

TAMIRES KAWAHARA OISHI

**MODELAGEM DO PROCESSO TÉRMICO CONTÍNUO EM UMA UNIDADE
PILOTO DE PASTEURIZAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS**

São Paulo

2019

TAMIRES KAWAHARA OISHI

**MODELAGEM DO PROCESSO TÉRMICO CONTÍNUO EM UMA UNIDADE
PILOTO DE PASTEURIZAÇÃO ASSISTIDA POR MICRO-ONDAS**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção do
título em Mestre em ciências.

Área de concentração: Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms
Gut.

Versão original

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

OISHI, TAMIRES KAWAHARA

Modelagem do processamento térmico contínuo em uma unidade piloto de pasteurização assistida por micro-ondas / T. K. OISHI -- São Paulo, 2019. 112 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Modelagem matemática fenomenológica 2.Processamento térmico contínuo 3.Pasteurização assistida por micro-ondas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES – código de financiamento 001) pela bolsa de mestrado e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio ao financiamento do projeto (processo 2013/07914-8).

Ao Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut, meu orientador, pela confiança depositada, amizade, paciência e excelência em tudo o que ensina e pesquisa.

À Prof.^a Dr.^a Carmem Cecília Tadini por todos os debates e ensinamentos valiosos para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao FoRC e LEA pela infraestrutura e financiamentos concedidos.

Ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da USP, em especial aos professores e colaboradores pela amizade e toda ajuda prestada.

Aos amigos do LEA (Bianca, Eduardo, Érica, Giulliana, Guilherme, Larissa, Kaiky, Mariana, Miriam, Nilo, Thais e Tiago) pelos conselhos, dicas, risadas, noites de jogos, pizza, pipoca e Outback.

Aos amigos que fiz durante o mestrado (Ale, Carol, Dielle, Fred, Gabriel, Gustavo, Henrique, Kevy, Léo, Lola, Maria, Matheus, Meire, Priscila, Samanta, Thamiris, Vaca e Williams) fizeram tudo muito mais tranquilo e divertido.

Ao Rafael pela parceria, paciência e incentivo a gostar de pesquisa.

Aos meus pais e irmão, Neusa, Fernando e Túlio, pelo porto seguro, amor incondicional, motivação e total confiança de que tudo ficaria bem.

RESUMO

O processamento térmico contínuo de alimentos líquidos visa garantir que um determinado nível de esterilidade seja alcançado com mínima degradação dos atributos de qualidade (características sensoriais e nutricionais) e consumo de energia. Para otimizar a inocuidade, qualidade e custo dos alimentos, o processo térmico deve ser modelado utilizando os princípios de escoamento, transferência de calor e difusão mássica. Neste trabalho, uma unidade piloto de pasteurização contínua, usada na pasteurização de sucos de frutas, foi modelada para fornecer uma ferramenta importante para avaliar o impacto do processamento térmico sobre um produto alimentício. O objetivo deste trabalho foi desenvolver e testar um modelo matemático para a pasteurização em fluxo contínuo de um líquido não newtoniano em escoamento laminar através de trocadores de calor serpentina em casco e micro-ondas com dispersões de calor e massa, perfil de velocidade e perdas de calor. O modelo contempla um conjunto de equações diferenciais para balanços de calor e massa aplicados às seções de pré-aquecimento, micro-ondas, retenção, resfriamento e conexões com as seguintes condições de contorno: fluido produto, tubo e fluidos utilidade do pré-aquecimento e resfriamento escoando contracorrente. O modelo foi resolvido usando a aproximação de diferenças finitas para componentes axiais e radiais com 100 e 30 pontos respectivamente, implementado no software gPROMS 3.2 (Process System Enterprise). Os principais resultados da simulação foram as comparações entre o processamento térmico contínuo convencional e assistido por micro-ondas das distribuições axial e radial de temperatura e atividade residual de um indicador biológico alvo, e a distribuição axial da letalidade de processo. O modelo foi aplicado para o estudo da pasteurização da polpa de manga (fluido pseudoplástico) para simulação da distribuição de temperatura e letalidade no equipamento. A técnica foi útil para analisar o desempenho do processo, espera-se que este estudo possa contribuir com o projeto do processo térmico contínuo de alimentos líquidos, a fim de garantir a inocuidade do produto com mínimo processamento e máxima retenção de nutrientes e sensorial.

Palavras-chave: Processamento térmico contínuo, fluido não-Newtoniano, modelagem matemática, pasteurização de fluxo contínuo, letalidade.

ABSTRACT

Continuous thermal processing of liquid foods requires that a given level of sterility is reached for minimum degradation of quality attributes (sensorial and nutritional characteristics) and energy consumption. In order to optimize food safety, quality and cost, the thermal process should be modeled considering flow, heat transfer and mass dispersion principles. In this work, a pilot scale unit used for pasteurization of fruit juices was modeled providing an important tool for evaluating the impact of thermal processing in a food product. The aim of this work was to develop and test a mathematical model for a continuous flow pasteurization of a non-Newtonian liquid in laminar flow through helical coils and microwave heat exchangers taking into account heat and mass dispersions, velocity profile and heat losses. The model comprises a set of differential equations for heat and mass balances applied to the pre-heating, microwave, holding tube, cooling and connections sections with the following boundary conditions: liquid food, inner tube and the heating or cooling fluid flowing in the annulus countercurrently of the coil. The model was solved using finite difference approximation and discretized for both axial and radial components with 100 and 30 points consecutively, supplied in the software gPROMS 3.2 (Process System Enterprise). Main simulation results were the comparison between conventional and microwave thermal processes of axial and radial distributions of temperature and residual activity of a target biological indicator, and the axial distribution of the integrated lethality. The model was applied for the study pasteurization of mango puree (power law fluid) to predict temperature and lethality distribution on the equipment. The technique was useful to analyze the process performance, for instance, it is expected that this study can contribute with the design of continuous thermal process of liquid foods in order to guarantee the product safety with minimal processing and maximum nutrient and sensorial retention.

Keywords: Continuous thermal process, non-Newtonian fluid, mathematical modeling, continuous flow pasteurization, lethality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de um modelo matemático fenomenológico no processamento de alimentos.....	16
Figura 3.1. Perfis de tempo-temperatura do UHT e HTST em leite	20
Figura 3.2. Perfil de temperatura típico de um processamento térmico contínuo	20
Figura 3.3. Esquema de um modelo cinético de primeira ordem para inativação enzimática sob condições isotérmicas	24
Figura 3.4. Esquema representando a classificação de fluidos alimentícios de acordo com seu comportamento reológico	27
Figura 4.1. Fotografia da unidade Lab25-UHT/HTST EHVH.....	32
Figura 4.2. Esquema da unidade Lab25-UHT/HTST EHVH.....	33
Figura 5.1. Representação do percurso do fluido produto na unidade de pasteurização.....	35
Figura 5.2. Esquema do trocador de calor serpentina em casco na seção de resfriamento	36
Figura 5.3. Aplicador de micro-ondas para fluxo contínuo.....	37
Figura 5.4. Fotografia frontal e superior do tubo de retenção helicoidal	37
Figura 5.5. Domínios radiais para as seções de pré-aquecimento e resfriamento	39
Figura 5.6. Representação da modelagem do tubo helicoidal considerando o tubo reto	42
Figura 5.7. Esquema do micro-ondas do sistema de pasteurização com as dimensões axial e radial utilizadas na modelagem matemática.....	49
Figura 5.8. Esquema do tubo de retenção do sistema de pasteurização com as dimensões axial e radial utilizadas na modelagem matemática	51
Figura 5.9. Esquema da conexão entre o pré-aquecedor e o aplicador de micro-ondas do sistema de pasteurização com as dimensões axiais e radiais utilizadas na modelagem matemática.....	54
Figura 6.1. Valor de esterilização em função do total de pontos para as discretizações axiais de 10 a 130 pontos para 30 pontos radiais.....	63
Figura 6.2. Valor de esterilização em função do total de pontos para as discretizações radiais de 30 a 100 pontos para 100 pontos axiais.....	64
Figura 6.3. Perfis de temperatura no tratamento térmico contínuo convencional da polpa de manga no centro e na superfície do tubo, temperatura média e dos fluidos utilidades	65
Figura 6.4. Perfis de temperatura do tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas da polpa de manga no centro e na superfície do tubo, temperatura média e do fluido utilidade ..	66

Figura 6.5. Comparação entre os perfis de temperatura média do tratamento térmico contínuo convencional e assistido por micro-ondas da polpa de manga.....	67
Figura 6.6. Perfis de atividade residual da peroxidase no tratamento térmico contínuo convencional.....	68
Figura 6.7. Perfis de atividade residual da peroxidase no tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas.....	68
Figura 6.8. Comparação entre os perfis de atividade residual média da peroxidase no tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas.....	69
Figura 6.9. Perfis do valor de esterilização da enzima peroxidase para o processamento térmico contínuo convencional e assistido por micro-ondas.....	70
Figura 6.10. Perfis do valor de esterilização para as difusividades térmicas efetivas na direção radial de $1 \times k_1$, $3 \times k_1$, $5 \times k_1$, $7 \times k_1$ e $9 \times k_1$ maiores que a difusividade térmica para as difusividades mássicas de: a) 10^{-4} , b) 10^{-5} , c) 10^{-6} , d) 10^{-7} , e) 10^{-8} , f) 10^{-9}	73
Figura 6.11. Perfis do valor de esterilização para as difusividades mássicas efetivas na direção radial de 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} e 10^{-9} para as difusividades térmicas efetivas.....	74
Figura 6.12. Gráfico de contorno das diferentes vazões volumétricas e temperaturas de aquecimento para o valor de esterilização do processamento térmico contínuo convencional e micro-ondas a uma temperatura de referência de $77,2 \text{ }^\circ\text{C}$	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Modelos reológicos para descrever o comportamento de fluidos não newtonianos	28
Tabela 3.2. Classificação e exemplos típicos de fluidos newtonianos e não newtonianos	29
Tabela 3.3. Exemplos de softwares de alto nível de simulação e modelagem	31
Tabela 5.1. Volumes internos do percurso do fluido produto, tempo espacial na vazão volumétrica nominal de 0,5 L/min, raio interno e comprimento da tubulação correspondente a cada trecho	38
Tabela 5.2. Temperaturas consideradas como parâmetros de entrada do modelo no estudo de caso	58
Tabela 5.3. Parâmetros de cinética de destruição térmica e atividade inicial da enzima peroxidase na entrada do trocador considerado no estudo de caso	59
Tabela 5.4. Modelos para a obtenção das propriedades termo-físicas e reológicas da polpa de manga (<i>Mangifera indica</i> L.)	59
Tabela 5.5. Parâmetros do pasteurizador e de suas seções para o estudo de caso	61
Tabela 6.1. Tempo computacional, total de pontos discretizados e valor de esterilização em função da quantidade de pontos axiais para 30 pontos radiais	63
Tabela 6.2. Tempo computacional, total de pontos discretizados e valor de esterilização em função da quantidade de pontos radiais para 100 pontos axiais	64
Tabela 6.3. Efeitos das diferentes difusividades mássicas efetivas radiais e condutividades térmicas efetivas no valor de esterilização do processamento térmico contínuo convencional para a enzima peroxidase	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALP	Fosfatase Alcalina
CFD	Fluidodinâmica Computacional
EUA	Estados Unidos da América
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
HTST	<i>High Temperature Short Time</i>
LEA	Laboratório de Engenharia de Alimentos
LPO	Lactoperoxidase
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PSE	Process System Enterprise
POD	Peroxidase
TTI	<i>Time-Temperature Integrator</i>
UFC	Unidades Formadoras de Colônia
UHT	<i>Ultra High Temperature</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Atividade enzimática (U/m^3)
A_0	Atividade enzimática inicial (U/m^3)
A_1	Área da seção transversal do escoamento do fluido produto (m^2)
A_R	Atividade enzimática residual (-)
$\overline{A_R}$	Atividade enzimática residual média de mistura (-)
C_p	Calor específico médio do fluido ($J/kg \cdot K$)
C_{p1}	Calor específico médio do fluido produto ($J/kg \cdot K$)
C_{p2}	Calor específico médio do fluido utilidade ($J/kg \cdot K$)
C_{ptb}	Calor específico médio do material do tubo ($J/kg \cdot K$)
C_{ss}	Teor de sólidos solúveis ($^{\circ}BRIX$)
D	Tempo de redução decimal (s)
D_{mass}	Difusividade mássica (m^2/s)
D_{massef}	Difusividade mássica efetiva radial (m^2/s)
D_{ref}	Tempo de decaimento decimal na temperatura de referência (s)
e_{ar}	Espessura da camada de ar entre a cavidade metálica e o tubo cerâmico do aplicador de micro-ondas (m)
e_{ca}	Espessura da cavidade metálica do aplicador de micro-ondas (m)
e_{tb}	Espessura do tubo (m)
F_{a1}	Fator de aumento da condutividade térmica radial do fluido produto (-)
h_2	Coefficiente convectivo do fluido utilidade ($W/m^2 \cdot K$)
h_{2aq}	Coefficiente convectivo do fluido utilidade na seção de pré-aquecimento ($W/m^2 \cdot K$)
h_{2resf}	Coefficiente convectivo do fluido utilidade na seção de resfriamento ($W/m^2 \cdot K$)
k	Constante cinética de primeira ordem ($1/s$)
k_1	Condutividade térmica do fluido produto ($W/m \cdot K$)
k_2	Condutividade térmica do fluido utilidade ($W/m \cdot K$)
k_{tb}	Condutividade térmica do material do tubo ($W/m \cdot K$)
k_{ef1}	Condutividade térmica radial efetiva do fluido produto ($W/m \cdot K$)
K	Índice de consistência ($Pa \cdot s^n$)

L	Fração da letalidade (-)
n	Índice de comportamento (-)
q_1	Vazão volumétrica do fluido produto (m^3/s)
\dot{Q}_1	Taxa volumétrica de geração de calor do fluido produto (W/m^3)
\dot{Q}_2	Taxa volumétrica de geração de calor do fluido utilidade (W/m^3)
\dot{Q}_{tb}	Taxa volumétrica de geração de calor do tubo (W/m^3)
r	Direção radial (m)
R	Taxa de produção/destruição volumétrica ($kg/s \cdot m^3$)
Re	Número de Reynolds (-)
Re_1	Número de Reynolds para o fluido produto (-)
R_{tb}	Raio do tubo (m)
S	Valor de esterilização (-)
t	Tempo (s)
T	Temperatura (K)
T_1	Temperatura do fluido produto (K)
\overline{T}_1	Média de mistura da temperatura do fluido produto (K)
T_{1in}	Temperatura de entrada do fluido produto (K)
T_{1in_aq}	Temperatura de entrada da seção de pré-aquecimento do fluido produto (K)
T_2	Temperatura do fluido utilidade (K)
\overline{T}_2	Média de mistura da temperatura do fluido utilidade (K)
T_{2aq}	Temperatura da água de aquecimento (K)
T_{2resf}	Temperatura da água de resfriamento (K)
T_{2in_aq}	Temperatura de entrada da água de aquecimento (K)
T_{2in_resf}	Temperatura de entrada da água resfriamento (K)
T_{amb}	Temperatura ambiente (K)
T_{ref}	Temperatura de referência para D_{ref} (K)
T_{tb}	Temperatura do tubo (K)
U_c	Coefficiente de troca térmica entre o ar ambiente e a superfície externa do tubo na conexão ($W/m^2 \cdot K$)
U_m	Coefficiente de troca térmica entre o ar ambiente, a cavidade metálica, a camada de ar e o tubo cerâmico do aplicador de micro-ondas ($W/m^2 \cdot K$)

