

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
ENGENHARIA QUÍMICA

FELIPE KREFT BATISTA

DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UM SISTEMA DE
PASTEURIZAÇÃO DE LEITE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Química
da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita filho” como
requisito parcial para a obtenção de
título de bacharel em engenharia
química

Orientador: Prof Dr. Elias de Souza
Monteiro Filho

ARARAQUARA, 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA
FILHO”
ENGENHARIA QUÍMICA

FELIPE KREFT BATISTA

DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UM SISTEMA DE
PASTEURIZAÇÃO DE LEITE

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Química
da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita filho” como
requisito parcial para a obtenção de
título de bacharel em engenharia
química

Orientador: Prof Dr. Elias de Souza
Monteiro Filho

ARARAQUARA, 2022

B333d Batista, Felipe Kreft
Desenvolvimento e estudo de um sistema de pasteurização de leite / Felipe Kreft Batista. -- Araraquara, 2023
36 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Química, Araraquara
Orientador: Elias de Souza Monteiro Filho

1. Simulação por computador. 2. Pasteurização. 3. Processos químicos. 4. Permutadores térmicos. 5. Laticínios. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Química, Araraquara. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Felipe Kreft Batista

Desenvolvimento e estudo de um sistema de pasteurização de leite

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Química
da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita filho” como
requisito parcial para a obtenção de
título de bacharel em engenharia
química

Orientador: Prof Dr. Elias de Souza
Monteiro Filho

Documento assinado digitalmente
 ELIAS DE SOUZA MONTEIRO FILHO
Data: 23/01/2023 13:15:05-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho (orientador)

Instituto de Química – UNESP Araraquara

 ARNALDO SARTI
Data: 24/01/2023 09:27:18-0300
Verifique em <https://verificador.itl.br>

Prof. Dr. Arnaldo Sarti

Instituto de Química – UNESP Araraquara



Assinado de forma digital por
LORENA OLIVEIRA PIRES
Dados: 2023.01.23 19:45:12 -03'00'

Prof^a. Dr^a. Lorena Oliveira Pires

Instituto de Química – UNESP Araraquara

RESUMO

O leite é a matéria-prima para a indústria de laticínios, o segundo maior segmento na indústria alimentícia brasileira em 2018. Como o leite é um substrato altamente nutritivo, ele é um meio de cultivo de microorganismos, úteis para a produção de fermentados, mas também de patógenos causadores de moléstias como tuberculose, brucelose e febre Q. Para prevenir este risco e aumentar a vida de prateleira do produto, a pasteurização foi desenvolvida. Neste trabalho está ilustrado um estudo de caso, onde foi desenvolvida e estudada uma instalação de uma pasteurizadora de leite de consumo. Foi elaborado um Diagrama de Fluxo de Processo com o uso do software DWSim; o estudo térmico do trocador de calor do tipo placa foi feito e constatou a afirmação da literatura de que os modelos correlacionais de coeficientes globais de troca térmica para trocadores de calor do tipo placa não se adequam com os valores reportados na literatura; a análise de sensibilidade da área total do sistema versus a temperatura de saída do regenerador versus áreas destinadas ao aquecimento indicou um comportamento interessante entre a área de $0,2\text{m}^2$ e $0,3\text{m}^2$: há um intervalo de área total onde a área de $0,2\text{m}^2$ é superior à área de $0,3\text{m}^2$ mas esse valor se inverte com o aumento da área. O consumo energético do sistema foi calculado em $49,7$ (J/kg leite pasteurizado) e demonstrou-se também que o uso do regenerador apresenta uma economia energética de $46,2\%$ (sem o uso do regenerador), o que faz desse equipamento essencial para a operação eficiente do sistema. A redução decimal do microorganismo alvo (*Coxiella burnetii*) foi calculada em 8 ordens de grandeza para um tempo de retenção de 18 segundos bem como as dimensões do tubo de retenção foram calculadas em $2'' \times 112$ cm de comprimento

Palavras-chave: Simulação de processos, pasteurização, DWSim, trocas térmicas

ABSTRACT

Milk is the raw material for the dairy industry, the second largest segment in the Brazilian food industry in 2018. As milk is a highly nutritious substrate, it is a culture medium for microorganisms, useful for the production of fermented products, but also for pathogens that cause diseases such as tuberculosis, brucellosis and Q fever. To prevent this risk and increase the shelf life of the product, pasteurization was developed. In this work, a case study is illustrated, where a pasteurizing installation for drinking milk was developed and studied. A process flow diagram was prepared using the DWSim software; the thermal study of the gasketed-type heat exchanger was carried out and concluded the assertion in the literature that the correlational models of global thermal exchange coefficients for gasketed-type heat exchangers do not match the values reported in the literature; the sensitivity analysis of the total area of the system versus the regenerator output temperature versus areas destined for heating indicated an interesting behavior between the areas of 0.2m² and 0.3m²: there is a range of total area where the area of 0.2m² provides better heat recovery than the area of 0.3 m², but this value is inverted as the total area increases. The energy consumption of the system was calculated at 49.7 (J/kg pasteurized milk) and it was also demonstrated that the use of the regenerator presents an energy saving of 46.2% (compared to without the use of the regenerator), which makes this equipment essential for the efficient operation of the system. The decimal reduction of the target microorganism (*Coxiella burnetii*) was calculated in 8 orders of magnitude for a retention time of 18 seconds as well as the dimensions of the retention tube were calculated in 2" x 112 cm in length

Key-words: Process simulation, pasteurization, DWSim, heat exchanges

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de um processo de pasteurização com PHE	6
Figura 2: Esquema de um trocador de calor de placas, PHE	9
Figura 3: Desenhos de placas utilizados no trocador de calor	9
Figura 4: Detalhe de uma placa com corrugações do tipo chevrons	9
Figura 5: PFD elaborado para o processo de pasteurização.....	21
Figura 6: Temperatura de saída do regenerador versus área total do sistema	22
Figura 7: Inativação microbiana versus comprimento do reator	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição do leite.....	7
Tabela 2: Propriedades físico-químicas do leite	8
Tabela 3: Parâmetros para a correlação 3 de Nusselt.....	12
Tabela 4: Parâmetros cinéticos para a Equação (17)	14
Tabela 5: Composição do leite usado na simulação.....	16
Tabela 6: Parâmetros dimensionais da seção do regenerador.....	17
Tabela 7: Número de Reynolds para diferentes vazões.....	17
Tabela 8: Resultados da Equação (10).....	18
Tabela 9: Resultados da Equação (11).....	18
Tabela 10: Resultados da Equação (12).....	19
Tabela 11: Vazões, correlações e coeficiente h.....	20
Tabela 12: Vazões e razões entre as correlações	20
Tabela 13: Principais parâmetros da simulação	21
Tabela 14: Principais parâmetros e valores do sistema térmico	24
Tabela 15: Utilidades do sistema e seus valores	24
Tabela 16: Diâmetro dos tubos e comprimento deles.....	25

LISTA DE ABREVIACÕES

PFD: *Process Flow Diagram* (Diagrama de Fluxo de Processo)

LTLT *Low Temperature Long Time* (Baixa Temperatura, Tempo Longo)

HTST: *High Temperature Short Time* (Alta Temperatura Baixo Tempo)

PHE: *Plate Heat Exchanger* (Trocador de Calor de Placas)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1 Modelagem termodinâmica	6
2.2 Trocador de calor de placas	8
2.3 Transferência de calor	10
2.4 Cinética	13
3 OBJETIVO.....	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	16
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
5.1 Modelagem do trocador de calor	17
5.2 Coeficiente de troca térmica.....	18
5.3 PFD do processo.....	20
5.4 Análise de sensibilidade	22
5.5 Análise do gasto energético	24
5.6 Tratamento térmico	25
5.6.2 Resultado da simulação	26
6 CONCLUSÃO.....	28
Referências	29

1 INTRODUÇÃO

A indústria de laticínios brasileira é o segundo maior segmento na indústria de alimentos, com faturamento de R\$ 68,7 bilhões em 2018. O consumo *per capita* no Brasil em 2018 foi de 166 litros por habitante, menor do que países desenvolvidos. Entretanto o consumo ainda é superior ao de muitos países vizinhos (Siqueira, 2019).

