erro (também chamado de *offset*) que é definido como a diferença entre variável de processo e *setpoint*, assumindo valor positivo ou negativo (FRANCHI, 2011, p. 23).

A forma mais simples de implementar um sistema de controle é o tipo liga-desliga, também chamado de *on-off*, no qual o elemento final somente pode assumir duas posições: totalmente aberta ou totalmente fechada (FRANCHI, 2011, p. 93-94). Este tipo é aplicado em situações em que um controle muito preciso não é necessário.

Entretanto o algoritmo de controle mais usado na indústria é o controlador proporcional integral derivativo (PID) que combina três tipos de ação dos controladores como o próprio nome indica (GARCIA, 2018, p. 323). O controlador PID é facilmente implementado devido a sua versatilidade e robustez e não exige o uso de um modelo matemático do processo, contudo seu desempenho pode ser

insatisfatório com constantes de tempo grandes e/ou atrasos puros longos (GARCIA, 2018, p. 323).

Um exemplo ilustrativo de controlador PID padrão pode ser observado na Figura 4, na qual SP é o *setpoint*, PV é a variável do processo medida, E é o erro, MV é a variável manipulada e FT representa o processo sendo analisando.



Fonte: Franchi (2011, p. 124).

A expressão básica para a saída de um controlador PID é:

$$m(t) = m_{(t=0)} + K_C \left(e(t) + \frac{1}{\tau_I} \int e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (16)$$

Na qual $m(t)$ é a variável manipulada ao longo do tempo, K_C é o ganho proporcional, $m_{(t=0)}$ é o valor da variável manipulada no tempo zero, $e(t)$ representa o valor do erro ao longo do tempo, τ_I é o tempo integral e τ_D é o tempo derivativo (GARCIA, 2018, p. 380).

Os parâmetros de um controlador são obtidos através do processo chamado de sintonia de malha de controle. Este processo tem por objetivo selecionar os melhores valores para os parâmetros de forma que o sistema obtenha as respostas características desejadas (FRANCHI, 2011, p. 134). A sintonia pode ser realizada por tentativa e erro, mas existem metodologias disponíveis que otimizam o processo.

Um problema típico usado para avaliar o efeito e sintonia do controlador é o controle regulatório, no qual o controlador deve rejeitar uma perturbação de carga, ou seja, compensar os efeitos de perturbações externas com o objetivo de manter a saída da variável de processo próximo ao *setpoint*.

Importante observar que o tipo da ação do controlador depende do comportamento do processo (FRANCHI, 2011, p. 92). Se o processo reage de forma

que a variável de processo é diretamente proporcional a variável manipulada, o controlador deve fornecer uma ação dita direta. Já se o processo reage de forma que a variável de processo é inversamente proporcional a variável manipulada, o controlador deve fornecer uma ação dita inversa.

Desta forma, o erro pode ser fixado como *setpoint* menos o valor da variável do processo e valor de K_C deve ser negativo para ação direta e positivo para ação inversa. Por exemplo, para um vaso encamisado com variável de processo temperatura: se é processo de aquecimento com água quente, usa-se ação inversa e se é processo de resfriamento com água fria, usa-se ação direta.

4 DISCUSSÃO DAS SOLUÇÕES

Devido a tendência de cristalização em temperaturas iguais ou inferiores a 15°C do produto no formulador em dias frios é necessário propor soluções para evitar este risco.

A primeira solução proposta, de não operar em dias frios, não é adequada, pois limita o planejamento da produção e restringe a operação impedindo o atendimento da demanda requerida do produto.

A segunda solução proposta, de instalar uma resistência elétrica no vaso, atua na redução do risco de cristalização, mas a presença de um objeto na parte interna do formulador dificulta o processo de descontaminação, que ocorre ao final de cada produção em todos os equipamentos. Desta forma, esta solução não é adequada devido aos riscos de contaminação cruzada.

A terceira solução proposta reduz o risco de cristalização no formulador e apresenta um risco de contaminação, contudo o trocador de calor escolhido é do modelo de placas, o qual pode ser desmontado e limpo a cada descontaminação.

A quarta solução proposta é uma solução ideal ao processo requerido, mas apresenta custo elevado. Já a terceira solução apresenta menor custo e menor tempo de parada para alteração.

Desta forma, a solução proposta com maior adequação ao projeto é a proposta de instalação de um trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador. O diagrama P&ID da inclusão de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador atual pode ser visualizado no Apêndice B. A empresa DA utiliza uma convenção própria nos diagramas P&ID e neste estudo utilizou-se o padrão ISO que melhor representa os equipamentos descritos.

Para esta proposta, o aquecimento do trocador de calor de placas é realizado com água quente a 60°C ($T_{q,entrada}$) já disponível na fábrica e sugeriu-se a automatização de três válvulas e a inclusão de sistema de controle de temperatura no reator e no formulador.

Para estimar a área deste trocador de calor de placas, primeiramente é necessário determinar a taxa de transferência de calor através da equação 1, considerando as propriedades do produto similares a da água. Os valores considerados são $C_{p,f}=4,184$ kJ/kg·K a 330 K (valor coletado para água líquida em BERGMAN, 2019, p. 599), ΔT de 3°C para produto ($T_{f,entrada}=27^\circ\text{C}$ e $T_{f,saída}=30^\circ\text{C}$) e

vazão mássica de $\dot{m}_f=24.500$ kg/h. A vazão do fluido frio (\dot{m}_f) foi baseada na premissa que toda a massa do produto dentro do formulador deve ser aquecida em uma hora.

A taxa de transferência de calor determinada é $\dot{Q}=86,16$ kW e calculou-se que $T_{q,saída}$ é de 43,5 °C através da equação 1 considerando $C_{p,q}=4,217$ kJ/kg·K a 273,15 K (valor coletado para água líquida em BERGMAN, 2019, p. 599) e $\dot{m}_q=4.500$ kg/h.

A vazão mássica do fluido quente (\dot{m}_q) foi calculada com base em uma bomba preexistente na fábrica que pode ser utilizada para bobear a água quente. Esta bomba apresenta vazão volumétrica de 15 m³/h e considera-se que metade da vazão estará disponível para a função e a eficiência é de 60%.

A partir das temperaturas determinadas é possível calcular a ΔT_{ml} pela equação 5 e os valores de R1 e P1 podem ser obtidos através do gráfico da Figura 2. O valor encontrado de ΔT_{ml} é de 22,6 K e com R1=5,5 e P1=0,09 obtém-se o fator de correção $F_{MLDT}=0,98$.

A partir da equação 8 e utilizando $U=1.700$ W/m²·K (valor coletado de água para água em BERGMAN, 2019, p. 421), determinou-se que a área estimada do trocador de calor de placas desejado é de 2,29 m² e considerando um fator de segurança de 30%, esta área passa a ser de 3,0 m².

Avaliou-se que não existe a necessidade de considerar um fator de incrustação (R_d), visto que o trocador deverá ser desmontado e descontaminado ao final de cada campanha.

Com relação a estação de envase em isotanques, a proposta é a construção desta na bacia existente de carregamento de surfactante da fábrica, a qual cumpre os requisitos de segurança em caso de extravasamento. A estação de envase em isotanques inclui: plataforma, cobertura, ponto de ancoragem, braço e engate para bocal do isotanque. Dois exemplos de plataformas podem ser visualizados nas Figuras 5 e 6.

O engate do bocal de envase no isotanque deve ser realizado pelo bocal superior do isotanque (*manlid*), dado que caso ocorra vazamento no engate e/ou mangote não existe risco de esvaziar o tanque.

Figura 5 – Exemplo de plataforma de envase em isotanque



Fonte: Sam Carbis Solutions Group (2022).

Figura 6 – Exemplo de plataforma de envase em isotanque



Fonte: Sam Carbis Solutions Group (2022).

A linha do envase desta estação deve ser isolada para diminuir os riscos de cristalização na mesma, sendo proposto a automatização de uma válvula e a presença

de dois sistemas de controle de nível no bocal de carga: uma barreira de controle e uma barreira de segurança. O diagrama P&ID da estação proposta pode ser visualizado no Apêndice C.