U_t	Coeficiente de troca térmica entre o ar ambiente e a superfície externa do tubo de retenção ($W/m^2 \cdot K$)
v_r	Velocidade na direção radial (m/s)
v_z	Velocidade na direção axial (m/s)
\bar{v}_z	Velocidade axial média (m/s)
z	Direção axial (m)
z_{a1}	Posição axial de entrada da seção de pré-aquecimento (m)
z_{a2}	Posição axial de saída da seção de pré-aquecimento (m)
z_{r1}	Posição axial de entrada da seção de resfriamento (m)
z_{r2}	Posição axial de saída da seção de resfriamento (m)
z_{t1}	Posição axial de entrada da seção de retenção (m)
z_{t2}	Posição axial de saída da seção de retenção (m)
z_{red}	Variação de temperatura necessária para promover uma variação de 10 vezes no valor de D (K)

Letras gregas

$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento (1/s)
ΔT_{lm}	Média logarítmica da diferença de temperaturas MLDT (K)
μ	Viscosidade dinâmica ($kg/m \cdot s$)
ρ	Densidade do fluido (kg/m^3)
ρ_1	Densidade do fluido produto (kg/m^3)
ρ_2	Densidade do fluido utilidade (kg/m^3)
ρ_{tb}	Densidade do material do tubo (kg/m^3)
σ	Tensão de cisalhamento (Pa)
σ_0	Tensão de cisalhamento inicial (Pa)
ϑ	Viscosidade cinemática (m^2/s)

SUMÁRIO

1	<u>INTRODUÇÃO</u>	15
2	<u>OBJETIVOS</u>	17
3	<u>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	18
3.1	PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS	18
3.1.1	Processamento térmico contínuo.....	19
3.1.2	Pasteurização.....	21
3.2	INTEGRADOR TEMPO-TEMPERATURA	22
3.3	LETALIDADE NO PROCESSAMENTO TÉRMICO	23
3.4	REOLOGIA DE ALIMENTOS LÍQUIDOS	26
3.5	DIMENSIONAMENTO DE UM PROCESSO TÉRMICO	30
4	<u>MATERIAIS E MÉTODOS</u>	32
5	<u>DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO</u>	35
5.1	MODELAGEM DAS SEÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO	38
5.1.1	Modelagem do fluido produto.....	39
5.1.2	Modelagem do tubo metálico.....	45
5.1.3	Modelagem do fluido utilidade	47
5.2	MODELAGEM DA SEÇÃO DE MICRO-ONDAS	48
5.2.1	Modelagem do fluido produto.....	49
5.2.2	Modelagem do aplicador de micro-ondas	50
5.3	MODELAGEM DA SEÇÃO DE RETENÇÃO	51
5.3.1	Modelagem do fluido produto.....	52
5.3.2	Modelagem do tubo metálico.....	53
5.4	MODELAGEM DAS CONEXÕES	54
5.5	UNIÃO DAS SEÇÕES DO TROCADOR	56
5.6	SIMULAÇÃO	57
5.7	ESTUDO DE CASO	57
6	<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	62
6.1	ESTUDO 1: SENSIBILIDADE DO MODELO E SIMULAÇÃO AO NÚMERO DE PONTOS DE DISCRETIZAÇÃO.....	62
6.2	ESTUDO 2: PERFIS DE TEMPERATURA, ATIVIDADE RESIDUAL E VALOR DE	

ESTERILIZAÇÃO	65
6.3 ESTUDO 3: EFEITO DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICA E MÁSSICA	70
6.4 ESTUDO 4: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO E DA VAZÃO DO PRODUTO NO VALOR DE ESTERILIZAÇÃO.....	75
7 <u>CONCLUSÕES</u>	77
7.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	78
7.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	78
<u>REFERÊNCIAS</u>	79
APÊNDICE A: ARQUIVO FONTE DO gPROMS.....	85

1 INTRODUÇÃO

Na indústria de alimentos são adotados procedimentos com o objetivo de estender a vida de prateleira do produto e eliminar os potenciais riscos à saúde. Nos últimos anos, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias térmicas e não-térmicas foi importante para que consumidores tivessem acesso à alimentos seguros e que apresentem alta qualidade (FAO, 2019). Na revisão de Saguy et al. (2013) foram abordadas as oportunidades e desafios de pesquisas na área de alimentos, como exemplo, oferecer produtos que sejam saudáveis, funcionais, frescos, seguros e tenham qualidade a um custo competitivo no mercado mundial.

Considerando este cenário, é desafiador criar ferramentas e metodologias para desenvolver novos processos industriais que ofereçam alimentos com alta qualidade nutricional e sensorial a um custo razoável, ou seja, que sejam capazes de agregar valor e sabor ao produto.

O processamento térmico de alimentos é a técnica mais comum e tradicional de inativar enzimas indesejadas e destruir micro-organismos patogênicos e/ou deteriorantes (RAWSON et al., 2011). Neste tratamento, o alimento é submetido a um aumento de temperatura, seguido por um período de retenção na temperatura do processo, e depois o resfriamento (SINGH, HELDMAN, 2009).

Em geral, o processamento térmico convencional é realizado a partir de um trocador de calor metálico com geometria do tipo tubo helicoidal, casco-tubo, bitubular ou placas. Dos quais, os trocadores de calor a placas são usados para alimentos líquidos com baixa viscosidade aparente (leite e suco de frutas), enquanto os trocadores tubulares processam alimentos pastosos (polpas de frutas e purês).

No entanto, durante todo o tratamento térmico ocorre uma perda indesejável de qualidade do produto, tanto nutricional (como a degradação de vitaminas) quanto sensorial (mudanças de características como cor, aroma, sabor e textura). Criado o binômio: qualidade versus inocuidade tem-se um problema de otimização que consiste em tornar o alimento inócuo e duradouro, mas com as características próximas de sua origem natural.

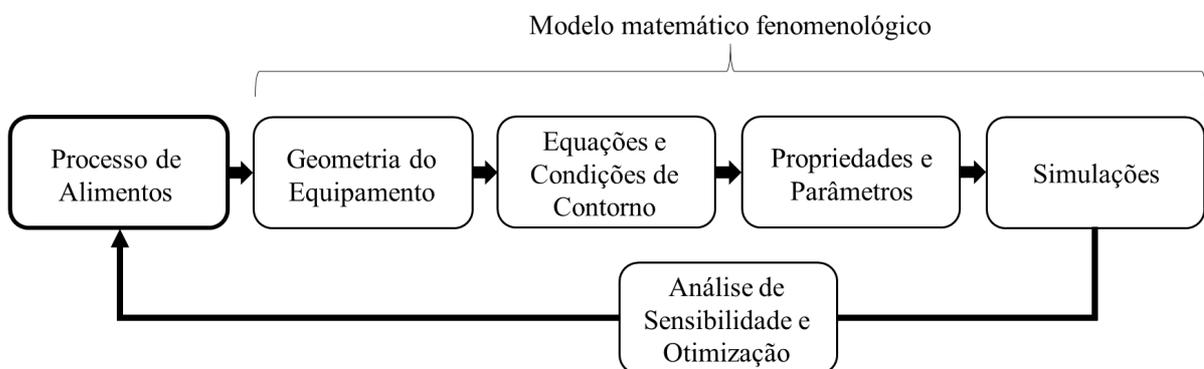
No processamento térmico de alimentos não é possível otimizar e dimensionar as condições de processamento sem um estudo sobre os fundamentos da transferência de calor na distribuição de temperatura. Estudos de otimização do processo térmico demonstraram a necessidade de modelos matemáticos para predição do perfil de temperatura e dos efeitos sobre a composição química e microbiológica do alimento (TEIXEIRA et al., 1969; ERDOGDU, KARATAS, SARGHINI, 2018). Um modelo matemático simula diferentes situações de um

sistema real e é um componente essencial para o dimensionamento das condições ótimas de processamento de um alimento (BANGA et al., 2003).

Ling et al. (2015) reforçaram a importância dos modelos cinéticos para estimar a letalidade a partir do perfil de temperatura, sendo possível garantir a satisfação do consumidor e a inocuidade do alimento. Além disso, em sua revisão, sugeriram que futuros trabalhos devem ser focados na aplicação de modelos cinéticos em alimentos reais submetidos a condições de processamento não isotérmico, otimizando e estabelecendo um modelo de processo para evitar a perda de qualidade do alimento. Van Boekel (2008) também relatou a falta de trabalhos publicados sobre como as mudanças de qualidade e inocuidade estão relacionadas a aspectos como transferência de calor e difusividade mássica, sendo indispensáveis para a análise e projeto do processo e do produto.

Alimentos, devido à sua composição biológica, são materiais heterogêneos complexos e suas propriedades variam durante o processamento térmico (VAN BOEKEL, 2004). Desenvolver um modelo matemático fenomenológico, que represente de forma realista o processamento de alimentos, é desafiador, pois a estimação e predição do comportamento de um alimento dependem do conhecimento das condições do processo (dimensionamento, equações de transferência de calor e difusividade mássica, e condições de contorno) e das propriedades do alimento (Figura 1.1). Apesar da complexidade do modelo, a partir dos resultados das simulações, pode-se realizar análises de sensibilidade, já que são de interesse para a otimização do processo (GULATI, DATTA, 2013).

Figura 1.1. Diagrama de um modelo matemático fenomenológico no processamento de alimentos



Fonte: Adaptado de GULATI e DATTA, 2013.

2 **OBJETIVOS**

Considerando o cenário apresentado na seção anterior, o presente trabalho propõe desenvolver e testar a modelagem matemática da letalidade de um indicador biológico alvo em um fluido não-newtoniano (que segue a Lei da Potência), submetido a um processo não-isotérmico, sob escoamento laminar e regime estacionário em uma unidade de pasteurização contínua assistida por micro-ondas. A modelagem deve contemplar as seções de pré-aquecimento, aquecimento por micro-ondas, retenção, resfriamento e as respectivas conexões que existem no processo e envolver fundamentos de escoamento, transferência de calor e cinética de inativação enzimática.

Estima-se que o presente trabalho contribuirá de forma significativa para o aprimoramento do dimensionamento do tratamento térmico contínuo de uma unidade piloto de pasteurização, para atender a demanda do mercado por produtos que além de inócuos, também apresentem máxima retenção nutricional e sensorial.

Para atingir os objetivos do presente trabalho, as seguintes etapas são propostas:

- a) Desenvolver a modelagem matemática (térmica e atividade residual) da unidade de pasteurização contínua assistida por micro-ondas;
- b) Estudar a sensibilidade do modelo ao número de pontos de discretização na sua resolução numérica;
- c) Avaliar a distribuição dos perfis de temperatura, atividade residual e valor de esterilização;
- d) Estudar os efeitos da condutividade térmica e difusividade mássica efetiva na direção radial;
- e) Analisar a influência da temperatura de aquecimento e da vazão volumétrica no valor de esterilização com e sem o uso do aquecimento por micro-ondas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS

O processamento térmico é o método de conservação mais utilizado na indústria alimentícia, devido a sua capacidade de produzir efeitos desejáveis na qualidade e preservação pela inativação de enzimas e micro-organismos (FELLOWS, 2006). Em alimentos líquidos, como leite, polpas e sucos de frutas, o uso do calor pode afetar a qualidade nutricional e sensorial do alimento (BRADDOCK, 1999). Contudo, a crescente demanda por alimentos mais frescos e saudáveis, com maior retenção de nutrientes, requer a necessidade de novas tecnologias de processamento de alimentos que garantam a inocuidade, qualidade e sabor (AWUAHA, RAMASWAMY, ECONOMIDES, 2007).

O estudo do processamento térmico em alimentos iniciou através das pesquisas de Nicolas Appert (1749 – 1841) e Louis Pasteur (1822 – 1895) com a esterilização e a pasteurização, respectivamente. Durante as guerras napoleônicas, Appert foi o primeiro a demonstrar que a aplicação de calor em recipientes hermeticamente fechados pode prolongar a vida de prateleira dos alimentos. Desta forma, acreditava-se que a conservação dos alimentos era devida à ausência de ar no interior do frasco. Por volta de 50 anos mais tarde, Pasteur observou que na verdade a preservação de alimentos líquidos ocorria com a inativação térmica de micro-organismos. Inicialmente, a técnica de pasteurização foi aplicada em cervejas e vinhos, e posteriormente a técnica pôde ser utilizada para leite e sucos de frutas (BYLUND, 1995; EMOND, CAMPDEN, 2001).

Essas descobertas contribuíram para que pesquisadores desenvolvessem processos mais seguros, sem atividade de enzimas indesejadas e de micro-organismos patogênicos e/ou deteriorantes, para a produção de alimentos em larga escala na indústria, como também, na produção doméstica. Conseqüentemente a utilização dos processos de conservação de alimentos pelo uso do calor foi essencial para que conservas, alimentos enlatados e líquidos chegassem ao consumidor estáveis e com maior vida de prateleira (GAVA, DA SILVA, FRIAS, 2008).

Nas indústrias de alimentos líquidos, os sistemas de processamento térmico em fluxo contínuo são os mais utilizados, pois é usada energia térmica para aumentar a temperatura, inativando micro-organismos patogênicos específicos e outros componentes que causam

deterioração do produto (SINGH; HELDMAN, 2009; RAWSON et al., 2011). Em geral, esses sistemas de tratamento térmico contínuo utilizam trocadores de calor a placas para processar alimentos com baixa viscosidade, como os sucos de frutas e leite (LEWIS, HEPPELL, 2000). No caso de alimentos com média ou alta viscosidade, ou ainda, pequenas partículas sólidas, como exemplo, polpas de frutas, purês, ketchup, maionese e papinhas, os trocadores bitubulares são os mais indicados (SKOGLUND, DEJMEK, 2008; FELLOWS, 2006; TORRES, OLIVEIRA, 1998).

3.1.1 Processamento térmico contínuo

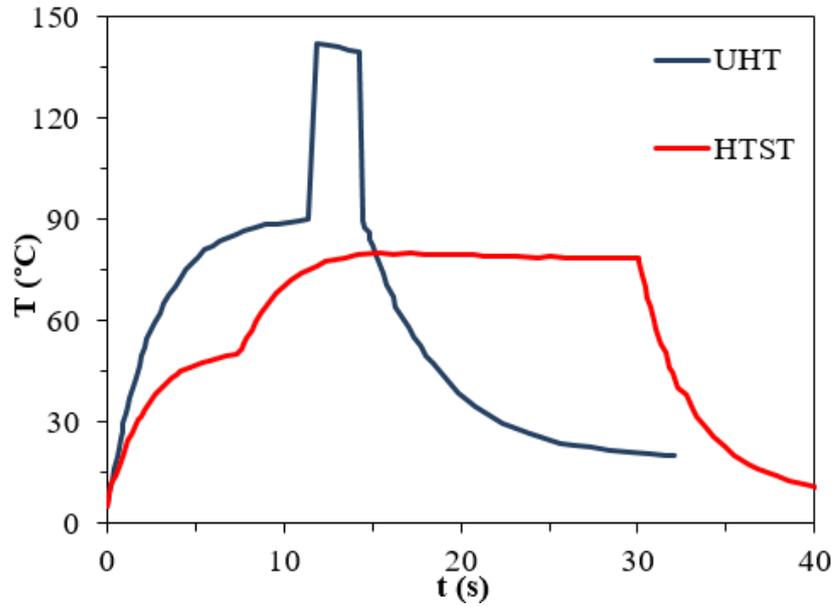
Um sistema de processamento térmico contínuo convencional pode ser: UHT (*Ultra High Temperature*) ou HTST (*High Temperature Short Time*). O primeiro tratamento térmico pode utilizar vapor saturado para obter temperaturas elevadas em um curto intervalo de tempo, podendo ocasionar grande alteração sensorial, aumento no tempo de prateleira e o armazenamento não requer refrigeração. Já a pasteurização HTST é um processamento com temperaturas abaixo de 100 °C e maior tempo de aquecimento que a UHT (LEE, BARBANO, DRAKE, 2017).