Por ser um alimento complexo que contém altas concentrações de macro e micronutrientes, o leite é importante para a nutrição e desenvolvimento humano. Ele é fonte de proteína de alta qualidade e fornece parcela significativa de cálcio, magnésio, selênio, riboflavina, vitamina B12 e ácido pantotênico (vitamina B5) (Siqueira, 2019).

Por ser altamente nutritivo, ele é também um ótimo meio para desenvolvimento de microrganismos, desde desejáveis, como na produção de iogurtes, bem como de indesejáveis, causadores de doenças como tuberculose, brucelose e febre Q. Para prevenir isso, a pasteurização foi introduzida como método de prevenir esses riscos (Cerf & Condron, 2006), (Jost, 2012).

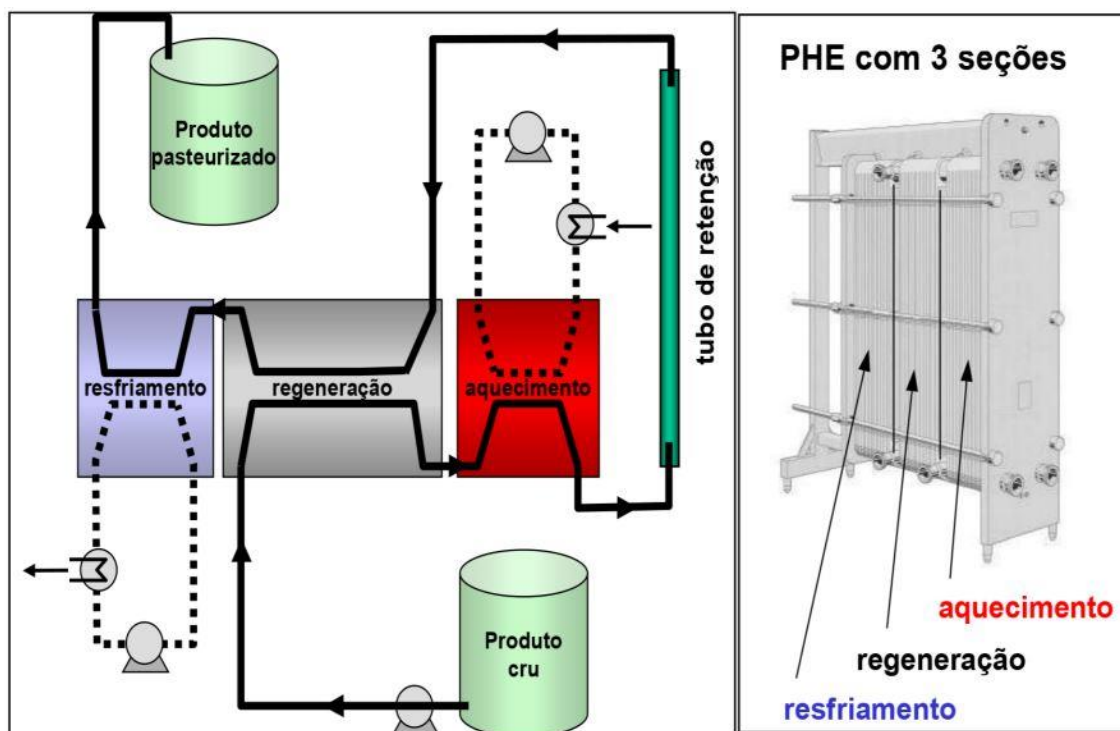
A pasteurização é definida como um tratamento térmico com objetivo de eliminar quaisquer microrganismos patogênicos presentes no leite. A Figura 1 mostra o esquema de um pasteurizador, com o uso de um trocador de calor de placas, PHE (*Plante Heat Exchanger*). As condições de pasteurização são desenhadas para reduzir a contaminação pelo microorganismo *Coxiella burnetii* a um nível em que eles não constituam risco à saúde, por ser este o microrganismo patogênico mais termorresistente conhecido (Cerf & Condron, 2006).

Para obter-se pasteurização efetiva, o leite deve ser aquecido entre 72°C a 75°C e mantido nessa temperatura de 15 segundos a 20 segundos, de modo a inativar os microrganismos e tornar o alimento seguro para consumo. Logo em seguida, deve ser rapidamente resfriado de modo a não cozinhar o alimento e alterar as suas propriedades sensoriais. Atenção especial deve ser tomada ao controle de temperatura porque esse processo é sensível à mudanças de temperatura (Cerf & Condron, 2006) .

No Brasil, a legislação vigente que regulamenta a produção de leite permite dois tipos de pasteurização, uma lenta chamada LTLT (*Low Temperature Long Time*) e a rápida chamada HTST (*High Temperature Short*

Time), sendo esta a mais comum na indústria de laticínios. Além disso, a legislação exige que o material em contato com o leite seja o aço inox (Brasil, 2002), (FGV, 2018).

Figura 1: Esquema de um processo de pasteurização com PHE



Fonte: Cano, 2016

1.1 SIMULADOR DE PROCESSOS

A simulação de processos químicos é importante porque permite aos engenheiros prever o comportamento do sistema projetado bem como estudar alterações em correntes de matéria além de permitir cálculos de otimização de processos, seja em questão energética, seja em qualidade de produto produzido.

Neste contexto, surge o DWSim, simulador de processos químicos gratuito e amplamente conhecido no mundo, com diversos tutoriais gratuitos espalhados pela internet, além de sua interface gráfica é de fácil uso e bem intuitiva. Esse programa é interessante para o estudo de engenharia química devido ao vasto suporte que possui na internet.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MODELAGEM TERMODINÂMICA

A modelagem termodinâmica é importante porque permite descrever matematicamente processos. Essa descrição é útil visto que possibilita cálculos energéticos bem como mudanças de fases e suas respectivas temperaturas e pressões.

2.1. Lei de Raoult

O modelo termodinâmico utilizado foi a Lei de Raoult com a regra Lewis-Randall para soluções ideais.

A Lei de Raoult estabelece que a pressão parcial de cada componente (P_A) na fase gasosa é igual à sua composição molar na fase líquida (x_A) multiplicada por sua pressão de saturação como líquido puro (P_{SAT}), conforme Equação (1)

$$P_A = x_A \cdot P_{SAT} \quad \text{Equação (1)}$$

A fase líquida fica definida como uma solução ideal, onde todas as interações moleculares são consideradas nulas, independentemente das espécies químicas presentes. A fração molar na fase vapor (y_A) é função da pressão de saturação do soluto (P_{SAT}), sua fração molar na fase líquida (x_A) e a pressão total do sistema (P_{Total}), conforme Equação (2) abaixo

$$y_A = x_A \cdot \frac{P_A^{sat}}{P_{total}} \quad \text{Equação (2)}$$

2.1.2 Leite

Tratando-se de tecnologia de laticínios, o termo leite refere-se exclusivamente ao leite coletado de vacas (fêmeas de *Bos taurus*) sadias. No caso de leite provindo de outras fontes, este deve ser devidamente identificado (Jost, 2012).