O custo avaliado da implementação da proposta de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador juntamente com a estação de envase em isotanques é de U\$187.200 e está detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa de custos para proposta

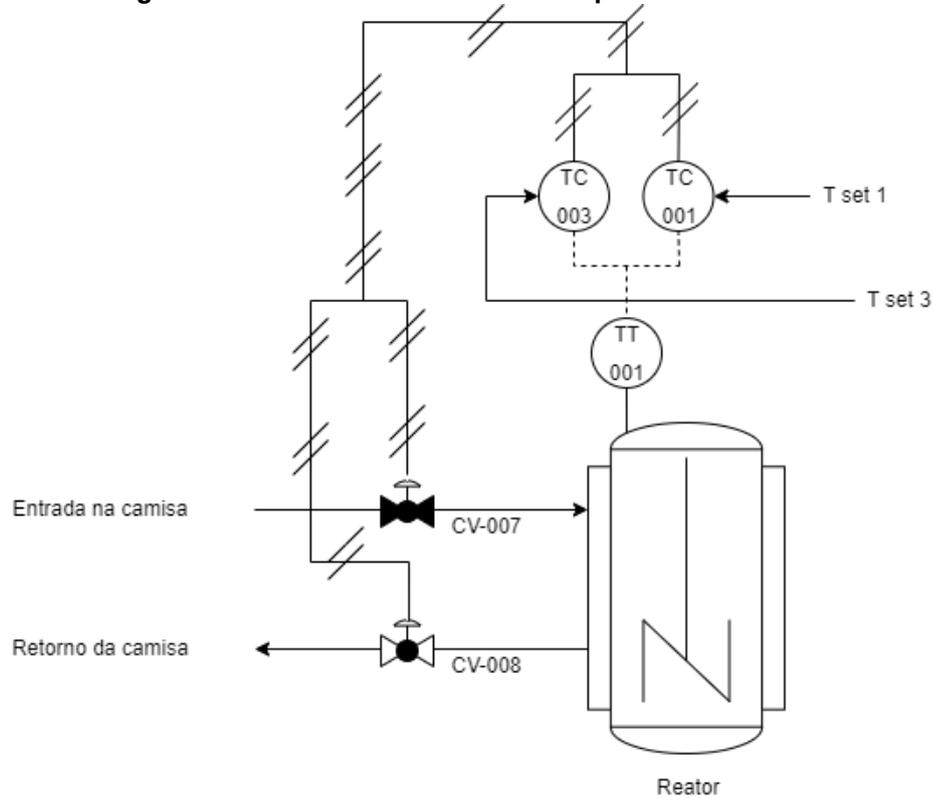
Item	Descrição	Custo estimado (U\$)
1	DESIGN	
1.1	Projetos mecânico e de processo	2.000
1.2	Projeto civil	1.000
1.3	Equipe de engenharia para suporte no projeto	5.000
	TOTAL (item 1)	8.000
2	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	
2.1	Equipamentos principais	17.500
2.2	Instrumentos de controle	7.500
2.3	Sistemas elétricos	3.500
2.4	Materiais elétricos e instrumentais	7.500
2.5	Materiais mecânicos	10.000
2.6	Material de pintura e material isolante	5.000
2.7	Outros materiais e/ou aluguel	5.000
	TOTAL (item 2)	56.000
3	MONTAGEM	
3.1	Mecânica e Processo	40.000
3.2	Elétrica e Instrumentação	20.000
3.3	Civil	5.000
3.4	Programação de software	15.000
	TOTAL (item 3)	80.000
	TOTAL (itens 1, 2 e 3)	144.000
4	CUSTOS NÃO PREVISTOS (+30%)	43.200
	TOTAL	187.200

Fonte: Setor de engenharia da empresa.

Como dito anteriormente, a proposta inclui três sistemas de controle: um controle de temperatura para reator, um controle de temperatura para formulador e um controle de nível para estação de envase em isotanques.

O sistema de controle de temperatura proposto para reator pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Sistema de controle de temperatura no reator



Fonte: Autor.

Importante observar que por segurança e para evitar o aumento de pressão na camisa, a válvula de entrada de vapor ou água quente na camisa do reator deve apresentar posição normal fechada e a válvula de saída de vapor ou água quente na camisa do reator é posição normal aberta.

Para este sistema utilizou-se dois controladores PID, no qual a variável manipulada é a porcentagem de abertura da válvula que alimenta água quente ou água resfriada na camisa do reator e a variável de processo é a temperatura do produto no reator (T_{reator}). Os valores de *setpoint* ($T_{setpoint}$) escolhidos são de 50 °C para aquecimento e de 30 °C para resfriamento e inicialmente a válvula da camisa está 100% aberta ($m(t=0)$).

Desta forma, o erro assume a seguinte equação:

$$e(t) = T_{setpoint} - T_{reator} \quad (17)$$

Para demonstrar a ação dos controladores é necessário simular o processo de aquecimento e de resfriamento no reator. Para isso, partiu-se dos balanços de

massa e de energia para camisa e do balanço de energia para reator, lembrando que o vaso é fechado durante processo. Conseqüentemente, utilizou-se a equação 14 para descrever o comportamento da temperatura na camisa, a equação 15 para descrever o comportamento da temperatura no reator e a equação 4 para descrever a troca de calor envolvida. Para simplificar a simulação, considerou-se que a porcentagem de abertura da válvula apresenta uma relação linear com a troca térmica entre camisa e reator, temperatura ambiente constante e que somente o reator não é isolado.

A partir das equações 17 e 16, é possível simular o processo na linguagem *python* no programa *Anaconda Distribution* (versão 2021.11) assumindo valores para os parâmetros da simulação, como volume da camisa, áreas de troca térmica e coeficientes globais de transferência de calor, entre outros. Durante simulação, aplicou-se um problema de controle regulatório e alterou-se o valor da temperatura ambiente de forma brusca, uma perturbação em degrau.

As equações consideradas na simulação foram:

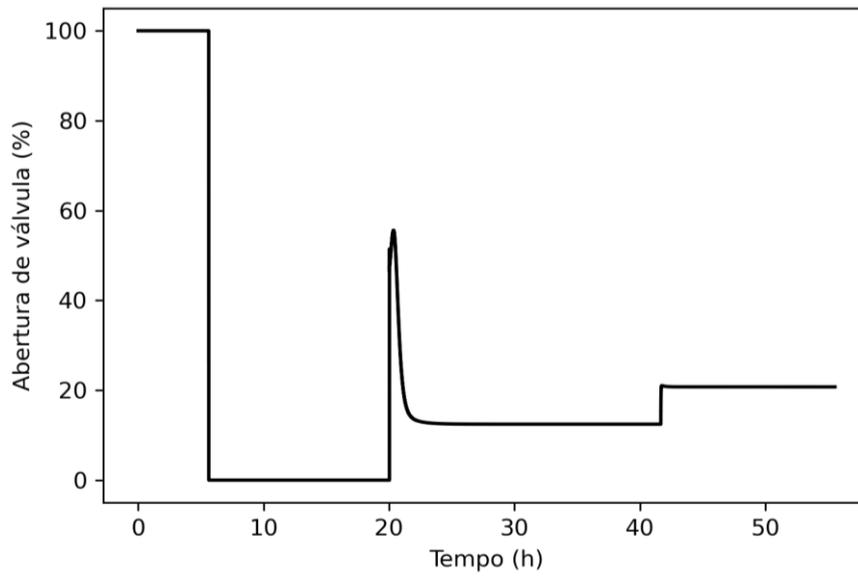
$$\frac{dT_R}{dt} = [U_R A_R QF(T_C - T_R) + U_E A_E (T_{amb} - T_R)] / \rho_R V_R C_{p,R} \quad (18)$$

$$\frac{dT_C}{dt} = [\rho_C Q_C C_{p,C} (T_{C,entrada} - T_C) + U_R A_R QF(T_R - T_C)] / \rho_C V_C C_{p,C} \quad (19)$$