Os perfis de tempo-temperatura do UHT e HTST no processamento de leite foram comparados por Lee, Barbano e Drake (2017) (Figura 3.1). Os perfis ilustram a diferença entre os dois sistemas na exposição do alimento ao calor. No tratamento UHT o aquecimento pode causar a desnaturação do leite, resultando em um produto com menor qualidade e valor de mercado. Por outro lado, o processamento HTST foi projetado para obter a inativação do indicador biológico alvo a menores temperaturas e maior tempo, mas os atributos sensoriais e nutricionais são substancialmente retidos (FELLOWS, 2006).

Ambos os processamentos térmicos contínuos são compostos pelas etapas de aquecimento, retenção, resfriamento e, em alguns casos, para economizar energia, a etapa de regeneração de calor (FELLOWS, 2006). Na etapa de aquecimento há a necessidade de um trocador de calor responsável em atingir a temperatura e tempo de retenção necessários para inativação da enzima ou micro-organismo alvo mais termorresistente. A retenção geralmente é composta por um tubo projetado para que as condições de processamento térmico, binômio tempo e temperatura, sejam atingidas. Finalmente, a etapa de resfriamento composta por um trocador de calor para interromper o processamento térmico (SINGH, HELDMAN, 2009). A

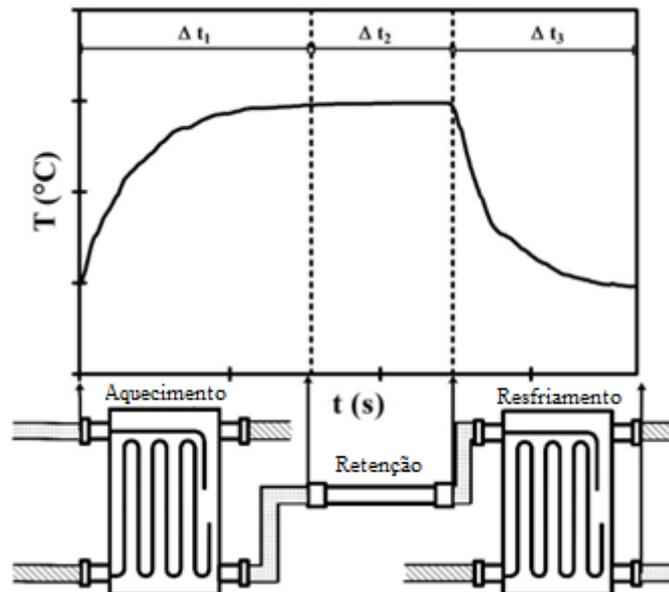
Figura 3.2 ilustra as três etapas de uma pasteurização HTST com o perfil de temperatura de cada etapa.

Figura 3.1. Perfis de tempo-temperatura do UHT e HTST em leite



Fonte: Adaptado de LEE, BARBANO, DRAKE, 2017.

Figura 3.2. Perfil de temperatura típico de um processamento térmico contínuo



Fonte: Adaptado de SIGUEMOTO, 2018b.

A utilização do calor em um processo pode alterar ou destruir componentes dos alimentos responsáveis pelo sabor, cor, aroma e textura, resultando em um produto de menor qualidade e valor agregado. As condições do tratamento térmico da pasteurização (HTST) levam em consideração a inativação do indicador biológico alvo mais termorresistente e a preservação das características nutricionais e sensoriais do alimento. Assim, o produto final, diferentemente de uma esterilização comercial, não fica totalmente livre de micro-organismos. Porém, o seu desenvolvimento fica dificultado pela maneira com que é feito o armazenamento do produto, sendo necessária uma associação com outros métodos de conservação, como exemplo: refrigeração, congelamento, conservantes ou aditivos (LEWIS; HEPPELL, 2000; FELLOWS, 2006; LEE, BARBANO, DRAKE, 2017).

3.1.2 Pasteurização

A pasteurização é um tratamento térmico mais brando, em que o alimento é processado a temperaturas abaixo de 100 °C (FELLOWS, 2006). Neste processamento, alimentos de baixa acidez ($\text{pH} > 4,5$), como o leite, o calor é usado para reduzir possíveis riscos à saúde de micro-organismos patogênicos e/ou deteriorantes e aumentar a vida de prateleira por alguns dias. Em contrapartida, alimentos mais ácidos ($\text{pH} < 4,5$), como exemplo, sucos de frutas cítricas, a acidez é alta o suficiente para inibir o crescimento de micro-organismos, então o calor é utilizado para inativar enzimas e/ou destruir esporos de micro-organismos (AWUAHA, RAMASWAMY, ECONOMIDES, 2007; FELLOWS, 2006; GAVA, DA SILVA, FRIAS, 2008). Em ambos os tipos de alimentos, mudanças mínimas são causadas nas características sensoriais pelo uso do HTST.

O desenvolvimento de novas tecnologias de processamento térmico contínuo para pasteurização de alimentos líquidos busca produtos de melhor aceitação pelo consumidor. Essas tecnologias empregam temperatura e tempo mínimos para garantir a inativação de enzimas e micro-organismos, e minimizar a degradação de nutrientes (TRIBESS et al., 2009).

A pasteurização pode ser atingida também com o auxílio de novas tecnologias térmicas (micro-ondas, radio frequência, aquecimento ôhmico) e não-térmicas (alta pressão hidrostática, tratamento ultravioleta, pulsos elétricos e ultrassom de alta intensidade) com mínimas interferências na cor, sabor ou valor nutricional dos alimentos (CHANDRASEKARAN, RAMANATHAN, BASAK, 2013; PEREIRA, VICENTE, 2010). Além disso, a maioria dessas

novas tecnologias economizam em média 70% da energia gasta com o uso de tratamentos térmicos tradicionais (PEREIRA, VICENTE, 2010).

O uso do micro-ondas como alternativa para a pasteurização contínua de alimentos líquidos, minimiza alterações nos atributos de qualidade do produto, e tem sido estudado visando melhorar, substituir ou complementar a tecnologia de processamento convencional por trocadores de calor (RAWSON et al., 2011). A adoção do aquecimento em micro-ondas nas indústrias de alimentos tem o objetivo de fornecer produtos melhores para os consumidores (SALAZAR-GONZÁLEZ et al., 2012).

Leite (2018) estudou o impacto do processo térmico assistido por micro-ondas nos leites humano e bovino no intervalo de temperatura de 50 a 80 °C. A pesquisadora obteve boa eficiência na inativação de micro-organismos e na preservação de ácidos graxos. De maneira que o tratamento térmico assistido por micro-ondas reduziu as perdas de proteínas em relação ao tratamento convencional, mostrando ser uma boa alternativa para o processamento.

3.2 INTEGRADOR TEMPO-TEMPERATURA

A avaliação do impacto de um tratamento térmico sobre atributos de inocuidade e qualidade de um alimento é essencial para avaliação ou o projeto de um processo. A avaliação *in situ* de contagem de micro-organismos ou conteúdo de vitaminas é usualmente demorada e cara. De forma alternativa, esse impacto pode ser avaliado de duas maneiras: 1) teoricamente, analisando o histórico de temperatura do produto, podendo ser experimental e/ou do modelo de simulação, ou das distribuições de temperatura e de tempo de residência, agregado à cinética de degradação térmica; 2) experimentalmente, utilizando integradores de tempo-temperatura (TTI, *Time-Temperature Integrator*) como indicadores indiretos de qualidade e inocuidade, sendo um método mais rápido, fácil e confiável (LEWIS, HEPPEL, 2000; VAN LOEY et al., 1999).

Um TTI é um componente termicamente sensível, intrínseco ou extrínseco ao alimento, que permite quantificar o impacto do processo térmico sobre um atributo de inocuidade ou de qualidade (VAN LOEY et al., 1999). O princípio de ação de um TTI pode ser biológico, químico ou físico. As alterações que o processo provoca no TTI devem ser irreversíveis e de dinâmica similar ao atributo que é estudado (HENDRICKX et al., 1995).

Na pasteurização HTST, os TTI baseados nas enzimas fosfatase alcalina (ALP) e

lactoperoxidase (LPO), intrínsecas ao leite bovino, são utilizados na avaliação do sub-processamento e sobre-processamento do leite, respectivamente (CLAEYS, VAN LOEY, HENDRICKX, 2002).

No caso do leite bovino, o micro-organismo alvo é a bactéria *Mycobacterium tuberculosis*, porém a enzima ALP, também presente no alimento, apresenta maior resistência ao calor que a bactéria e pode ser rapidamente testada para garantir o controle de qualidade com eficiência (FOX; McSWEENEY, 1998; ANGELINO et al., 1999). Em laticínios, a avaliação da inativação da enzima faz parte da rotina de controle de qualidade do leite, sendo uma medida de eficiência da pasteurização.

Regulamentações europeias exigem que a pasteurização de leite deve apresentar atividade positiva para a enzima lactoperoxidase, natural desse alimento. Isso garante que o produto não sofreu sobre-processamento térmico, pois essa enzima não é totalmente desnaturada na pasteurização, mas somente a temperaturas de processo mais elevadas (LEWIS; HEPPELL, 2000).

Aguiar, Yamashita e Gut (2012) desenvolveram e testaram TTIs para avaliar o impacto da pasteurização HTST em alimentos líquidos de baixa viscosidade, como sucos e leites. Ao invés de desenvolver o TTI para um tipo específico de alimento, os autores testaram as enzimas mais recorrentes desses alimentos de baixa viscosidade utilizando a água como base. As enzimas peroxidase (POD), LPO e ALP em tampão fosfato foram testadas e determinadas suas atividades residuais. Após tratamentos térmicos descontínuos em diferentes combinações de temperatura de processo (70 – 85 °C) e tempo de retenção (10 – 60 s), apenas o indicador ALP mostrou adequado para o uso. Suas vantagens são o reduzido custo específico, a facilidade de medição da atividade enzimática e parâmetros cinéticos adequados para avaliar os processos de pasteurização HTST.

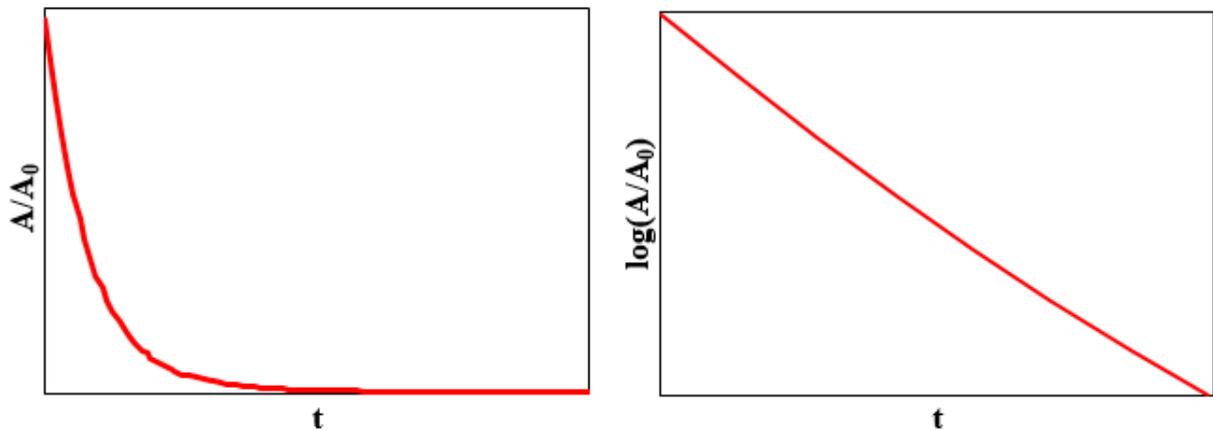
3.3 LETALIDADE NO PROCESSAMENTO TÉRMICO

A letalidade de um processo térmico é representada pelo número de ciclos logarítmicos reduzidos de uma população de micro-organismos ou atividade enzimática. Em geral, a cinética de degradação térmica no processamento de alimentos é expressa pela cinética de primeira ordem com os parâmetros D , tempo de redução decimal, e z_{red} , a variação de temperatura necessária para promover uma variação de 10 vezes no valor de D , válidos para uma

determinada faixa de temperatura de processo, tipo de micro-organismo ou enzima (IBARZ, BARBOSA-CÁNOVAS, 2003; FELLOWS, 2006; LEWIS, HEPPEL, 2000).

Os parâmetros D e z_{red} descrevem a inativação de micro-organismo ou enzima em alimentos como um decaimento semi-logaritmo sob condições isotérmicas (BIGELOW, 1921). O decaimento semi-logaritmo é ilustrado na Figura 3.3, em que A representa atividade enzimática (U/m^3) e A_0 a atividade enzimática antes do processamento térmico (U/m^3) que apresentam cinética de inativação térmica de primeira ordem.

Figura 3.3. Esquema de um modelo cinético de primeira ordem para inativação enzimática sob condições isotérmicas



Fonte: Adaptado de SIGUEMOTO, 2018b.

Considerando A a atividade enzimática (U/m^3) em função do tempo de processamento, tem-se a Equação (3.1) que expressa uma cinética de primeira ordem (TOLEDO, 1999).

$$\frac{dA}{dt} = -k \cdot A \quad (3.1)$$

em que:

k = constante cinética de primeira ordem (1/s)

t = tempo de processo (s).

A forma integrada é expressa baseada no logaritmo decimal da Equação (3.1), para a condição inicial ($t = 0$), A é igual a A_0 , ou seja, a atividade enzimática inicial é determinada pela Equação (3.2) (TOLEDO, 1999):

$$\log\left(\frac{A}{A_0}\right) = -\frac{k}{2,303} \cdot t \quad (3.2)$$

A relação da atividade enzimática pela atividade inicial é chamada de A_R , atividade enzimática residual (-) como apresentado na Equação (3.3).

$$A_R = \frac{A}{A_0} \quad (3.3)$$

O parâmetro D representa o tempo necessário para que a atividade inicial, A_0 , tenha uma redução de 90%, a uma temperatura constante. Analogamente, a atividade residual, A_R , consiste em 10% do valor inicial (TOLEDO, 1999).

O tempo de redução decimal é utilizado na indústria como garantia de inocuidade do alimento. Como exemplo, no caso do processamento térmico de sucos de frutas, a agência americana *Food and Drug Administration* (FDA, 2004) atesta que o sistema de pasteurização de suco de frutas deve atingir uma redução de pelo menos $5 \log_{10}$, ou o equivalente ao tempo de 5 reduções decimais, para o indicador biológico de maior preocupação deteriorante. A Equação (3.4) é representada pela Equação (3.2) quando $t = D$ (TOLEDO, 1999).

$$\log\left(\frac{0,1 \cdot A_0}{A_0}\right) = -\frac{k}{2,303} \cdot D \quad (3.4)$$

em que:

D = tempo de redução decimal, a uma determinada temperatura (s).