2.1.2.1 Composição

Leite integral é uma dispersão coloidal composta de uma fase aquosa contínua onde lactose, proteína e minerais estão dissolvidos. A fase dispersa consiste em micelas de caseína e glóbulos de gordura, e é esta dispersão que contribui para a aparência branca e leitosa do leite (Jost, 2012)

A composição do leite é dada na Tabela 1:

Tabela 1: Composição do leite

Principais componentes	Fração mássica
Água	0,872
Proteína	0,033
Gordura	0,038
Carboidratos	0,048
Ácidos orgânicos	0,002
Minerais	0,007

Fonte: Jost, 2012

2.1.2.2 Propriedades

As propriedades físico-químicas do leite integral estão descritas na Tabela 2:

Tabela 2: Propriedades físico-químicas do leite

Propriedade	Valor
Densidade (kg/m ³)	1035
Ponto de Congelamento (°C)	-0,5
Calor específico (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	3900
Condutividade térmica (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,6

Fonte: Jost, 2012

A viscosidade do leite é estudada e correlacionada com a temperatura e o seu teor de gordura e está exibida na Equação (3). A viscosidade é medida em centipoise, F é o teor de gordura, expresso em porcentagem e T é a temperatura, em Kelvin (Bakshi & Smith, 1984).

$$\ln(\mu) = \frac{2721,5}{T} + 0,1F - 8,9 \quad \text{Equação (3)}$$

A densidade do leite foi estudada e correlacionada com a temperatura e o seu teor de gordura e está na Equação (4). A densidade é medida em kg/m³,

F é o teor de gordura, expresso em porcentagem e T é a temperatura, em Kelvin (Bakshi & Smith, 1984)

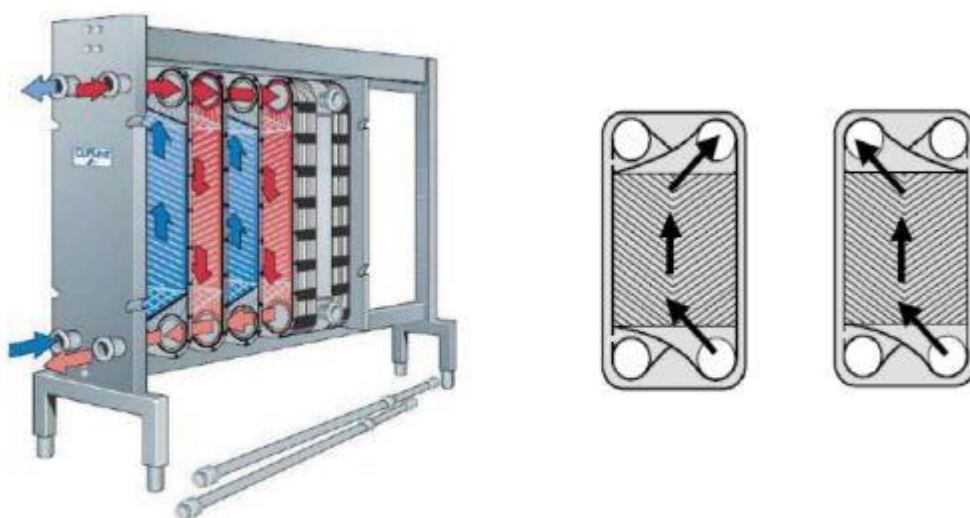
$$\rho = 0,3 T - 0,03 T^2 - 0,7 F - 0,1 F^2 + 1034,5 \quad \text{Equação (4)}$$

2.2 TROCADOR DE CALOR DE PLACAS

O trocador de calor de placas foi introduzido nos anos 1930 principalmente para o seu uso na indústria alimentícia porque eles possuem fácil limpeza, manutenção e reconfiguração. Com o passar dos anos, o seu desenvolvimento atingiu a maturidade nos anos 1960 com o aprimoramento da geometria das placas, materiais de construção e esquemas de montagem (The Gasketed-Plate Heat Exchangers, 2002).

A Figura 2 mostra o esquema do equipamento. Nela, observa-se o arranjo das diferentes partes bem como as placas são inseridas.

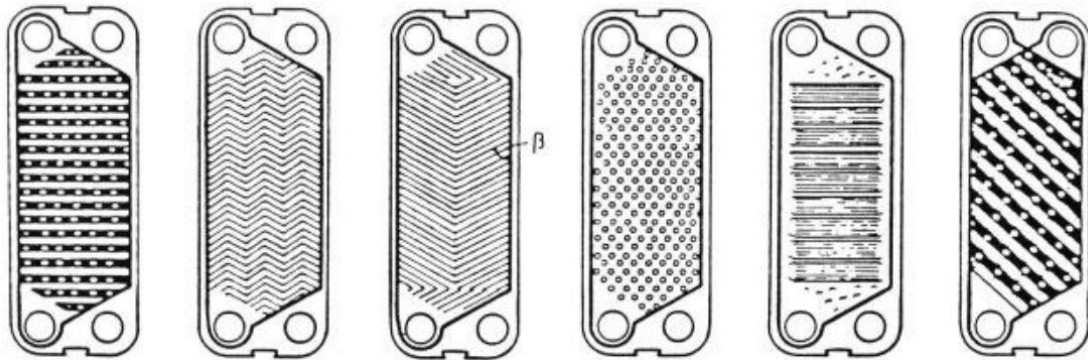
Figura 1: Esquema de um trocador de calor de placas, PHE



Fonte: Cano, 2016

A Figura 3 mostra alguns desenhos das placas utilizadas no trocador de calor e as geometrias delas. As geometrias foram implementadas porque melhoram o coeficiente de troca térmica através do aumento da turbulência do sistema.

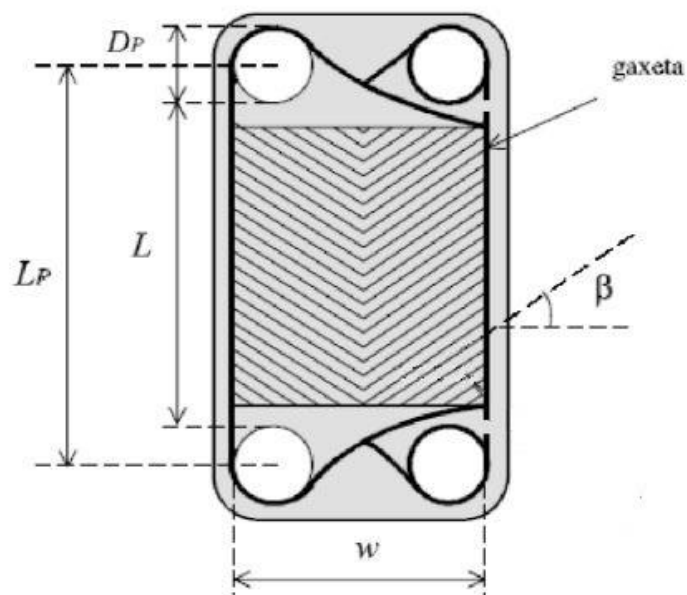
Figura 2: Desenhos de placas utilizados no trocador de calor)



Fonte: Shah & Mueller, 2005

A Figura 4 mostra os detalhes de uma placa com corrugações do tipo *chevrons*. Nela, é possível observar as dimensões para essa placa.