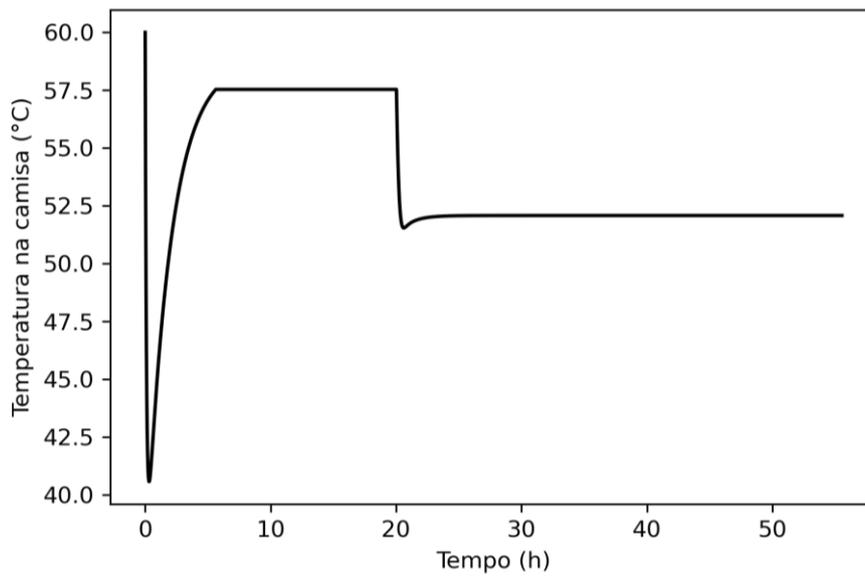
Nas quais U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área da superfície envolvida na troca térmica, QF representa a porcentagem de abertura da válvula de entrada de fluido na camisa, T é a temperatura, T_{amb} é a temperatura ambiente, ρ é densidade, V é o volume, C_p é o calor específico, Q é a vazão de fluido e as letras subscritas R , C e E representam reator, camisa e parte externa do reator em contato com ambiente, respectivamente.

Os códigos desenvolvidos no programa *Anaconda Distribution* (versão 2021.11) podem ser visualizados nos Apêndices D e E para o processo de aquecimento e resfriamento do reator, respectivamente.

Os resultados obtidos com a aplicação do controle PID para aquecimento do reator estão descritos nas Figuras 8, 9 e 10.

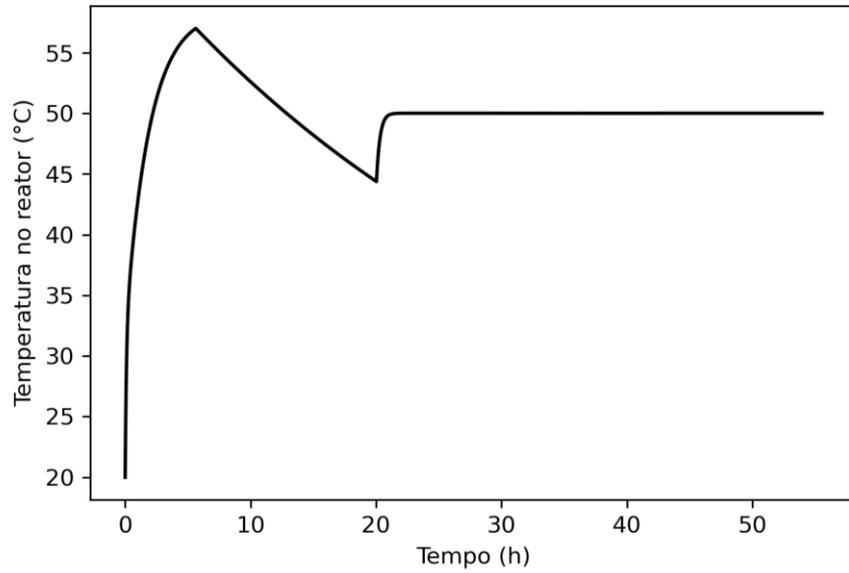
Figura 8 – Abertura de válvula durante aquecimento no reator pelo tempo

Fonte: Autor.

Figura 9 – Temperatura na camisa durante aquecimento no reator pelo tempo

Fonte: Autor.

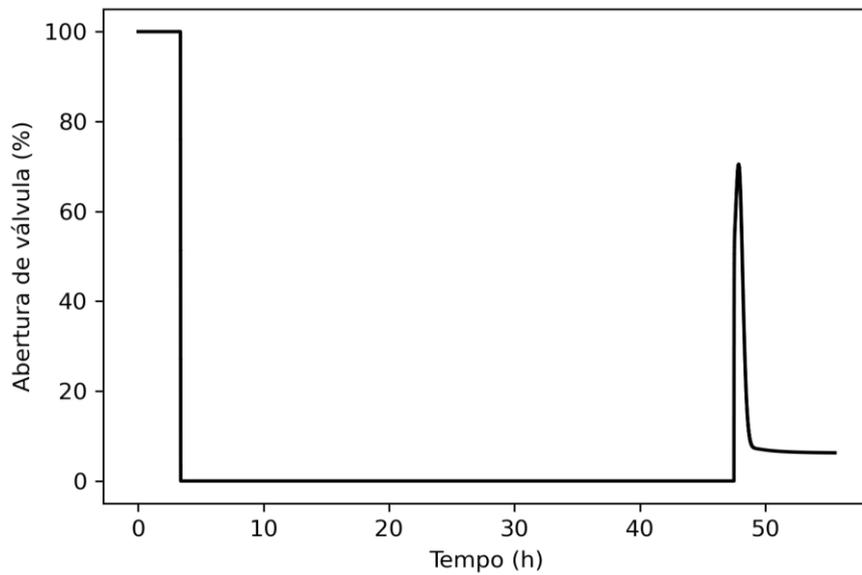
Figura 10 – Temperatura no reator durante aquecimento no reator pelo tempo



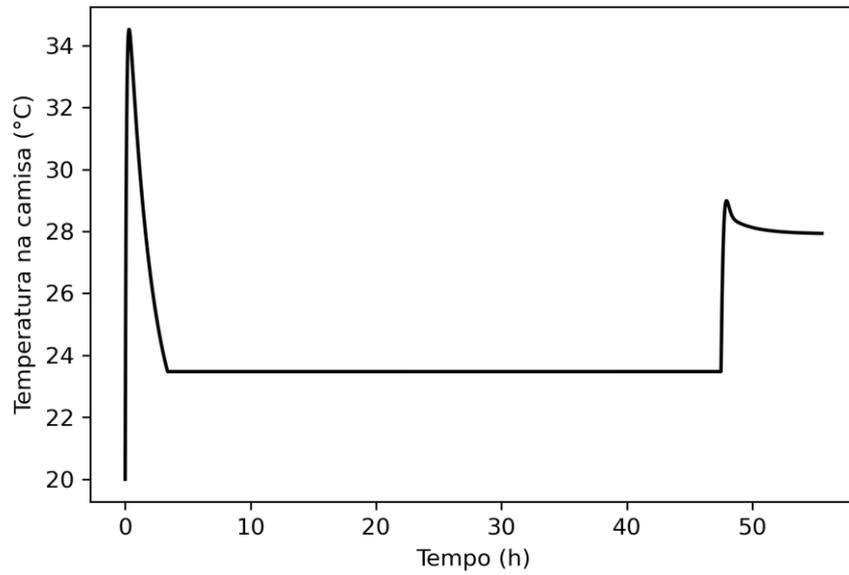
Fonte: Autor.

Os resultados obtidos com a aplicação do controle PID para resfriamento do reator estão descritos nas Figuras 11, 12 e 13.

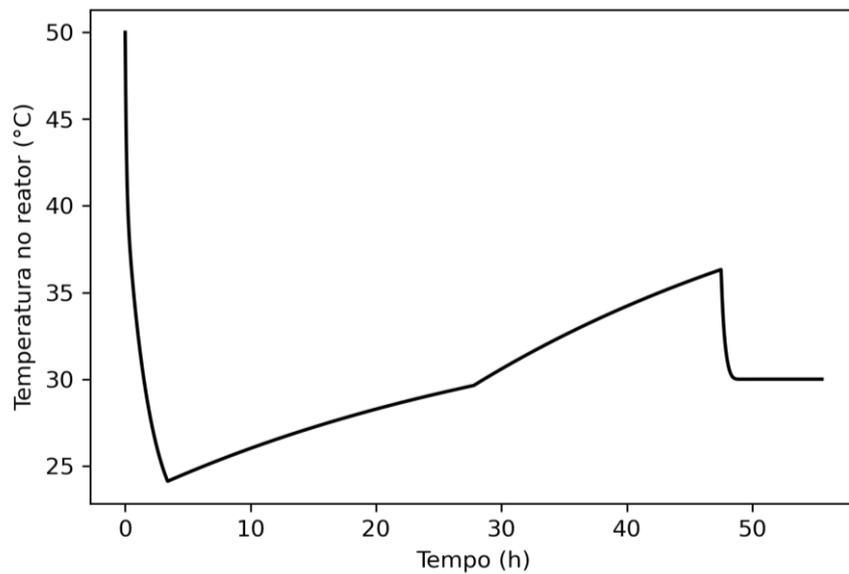
Figura 11 – Abertura de válvula durante resfriamento no reator pelo tempo



Fonte: Autor.