A partir da Equação (3.4), o tempo de redução decimal, D , pode ser expressa em função da constante cinética, k , pela Equação (3.5).

$$k = \frac{2,303}{D} \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação (3.5) na Equação (3.2), tem-se a Equação (3.6).

$$\log(A_R) = -\frac{t}{D} \quad (3.6)$$

O valor de esterilização, S , é indicado pela Equação (3.7), válido para processos isotérmicos (TOLEDO, 1999).

$$S = -\log(A_R) = \frac{t}{D} \quad (3.7)$$

em que:

S = valor de esterilização (-).

O tempo de redução decimal, a uma determinada temperatura, e a fração da letalidade, L , são dependentes da temperatura e podem ser determinados a partir do parâmetro Z_{red} (Equações (3.8) e (3.9)) (TOLEDO, 1999).

$$D = D_{ref} \cdot 10^{\left(\frac{T_{ref}-T}{z_{red}}\right)} \quad (3.8)$$

$$L = 10^{\left(\frac{T_{ref}-T}{z_{red}}\right)} \quad (3.9)$$

em que:

D_{ref} = tempo de redução decimal a temperatura de referência (s);

L = fração da letalidade (-);

T_{ref} = temperatura de referência (K);

T = temperatura, dependente da posição axial e radial (K);

z_{red} = variação de temperatura necessária para promover uma variação de 10 vezes no valor de D (°C).

Kechichian, Crivellari, Gut e Tadini (2012) desenvolveram um modelo matemático para um processo térmico contínuo em trocador de calor bitubular, no qual levou em conta as dispersões efetivas de massa e energia, a letalidade que ocorre no aquecimento e resfriamento e o perfil de velocidade. A partir dos resultados das simulações do processo térmico, verificou-se que uma importante parcela da letalidade do processo ocorre nas seções de aquecimento e resfriamento, independente das hipóteses adotadas no modelo. Entretanto, em um tratamento térmico ideal, a letalidade deveria ocorrer apenas no tubo de retenção, sendo necessário o estudo de processamentos térmicos com maior eficiência nas seções de aquecimento e resfriamento.

3.4 REOLOGIA DE ALIMENTOS LÍQUIDOS

A reologia é definida como a resposta de um material, diante a uma tensão ou deformação, em forma de compressão ou extensão. Sendo que esta deformação, sofrida pelo material, pode alterar sua estrutura, viscosidade, estabilidade e/ou aspectos sensoriais, podendo comprometer o dimensionamento do processamento térmico (STEFFE, 1996). Alimentos líquidos como o leite, normalmente se comportam como um fluido newtoniano. Em contrapartida, alimentos contendo compostos poliméricos solúveis, sólidos insolúveis ou imiscíveis exibem comportamento não newtoniano como purês de frutas, em geral, seguem a lei de potência (RAO, 2005).

Todos os alimentos apresentam propriedades reológicas e são de grande utilidade na indústria para:

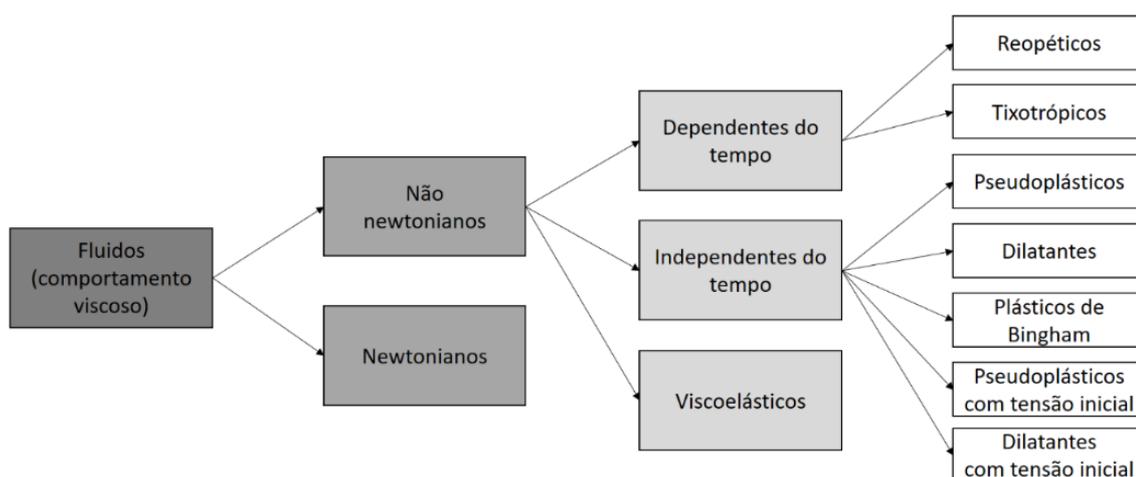
- Cálculos em engenharia de processos envolvendo uma variedade de equipamentos tais

como: bombas, tubulações, extrusoras, misturadores e trocadores de calor;

- Determinar a funcionalidade de um ingrediente no desenvolvimento de produtos;
- Testes de vida de prateleira;
- Avaliar a textura do alimento e correlacioná-la com análise sensorial (STEFFE, 1996).

Os alimentos líquidos são classificados quanto ao seu comportamento reológico em newtonianos e não newtonianos, este último ainda pode apresentar comportamento dependente ou independente do tempo, conforme mostrado na Figura 3.4 (ROMERO e DITCHFIELD, 2016).

Figura 3.4. Esquema representando a classificação de fluidos alimentícios de acordo com seu comportamento reológico



Fonte: Adaptado de ROMERO e DITCHFIELD, 2016.

Um fluido alimentício é classificado como newtoniano quando há uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento (ou gradiente de velocidade) e a reta passa pela origem (ROMERO e DITCHFIELD, 2016). Exemplos de alimentos que possuem baixa densidade molecular como leites, alguns tipos de sucos, óleos, soluções de sacarose, entre outros, possuem características correspondentes à Lei de Newton (RAO, 2005). O modelo que descreve este tipo de fluido é dado pela Equação (3.10) (STEFFE, 1996).

$$\sigma = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3.10)$$

em que:

σ = tensão de cisalhamento (Pa);

$\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento (1/s);

μ = viscosidade dinâmica (kg/m · s).

Analogamente, outra característica dos fluidos newtonianos é a viscosidade, resistência interna ao escoamento, a qual apresenta relação direta entre a viscosidade dinâmica e cinemática, sendo representada na Equação (3.11). A viscosidade destes fluidos que seguem a Lei de Newton é influenciada somente pela temperatura do fluido e sua composição (STEFFE, 1996).

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.11)$$

em que:

ϑ = viscosidade cinemática (m²/s);

ρ = densidade do fluido (kg/m³).

Por outro lado, um grande número de alimentos líquidos apresenta comportamento não newtoniano, sendo então divididos em: fluidos dependentes do tempo, fluidos independentes do tempo e fluidos viscoelásticos, com comportamento de um fluido com algumas características típicas de um sólido (Figura 3.4). Vários modelos reológicos têm sido propostos para descrever esses fluidos, como os modelos de Ostwald-de-Waele ou Lei de Potência (Equação 3.12), Bingham (Equação 3.13), Herschel-Bulkley (Equação 3.14), Casson (Equação 3.15) e Casson modificado (Equação 3.16) que representa o comportamento dos fluidos, conforme mostrado na Tabela 3.1 (STEFFE, 1996).

Tabela 3.1. Modelos reológicos para descrever o comportamento de fluidos não newtonianos

Modelo	Equação
Lei de Potência	$\sigma = K(\dot{\gamma})^n$ (3.12)
Bingham	$\sigma = K(\dot{\gamma}) + \sigma_0$ (3.13)
Herschel-Bulkley	$\sigma = K(\dot{\gamma})^n + \sigma_0$ (3.14)
Casson	$\sigma^{0,5} = K(\dot{\gamma})^{0,5} + \sigma_0^{0,5}$ (3.15)
Casson modificado	$\sigma^{0,5} = K(\dot{\gamma})^n + \sigma_0^{0,5}$ (3.16)

Fonte: Adaptado de STEFFE, 1996.

em que:

K = índice de consistência (Pa · sⁿ);

σ_0 = tensão de cisalhamento inicial (Pa);

n = índice de comportamento do fluido ou índice de fluxo (-).

Para os fluidos classificados como independentes do tempo, à temperatura constante, a viscosidade dinâmica depende somente da taxa de cisalhamento. Dentre estes fluidos estão os plásticos de Bingham (margarinas, óleos vegetais, entre outros), os fluidos pseudoplásticos ou *shear thinning* (sucos de frutas concentrados, purês de frutas e vegetais) e os fluidos dilatantes ou *shear thickening* (alguns tipos de mel e suspensões de amido). Porém, para os fluidos dependentes do tempo, a viscosidade aparente também depende do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, ou escoamento. Sendo divididos em tixotrópicos (maionese, iogurte) e reopéticos (argila bentonita) (HOLDSWORTH, 1993; ROMERO e DITCHFIELD, 2016).

O modelo de Herschel-Bukley, na Equação (3.14), é o mais comum para caracterizar fluidos não newtonianos apenas variando os parâmetros reológicos K , σ_0 e n . Baseando-se na magnitude do índice de comportamento do fluido e de consistência, é possível caracterizar o comportamento do alimento, conforme a Tabela 3.2 (BARBOSA-CÁNOVAS et al., 1996).

Tabela 3.2. Classificação e exemplos típicos de fluidos newtonianos e não newtonianos

Fluido	K	n	σ_0	Exemplos típicos
Herschel-Bulkley	> 0	$0 < n < \infty$	> 0	Pasta de peixe, purê de uva passa, espumas aquosas
Newtoniano	> 0	1	0	Água, alguns sucos de frutas, leite, mel, óleo vegetal
Pseudoplástico	> 0	$0 < n < 1$	0	Compota de maçã, purê de banana, polpa de manga, concentrado de suco de laranja
Dilatante	> 0	$1 < n < \infty$	0	Alguns tipos de mel, suspensões de amido
Plástico de Bingham	> 0	1	> 0	Ketchup, extrato de tomate, alimentos com alto teor de gordura (chocolate, margarina)

Fonte: Adaptado de STEFFE, 1996 e BARBOSA-CÁNOVAS et al., 1996.

3.5 DIMENSIONAMENTO DE UM PROCESSO TÉRMICO

O estudo das condições do processamento térmico (escoamento, reologia, propriedades termo-físicas e marcador biológico) são úteis para dimensionar, simular e determinar condições ótimas para garantir um produto com melhor retenção nutricional e sensorial, tempo de prateleira, menor custo e impacto ambiental (BANGA et al., 2003).

Para dimensionar o processo térmico deve-se selecionar o indicador biológico mais termorresistente, considerando aspectos de inocuidade alimentar e qualidade, presente no alimento. Este marcador pode ser um nutriente, micro-organismo ou enzima e será utilizado como parâmetro para a pasteurização, a partir do cálculo do binômio tempo-temperatura da atividade ou população residual deste indicador após o processamento térmico.

O dimensionamento também leva em consideração as propriedades termo-físicas e a reologia do alimento. As propriedades termo-físicas (densidade, capacidade térmica, constantes de troca térmica e etc.) e reológicas geralmente são dependentes da temperatura do processo. Em geral, a reologia apresentada por alimentos líquidos, no caso de purês, concentrados e alguns sucos de fruta seguem a lei de potência (STEFFE, 1996).

As condições do processamento são importantes para o dimensionamento, pois contribuem para reduzir custo, utilizando tempo e temperatura mínimos para garantir a letalidade, e, conseqüentemente, evita o sobre-processamento, com perdas sensoriais e de qualidade.

Estudos recentes do processamento térmico contínuo utilizando diferentes tipos de alimentos líquidos (newtonianos e não-newtonianos), trocadores de calor (placas, bitubular, serpentina em casco), distribuição do tempo de residência, integradores de tempo e temperatura, dispersões de massa e transferência de energia têm sido realizados para determinar as melhores condições do processamento térmico de alimentos e contribuir com o dimensionamento (SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a; DANTAS, GUT, 2018; CANO, 2016; AGUIAR, GUT, 2014; BENZE, 2013; KECHICHIAN, CRIVELLARI, GUT, TADINI, 2012).

Banga et al. (2003) apresentaram ferramentas computacionais adotadas para melhorar o processamento térmico de alimentos. Os softwares utilizados para modelar, simular e definir as condições mais adequadas para a conservação de alimentos, estão listados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Exemplos de softwares de alto nível de simulação e modelagem

Software	Empresa	Exemplos de utilização em alimentos
ABACUS II	MIT, EUA	Produção de ácido cítrico (CHEKHOVA, BARTON & GORAK, 2000).
EcosimPro	EA International, Espanha	Indústria de açúcar (PRADA, 2001).
gPROMS	Process Systems Enterprise (PSE), Inglaterra	Secagem (SUN, PANTELIDES, & CHALABI, 1995). Processamento térmico em micro-ondas (SAA, ALONSO, BANGA, 1998; BANGA, SAA, ALONSO, 1999). Processamento térmico convencional (DANTAS, GUT, 2018; AGUIAR, GUT, 2014; GEORGIARDIS, ROTSTEIN, & MACCHIETTO, 1998).

Fonte: Adaptado de BANGA et al., 2003.

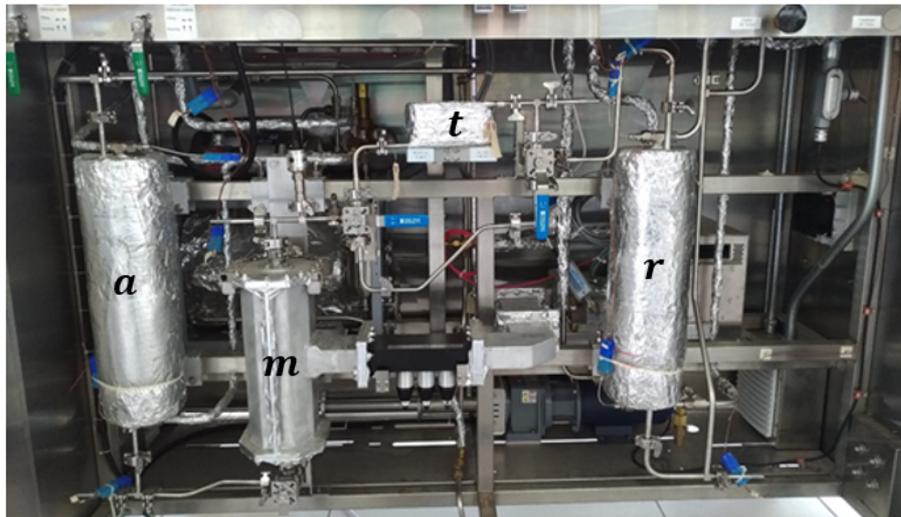
Dantas e Gut (2018) desenvolveram e testaram um modelo matemático de transferência de calor e difusividade mássica de um trocador de calor bitubular para simulação de um processamento térmico contínuo de um alimento líquido viscoso, não-newtoniano que segue a lei de potência, homogêneo, em regime laminar difusivo. O modelo contempla as seções de aquecimento, retenção e resfriamento. Balanços diferenciais de energia e massa foram aplicados para modelar a troca térmica e a letalidade de micro-organismos e enzimas ou nutrientes. O modelo foi resolvido através do método de diferenças finitas, discretizando componentes axiais e radiais. A simulação foi implementada e resolvida em gPROMS 3.2 (Process System Enterprise) e o modelo proposto representou satisfatoriamente as distribuições axiais e radiais de temperatura e letalidade ao longo do processamento térmico.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia de Alimentos (LEA) da Escola Politécnica da USP (EPUSP). O LEA possui estudos na área de processamento térmico de alimentos líquidos buscando produtos com melhor valor nutricional e sensorial desde 1997 de forma que a infraestrutura existente será usada para o presente trabalho.