Figura 3: Detalhe de uma placa com corrugações do tipo chevrons



Fonte: Cano, 2016

O uso desse tipo de equipamento possui vantagens e benefícios, listados abaixo (The Gasketed-Plate Heat Exchangers, 2002):

- Flexibilidade do desenho pela variedade de tamanho de placas bem como o arranjo de passagens
- Transferência de calor eficiente, com altos coeficientes de transferência de calor para ambos fluidos por causa da grande área de contato entre fluidos, elevada turbulência e pequeno diâmetro hidráulico

- Muito compacto, grande área, pequeno volume e baixo peso
- Apenas as pontas das placas estão expostas à atmosfera, o que minimiza perdas de calor e dispensa o uso de isolantes
- Fácil detecção de vazamentos bem como não há mistura de líquidos em caso de falha
- Baixa incrustação devido ao baixo tempo de residência e a turbulência elevada.
- Mais de dois fluidos podem ser processados numa mesma unidade

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Para determinar a transferência de calor e temperaturas de entrada e saída do trocador, as equações básicas utilizadas são as utilizadas na conservação de energia (Shah & Mueller, 2005)

A Equação (5) permite calcular a variação de entalpia sem mudança de fases, ΔH (J), de um determinado líquido de massa m (em kg), com calor específico c_p (em $J.kg^{-1}.K^{-1}$) e uma variação de temperatura ΔT (em K) (Shah & Mueller, 2005).

$$\Delta H = m.c_p.\Delta T \quad \text{Equação (5)}$$

A Equação (6) é utilizada para modelar a quantidade de calor transferido com o uso de um trocador de calor, onde Q é o calor trocado (em J), U é o coeficiente global de transferência de calor (em $J.m^{-2}.K^{-1}$), A é a área de troca (em m^2) e ΔT é a variação de temperatura (em K) (Shah & Mueller, 2005)

$$Q = U.A.\Delta T \quad \text{Equação (6)}$$

O coeficiente global de transferência de calor U é calculado pelo recíproco da resistência térmica, R . Ele é função da soma das diversas resistências térmicas que compõem o modelo, entretanto, como a espessura da placa é muito pequena, o principal parâmetro que governa o processo de troca de calor neste equipamento é o coeficiente de convecção, h (Kakaç, Liu, 2002), (Shah & Mueller, 2005).

O coeficiente de convecção foi estudado e correlações foram propostas. Para o cálculo destas correlações, é necessário o uso de números adimensionais que descrevem propriedades do fluido em questão (McCabe, Smith, Harriot, 2005),(Kakaç, Liu, 2002).

O número de Reynolds descreve a razão entre forças inerciais e forças viscosas e é utilizado para categorizar o tipo de escoamento do sistema, laminar, turbulento e intermediário. Este número está descrito na Equação (7), onde G é a velocidade mássica, D_H é o diâmetro hidráulico e μ é a viscosidade do fluido. (McCabe, Smith, & Harriott, 2005)

O número de Prandtl correlaciona a viscosidade de um fluido com sua condutividade térmica, portanto avalia a relação entre transporte de momento e transporte térmico de um fluido. Está descrito na Equação (8) onde c_p é a capacidade térmica do fluido, μ é a viscosidade do fluido e k é a condutividade térmica do fluido (McCabe, Smith, Harriot, 2005)

O número de Nusselt correlaciona o mecanismo de transferência de calor de um sistema, seja por condução ou convecção térmica. O seu cálculo é feito pela Equação (9), onde correlaciona diretamente a convecção h e o diâmetro hidráulico D_H com a condução térmica do fluido k . Ele é importante porque permite estimar o coeficiente h pelas correlações apresentadas nas Equação (10), Equação (11), Equação (12). Os seus cálculos dependem de Reynolds e Prandtl. (McCabe, Smith, Harriot, 2005),(Kakaç, Liu, 2002).

Reynolds, Re	$\frac{GD_H}{\mu}$	Equação (7)
Prandtl, Pr	$\frac{c_p\mu}{k}$	Equação (8)
Nusselt, Nu	$\frac{hD_H}{k}$	Equação (9)
Nusselt Correlação (1)	$Nu = 0,37\Re^{\frac{2}{3}}Pr^{\frac{1}{3}}$	Equação (10)
Nusselt Correlação (2)	$Nu = 0,44\left(\frac{\beta}{30}\right)^{0,38}\Re^{\frac{2}{3}}Pr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,14}$	Equação (11)
Nusselt Correlação (3)	$Nu = C_h\Re^nPr^{\frac{1}{3}}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0,17}$	Equação (12)

Para a Correlação (3) de Nusselt, a Tabela 3 abaixo apresenta os parâmetros necessários para o cálculo. O parâmetro β refere-se ao ângulo das corrugações presentes na placa, responsáveis por criar turbilhonamento no fluido e melhorar a troca térmica entre placas.

Tabela 3: Parâmetros para a correlação (3) de Nusselt

Ângulo β (graus)	C_h	n
30	0,718	0,349
45	0,718	0,349
50	0,63	0,333
60	0,562	0,326
65	0,562	0,326

Fonte: Kakaç e Liu, 2002)

2.4 CINÉTICA

A destruição térmica de microorganismos geralmente segue uma reação cinética de primeira ordem, onde a taxa de desativação térmica é proporcional à concentração dos microorganismos presentes (Jelen, 2005), conforme a Equação (13).

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad \text{Equação (13)}$$

Outro parâmetro relevante para o tratamento térmico é o Tempo de Redução Decimal, definido como o tempo para que ocorra a redução de uma ordem de grandeza na contagem de células microbianas viáveis, definido na Equação (14), onde C_0 representa a concentração inicial do microrganismo e C a sua concentração final. (Jelen, 2005)

$$t.D. \log \frac{C_0}{C} \quad \text{Equação (14)}$$

Para descobrir o comprimento do reator necessário para se obter uma dada redução decimal, é necessário integrar a Equação (13) conforme Equação (15) abaixo, onde L é o comprimento do reator, C_{A0} é a concentração inicial, C_{AL}

é a concentração atingida no comprimento L, v é a velocidade do fluido e k é a constante cinética da reação.

$$\int_0^L dx = \frac{-v}{k} \int_{C_{A0}}^{C_{AL}} \frac{1}{C_A} dC \quad \text{Equação (15)}$$

Ao integrar a Equação (15) dentro dos limites, obtém-se a Equação (16) abaixo, que calcula o comprimento do tubo em função da razão da concentração do sistema

$$L = \frac{v}{k} \ln \frac{C_{A0}}{C_{AL}} \quad \text{Equação (16)}$$

O parâmetro k da equação cinética é calculado pela Equação (17) e os seus parâmetros estão dispostos na Tabela 4

$$k = A \cdot e^{\frac{E_A}{RT}} \quad \text{Equação (17)}$$

Tabela 4: Parâmetros cinéticos para a Equação (17)

Parâmetro	valor
A	1,0029
Ea (kJ/mol)	-0,00014
Temperatura (°C)	72

Fonte: Cerf e Condron, 2006

3 OBJETIVO

O foco deste trabalho foi avaliar uma instalação pasteurizadora de leite de consumo através de modelagem computacional. Objetivos específicos são:

- avaliar a regeneração (recuperação de energia no trocador de calor);
- avaliar a cinética da destruição térmica do microorganismo-alvo no tubo de retenção
- avaliar a troca térmica do trocador de calor de placas;
- realizar e avaliar uma análise de sensibilidade da área de troca térmica do sistema;

4. MATERIAL E MÉTODOS

Para esse trabalho, foi utilizado o simulador DWSim na versão 8 bem como a planilha eletrônica Microsoft Excel®.