Figura 12 – Temperatura na camisa durante resfriamento no reator pelo tempo

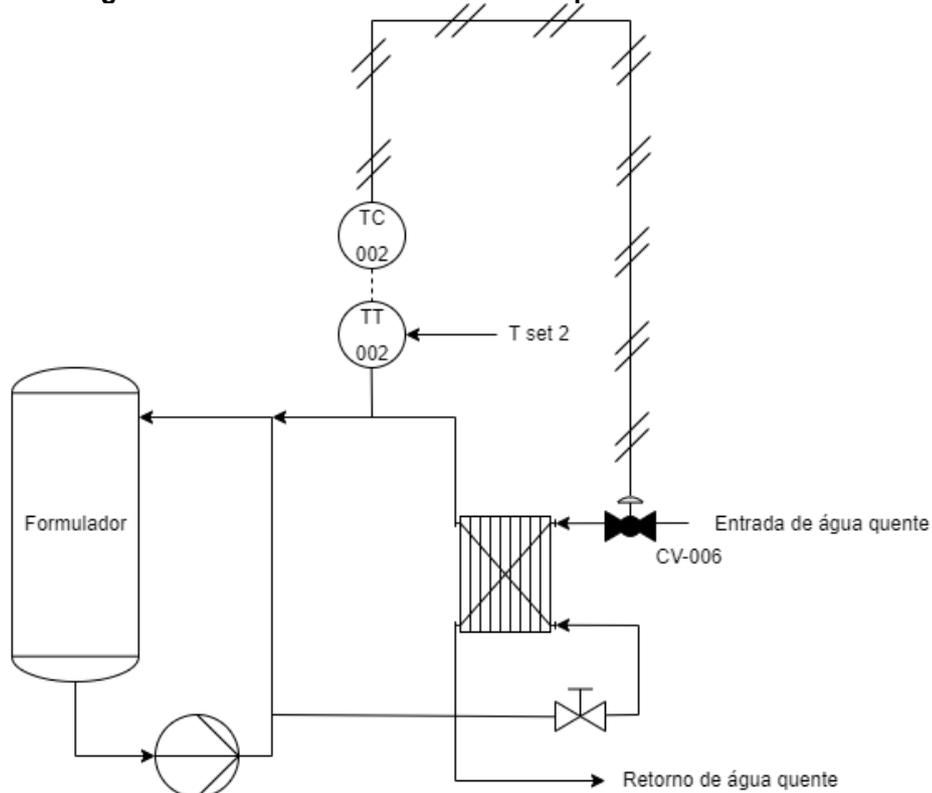
Fonte: Autor.

Figura 13 – Temperatura no reator durante resfriamento no reator pelo tempo

Fonte: Autor.

O sistema de controle de temperatura proposto para formulador pode ser visualizado na Figura 14. Importante observar que por segurança a válvula de entrada de água quente no trocador deve apresentar posição normal fechada.

Figura 14 – Sistema de controle de temperatura no formulador



Fonte: Autor.

Para este sistema utilizou-se um controlador PID, no qual a variável manipulada é a porcentagem de abertura da válvula que alimenta água quente no trocador de calor de placas, a variável de processo é a temperatura do produto na saída do trocador de placas ($T_{saídaTC}$), o *setpoint* escolhido é de 28,5 °C ($T_{setpoint}$) e inicialmente a válvula de vapor está 100% aberta ($m(t=0)$).

Desta forma, o erro assume a seguinte equação:

$$e(t) = T_{setpoint} - T_{saídaTC} \quad (20)$$

Para demonstrar a ação do controlador é necessário simular o processo de aquecimento no formulador. Para esta simulação, considerou-se o sistema de vaso com trocador de calor na linha de recirculação como um vaso fechado durante processo e encamisado. Assim, partiu-se dos balanços de massa e de energia para trocador de calor e do balanço de energia para formulador.

Conseqüentemente, utilizou-se a equação 14 para descrever o comportamento da temperatura no trocador, a equação 15 para descrever o comportamento da temperatura no formulador e a equação 4 para descrever a troca de calor envolvida. Para simplificar a simulação, considerou-se que a porcentagem de

abertura da válvula apresenta uma relação linear com a troca térmica entre trocador e formulador, temperatura ambiente constante e que somente o formulador não é isolado.

A partir das equações 16 e 20, é possível simular o processo na linguagem *python* no programa *Anaconda Distribution* (versão 2021.11) assumindo valores para os parâmetros da simulação, como volume do trocador, área externa da troca térmica com ambiente e coeficiente global de transferência de calor entre ambiente e formulador etc. Durante simulação, aplicou-se um problema de controle regulatório e alterou-se o valor da temperatura ambiente de forma brusca, uma perturbação em degrau.

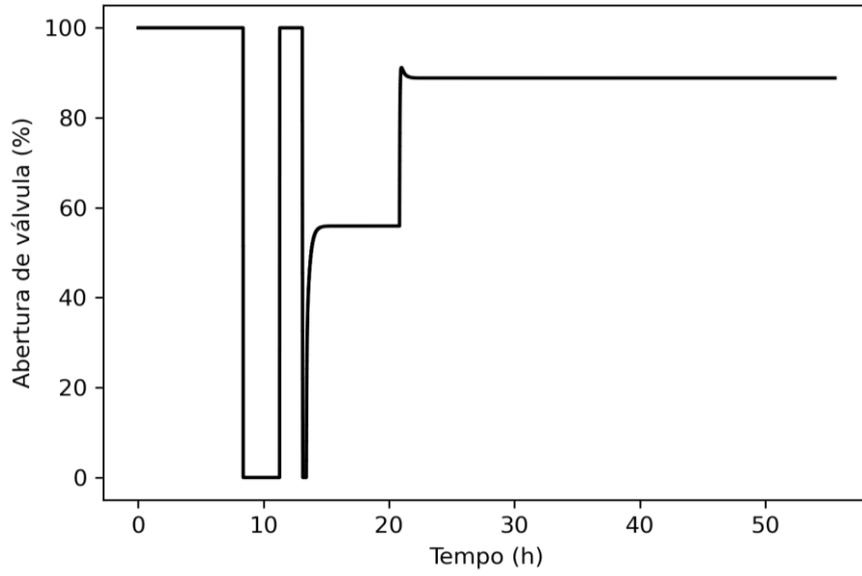
As equações consideradas na simulação foram:

$$\frac{dT_F}{dt} = [U_F A_F QF(T_C - T_F) + U_E A_E (T_{amb} - T_F)] / \rho_F V_F C_{p,F} \quad (21)$$

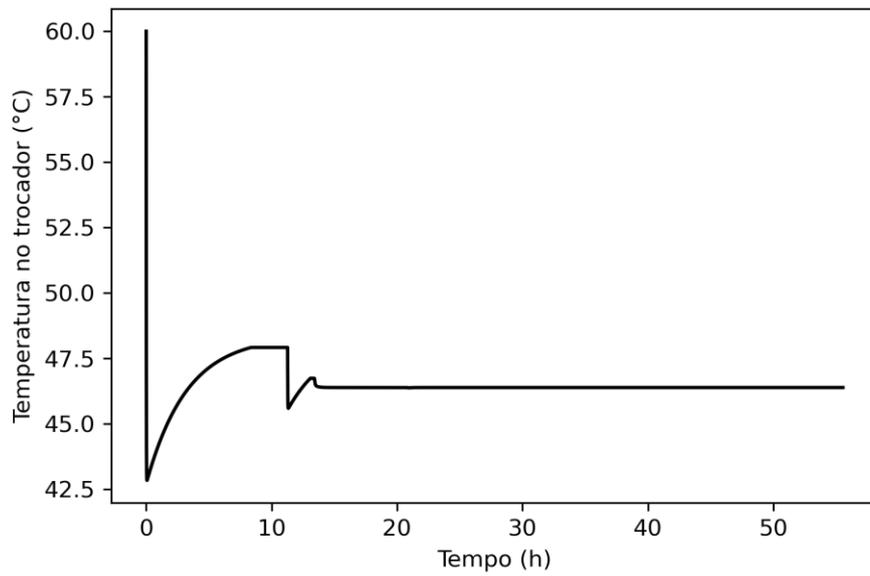
$$\frac{dT_C}{dt} = [\rho_C Q_C C_{p,C} (T_{C,entrada} - T_C) + U_F A_F QF(T_F - T_C)] / \rho_C V_C C_{p,C} \quad (22)$$

Nas quais U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área da superfície envolvida na troca térmica, QF representa a porcentagem de abertura da válvula de entrada de fluido na camisa, T é a temperatura, T_{amb} é a temperatura ambiente, ρ é densidade, V é o volume, C_p é o calor específico, Q é a vazão de fluido e as letras subscritas F , C e E representam formulador, camisa e parte externa do formulador em contato com ambiente, respectivamente.