Neste trabalho, utilizou-se uma unidade Lab25-UHT/HTST EHVH (MicroThermics, Raleigh, EUA) para realizar a modelagem proposta no capítulo 5. A unidade em questão é apresentada na Figura 4.1 e o seu fluxograma na Figura 4.2.

Figura 4.1. Fotografia da unidade Lab25-UHT/HTST EHVH



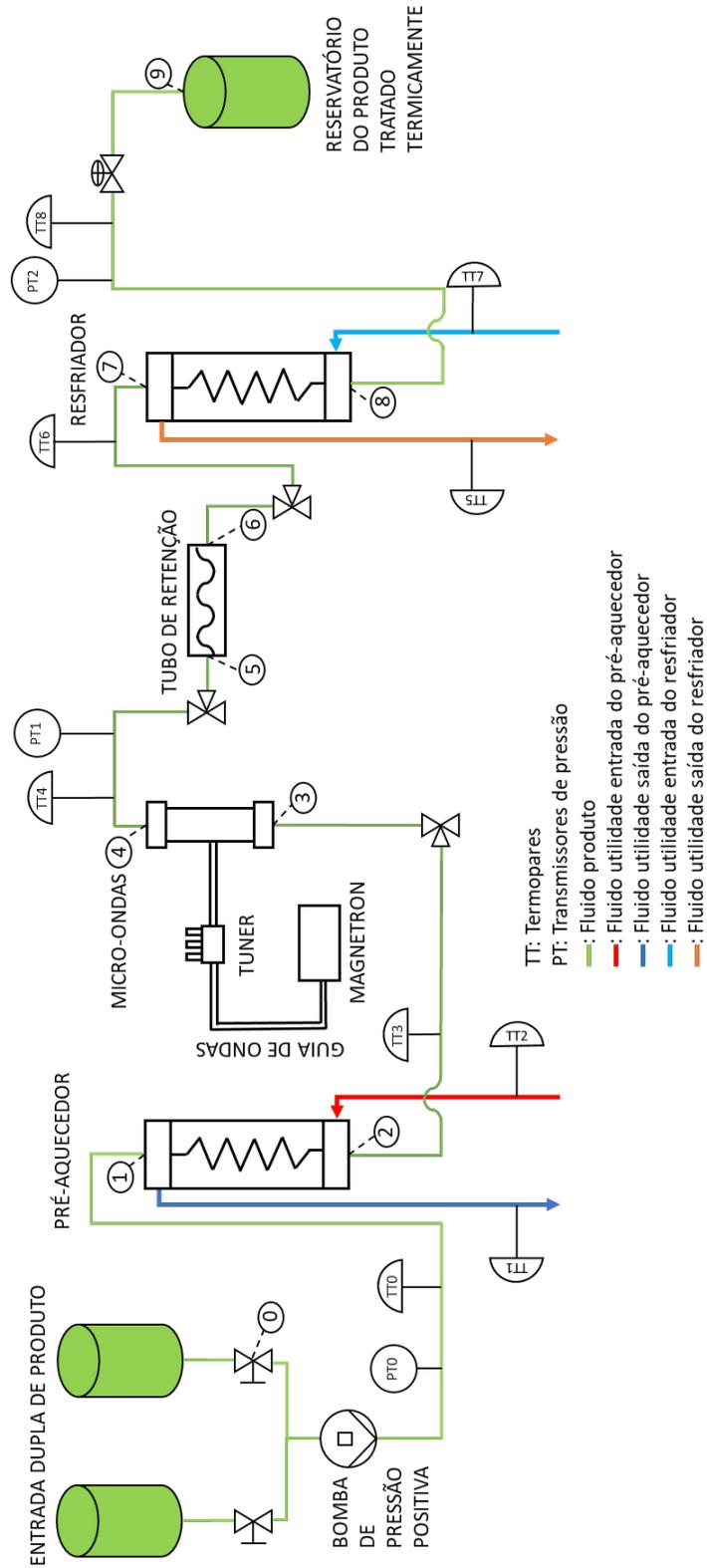
a: Pré-aquecedor, **m:** Micro-ondas, **t:** Retenção, **r:** Resfriador.

Fonte: Autor, 2019.

Esse equipamento, representado pela Figura 4.1, é utilizado para o processamento térmico contínuo de alimentos líquidos assistido por micro-ondas e possui capacidade de 0,4 L/min a 2,0 L/min e temperatura máxima de aquecimento de 150 °C.

O equipamento foi projetado para pasteurizar alimentos líquidos de baixa e média viscosidade, como exemplo, água de coco, sucos e polpas de frutas. Dois reservatórios alimentam o sistema, alternando entre produto e água pela entrada dupla (*válvula dual inlet*). A alimentação é bombeada para a unidade de processamento, a qual está dividida em quatro seções principais: pré-aquecedor, aplicador de micro-ondas focalizadas, tubo de retenção e resfriador.

Figura 4.2. Esquema da unidade Lab25-UHT/HTST EHVH



Fonte: Adaptado de SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a.

O pré-aquecedor é um trocador de calor tipo serpentina em casco, o qual está ligado a um circuito de água quente com controle de temperatura e potência máxima de 18 kW. A água quente (fluido utilidade) escoar em circuito fechado com bomba centrífuga e em contracorrente no lado do casco. A serpentina possui comprimento de 9,26 m, diâmetro interno de 7,75 mm e externo de 9,51 mm (SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a).

Em seguida, o fluido produto passa pela seção do aplicador de micro-ondas focalizadas, sendo o aplicador em um tubo na vertical de 0,33 m de comprimento e 6,6 mm de diâmetro conectado por uma cavidade (local onde o alimento ficará exposto à incidência das micro-ondas) com um magnetron de 2450 MHz e 6 kW equipado com um sensor de potência refletida e conectado ao software *Microwave Power Meter*. O sensor usado para ajustar a potência refletida para o magnetron, por meio de um sintonizador de micro-ondas composto por três pinos. O ajuste manual dos pinos deve ser realizado com a finalidade de obter a menor potência refletida possível (SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a).

Após o aplicador de micro-ondas, o fluido produto quente escoar até a seção de retenção, um tubo com isolamento térmico com comprimento de 3,12 m, diâmetro interno de 7,75 mm e externo de 9,51 mm, e o tempo de residência de 18 s na vazão nominal de 0,5 L/min (SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a).

Na etapa de resfriamento do processo, o fluido produto quente entra no lado serpentina do trocador de calor, tipo serpentina em casco, e o lado casco está ligado a um circuito fechado de água gelada contracorrente provindo de um *chiller* MAS-5-RI-220/C (Mecalor, Brasil). Este *chiller* opera com capacidade de 3,50 kW e atua com um *set point* de 2 °C. Para esta seção, a serpentina possui comprimento de 9,90 m, diâmetro interno de 9,40 mm e externo de 12,7 mm (SIGUEMOTO, PIRES, FUNCIA, GUT, 2018a).

Na Figura 4.2 é possível observar o posicionamento dos termopares (TT) ao longo do escoamento do fluido produto e nas entradas e saídas das utilidades. A temperatura do alimento após o pré-aquecedor (TT3) foi controlada automaticamente pela manipulação da potência do aquecedor elétrico do fluido utilidade (de 0 a 100 %). As temperaturas e a potência do pré-aquecedor são monitoradas e registradas a cada 10 segundos pelo sistema integrado de aquisição de dados.

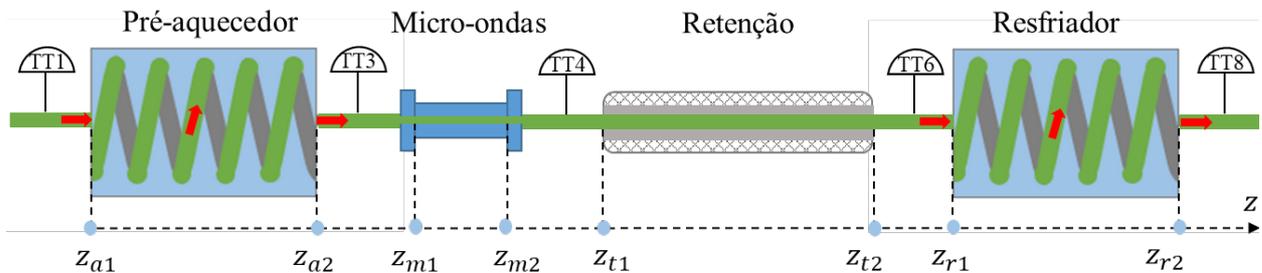
5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

A modelagem proposta neste trabalho foi baseada nos trabalhos de Kechichian, Crivellari, Gut e Tadini (2012) e Dantas e Gut (2018), em que os autores desenvolveram um modelo matemático para o processamento térmico contínuo em trocador de calor bitubular.

O desenvolvimento do modelo matemático do processo de pasteurização foi composto pelas seções: 1) Pré-aquecedor: cuja função é aquecer o produto até a temperatura de tratamento térmico; 2) Micro-ondas: também responsável pelo aquecimento do fluido produto; 3) Retenção: o produto escoa em um tubo por um determinado tempo a uma temperatura constante; 4) Resfriamento: seção responsável pelo resfriamento do produto, cujo objetivo é cessar rapidamente os efeitos do aquecimento após o correto tratamento térmico e 5) Conexões: ligações entre os trocadores de calor e o tubo de retenção em que o fluido produto escoa.

No modelo proposto, o percurso do fluido produto pela unidade de pasteurização foi marcado em 8 pontos na direção axial (z) monitorados por 5 termopares (TT), a partir da entrada do produto no pré-aquecedor até a saída do produto no resfriador, conforme apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1. Representação do percurso do fluido produto na unidade de pasteurização



Fonte: Autor, 2019.

sendo:

- z_{a1} = entrada do produto no pré-aquecedor (m);
- z_{a2} = saída do produto no pré-aquecedor (m);
- z_{m1} = entrada do produto no micro-ondas (m);
- z_{m2} = saída do produto no micro-ondas (m);
- z_{t1} = entrada do produto no tubo de retenção (m);

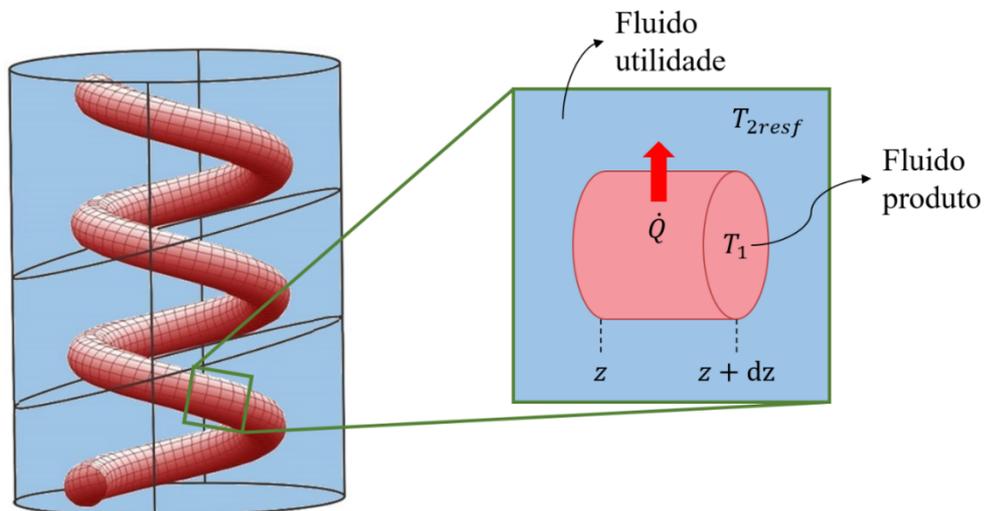
z_{t2} = saída do produto no tubo de retenção (m);

z_{r1} = entrada do produto no resfriador (m);

z_{r2} = saída do produto no resfriador (m).

As seções de pré-aquecimento e resfriamento são compostas por um trocador de calor serpentina em casco, em que o fluido produto escoa através do tubo e no espaço do casco escoo o fluido de utilidade, conforme ilustrado na Figura 5.2. A superfície externa do trocador de calor possui isolamento térmico, portanto é desprezível a troca de calor com o ambiente. As propriedades dos fluidos são constantes e calculadas na temperatura média aritmética entre a entrada e a saída através de correlações preditivas adequadas.

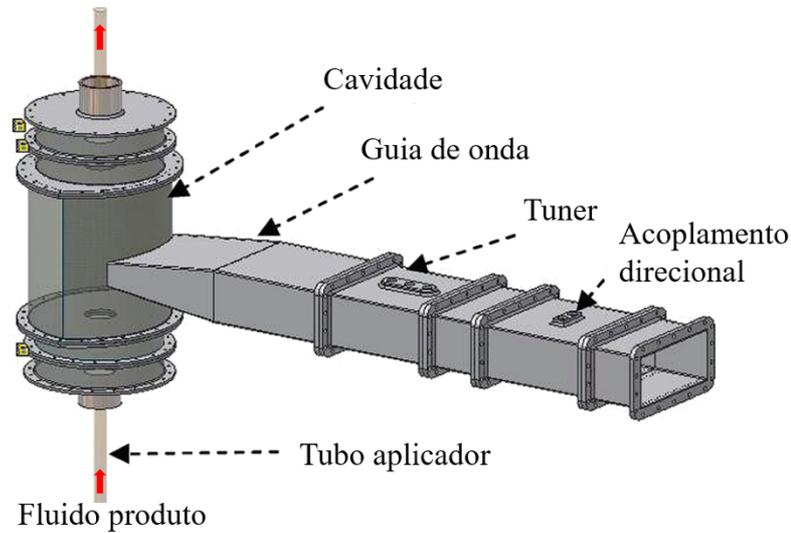
Figura 5.2. Esquema do trocador de calor serpentina em casco na seção de resfriamento



Fonte: Adaptado de RAJU e KUMAR, 2010.

O equipamento também permite o aquecimento do fluido produto por meio do aplicador de micro-ondas. Na Figura 5.3, é ilustrada a ligação entre o *magnetron* e o aplicador de micro-ondas com o *tuner* na guia de onda. As setas vermelhas indicam o escoamento do fluido produto pelo tubo cerâmico vertical que fica no centro da cavidade do aplicador.

Figura 5.3. Aplicador de micro-ondas para fluxo contínuo



Fonte: Adaptado de BOLDOR, BALASUBRAMANIAN, PUROHIT, RUSCH, 2008.

Na seção de retenção, o fluido produto passa por um tubo tipo serpentina semi-helicoidal com isolamento térmico, observado na Figura 5.4. Além disso, o tubo de retenção possui diâmetro igual ao tubo da seção de pré-aquecimento.