Para simular o processo, foi escolhido o modelo Lei de Raoult com regra de Lewis-Randall. De modo a representar a fração gordurosa do leite, a trioleína foi escolhida como componente representante desta fração.

A composição química utilizada para o leite está na Tabela 5.

Tabela 5: Composição do leite usado na simulação (Autor, 2022)

Componente	Fração mássica
Água	0,88
Lactose (açúcar)	0,05
Caseína (proteína)	0,04
Trioleína (gordura)	0,03

Para a análise de sensibilidade, utilizou-se a ferramenta de análise de sensibilidade disponível no próprio simulador.

Para o cálculo da cinética de inativação, utilizou-se o Microsoft Excel.

Para o cálculo dos coeficientes globais de transferência de calor, utilizou-se o Microsoft Excel.

Para a elaboração do PFD do processo, utilizou-se o próprio DWSim, que possui ferramenta de interface gráfica própria para isso.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODELAGEM DO TROCADOR DE CALOR

Um dos principais parâmetros para a modelagem do trocador de calor de placas é determinar o seu coeficiente global de troca térmica, U ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$), e para isso foi necessário dimensionar um trocador de calor, onde considerou-se apenas a seção de regeneração do equipamento porque ela representa aproximadamente 90% do uso de área total do equipamento. Os parâmetros do dimensionamento desta seção estão dispostos na Tabela 6

Tabela 6: Parâmetros dimensionais da seção do regenerador

Parâmetro	valor
Largura da placa (m)	0,2
Altura da placa (m)	0,3
Total de placas	19
Total de canais	18
Canais do fluido frio/quente	9
Espaço entre placas (m)	0,002
Diâmetro hidráulico, D_H (m)	0,00396
Área da placa (m^2)	0,06
Área total (m^2)	1,08
Temperatura de referência ($^\circ C$)	50

Fonte: Autor, 2022

Com o dimensionamento apresentado na Tabela 6, foi possível calcular, para diferentes vazões, o número de Reynolds, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Número de Reynolds para diferentes vazões

Vazão (kg leite/hora)	Reynolds
500	0,05
1000	0,10
2000	0,20
5000	0,51

Fonte: Autor, 2022

Os resultados da Tabela 7 mostram que o regime de escoamento, para diferentes vazões, é laminar em todos os casos, mesmo com a condição proposta de Turbulência para Reynolds acima de 400 (Kakaç e Liu, 2002).

5.2 COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA

Para os cálculos dos coeficientes de troca térmica, h , é necessário estimar o número de Prandtl, Pr , com o uso da Equação (8).

$$Prandtl = 7,84$$

Com os números de Re e Pr , é possível estimar o número de Nusselt, Nu , e com isso, o coeficiente de troca térmica, h . Como as Equações 11 e 12 apresentam o ângulo das corrugações como parâmetros, escolheu-se a vazão de 500 (kg/h) para estimativa dos coeficientes h .

Com os números de Re e Pr , foi possível estimar o número de Nusselt pelas correlações apresentadas pelas Equações 10, 11 e 12. Para o caso mais simples, a Equação (10), o resultado do número de Nusselt bem como o coeficiente h estão dispostos na Tabela 8 abaixo

Tabela 8: Resultados da Equação (10)

Parâmetro	Valor
Nusselt (adimensional)	0,0993
h (W/m ² -K)	16,0

Fonte: Autor, 2022

Para as Equações 11 e 12, o valor de Nusselt é dependente do ângulo da corrugação da placa, β . Os valores de Nusselt calculados para cada ângulo bem como o coeficiente de convecção, h estão na Tabela 9, que apresenta os resultados da Equação (11) enquanto que a Tabela 10 apresenta resultados equivalentes da Equação (12)

Tabela 9: Resultados da Equação (11), Nusselt Correlação (2)

Ângulo (°)	Nusselt	h (W/m ² -°C)
30	0,1972	31,9
45	0,2589	41,8
60	0,2888	46,7

Fonte: Autor, 2022

Tabela 10: Resultados da Equação (12), Nusselt Correlação (3)

Ângulo (°)	Nusselt	h (W/m ² -°C)
30	0,5141	83,1
45	0,5141	83,1
50	0,4679	75,6
60	0,4241	68,5

Fonte: Autor, 2022

Ao comparar o resultado da primeira correlação de Nusselt (Equação (10)) com as outras duas (Equação (11) e Equação (12)), observa-se que o uso de corrugações melhora a transferência térmica, de 2 a 4 vezes. Isso é interessante porque mostra que apenas com essa alteração simples da geometria das placas foi possível obter ganhos significativos na troca térmica, mesmo sem alteração no número de Reynolds.

Com a comparação entre a segunda e a terceira correlação, observa-se que a geometria do ângulo influencia de modo diferente nos resultados. Na segunda correlação o aumento do ângulo causa um aumento do coeficiente de troca térmica, enquanto que na terceira correlação o aumento do ângulo causa a diminuição do mesmo coeficiente. Conforme cita a literatura, as correlações para trocadores de calor de placa não são genéricas e por isso podem apresentar resultados divergentes, como observa-se na variação do coeficiente h, como demonstrado acima. (Kakaç e Liu, 2002)

Com os ângulos que fornecem os maiores coeficiente h (60° para a Equação (11), 30° para a Equação (12)), a Tabela 11 mostra os resultados destes coeficientes com variação de vazão. Nela observa-se que o aumento da vazão aumenta a troca térmica para todas as correlações, e que o uso das

corrugações melhora essa troca térmica, se comparado com a primeira correlação, conforme a Tabela 12.

Tabela 11: Vazões, correlações e coeficiente h

vazão (kg/h)	Correlação 1	Correlação 2	Correlação 3
500	16.0	41.5	82.2
1000	25.5	58.7	104.6
2000	40.6	83.0	133.3
5000	75.1	131.2	183.5

Fonte: Autor, 2022

Tabela 12: Vazões e razões entre as correlações

vazão (kg/h)	h_2/h_1	h_3/h_1
500	2.58	5,12
1000	2.30	4,10
2000	2.04	3,28
5000	1,75	1,75

Fonte: Autor, 2022

As literaturas apresentam valores de referência para o coeficiente deste tipo de trocador entre 2000 a 6000 ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) (McCabe, Smith, Harriot 2005), (Kakaç e Liu, 2002).

Como os valores calculados pelas correlações apresentam-se com duas ordens de grandeza de diferença, optou-se por utilizar o valor de 2000 ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) para o coeficiente de convecção entre placas.

5.3 PFD DO PROCESSO

O seguinte PFD foi elaborado para estudar o processo e está na Figura 5. Devido a um recurso do DWSim, as temperaturas de cada corrente bem como suas vazões mássicas já se encontram na Figura 5.