O código desenvolvido no programa *Anaconda Distribution* (versão 2021.11) para o processo de aquecimento do formulador pode ser visualizado no Apêndice F e os resultados obtidos com a aplicação do controle PID no formulador estão descritos nas Figuras 15, 16 e 17.

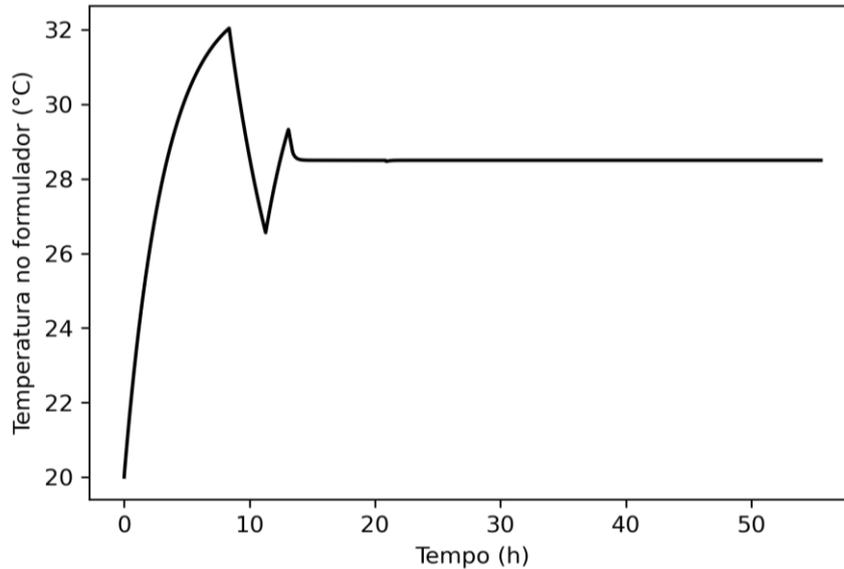
Figura 15 – Abertura de válvula durante resfriamento no formulador pelo tempo

Fonte: Autor.

Figura 16 – Temperatura no trocador durante aquecimento no formulador pelo tempo

Fonte: Autor.

Figura 17 – Temperatura no formulador durante aquecimento no formulador pelo tempo



Fonte: Autor.

A sintonia dos controladores propostos para reator e formulador foi realizada por tentativa e erro e os controles PID avaliados atingiram o objetivo de controlar a variável de processo, temperatura no vaso, próximo do *setpoint*.

As perturbações avaliadas nos controladores foram em degrau, contudo, em um sistema real, uma perturbação provavelmente seria em rampa (aumento ou diminuição gradual da variável). Entretanto se o controlador é capaz de atingir *setpoint* com uma perturbação em degrau, ele também poderá corrigir uma perturbação em rampa, somente sendo necessário um ajuste mais fino dos parâmetros do controlador.

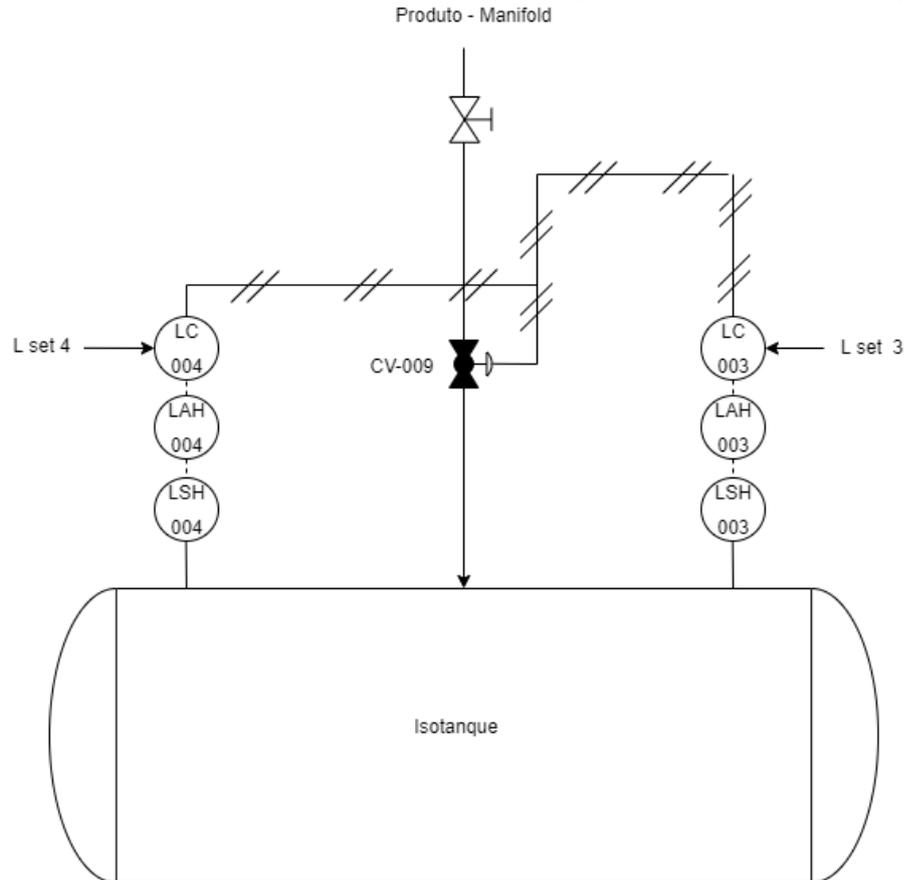
O sistema de controle de nível para envase em isotanques pode ser visualizado na Figura 18. Para evitar vazamentos, a válvula de entrada de produto no isotanque deve apresentar posição normal fechada.

Neste caso, propôs-se a presença de dois sistemas de controle de nível no bocal de carga, uma barreira de controle e uma barreira de segurança, e aplicou um controle do tipo *on-off* considerando que:

- se nível no tanque atingir valor de processo, a chave de nível alto LSH 003 é acionada e transmite sinal para alarme de nível alto LAH 003 e controlador de nível LC 003, assim válvula CV-009 é atuada;
- se nível no tanque atingir valor de segurança, chave de nível alto LSH 004 é acionada e transmite sinal para alarme de nível alto LAH 004 e controlador de nível LC 004, assim válvula CV-009 é atuada.

Importante notar que existiu o pressuposto que o volume do produto contido no formulador não ultrapassa o volume de controle escolhido para chave de nível alto LSH 003 e desta forma, adiciona-se mais uma camada de segurança para evitar transbordo.

Figura 18 – Sistema de controle de nível na estação de envase em isotanques



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

Este estudo de caso propôs algumas soluções para o problema de cristalização do produto no formulador, bem como uma solução para o envase em isotanques do produto.

A solução que melhor se adequou a necessidade da empresa é a proposta de instalação de um trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador e a instalação de uma estação de envase em isotanques na planta. Através desta solução será possível realizar a produção do produto requerido sem a ocorrência de cristalização e a inclusão dos sistemas de controle aumenta a segurança e reduz o tempo de processo, aumentando a capacidade.