Figura 5.4. Fotografia frontal e superior do tubo de retenção helicoidal



Fonte: Autor, 2019.

Para as conexões localizadas entre as seções de pré-aquecimento, micro-ondas, retenção e resfriamento, o comprimento da tubulação foi determinado no trabalho de Pires (2015) e é indicado na Figura 5.1 pelo trajeto do ponto z_{a1} ao z_{r2} . Após a determinação dos comprimentos dos tubos e seus respectivos diâmetros, o autor calculou o volume interno da tubulação e os respectivos tempos espaciais, razão entre o volume interno de cada trecho pela vazão volumétrica de 0,5 L/min (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Volumes internos do percurso do fluido produto, tempo espacial na vazão volumétrica nominal de 0,5 L/min, raio interno e comprimento da tubulação correspondente a cada trecho

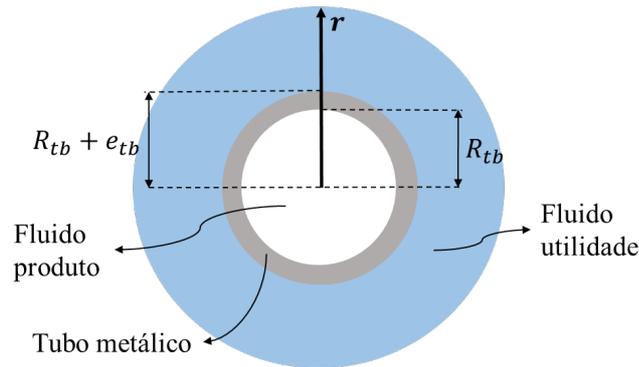
Trecho	Identificação	Volume interno (mL)	Tempo espacial (s)	Raio interno (mm)	Comprimento (m)
$z_{a1} \rightarrow z_{a2}$	Pré-aquecedor	437	55	3,9	9,27
$z_{a2} \rightarrow z_{m1}$	Conexão entre o pré-aquecedor e o micro-ondas	21	3	3,9	0,45
$z_{m1} \rightarrow z_{m2}$	Micro-ondas	16	2	3,3	0,33
$z_{m2} \rightarrow z_{t1}$	Conexão entre o micro-ondas e o tubo de retenção	15	2	3,9	0,32
$z_{t1} \rightarrow z_{t2}$	Tubo de retenção 18 s	150	18	3,9	3,12
$z_{t2} \rightarrow z_{r1}$	Conexão entre o tubo de retenção e o resfriador	33	4	3,9	0,71
$z_{r1} \rightarrow z_{r2}$	Resfriador	697	84	4,7	9,90
Total		1369	168		24,09

Fonte: Adaptado de PIRES, 2015.

5.1 MODELAGEM DAS SEÇÕES DE PRÉ-AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO

Para a modelagem das seções de pré-aquecimento e resfriamento, os trocadores de calor serpentina em casco foram separados em três volumes de controle: fluido produto, tubo e fluido utilidade (Figura 5.5). Para cada volume de controle foi realizado o balanço de energia e aplicadas as condições de contorno pertinentes.

Figura 5.5. Domínios radiais para as seções de pré-aquecimento e resfriamento



Fonte: Autor, 2019.

As condições de contorno para o domínio radial de ambos os trocadores de calor (Figura 5.5) são compostas de:

$0 \leq r \leq R_{tb}$ (fluido produto escoando dentro do tubo metálico)

$R_{tb} \leq r \leq R_{tb} + e_{tb}$ (superfície do tubo metálico)

$R_{tb} + e_{tb} \leq r \leq \infty$ (fluido utilidade escoando no lado casco)

sendo:

R_{tb} = o raio interno do tubo (m);

e_{tb} = a espessura do tubo (m).

O domínio axial da seção de pré-aquecimento é limitado por:

$$z_{a1} \leq z \leq z_{a2}$$

O domínio axial da seção de resfriamento é limitado por:

$$z_{r1} \leq z \leq z_{r2}$$

5.1.1 Modelagem do fluido produto

Para a modelagem do escoamento do produto alimentício (fluido que passa dentro do tubo), de comportamento não-newtoniano que segue a Lei de Potência (Equação 3.15), escoando em regime laminar desenvolvido, isotérmico, em tubo cilíndrico, cujo o perfil de velocidade na direção axial é apresentado por Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$v_1(z, r) = \bar{v}_1 \cdot \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n + 1} \right) \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R_{tb}} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (5.1)$$

em que \bar{v}_1 é calculado por:

$$\bar{v}_1 = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_1}{\pi R_{tb}^2} \quad (5.2)$$

sendo:

$v_1(z, r)$ = velocidade do fluido produto (m/s);

\bar{v}_1 = velocidade média do fluido produto (m/s);

q_1 = vazão volumétrica do fluido produto (m^3/s);

A_1 = área da seção do escoamento do fluido produto (m^2).

Como se trata de um alimento com comportamento reológico que segue Lei de Potência, o número de Reynolds para escoamento laminar em tubo circular de diâmetro interno D_{ti} é calculado, segundo Steffe e Singh (1997), por:

$$Re_1 = \frac{D_{ti}^n \cdot \rho_1 \cdot \bar{v}_1^{(2-n)}}{8^{(n-1)} \cdot K} \left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1} \right)^n \quad (5.3)$$

Além disso, para a modelagem do fluido produto foram realizados balanços de temperatura e atividade residual enzimática. Admitiu-se como hipótese, que no fluido produto está presente uma enzima que segue a inativação térmica de primeira ordem. Aplicando, ao fluido produto, o balanço diferencial de energia e mássico para inativação enzimática, tem-se as seguintes Equações (5.4) e (5.5), de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$\rho_1 \cdot C_{p1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial t} + v_1 \cdot \nabla T_1 \right) = \nabla(k_1 \nabla T_1) + \dot{Q}_1 \quad (5.4)$$

$$\frac{\partial A_R}{\partial t} + v_1 \cdot \nabla A_R = \nabla(D_{mass} \nabla A_R) + R \quad (5.5)$$

Os termos do lado esquerdo das Equações (5.4) e (5.5) representam o acúmulo e o transporte por advecção, e os do lado direito, transporte por difusão e termo de produção/consumo volumétrico, sendo:

ρ_1 = densidade média do fluido produto (kg/m^3);

C_{p1} = calor específico médio do fluido produto ($J/kg \cdot K$);

k_1 = condutividade térmica média do fluido produto ($W/m \cdot K$);

\dot{Q}_1 = taxa de geração de calor do fluido produto (W/m^2);

$T_1(z, r)$ = temperatura do fluido produto (K);

$A_R(z, r)$ = atividade enzimática residual (-);

D_{mass} = difusividade mássica (m^2/s);

R = taxa de reação de inativação de primeira ordem (-);

Considerando as seguintes hipóteses:

- estado estacionário:

$$\left(\frac{\partial T_1}{\partial t}\right) = 0;$$

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial t}\right) = 0;$$

- tubo cilíndrico e reto com simetria angular:

$$(v_1 \cdot \nabla T_1) = v_{r1} \frac{\partial T_1}{\partial r} + v_{z1} \frac{\partial T_1}{\partial z};$$

$$(v_1 \cdot \nabla A_R) = v_{r1} \frac{\partial A_R}{\partial r} + v_{z1} \frac{\partial A_R}{\partial z};$$

- escoamento desenvolvido:

$$v_{r1} = 0 \rightarrow (v_1 \cdot \nabla T_1) = v_1 \frac{\partial T_1}{\partial z};$$

$$v_{r1} = 0 \rightarrow (v_1 \cdot \nabla A_R) = v_1 \frac{\partial A_R}{\partial z};$$

- contribuição da transferência de massa associada ao escoamento na direção axial muito maior que a contribuição do transporte difusivo na direção axial:

$$v_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} \gg k_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \rightarrow k_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \text{ é desprezível};$$

$$v_1 \frac{\partial A_R}{\partial z} \gg D_{mass} \frac{\partial^2 A_R}{\partial z^2} \rightarrow D_{mass} \frac{\partial^2 A_R}{\partial z^2} \text{ é desprezível};$$

- sem geração ou consumo interno de energia térmica:

$$\dot{Q}_1 = 0;$$

- taxa de destruição volumétrica obedecendo a uma cinética de primeira ordem:

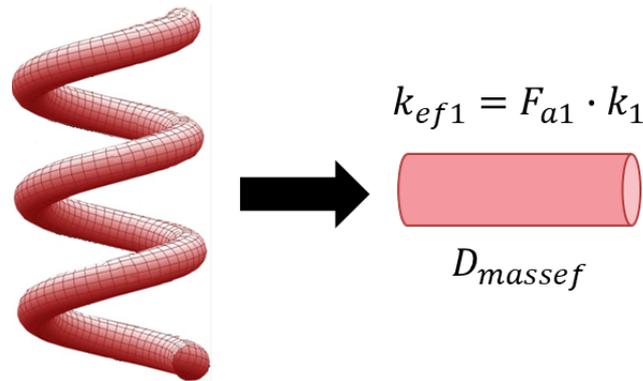
$$R = -kA_R = -\frac{2,303}{D} A_R;$$

em que k e D são, respectivamente, constante cinética de destruição térmica (1/s) e tempo de decaimento decimal (s), e seus valores são calculados pelas Equações (3.7) e (3.4).

- efeito do escoamento laminar em tubo helicoidal: os trocadores de calor serpentina helicoidal oferecem benefícios na troca térmica e no melhor aproveitamento do espaço físico que trocadores de calor tubulares retos. Essas vantagens são devido à presença das forças centrífugas que atuam no fluido gerando um escoamento secundário, mistura radial, aumentando os coeficientes de troca térmica e na difusividade mássica do fluido

(RUTHVEN, 1971; CORONEL, SANDEEP, 2008). Neste caso, o tubo helicoidal é modelado como um tubo reto e são usadas uma condutividade térmica efetiva radial (k_{ef1}) e uma difusividade mássica efetiva radial ($D_{mass_{ef}}$) para contabilizar esses efeitos de mistura (Figura 5.6).

Figura 5.6. Representação da modelagem do tubo helicoidal considerando o tubo reto



Fonte: Autor, 2019.

F_{a1} é definido como o fator de aumento da condutividade térmica do fluido produto na direção radial (-).

Reescrevendo as Equações (5.4) e (5.5), respectivamente, levando as considerações mencionadas:

$$\rho_1 \cdot C_{p1} \left(v_1 \frac{\partial T_1}{\partial Z} \right) = k_{ef1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) \right) \quad (5.6)$$

$$v_1 \frac{\partial A_R}{\partial Z} = D_{massef} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \right] - \frac{2,303}{D} A_R \quad (5.7)$$

Substituindo a equação (3.8) em (5.7) tem-se:

$$v_1 \frac{\partial A_R}{\partial Z} = D_{massef} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \right] - \frac{2,303}{D_{ref} \cdot 10^{\left(\frac{T_{ref} - T_1}{z_{red}} \right)}} A_R \quad (5.8)$$

Para resolver as Equações (5.6) e (5.8) são necessárias três condições de contorno, sendo uma na direção axial, decorrente da derivada parcial de primeira ordem em z , e duas na direção radial, devido à derivada parcial de segunda ordem em r .

As condições de contorno para o balanço diferencial de energia na seção de pré-aquecimento são:

- a) Na seção de pré-aquecimento, a temperatura de entrada do fluido produto é igual ao parâmetro T_{1in} (temperatura de alimentação).

$$T_1|_{z=z_{a1}} = T_{1in};$$

- b) Devido à hipótese de simetria de eixo, o fluxo de calor é igual à zero.

Para $r = 0$ e $z_{a1} < z \leq z_{a2}$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) O fluxo de calor (W/m^2) transferido para o fluido produto em $r = R_{tb}$ é igual ao fluxo de calor transferido pela superfície do tubo em contato com o fluido produto.

Para $r = R_{tb}$ e $z_{a1} < z \leq z_{a2}$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} ;$$

em que k_{tb} é a condutividade térmica do material do tubo ($W/m \cdot K$) e T_{tb} é a temperatura do tubo (K).

De forma análoga, as condições de contorno para o balanço diferencial de energia na seção de resfriamento são:

- a) Na seção de resfriamento, a temperatura de entrada do fluido é igual à temperatura de saída do mesmo na conexão após o tubo de retenção. Esta condição é válida ao longo de $0 \leq r \leq R_{tb}$ em $z = z_{r1}$.

$$T_1(A, r) = T_1|_{z=z_{r1}};$$

- b) De acordo com a hipótese de simetria de eixo, não há fluxo de calor em $r = 0$ e $z_{r1} < z \leq z_{r2}$.

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) O fluxo de calor transferido para o fluido produto em $r = R_{tb}$ é igual ao fluxo de calor transferido pela superfície do tubo em contato com o fluido produto.

Para $r = R_{tb}$ e $z_{r1} < z \leq z_{r2}$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} ;$$

As condições de contorno para o balanço diferencial da atividade enzimática residual na seção de pré-aquecimento são:

- a) A atividade enzimática residual na entrada do pasteurizador é igual a 100 %.

Em $z = z_{a1}$ e $0 \leq r \leq R_{tb}$:

$$A_R|_{z=z_{a1}} = 1;$$

b) Devido à simetria de eixo, o gradiente da atividade enzimática residual é zero.

Para $r = 0$ e $z_{a1} < z \leq z_{a2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=0} = 0;$$

c) Não há fluxo da atividade enzimática residual na direção radial devido à impermeabilidade da superfície interna do tubo.

Para $r = R_{tb}$ e $z_{a1} < z \leq z_{a2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=R_{tb}} = 0;$$

Analogamente, as condições de contorno para o balanço diferencial da atividade enzimática residual da seção de resfriamento são:

a) A atividade enzimática residual na entrada do resfriador é igual à atividade residual na saída da conexão do tubo de retenção.

Em $z = z_{r1}$ e $0 \leq r \leq R_{tb}$:

$$A_R(A, r) = A_R|_{z=z_{r1}};$$

d) Devido à simetria de eixo, o gradiente da atividade enzimática residual é zero.

Para $r = 0$ e $z_{r1} < z \leq z_{r2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=0} = 0;$$

e) Não há fluxo da atividade enzimática residual na direção radial devido à impermeabilidade da superfície interna do tubo.

Para $r = R_{tb}$ e $z_{r1} < z \leq z_{r2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=R_{tb}} = 0;$$

As Equações (5.9) e (5.10) definem a atividade enzimática residual média de mistura e a temperatura média de mistura do fluido produto, respectivamente, em cada posição axial.

$$\bar{A}_R(z) = \frac{\int v_1 A_R(z, r) 2\pi r dr}{\bar{v}_1} \quad (5.9)$$

$$\bar{T}_1(z) = \frac{\int v_1 T_1(z, r) 2\pi r dr}{\bar{v}_1} \quad (5.10)$$

sendo:

\overline{A}_R = média de mistura da atividade enzimática residual (-);

\overline{T}_1 = média de mistura da temperatura do fluido produto (K).