Os principais parâmetros do PFD elaborado e que não estão dispostos na Figura 5 estão dispostos na Tabela 13

Parâmetro	Valor
Vazão mássica (kg/h)	500
Vazão mássica (kg/s)	0,1389
Área do regenerador (m²)	1
Área do aquecedor (m²)	0,2
Área do resfriador (m²)	1
Coef. Troca térmica h (W/m²-K)	2000

O diagrama ilustra um sistema de aquecimento e resfriamento de água com os seguintes componentes e fluxos:

- Entrada:** Fluxo 1 (25,0 °C, 500 kg/h) entra no regenerador.
- Regenerador:** Trocador de calor onde o fluxo 1 é aquecido para o fluxo 2 (62,3 °C, 500 kg/h) e o fluxo 3 (73,2 °C, 500 kg/h) é resfriado para o fluxo 4 (73,2 °C, 500 kg/h).
- Bloco de aquecimento (A):** Recebe o fluxo 4 e o aquece para o fluxo 5 (73,2 °C, 500 kg/h).
- Tubo de retenção:** Conecta o fluxo 5 ao fluxo 6 (35,8 °C, 500 kg/h).
- Resfriador:** Recebe o fluxo 6 e o resfria para o fluxo 7 (4,0 °C, 500 kg/h).
- Bloco de resfriamento (R):** Recebe o fluxo 7 e o resfria para o fluxo 8 (0,1 °C, 900 kg/h).
- Chiller:** Recebe o fluxo 8 e o resfria para o fluxo 9 (0,1 °C, 900 kg/h).
- Tanque de armazenamento:** Recebe o fluxo 9 e o aquece para o fluxo 10 (95,0 °C, 250 kg/h).
- Aquecedor:** Recebe o fluxo 10 e o aquece para o fluxo 11 (73,3 °C, 250 kg/h).
- Hidrociclone (H):** Separa o fluxo 11 em dois fluxos: 12 (95,0 °C, 250 kg/h) e 13 (73,3 °C, 250 kg/h).
- Reservatório (R):** Recebe o fluxo 12 e o resfria para o fluxo 14 (0,1 °C, 900 kg/h).
- Chiller:** Recebe o fluxo 14 e o resfria para o fluxo 15 (0,1 °C, 900 kg/h).
- Resfriador:** Recebe o fluxo 15 e o resfria para o fluxo 16 (17,7 °C, 900 kg/h).
- Bloco de aquecimento (A):** Recebe o fluxo 16 e o aquece para o fluxo 17 (73,2 °C, 500 kg/h).
- Tubo de retenção:** Conecta o fluxo 17 ao fluxo 18 (25,0 °C, 500 kg/h), que retorna ao regenerador.

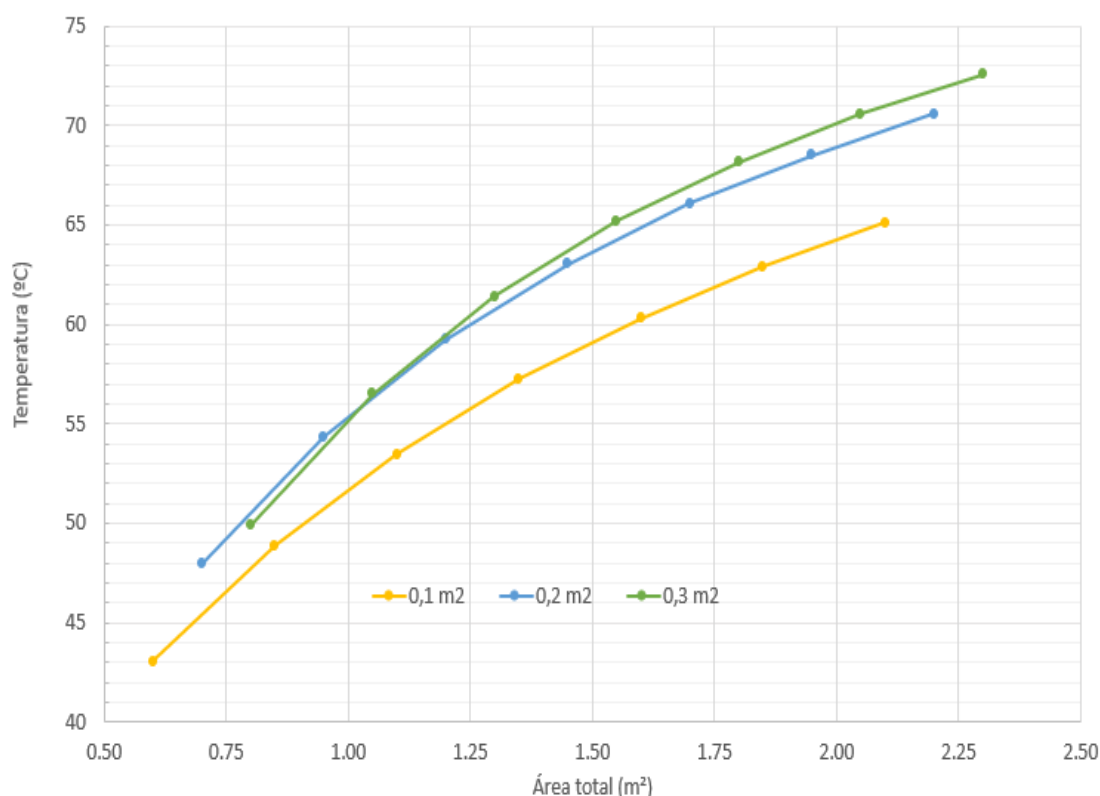
Legenda:

- A** Bloco de aquecimento
- R** Bloco de resfriamento

5.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para melhor estudar o comportamento do sistema, uma análise de sensibilidade foi feita, onde estudou-se o comportamento da temperatura de saída do regenerador com variação da área total do sistema e com variação da área do aquecedor. Foram adotadas 3 áreas do aquecedor de como referência para o cálculo 0,1 m² ou Aquecedor 1, 0,2 m² ou Aquecedor 2 e 0,3 m² ou Aquecedor 3. A vazão do sistema foi de 500 (kg/h) e o coeficiente de troca térmica do sistema foi de 2000 (W/m²-K) e os resultados estão na Figura 6.

Figura 6 : Temperatura de saída do regenerador versus área total do sistema (Autor, 2022)



Para o Aquecedor 1 o desempenho do sistema foi o menor apresentado. Já para os outros dois aquecedores, seus desempenhos foram similares, entretanto, o Aquecedor 2 apresentou-se ligeiramente superior ao Aquecedor 3 até 1,2 m² de área total (61 °C na saída do regenerador) e depois o maior aquecedor apresentou o maior desempenho, entretanto esse desempenho não foi superior a 2°C em seus respectivos máximos

5.4.1 COMPARAÇÃO ENTRE MESMA TEMPERATURAS

O Aquecedor 1 teve sua maior temperatura de saída do regenerador em 65,1 °C e com 2,1 m² de área total. As comparações do Aquecedor 1 com os outros Aquecedores estão na Tabela 14

TABELA 14: Comparação entre áreas totais dos sistemas

Aquecedor	Área total do sistema (m ²)	Redução de área, comparado ao Aquecedor 1
1	2,1	-
2	1,63	22,3%
3	1,55	26,2%

Fonte: Autor, 2022

Ao realizar a mesma comparação do Aquecedor 2 com o Aquecedor 3, os resultados estão na Tabela 15. Escolheu-se o valor de área total para o sistema do Aquecedor 2 de 2,2 m², valor máximo representado na Figura 6

Tabela 15: Comparação entre temperaturas iguais de saída do regenerador, Aquecedor 1

Aquecedor	Área total do sistema (m ²)	Redução de área, comparado ao Aquecedor 2
2	2,2	-
3	2,05	6,8%

Fonte: Autor, 2022

Destas análises de temperaturas iguais de saída do regenerador, constata-se que o Aquecedor 1 possui a menor eficiência dentre os sistemas, o Aquecedor 2 fica em segundo lugar e o Aquecedor 3 em primeiro, entretanto o Aquecedor 2 fica 6,8% maior na área total do sistema.