Para análises futuras é interessante aprimorar o modelo de simulação do processo e determinar valores mais precisos dos parâmetros assumidos, além de refinar a sintonia dos controladores utilizando metodologias empíricas.

REFERÊNCIAS

ANACONDA Distribution. **Anaconda**, Versão 2021.11, 2021. Disponível em: <https://www.anaconda.com/products/distribution>. Acesso em 21 maio 2022.

AFONSO, M. M. F. **Análise de risco visando à prevenção de contaminação cruzada em uma planta de formulação de inseticidas e fungicidas**. 2015. Trabalho de Graduação (Engenheira Industrial Química) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2015/MIQ15024.pdf>. Acesso em 08 maio 2022.

BERGMAN, T. L. **Incropera Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BERMO. BP6 - Trocador de Calor a Placas Gaxetado. **Trocador de Calor a Placas**. 2022. Disponível em: <https://bermo.com.br/produtos/detalhes/bp6-trocador-de-calor-a-placas-gaxetado/>. Acesso em 08 maio 2022.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012.

COBB, A.; READE, J. **Herbicides and Plant Physiology**. 2. ed. Singapore: Wiley-Blackwell, 2010.

CORREIA, N. M. Herbicidas. **Informe Agropecuário**, v. 42, n. 315, p. 48-58, 2021. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1140443>. Acesso em 08 maio 2022.

COSTA, C.B. B.; GIULIETTI, M. **Introdução à cristalização**: princípios e aplicações. São Carlos: EdUFSCar, 2010. Disponível em: http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2771/1/TS_Caliane_IntroCristalizacao.pdf. Acesso em 08 maio 2022.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Pesticides use, pesticides trade and pesticides indicators 1990–2019. **FAOSTAT Analytical Brief**, v. 29, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/card/fr/c/cb6034en/>. Acesso em 08 maio 2022.

FRANCHI, C. M. **Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais: Estratégias Convencionais**. Volume 1. São Paulo: Blucher, 2018.

INDUSTRYARC. Herbicides Market – Forecast (2022 - 2027). **Herbicides Market**. 2018. Disponível em: <https://www.industryarc.com/Report/15124/herbicides-market.html#:~:text=As%20per%20the%20IndustryARC%20business,period%20of%202019%20to%202025>. Acesso em 08 maio 2022.

MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S.; GUIMARÃES, T. G. **Herbicidas**: mecanismos de ação e uso. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2010/30295/1/doc-227.pdf>. Acesso em 08 maio 2022.

MÉRIEUX NUTRISCIENCES. Elimine o risco de Contaminação Cruzada e maximize sua produção. **Mérieux NutriSciences**. 2020. Disponível em: http://www.aenda.org.br/wp-content/uploads/2020/04/cir0381-anexo-agro_contaminacao_cruzada.pdf. Acesso em 08 maio 2022.

POPP, J.; PETŐ, K.; NAGY, J. Pesticide productivity and food security. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 33, n.1, p. 243-255, jan. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-012-0105-x>. Acesso em 08 maio 2022.

ROMAN, E. S.; BECKIE, H.; VARGAS, L.; HALL, L.; RIZZARDI, M. A.; WOLF, T. M. **Como funcionam os herbicidas: da biologia à aplicação**. Passo Fundo: Berthier, 2007. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/1355291/12492345/Como+funcionam+os+herbicidas/954b0416-031d-4764-a703-14d9b28b178e?version=1.0#:~:text=COMO%20OS%20HERBICIDAS%20MATAM%20AS%20PLANTAS&text=A%20morte%20das%20plantas%20tratadas,assim%2C%20a%20planta%20%C3%A0%20morte>. Acesso em 08 maio 2022.

SAM CARBIS SOLUTIONS GROUP. ISO Container Loading Platforms. **Products**. 2022. Disponível em: <https://www.carbissolutions.com/product/iso-container-loading-platforms/>. Acesso em 08 maio 2022.

SIBALDELLI, R. N. R.; GONÇALVES, S. L.; FARIAS, J. R. B. **Boletim Agrometeorológico da Embrapa Soja, Londrina, PR – 2020**. Londrina: Embrapa Soja, 2021. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1130506>. Acesso em 08 maio 2022.

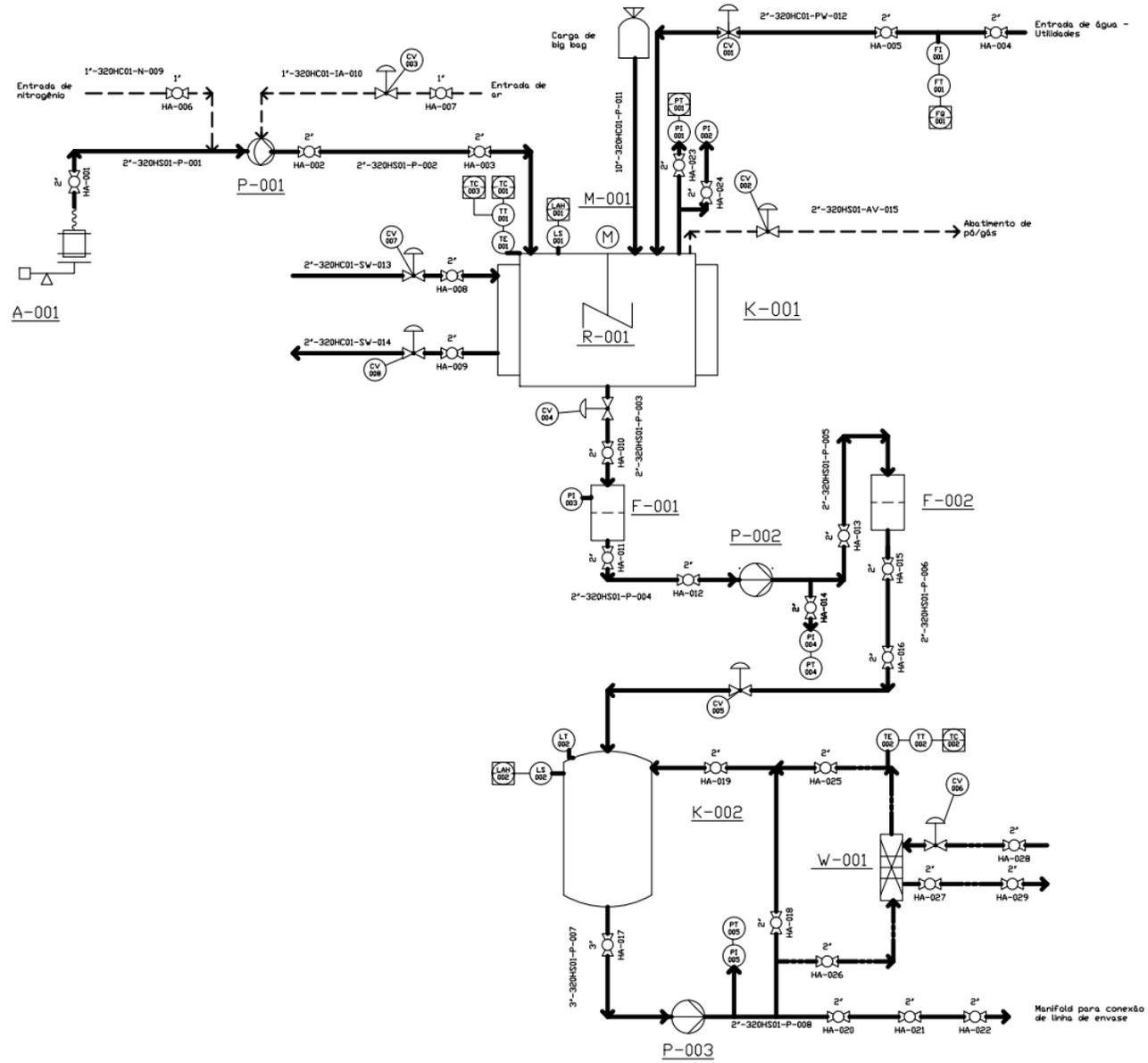
TADINI, C. C. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. Volume 1. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

TOGHRAEI, M. **Piping and Instrumentation Diagram Development**. 1 ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019.