Na modelagem, considerando a da atividade residual média de mistura, pode-se calcular o valor de esterilização na direção axial, S . Foi utilizada a Equação (3.7), adaptada para a Equação (5.11).

$$S(z) = -\log_{10}(\overline{A}_R(z)) \quad (5.11)$$

5.1.2 Modelagem do tubo metálico

O equacionamento do tubo é bidimensional, pois foi desconsiderado o gradiente angular de temperatura. Para modelar o tubo dos trocadores de calor, aplicou-se o balanço diferencial de energia ao volume de controle cilíndrico do tubo, tem-se a seguinte expressão de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$\rho_{tb} \cdot C_{ptb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial t} + v_{tb} \cdot \nabla T_{tb} \right) = \nabla(k_{tb} \nabla T_{tb}) + \dot{Q}_{tb} \quad (5.12)$$

Os termos do lado esquerdo da Equação (5.12) representam o acúmulo de energia e transporte de energia por advecção, e os do lado direito, transporte de energia por difusão e geração volumétrica de energia térmica.

em que:

ρ_{tb} = densidade média do material do tubo (kg/m³);

C_{ptb} = calor específico médio do material do tubo (J/kg · K);

k_{tb} = condutividade térmica média do material do tubo (W/m · K);

v_{tb} = velocidade do tubo (m/s);

\dot{Q}_{tb} = taxa de geração volumétrica de energia térmica no tubo (W/m²);

$T_{tb}(z, r)$ = temperatura do tubo (K).

Considera-se:

- estado estacionário:

$$\left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial t} \right) = 0;$$

- tubo cilíndrico e reto com simetria angular:

$$\frac{\partial T_{tb}}{\partial \theta} = 0;$$

- sem advecção em material sólido:

$$\vec{v}_{tb} = 0;$$

- sem geração ou consumo interno de energia térmica:

$$\dot{Q}_{tb} = 0;$$

- material isotrópico (mesmas propriedades físicas independente da posição).

Reescrevendo a Equação (5.12), levando as considerações mencionadas anteriormente:

$$0 = k_{tb} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \right) \right] \quad (5.13)$$

Para resolver a Equação (5.13) são necessárias três condições de contorno. Uma para a direção axial (z) e duas para a direção radial (r).

As condições de contorno para o balanço de energia do tubo na seção de pré-aquecimento são:

- No início da seção de pré-aquecimento considera-se a superfície lateral adiabática. Em que a condição é válida para o intervalo radial $R_{tb} \leq r \leq R_{tb} + e_{tb}$.

$$k_{tb} \frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \Big|_{z=z_{a1}} = 0;$$

- Igualdade de temperatura na interface da superfície interna do tubo e o fluido produto. Condição de contorno válida para o intervalo axial $z_{a1} < z \leq z_{a2}$.

$$T_{tb}|_{r=R_{tb}} = T_1|_{r=R_{tb}};$$

- Definição do fluxo de calor radialmente trocado entre a superfície externa do tubo e o fluido que passa pelo casco. Válida para o intervalo $z_{a1} < z \leq z_{a2}$.

$$-k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = h_{2aq} (T_{tb}|_{r=R_{tb}+e_{tb}} - T_{2aq});$$

em que T_{2aq} é a temperatura média axial do fluido utilidade (K) e h_{2aq} o coeficiente convectivo de troca térmica ($W/m^2 \cdot K$) entre o fluido que escoar no casco e a superfície externa do tubo.

De forma análoga, as condições de contorno para o balanço diferencial de energia do tubo na seção de resfriamento são:

- No início da seção de resfriamento, a temperatura de entrada da seção é igual à saída da conexão após o tubo de retenção. Condição válida para o intervalo radial $R_{tb} \leq r \leq R_{tb} + e_{tb}$.

$$T_{tb}(z_{r1}, r) = T_{tb}|_{z=z_{r1}};$$

- Condição análoga à explicitada no pré-aquecimento, sendo válida para o intervalo axial $z_{r1} < z \leq z_{r2}$.

$$T_{tb}|_{r=R_{tb}} = T_1|_{r=R_{tb}};$$

- c) Condição análoga à explicitada no pré-aquecimento, sendo válida para o intervalo axial $z_{r1} < z \leq z_{r2}$.

$$-k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = h_{2resf} (T_{tb}|_{r=R_{tb}+e_{tb}} - T_{2resf});$$

em que T_{2resf} é a temperatura média axial do fluido utilidade no resfriador (K) e h_{2resf} o coeficiente convectivo de troca térmica do resfriador ($W/m^2 \cdot K$) entre o fluido que escoava no casco e a superfície externa do tubo.

5.1.3 Modelagem do fluido utilidade

O equacionamento do fluido utilidade é bidimensional, pois foi desconsiderado o gradiente angular de temperatura. Para modelar o fluido utilidade dos trocadores de calor, aplicou-se o balanço diferencial de energia ao volume de controle cilíndrico do tubo, tem-se a seguinte expressão de acordo com Bird, Stewart e Lightfoot (2002):

$$\rho_2 \cdot C_{p2} \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + v_2 \nabla T_2 \right) = \nabla (k_2 \nabla T_2) + \dot{Q}_2 \quad (5.14)$$

em que:

ρ_2 = densidade média do fluido utilidade (kg/m^3);

C_{p2} = calor específico médio do fluido utilidade ($J/kg \cdot K$);

k_2 = condutividade térmica média do fluido utilidade ($W/m \cdot K$);

v_2 = velocidade do fluido utilidade (m/s);

T_2 = temperatura média axial do fluido utilidade (K);

\dot{Q}_2 = taxa de geração volumétrica de energia térmica do fluido utilidade (W/m^2).

Os termos do lado esquerdo da Equação (5.14) representam o acúmulo de energia e transporte de energia por advecção, e os do lado direito, transporte de energia por condução e geração volumétrica de energia térmica.

As hipóteses utilizadas no equacionamento da conservação de energia no fluido de utilidade escoando em contracorrente no casco foram:

- fluido incompressível;
- escoamento turbulento e desenvolvido;
- estado estacionário;

- gradientes de temperatura (radial e angular) desprezíveis;
- sem geração interna de energia.

No entanto, a taxa de calor trocada radialmente com a superfície externa do tubo foi artificialmente considerada como geração volumétrica de energia térmica, já que o gradiente radial de temperatura foi desprezado. No volume de controle em estudo (Figura 5.3), a taxa de calor trocada pelo fluido na região anular do casco e o tubo é representada pela Equação (4.2) com o coeficiente global sendo apenas a resistência convectiva do fluido utilidade (Equação 5.15).

$$\dot{Q}_2 = h_2 A_T (T_{tb}(z) - T_2(z)) \quad (5.15)$$

sendo:

h_2 = coeficiente convectivo do fluido utilidade ($W/m^2 \cdot K$).

Reescrevendo a Equação (5.14) considerando as hipóteses mencionadas, tem-se:

$$\rho_2 C_{p2} \left(-\bar{v}_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} \right) = h_2 A (T_{tb}(z) - T_2(z)) \quad (5.16)$$

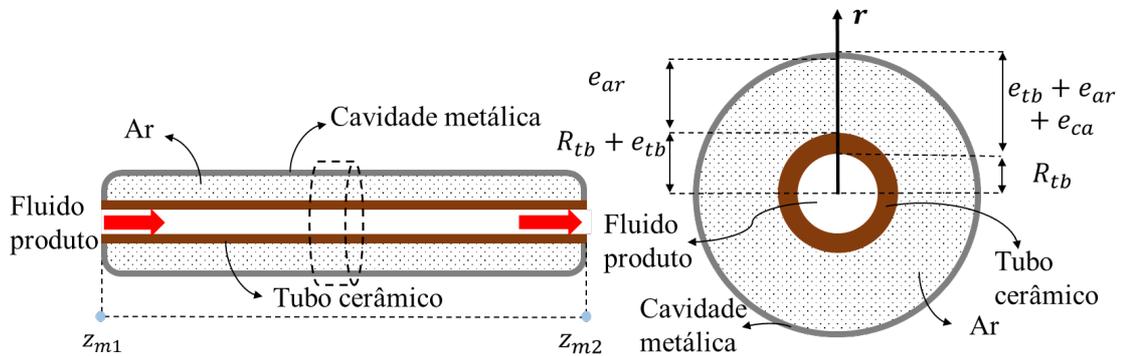
em que:

\bar{v}_2 = velocidade média do fluido utilidade (m/s).

5.2 MODELAGEM DA SEÇÃO DE MICRO-ONDAS

A seção de micro-ondas é um tubo de material cerâmico com uma cavidade conectada a um aplicador de micro-ondas. O fluido produto escoar no tubo e o micro-ondas aquece o mesmo até atingir a temperatura de processo. Os volumes de controle estudados no modelo para esta seção foram: fluido produto e aplicador de micro-ondas (envolvendo o tubo cerâmico, ar e a cavidade metálica) (Figura 5.7).

Figura 5.7. Esquema do micro-ondas do sistema de pasteurização com as dimensões axial e radial utilizadas na modelagem matemática



Fonte: Autor, 2019.

sendo:

e_{ar} = espessura da camada de ar entre a cavidade metálica e o tubo cerâmico do aplicador de micro-ondas (m);

e_{ca} = espessura da cavidade metálica do aplicador de micro-ondas (m).

A modelagem destes volumes de controle é composta por domínios axiais e radiais.

O domínio axial do micro-ondas é:

$$z_{m1} \leq z \leq z_{m2}$$

O domínio radial é dividido em:

$$0 \leq r \leq R_{tb} \text{ (fluido escoando dentro do tubo)}$$

$$R_{tb} \leq r \leq R_{tb} + e_{tb} + e_{ar} + e_{ca} \text{ (aplicador de micro-ondas)}$$

$$R_{tb} + e_{tb} + e_{ar} + e_{ca} \leq r \leq \infty \text{ (ar ambiente)}$$

5.2.1 Modelagem do fluido produto

As hipóteses descritas no item 5.1.1 são aplicadas ao item 5.2.1.

No entanto, a Equação (5.6) referente ao balanço de energia do fluido produto para o micro-ondas foi modificada, pois foi observado que o micro-ondas é capaz de aquecer rapidamente o fluido produto até a temperatura de processo determinada no controlador devido ao rápido aquecimento volumétrico e menor diâmetro do tubo cerâmico do micro-ondas (AHMED, RAMASWAMY, 2007). Desta forma, optou-se por um modelo mais simples, em que o aquecimento ocorre de maneira volumétrica, uniforme e linear, sem a necessidade do

estudo da radiação ou da fluidodinâmica computacional (CFD). A Equação (5.17) foi utilizada para descrever o comportamento da temperatura nesta seção.

$$T_1(z) = z \left(\frac{T_1|_{z=z_{m2}} - T_1|_{z=z_{m1}}}{z_{m2} - z_{m1}} \right) + T_1|_{z=z_{m1}} \quad (5.17)$$

A resolução da Equação (5.17) requer apenas uma condição de contorno inicial para a direção axial. Para a Equação (5.8) são necessárias três condições de contorno, sendo uma na direção axial e duas na direção radial.

Condição de contorno para o balanço diferencial de energia na seção de micro-ondas:

- a) Na seção de micro-ondas, a temperatura de entrada do fluido produto é igual a temperatura de saída da conexão da retenção.

$$T_1(z_{m1}) = T_1|_{z=z_{m1}};$$

As condições de contorno para o balanço diferencial da atividade residual na seção de micro-ondas são:

- a) A atividade enzimática residual na entrada do micro-ondas é igual à atividade residual na saída da conexão após a seção de retenção.

$$A_R(A, r) = A_R|_{z=z_{m1}};$$

- b) Devido à simetria de eixo, o gradiente da atividade residual é zero.

Em $r = 0$ e $z_{m1} < z \leq z_{m2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) Sem fluxo da atividade enzimática residual na direção radial devido à impermeabilidade da superfície interna do tubo.

Em $r = R_{tb}$ e $z_{m1} < z \leq z_{m2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = 0;$$

5.2.2 Modelagem do aplicador de micro-ondas

As hipóteses admitidas para o micro-ondas são as mesmas que as já descritas no item 5.1.2 para a modelagem do tubo metálico dos trocadores de calor.

As condições de contorno aplicadas para o balanço diferencial de energia pela Equação (5.13), no aplicador de micro-ondas, são:

- a) O fluxo de calor axial no início da seção de micro-ondas é desprezível devido ao isolamento térmico. Condição é válida para o intervalo radial $R_{tb} < r \leq R_{tb} + e_{tb} + e_{ar} + e_{ca}$.

$$k_{tb} \frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \Big|_{z=z_{m1}} = 0;$$

- b) Igualdade de temperatura na interface da superfície interna do tubo e o fluido produto. Condição de contorno válida para o intervalo axial $z_{m1} < z \leq z_{m2}$.

$$T_{tb} |_{r=R_{tb}} = T_1 |_{r=R_{tb}};$$

- c) Definição do fluxo de calor radialmente trocado entre a superfície externa do tubo e o ar ambiente. Válida para o intervalo $z_{m1} < z \leq z_{m2}$.

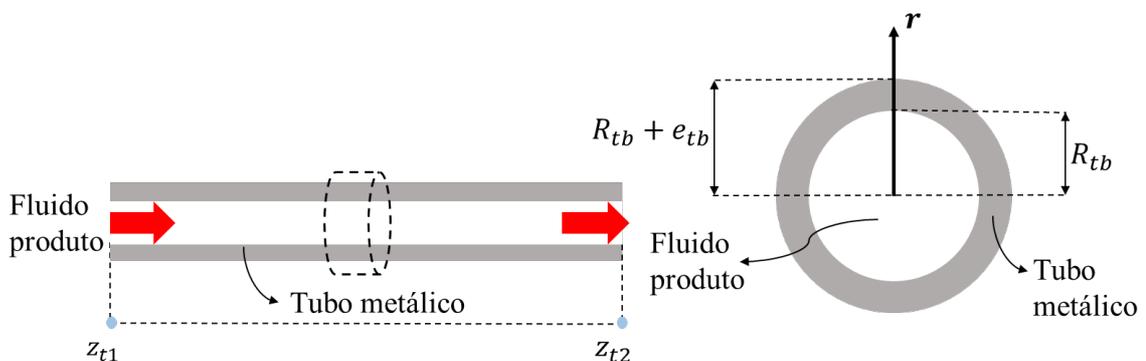
$$-k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = U_m (T_{tb} |_{r=R_{tb}+e_{tb}+e_{ar}+e_{ca}} - T_{amb});$$

em que U_m é o coeficiente de troca térmica entre o ar ambiente, a cavidade metálica, a camada de ar e o tubo cerâmico do aplicador de micro-ondas ($W/m^2 \cdot K$) e T_{amb} é a temperatura média radial do ambiente que circunda o equipamento (K).

5.3 MODELAGEM DA SEÇÃO DE RETENÇÃO

O tubo de retenção é a seção do pasteurizador em que o fluido produto permanece na temperatura de tratamento térmico, para garantir a inocuidade desejada. No modelo, os volumes de controle considerados foram: fluido produto e tubo metálico, sendo os volumes de controle com as dimensões axiais e radiais ilustrados na Figura 5.8.

Figura 5.8. Esquema do tubo de retenção do sistema de pasteurização com as dimensões axial e radial utilizadas na modelagem matemática



Fonte: Autor, 2019.

O domínio axial da seção de retenção é:

$$z_{t1} \leq z \leq z_{t2}$$

O domínio radial é dividido em:

$$0 \leq r \leq R_{tb} \text{ (fluido escoando dentro do tubo)}$$

$$R_{tb} \leq r \leq R_{tb} + e_{tb} \text{ (superfície do tubo metálico)}$$

$$R_{tb} + e_{tb} \leq r \leq \infty \text{ (ar ambiente)}$$

5.3.1 Modelagem do fluido produto

Nesta seção, as hipóteses descritas no item 5.1.1 para o fluido produto escoando dentro do tubo metálico dos trocadores de calor são aplicadas ao item 5.3.1.