5.4.2 COMPARAÇÃO ENTRE MESMA ÁREA TOTAL

Ao comparar a mesma área total entre os aquecedores, considerou-se a área total do sistema com 2,1m², porque esse é o menor valor máximo para as três curvas analisadas. Os resultados estão na Tabela 16

Tabela 16: : Comparação entre temperaturas iguais de saída do regenerador, Aquecedor 2

Aquecedor	Tsaída regenerador (°C)	Ganho de T, comparado ao Aquecedor 2
2	69,8	-
3	71	1,7%

Fonte: Autor, 2022

Mantendo-se constante a área, o Aquecedor 1 foi o que apresentou a menor performance, o Aquecedor 2 ficou em segundo lugar e o Aquecedor 3 ficou em primeiro lugar, entretanto o ganho de temperatura do Aquecedor 2 para o Aquecedor 3 foi inferior a 2%

5.4.3 COMPARAÇÃO DE ÁREA MÁXIMA E TEMPERATURA MÁXIMA

A comparação entre os máximos da Figura 6 estão na Tabela 17

Tabela 17: máximos de temperatura e área para os Aquecedores

Aquecedor	T _{Máxima} (°C)	Área Máxima (m ²)
1	65,1	2,1
2	70,6	2,2
3	72,6	2,3

Fonte: Autor, 2022

A Tabela 18 apresenta as comparações com o Aquecedor 1, a Tabela 19 apresenta as comparações com o Aquecedor 2.

Tabela 18: Ganhos de temperatura e área comparativos, Aquecedor 1

Aquecedor	Ganho T _{Máxima}	Ganho Área Máxima
1	-	-
2	8,4%	4,7%
3	11,5%	9,5%

Fonte: Autor, 2022

Tabela 19: Ganhos de temperatura e área comparativos, Aquecedor 2

Aquecedor	Ganho T _{Máxima}	Ganho Área Máxima
2	-	-
3	4,5%	2,8%

Fonte: Autor, 2022

As comparações entre ganhos de temperatura e área, máximos, mostram que para o Aquecedor 1, tanto o Aquecedor 2 quanto o Aquecedor 3 apresentam ganhos significativos, entretanto, ao comparar o ganho do Aquecedor 3 com relação ao Aquecedor 2, o ganho de temperatura é quase 5%. Para um sistema que opere durante muito tempo, esse incremento de área inferior a 3% pode compensar o ganho de quase 5% de temperatura, o que reflete numa melhor economia energética, mas requer um estudo a longo prazo para ver o tempo de payback

5.5 ANÁLISE DO GASTO ENERGÉTICO

O gasto energético do processo ocorre em três diferentes partes do sistema e os valores da simulação estão indicados na Tabela 20. As utilidades do sistema bem como o seu gasto energético do sistema estão presentes na Tabela 21. Para o tubo de retenção, considerou-se o seu processo isotérmico.

Tabela 20: Principais parâmetros e valores do sistema térmico (Autor, 2022)

Parâmetro	Valor
Regenerador (kW)	21,3701
Eficiência (%)	77
Máximo teórico (kW)	27,5781
Aquecedor (kW)	6,41849
Eficiência (%)	66
Máximo teórico (kW)	9,66927
Resfriador (kW)	18,4474
Eficiência (%)	89
Máximo teórico (kW)	20,7245

Fonte: Autor, 2022

Tabela 21: Utilidades do sistema e seus valores

Parâmetro	Valor
Água quente (°C)	95
Água quente, retorno (°C)	73,0
Água quente (kg/h)	250
Água quente (kW)	6,41849

Água fria (°C)	0,1
Água fria, retorno (°C)	17,7
Água fria (kg/h)	900
Água fria (kW)	18,4474

Fonte: Autor, 2022

O consumo termoenergético do sistema é dado pelo consumo das utilidades, o que resulta em 24.866 kW. Com o uso do regenerador, 21.370 kW são transferidos de uma corrente quente para uma corrente fria, o que significa que, sem este equipamento, o consumo energético total do sistema seria de 46.236 kW, portanto, o uso do regenerador representa uma redução de 46,22% de energia térmica do sistema, o que faz deste um equipamento essencial para otimização da pasteurizadora.

Na comparação das frações energéticas, a energia da utilidade quente representa 25,82% do consumo total e a utilidade fria representa 74,18%.

O gasto energético para cada kilograma de leite produzido foi de 49,7 (J.kg⁻¹ de leite).

5.6 TRATAMENTO TÉRMICO

5.6.1 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DO TUBO

O tempo de retenção do leite foi calculado para que permanecesse entre 16 e 18 segundos dentro do tubo de retenção, conforme recomendação (Cerf & Condron, 2006).

Para o cálculo, considerou-se a vazão do leite é de $134,5 \times 10^{-6}$ (m³.s⁻¹). A Tabela 22 mostra os parâmetros referentes a cada cálculo dos tubos.

Tabela 22: Diâmetro dos tubos e seus respectivos comprimentos

Diâmetro nominal (in)	Diâmetro interno (cm)	Velocidade (m/s)	Comprimento mínimo (m)	Comprimento máximo (m)
1	2,6645	0,2415	3,86	4,31
1 ½	4,0894	0,1024	1,64	1,84
2	5,2502	0,0621	0,99	1,12

Fonte: Autor, 2022

Os resultados mostram que, para 18 segundos de retenção, o tubo de 2" é 60,87% menor que o tubo de 1½", portanto, o tubo de 2" foi escolhido. O tubo é também em aço inox e o seu NPS é 40, o que indica uma espessura de parede de 3,9 (mm) (McCabe, Smith, & Harriott, 2005)

Com as dimensões definidas do tubo, outro parâmetro importante a ser considerado é a perda de calor do tubo para o ar ambiente. O cálculo da perda de temperatura é feito pelo próprio simulador, que tem uma seção específica para isso. O valor do coeficiente de troca térmica considerado foi de 5 (W/m²-K) (Engineering Toolbox, 2003).