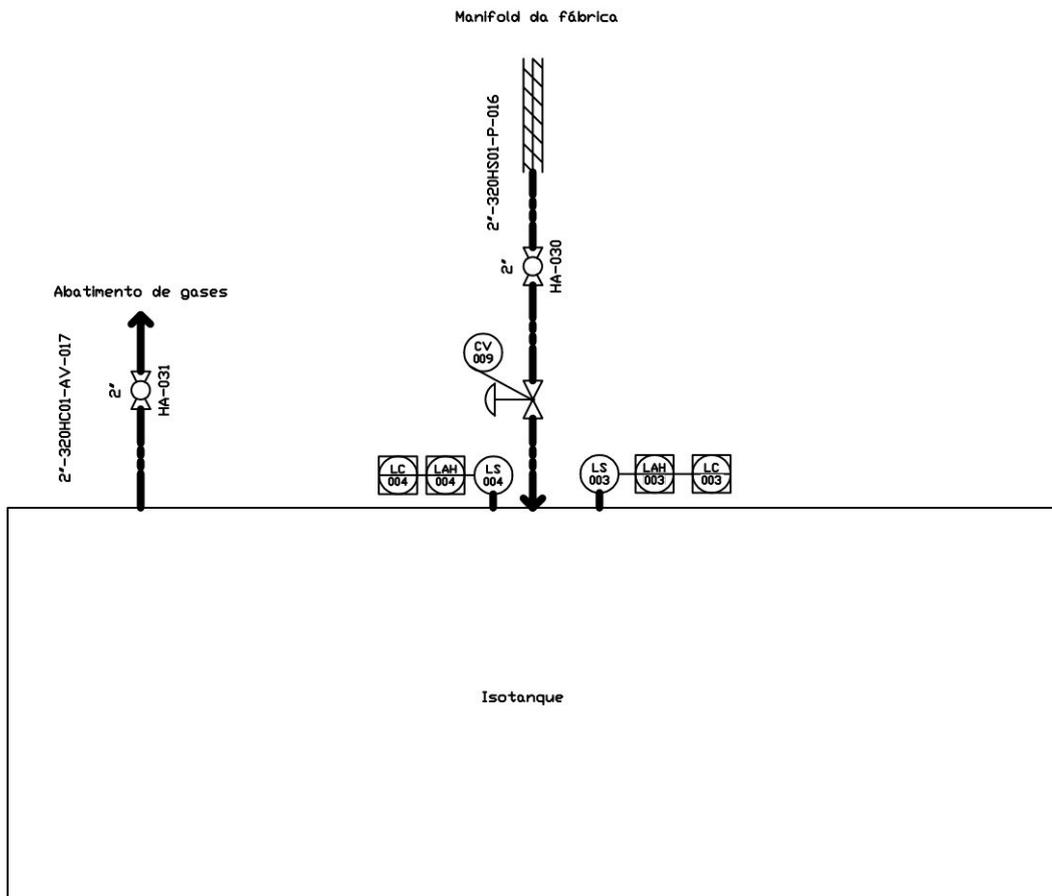
UCL (Ueno Container Logistics). ISO Tank Container Overview. **ISO Tanks**. 2022. Disponível em: <http://www.uenologistics.com/iso-tanks.html>. Acesso em 08 maio 2022.

APÊNDICE A - Diagrama P&ID da planta atual da fábrica

APÊNDICE B - Diagrama P&ID da proposta de instalação de trocador de calor de placas na linha de recirculação do formulador



APÊNDICE C - Diagrama P&ID da proposta de envase em isotanques



APÊNDICE D - Código em *python* para simulação de sistema de controle no reator - aquecimento

```

%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

#dados
cp=4.217*1000 #cp J/(kgK)
V=5.104 # volume m3
p=1.27*1000 #densidade kg/m3
U=1700 # coeficiente global de troca térmica W/m2K--> consideração
A=15 #área térmica m2--> consideração
Vc=3 #volume da camisa m3 --> consideração
Q=1.25/1000 #vazão na camisa m3/s --> consideração
Tce=60+273.15 # temperatura de entrada na camisa K
Ae=22 #área térmica externa do RTI m2 --> consideração
Tamb=20+273.15 # Temperatura ambiente K
Ue=10 # coeficiente global de troca térmica para área externa do RTI W/m2K -->
consideração

#valor inicial da variável manipulada
QF0=1 #Fator Vazão

#CI
T0=20+273.15 # Temperatura no vaso no t=0 (CI) K
Tc0=60+273.15 # Temperatura no TC no t=0 (CI) K

def FuncaoTanque(M,t):
    T,Tc=M
    Qc=Q*QF
    dT_dt=(U*A*QF*(Tc-T) + Ue*Ae*(Tamb-T))/(V*p*cp) #função definida
    dTc_dt=(U*A*QF*(T-Tc) + p*Qc*cp*(Tce-Tc))/(Vc*p*cp) #função definida
    return (dT_dt, dTc_dt)

num=5
delta_t=10 #tempo para atuação do controlador
t0=0 #começa em zero

# cria vetores vazios
T_vetor=[]
t_vetor=[]
QF_vetor=[]
Tc_vetor=[]
M=[]

#dados
Kc=10 # ação inversa --> positivo
Taul=1000
TauD=0 # usa mais para processos rápidos e oscilatórios

#para 1ª iteração

```

```

I=0 #começa em zero
e=0 # com erro=0 para q na 1ª iteração não exista ação de controle
e_anterior=0

# Define o set-point:
Tset=50+273.15

ne=20000
for i in range(0,ne):
    P=e
    I=e*delta_t+I
    D=(e-e_anterior)/delta_t
    QF=QF0+Kc*(P+(1/TauI)*I+TauD*D) #equação do controle PID

    #anti-reset
    if QF>1:
        QF=1
    if QF<0:
        QF=0

    for i in range (num):
        QF_vetor=np.append(QF_vetor,QF)

    tf=t0+delta_t
    t=np.linspace(t0,tf,num)
    M=odeint(FuncaoTanque, [T0,Tc0],t) # chama a função com os valores
    atualizados
    t0=tf

    #problema regulatório: distúrbio na temperatura ambiente
    if tf==150000:
        Tamb=0+273.15

    T=M[:,0]
    Tc=M[:,1]
    e=Tset-T[num-1] #calcula o erro atual --> Tset-ultimo T
    e_anterior=Tset-T[0] #calcula o erro anterior --> Tset-primeiro T
    T0=T[num-1]
    Tc0=Tc[num-1]

    Tc_vetor=np.append(Tc_vetor,Tc)
    T_vetor=np.append(T_vetor,T)
    t_vetor=np.append(t_vetor,t)

# conversão de unidades
t_vetor2=[]
T_vetor2=[]
Tc_vetor2=[]
QF_vetor2=[]

```

```
for i in range(len(t_vetor)):
    t2=t_vetor[i]/3600
    t_vetor2=np.append(t_vetor2,t2)
    T2=T_vetor[i]-273.15
    T_vetor2=np.append(T_vetor2,T2)
    Tc2=Tc_vetor[i]-273.15
    Tc_vetor2=np.append(Tc_vetor2,Tc2)
    QF2=QF_vetor[i]*100
    QF_vetor2=np.append(QF_vetor2,QF2)

plt.plot(t_vetor2,T_vetor2,color='black') #Temperatura no FML vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura no reator (°C)') # Eixo y
plt.savefig('RTI1TemperaturaRTI.png', format='png',dpi=300)

plt.plot(t_vetor2,Tc_vetor2,color='black') #Temperatura na camisa vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura na camisa (°C)') # Eixo y
plt.savefig('RTI1Temperaturacamisa.png', format='png',dpi=300)

plt.plot(t_vetor2,QF_vetor2,color='black') #Abertura de válvula vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Abertura de válvula (%)') # Eixo y
plt.savefig('RTI1Aberturavalv.png', format='png',dpi=300)
```