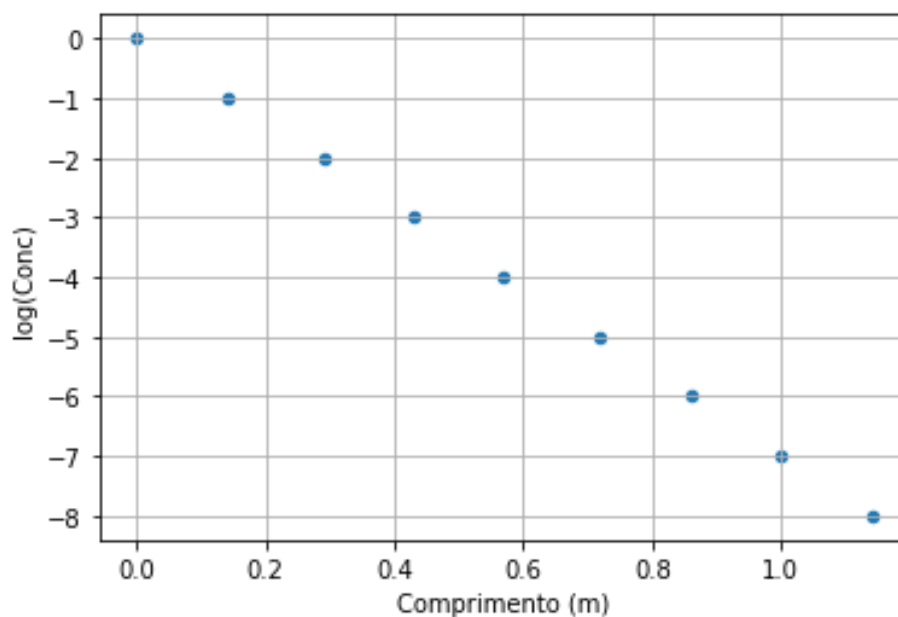
Os resultados da simulação mostram uma perda de 54 (W) o que significa uma queda de 0,1K. e com isso, considerou-se o processo como isotérmico.

5.6.2 RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Com o uso da Equação (17), os parâmetros fornecidos pela Tabela 4 e com o tubo de 2", calculou-se o decaimento decimal versus o comprimento do tubo de retenção.

Os resultados da simulação estão expostos na Figura 7, onde o eixo horizontal exibe o comprimento do reator e o eixo vertical exibe a redução decimal microbiana no leite, em escala logarítmica.

Figura 7 : Inativação microbiana versus comprimento do reator



Fonte: Autor, 2022

A análise do resultado indica que a reação de inativação atinge 7 decimais de redução microbiana para o comprimento de 1 (m) e 8 decimais de redução microbiana para o comprimento de 1,14 (m). Isso indica que o leite atingiu o tratamento térmico necessário e está seguro para o consumo humano (Cerf & Condron, 2006).

6 CONCLUSÃO

O uso dos modelos propostos para cálculo do coeficiente de transferência térmica dos trocadores de calor de placa mostrou que o uso de corrugações aumenta a troca térmica mesmo sem aumentar a velocidade, isso porque as corrugações causam turbilhonamento do líquido no interior das placas. Os valores obtidos divergiram por duas ordens de grandeza com os resultados reportados na literatura, portanto utilizou-se o valor de 2000 (W/m²-K), referenciado na literatura. Tal fato não é inesperado, visto que a própria literatura já adverte sobre a dificuldade encontrada com modelos para trocadores de calor do tipo placa (Kakaç e Liu, 2022)

O estudo térmico dos trocadores de calor mostrou que a distribuição entre área de regenerador e área de aquecimento influenciam significativamente na recuperação energética do sistema e consequentemente no gasto energético do sistema. A análise da Figura 6 mostra que o Aquecedor 1 sempre foi inferior e o Aquecedor 2 foi superior ao Aquecedor 3 até 1,2 m² e a partir daí o Aquecedor 3 é superior. Contudo, a comparação entre o Aquecedor 2 e Aquecedor 3 mostra que ambos sistemas apresentam valores de temperatura de saída do regenerador e área total muito próximos, mas o Aquecedor 3 sempre superior. Na comparação de máximos de temperatura de saída do regenerador e área total do sistema, o Aquecedor 3 apresenta ganho de 2,8% de área e ganho de 4,5% na temperatura, se comparado com o Aquecedor 2, o que faz com que o seja necessário realizar um estudo de payback para determinar qual o melhor aquecedor, 2 ou 3.

O gasto energético total do sistema foi de 24.866 (kW), com 25,82% dessa energia direcionada para o aquecimento e 74,18% direcionada para o resfriamento do leite. Com o uso do regenerador, o sistema evita que 21.370 (kW) adicionais de energia sejam utilizados no sistema, o que faz do regenerador um equipamento indispensável para a operação econômica desse sistema. No sistema desenhado, o consumo energético foi de 49,7 (J.kg⁻¹ de leite)

No tratamento térmico, o tubo utilizado foi o de 2" com 1,12 (m) porque seu tamanho é 60,87% menor do que o tamanho necessário para o tubo de 1½". A condição isotérmica foi demonstrada e a letalidade do tratamento no leite atingiu, dentro do tempo limite estabelecido de 18 segundos, uma redução de 8 ordens de grandeza, o que garante a segurança alimentar do leite.

REFERÊNCIAS

- Bakshi, A. S., & Smith, D. E. (1984). Effect of Fat Content and Temperature on Viscosity in Relation to Pumping Requirements of Fluid Milk Products. *Journal of Dairy Science*, pp. 1157 - 1160. Acesso em 2022, disponível em [Journal of Dairy Science: https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(84\)81417-4/pdf](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(84)81417-4/pdf)
- Brasil. (2002). *Instrução Normativa - 51, de 2002*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Fonte: Defesa Agropecuária - SP: <https://www.defesa.agricultura.sp.gov.br/legislacoes/instrucao-normativa-51-de-18-09-2002,654.html>
- Cano, I. A. (2016). *Modelagem e simulação dinâmica da pasteurização contínua de leite sujeito à incrustação*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Cerf, O., & Condrón, R. (2006). Coxiella burnetii and milk pasteurization: an early application of the precautionary principle? *Epidemiol. Infect.*, pp. 946-951.
- Dairy and Food Engineering*. (2013). Acesso em 2022, disponível em <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=124053>
- DWSim. (2022). *DWSim Simulator Helper*. Fonte: DWSim: <https://dwsim.inforside.com.br/docs/mobile/help/thermo.htm>
- Engineering Toolbox. (2003). Acesso em 2022, disponível em Overall Heat Transfer Coefficients: https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficient-d_434.html
- FGV. (2018). *O Setor de Laticínios no Brasil e suas interações com o comércio internacional*. Fundação Getúlio Vargas - anufood Brazil. Fonte: https://gvagro.fgv.br/sites/gvagro.fgv.br/files/u115/laticinios_fgv_PT.pdf
- Heat Exchange Equipment. (2005). Em W. C. McCabe, S. Julian , & P. Harriot, *Unit Operations of Chemical Engineering* (7ª ed., pp. 440 - 487). McGraw Hill.
- Heat transfer to fluids without phase change. (2005). Em W. C. McCabe, J. Smith, & P. Harriott, *Unit Operations of chemical engineering* (7ª ed., pp. 347 - 387). McGraw Hill.
- Jelen, P. (2005). Foods, 2. Food Technology. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, p. 38. doi:10.1002/14356007.a11 523

- Jost, R. (2012). Milk and dairy products. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*.
- McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit Operations of Chemical Engineering* (7^a ed.). McGraw Hill.
- Shah, R., & Mueller, A. C. (2005). Heat Exchange. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. doi:10.1002/14356007.t12_t01
- Siqueira, K. (2019). *O mercado consumidor de leite e derivados*. Circular Técnica, EMBRAPA, Juiz de Fora.
- The Gasketed-Plate Heat Exchangers. (2002). Em S. Kakaç, & H. Liu, *Heat Exchangers: selection, rating, and thermal design* (2^a ed., pp. 373 - 412). CRC Press.
- USDA. (2021). *Dairy and products annual, 2021*. United States Department of Agriculture. Fonte:
https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Dairy%20and%20Products%20Annual_Brasilia_Brazil_10-15-2021