APÊNDICE E - Código em *python* para simulação de sistema de controle no reator – resfriamento

```

%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

#dados
cp=4.217*1000 #cp J/(kgK)
V=5.104 # volume m3
p=1.27*1000 #densidade kg/m3
U=1700 # coeficiente global de troca térmica W/m2K--> consideração
A=15 #área térmica m2--> consideração
Vc=3 #volume da camisa m3 --> consideração
Q=1.25/1000 #vazão na camisa m3/s --> consideração
Tce=20+273.15 # temperatura de entrada na camisa K
Ae=22 #área térmica externa do RTI m2 --> consideração
Tamb=35+273.15 # Temperatura ambiente K
Ue=10 # coeficiente global de troca térmica para área externa do RTI W/m2K -->
consideração

#valor inicial da variável manipulada
QF0=1 #Fator Vazão

#CI
T0=50+273.15 # Temperatura no vaso no t=0 (CI) K
Tc0=20+273.15 # Temperatura no TC no t=0 (CI) K

def FuncaoTanque(M,t):
    T,Tc=M
    Qc=Q*QF
    dT_dt=(U*A*QF*(Tc-T) + Ue*Ae*(Tamb-T))/(V*p*cp) #função definida
    dTc_dt=(U*A*QF*(T-Tc) + p*Qc*cp*(Tce-Tc))/(Vc*p*cp) #função definida
    return (dT_dt, dTc_dt)

num=5
delta_t=10 #tempo para atuação do controlador
t0=0 #começa em zero

# cria vetores vazios
T_vetor=[]
t_vetor=[]
QF_vetor=[]
Tc_vetor=[]
M=[]

#dados
Kc=-2 # ação direta --> negativo
Taul=1000
TauD=2 # usa mais para processos rápidos e oscilatórios

#para 1ª iteração

```

```

I=0 #começa em zero
e=0 # com erro=0 para q na 1ª iteração não exista ação de controle
e_anterior=0

# Define o set-point:
Tset=30+273.15

ne=20000
for i in range(0,ne):
    P=e
    I=e*delta_t+I
    D=(e-e_anterior)/delta_t
    QF=QF0+Kc*(P+(1/TauI)*I+TauD*D) #equação do controle PID

    #anti-reset
    if QF>1:
        QF=1
    if QF<0:
        QF=0

    for i in range (num):
        QF_vetor=np.append(QF_vetor,QF)

    tf=t0+delta_t
    t=np.linspace(t0,tf,num)
    M=odeint(FuncaoTanque, [T0,Tc0],t) # chama a função com os valores
    atualizados
    t0=tf

    #problema regulatório: distúrbio na temperatura ambiente
    if tf==100000:
        Tamb=45+273.15

    T=M[:,0]
    Tc=M[:,1]
    e=Tset-T[num-1] #calcula o erro atual --> Tset-ultimo T
    e_anterior=Tset-T[0] #calcula o erro anterior --> Tset-primeiro T
    T0=T[num-1]
    Tc0=Tc[num-1]

    Tc_vetor=np.append(Tc_vetor,Tc)
    T_vetor=np.append(T_vetor,T)
    t_vetor=np.append(t_vetor,t)

# conversão de unidades
t_vetor2=[]
T_vetor2=[]
Tc_vetor2=[]
QF_vetor2=[]
for i in range(len(t_vetor)):

```

```
t2=t_vetor[i]/3600
t_vetor2=np.append(t_vetor2,t2)
T2=T_vetor[i]-273.15
T_vetor2=np.append(T_vetor2,T2)
Tc2=Tc_vetor[i]-273.15
Tc_vetor2=np.append(Tc_vetor2,Tc2)
QF2=QF_vetor[i]*100
QF_vetor2=np.append(QF_vetor2,QF2)

plt.plot(t_vetor2,T_vetor2,color='black') #Temperatura no RTI vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura no reator (°C)') # Eixo y
plt.savefig('RTI2TemperaturaRTI.png', format='png',dpi=300)

plt.plot(t_vetor2,Tc_vetor2,color='black') #Temperatura na camisa vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura na camisa (°C)') # Eixo y
plt.savefig('RTI2Temperaturacamisa.png', format='png',dpi=300)

plt.plot(t_vetor2,QF_vetor2,color='black') #Abertura de válvula vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Abertura de válvula (%)') # Eixo y
plt.savefig('RTI2Aberturavalv.png', format='png',dpi=300)
```

APÊNDICE F - Código em *python* para simulação de sistema de controle no formulador

```

%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.integrate import odeint

#dados
cp=4.217*1000 #cp J/(kg*K)
V=19.291 # volume m3
p=1.27*1000 #densidade kg/m3
U=1700 # coeficiente global de troca térmica W/m2K
A=3 #área térmica m2
Vc=0.075 #volume do trocador m3 --> consideração
Q=1.25/1000 #vazão no trocador m3/s
Tce=60+273.15 # temperatura de entrada no trocador K
Ae=60 #área térmica externa do FML m2 --> consideração
Tamb=20+273.15 # Temperatura ambiente K
Ue=100 # coeficiente global de troca térmica para área externa do FML W/m2K -->
consideração

#valor inicial da variável manipulada
QF0=1 #Fator Vazão

#CI
T0=20+273.15 # Temperatura no vaso no t=0 (CI) K
Tc0=60+273.15 # Temperatura no TC no t=0 (CI) K

def FuncaoTanque(M,t):
    T,Tc=M
    Qc=Q*QF
    dT_dt=(U*A*QF*(Tc-T) + Ue*Ae*(Tamb-T))/(V*p*cp) #função definida
    dTc_dt=(U*A*QF*(T-Tc) + p*Qc*cp*(Tce-Tc))/(Vc*p*cp) #função definida
    return (dT_dt, dTc_dt)

num=5
delta_t=10 #tempo para atuação do controlador
t0=0 #começa em zero

# cria vetores vazios
T_vetor=[]
t_vetor=[]
QF_vetor=[]
Tc_vetor=[]
M=[]

#dados
Kc=10 # ação inversa --> positivo
Taul=1000
TauD=0 # usa mais para processos rápidos e oscilatórios

#para 1ª iteração

```

```

I=0 #começa em zero
e=0 # com erro=0 para q na 1ª iteração não exista ação de controle
e_anterior=0

# Define o set-point:
Tset=28.5+273.15
ne=20000
for i in range(0,ne):
    P=e
    I=e*delta_t+I
    D=(e-e_anterior)/delta_t
    QF=QF0+Kc*(P+(1/TauI)*I+TauD*D) #equação do controle PID

    #anti-reset
    if QF>1:
        QF=1
    if QF<0:
        QF=0

    for i in range (num):
        QF_vetor=np.append(QF_vetor,QF)

    tf=t0+delta_t
    t=np.linspace(t0,tf,num)
    M=odeint(FuncaoTanque, [T0,Tc0],t) # chama função com valores atualizados
    t0=tf

    #problema regulatório: distúrbio na temperatura ambiente
    if tf==75000:
        Tamb=15+273.15

    T=M[:,0]
    Tc=M[:,1]
    e=Tset-T[num-1] #calcula o erro atual --> Tset-ultimo T
    e_anterior=Tset-T[0] #calcula o erro anterior --> Tset-primeiro T
    T0=T[num-1]
    Tc0=Tc[num-1]

    Tc_vetor=np.append(Tc_vetor,Tc)
    T_vetor=np.append(T_vetor,T)
    t_vetor=np.append(t_vetor,t)

# conversão de unidades
t_vetor2=[]
T_vetor2=[]
Tc_vetor2=[]
QF_vetor2=[]

for i in range(len(t_vetor)):
    t2=t_vetor[i]/3600

```

```
t_vetor2=np.append(t_vetor2,t2)
T2=T_vetor[i]-273.15
T_vetor2=np.append(T_vetor2,T2)
Tc2=Tc_vetor[i]-273.15
Tc_vetor2=np.append(Tc_vetor2,Tc2)
QF2=QF_vetor[i]*100
QF_vetor2=np.append(QF_vetor2,QF2)

plt.plot(t_vetor2,T_vetor2,color='black') #Temperatura no FML vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura no formulador (°C)') # Eixo y
plt.savefig('FMLTemperaturaFML.png', format='png',dpi=300)
plt.show()

plt.plot(t_vetor2,Tc_vetor2,color='black') #Temperatura no trocador vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Temperatura no trocador (°C)') # Eixo y
plt.savefig('FMLTemperaturaTC.png', format='png',dpi=300)
plt.show()

plt.plot(t_vetor2,QF_vetor2,color='black') #Abertura de válvula vs tempo
plt.xlabel('Tempo (h)') # Eixo x
plt.ylabel('Abertura de válvula (%)') # Eixo y
plt.savefig('FMLaberturavalv.png', format='png',dpi=300)
plt.show()
```