Para resolver as Equações (5.6) e (5.8) referentes ao fluido produto para o tubo de retenção são necessárias três condições de contorno, sendo uma na direção axial, decorrente da derivada parcial de primeira ordem em z , e duas na direção radial, devido à derivada parcial de segunda ordem em r .

As condições de contorno para o balanço diferencial de energia na seção de retenção são:

- a) Na seção de retenção, a temperatura de entrada do fluido produto é igual a temperatura de saída da conexão após o aplicador de micro-ondas.

$$T_1(z_{t1}, r) = T_1|_{z=z_{t1}};$$

- b) Devido à hipótese de simetria de eixo, o fluxo de calor será igual à zero.

Para $r = 0$ e $z_{t1} < z \leq z_{t2}$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) O fluxo de calor (W/m^2) transferido para o fluido produto em $r = R_{tb}$ é igual ao fluxo de calor transferido pela superfície do tubo em contato com o fluido produto.

Para $r = R_{tb}$ e $z_{t1} < z \leq z_{t2}$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} ;$$

As condições de contorno para o balanço diferencial da atividade residual na seção de retenção são:

- a) A atividade enzimática residual na entrada do tubo de retenção é igual à atividade residual na saída da conexão após a seção de pré-aquecimento.

$$A_R(A, z) = A_R|_{z=z_{t1}};$$

- b) Devido à simetria de eixo, o gradiente de atividade residual é zero.

Em $r = 0$ e $z_{t1} < z \leq z_{t2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=0} = 0;$$

- c) Não há fluxo da atividade residual devido à impermeabilidade da superfície interna do tubo.

Em $r = R_{tb}$ e $z_{t1} < z \leq z_{t2}$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r}\right)\Big|_{r=R_{tb}} = 0;$$

5.3.2 Modelagem do tubo metálico

No caso do tubo da seção de retenção, as hipóteses admitidas são as mesmas que as já descritas no item 5.1.2 para o tubo metálico das seções de pré-aquecedor e resfriador.

As condições de contorno aplicadas para o balanço diferencial de energia pela Equação (5.13), no tubo de retenção, são:

- a) O fluxo de calor axial no início da seção de retenção é desprezível devido ao isolamento térmico. Condição é válida para o intervalo radial $R_{tb} < r \leq R_{tb} + e_{tb}$.

$$k_{tb} \frac{\partial T_{tb}}{\partial z}\Big|_{z=z_{t1}} = 0;$$

- b) Igualdade de temperatura na interface da superfície interna do tubo e o fluido produto. Condição de contorno válida para o intervalo axial $z_{t1} < z \leq z_{t2}$.

$$T_{tb}|_{r=R_{tb}} = T_1|_{r=R_{tb}};$$

- c) Definição do fluxo de calor radialmente trocado entre a superfície externa do tubo de retenção e o ar ambiente. Válida para o intervalo $z_{t1} < z \leq z_{t2}$.

$$-k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial z}\right)\Big|_{r=R_{tb}} = U_t (T_{tb}|_{r=R_{tb}+e_{tb}} - T_{amb});$$

em que U_t é o coeficiente de troca térmica entre o ar ambiente e a superfície externa do tubo de retenção ($W/m^2 \cdot K$).

5.4 MODELAGEM DAS CONEXÕES

As conexões entre uma seção e outra foram modeladas considerando os volumes de controle: fluido produto e tubo metálico, o esquema da conexão entre o pré-aquecedor e o aplicador de micro-ondas é apresentado na Figura 5.9.

A modelagem destes volumes de controle é análoga à descrita na seção 5.3, modelagem da retenção, mudando somente o domínio na direção axial.

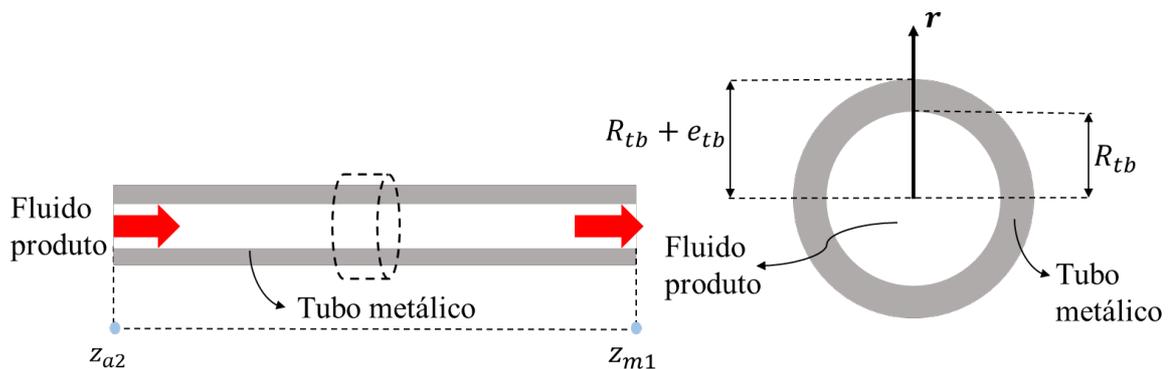
O domínio axial das conexões são:

$z_{a2} \leq z \leq z_{m1}$: saída do pré-aquecedor e entrada do micro-ondas;

$z_{m2} \leq z \leq z_{t1}$: saída do micro-ondas e entrada da retenção;

$z_{t2} \leq z \leq z_{r1}$: saída da retenção e entrada do resfriador.

Figura 5.9. Esquema da conexão entre o pré-aquecedor e o aplicador de micro-ondas do sistema de pasteurização com as dimensões axiais e radiais utilizadas na modelagem matemática



Fonte: Autor, 2019.

5.4.1 Modelagem do fluido produto

As hipóteses admitidas no item 5.1.1 para o fluido produto que escoar no tubo metálico dos trocadores de calor também se aplicam ao item 5.4.1.

Para resolver as Equações (5.6) e (5.8) referentes ao fluido produto para o tubo de retenção são necessárias três condições de contorno, sendo uma na direção axial, decorrente da derivada parcial de primeira ordem em z , e duas na direção radial, devido à derivada parcial de segunda ordem em r .

As condições de contorno para o balanço diferencial de energia na seção de retenção são:

- a) Nas conexões, a temperatura de entrada do fluido produto é igual a temperatura de saída da seção anterior.

$$T_1(z_2, r) = T_1|_{z=z_2};$$

- b) Devido à hipótese de simetria de eixo o fluxo de calor será igual à zero.

Para $r = 0$ e $z_2 < z \leq z_1$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) O fluxo de calor (W/m^2) transferido para o fluido produto em $r = R_{tb}$ é igual ao fluxo de calor transferido pela superfície do tubo em contato com o fluido produto.

Para $r = R_{tb}$ e $z_2 < z \leq z_1$:

$$k_{ef1} \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} ;$$

As condições de contorno para o balanço diferencial da atividade enzimática residual nas conexões são:

- a) A atividade enzimática residual na entrada da conexão é igual à atividade residual na saída da seção anterior.

$$A_R(z_2, r) = A_R|_{z=z_2};$$

- b) Devido à simetria de eixo, o gradiente de atividade residual é zero.

Em $r = 0$ e $z_2 < z \leq z_1$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} = 0;$$

- c) Não há fluxo da atividade residual devido à impermeabilidade da superfície interna do tubo.

Em $r = R_{tb}$ e $z_2 < z \leq z_1$:

$$\left(\frac{\partial A_R}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = 0;$$

5.4.2 Modelagem do tubo metálico

Nesta seção, as hipóteses admitidas são as mesmas que as já descritas no item 5.1.2 para o tubo metálico das seções de pré-aquecedor e resfriador.

As condições de contorno aplicadas para o balanço diferencial de energia pela Equação (5.13) são:

- a) O fluxo de calor axial no início das conexões é desprezível devido ao isolamento térmico. Condição é válida para o intervalo radial $R_{tb} < r \leq R_{tb} + e_{tb}$.

$$k_{tb} \frac{\partial T_{tb}}{\partial z} \Big|_{z=z_2} = 0;$$

- b) Igualdade de temperatura na interface da superfície interna do tubo e o fluido produto. Condição de contorno válida para o intervalo axial $z_2 < z \leq z_1$.

$$T_{tb} |_{r=R_{tb}} = T_1 |_{r=R_{tb}};$$

- c) Definição do fluxo de calor radialmente trocado entre a superfície externa do tubo e o ar ambiente. Válida para o intervalo $z_2 < z \leq z_1$.

$$-k_{tb} \left(\frac{\partial T_{tb}}{\partial r} \right) \Big|_{r=R_{tb}} = U_c (T_{tb} |_{r=R_{tb}+e_{tb}} - T_{amb});$$

em que U_c é o coeficiente de troca térmica entre o ar ambiente e a superfície externa do tubo na conexão ($W/m^2 \cdot K$).

5.5 UNIÃO DAS SEÇÕES DO TROCADOR

Nos itens 5.1 a 5.4 foram descritas todas as equações e condições de contorno dos modelos das seções de pré-aquecimento, resfriamento, micro-ondas, tubo de retenção e conexões (Figura 5.1). Além disso, um modelo de união das seções foi elaborado com o objetivo de realizar simulações do processo completo. Portanto, foram agrupados 5 modelos conforme indicado a seguir:

- Modelo da seção de pré-aquecimento.
- Modelo da seção de micro-ondas.
- Modelo tubo de retenção.
- Modelo da seção de resfriamento.
- Modelo das conexões entre as seções de pré-aquecimento, micro-ondas, retenção e resfriamento.

Para implementar os modelos foi utilizado um *software* apresentado no item 5.6.

5.6 SIMULAÇÃO

Para a simulação do modelo proposto, foram utilizadas técnicas numéricas de discretização espacial (método de diferenças finitas) para as variáveis dos modelos descritos e foi elaborado um sistema de equações com número de graus de liberdade nulo. O *software* gPROMS (*Process System Enterprise*, versão 3.2) é adequado para a simulação de processos e possui linguagem específica de programação, na qual se utilizam equações diferenciais e algébricas, e foi utilizado para a implementação e resolução dos modelos matemáticos elaborados. Utilizou um computador pessoal com Intel Core 2 Quad (2.66GHz) e 4 Gb de memória RAM para as simulações.

O modelo foi resolvido pelo método numérico de diferenças finitas para trás (BFDM) – fluido produto e tubo– ou para frente (FFDM) – fluido utilidade (DANTAS, GUT, 2018). Para as direções axial e radial utilizou-se o método de diferenças finitas centradas (CDFM), em que os domínios axiais foram discretizados em 100 pontos, e os radiais em 30 pontos para o fluido produto e 5 pontos para o tubo para cada uma das 7 sessões, sendo 3 conexões localizadas entre o pré-aquecedor, micro-ondas, retenção e resfriador, apresentadas na Figura 5.1. Ao todo o modelo terá 700 pontos axiais entre a entrada do pré-aquecedor e a saída do resfriador.

A sessão de micro-ondas apresenta um raio menor que o restante do equipamento, esta diferença foi considerada nas simulações como um estreitamento do tubo em que há uma variação momentânea no perfil de velocidade e foi desprezada as perturbações na entrada e saída do micro-ondas.

As simulações da modelagem foram realizadas utilizando o modelo proposto, sendo necessário inserir os valores dos parâmetros de cada uma das seções do trocador. No item 5.7 é apresentado um estudo de caso para testar o modelo elaborado.

5.7 ESTUDO DE CASO

O modelo elaborado e apresentado neste capítulo foi testado por meio de simulações do processamento térmico do fluido produto polpa de manga escoando sob regime laminar, em uma unidade de pasteurização em escala semi-industrial.

A polpa de manga foi escolhida devido ao comportamento reológico não-newtoniano, pseudoplástico que segue a lei de potência (BHATTACHARYA, RASTOGI, 1998). Além

disso, a legislação brasileira define padrões de identidade e qualidade para purês e polpas de manga destinadas ao consumo como bebida. Segundo a Instrução Normativa nº 37, de 1 de outubro de 2018, a polpa ou purê de manga (para consumo como bebida) obtido da parte comestível da manga (*Mangifera indica* Linn.), através de processo tecnológico adequado, deve apresentar cor amarela, sabor doce, sabor e aroma próprios e um pH levemente ácido ($\text{pH} < 4,5$) (BRASIL, 2018). Por se tratar de um alimento que apresenta acidez alta o suficiente para inibir o crescimento de micro-organismos, para a polpa de manga o processamento térmico é utilizado para inativar enzimas e/ou destruir esporos de micro-organismos.

A enzima peroxidase foi escolhida como indicador biológico do processo térmico, pois pode servir como parâmetro para obtenção de produtos seguros quanto ao aspecto microbiológico, uma vez que a resistência térmica de lactobacilos, bolores e leveduras é menor que a das enzimas como a peroxidase, a polifenol oxidase e a pectinesterase, que são encontradas em mangas (KHAN, ROBINSON, 1993; KAUSHIK, RAO e MISHRA, 2017).

Os fluidos de utilidade considerados na seção de pré-aquecimento e resfriamento foram: água quente e água gelada, respectivamente, ambos escoando em regime turbulento em fluxo contra-corrente.

As temperaturas consideradas parâmetros no estudo de caso estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Temperaturas consideradas como parâmetros de entrada do modelo no estudo de caso

Temperatura	Posição	°C
Fluido produto, T_{1in_aq}	Z_{a1}	20
Fluido utilidade (água quente), T_{2in_aq}	Z_{a2}	90
Fluido utilidade (água fria), T_{2in_resf}	Z_{r2}	5
Ar que circunda o equipamento, T_{amb}	-	25

Fonte: Autor, 2019.

Os parâmetros cinéticos de inativação térmica e a atividade inicial da enzima peroxidase considerada no fluido produto, estão apresentados na Tabela 5.3 (SUGAI, 2007). O parâmetro Z_{red} é válido para a faixa de temperatura de 60,5 a 77,2 °C.

Tabela 5.3. Parâmetros de cinética de destruição térmica e atividade inicial da enzima peroxidase na entrada do trocador considerado no estudo de caso

Parâmetro	Valor
$D_{77,2} \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (s)}$	4,40
$z_{red} \text{ (}^\circ\text{C)}$	14,30

Fonte: SUGAI, 2007.

Os valores das propriedades termo-físicas e reológicas do fluido produto, k_1 , ρ_1 , C_{p1} , K e n , foram calculados com correlações válidas para polpa de manga (*Mangifera indica* L.) à faixa de temperatura de 20 – 80 °C e a concentração de sólidos solúveis de 20 °Brix, com os dados de Gundurao, Ramaswamy e Ahmed (2011) (Equações 5.18 a 5.22). Sendo que os valores dos parâmetros utilizados na modelagem foram definidos de acordo com a temperatura média de mistura axial ($\bar{T}_1(z)$) respectiva (Tabela 5.4).

Tabela 5.4. Modelos para a obtenção das propriedades termo-físicas e reológicas da polpa de manga (*Mangifera indica* L.)

		R^2	
$k_1 = 0,22 \cdot e^{0,0027 \cdot \bar{T}_1(z)}$	W/m · K	0,9873	(5.18)
$\rho_1 = -0,30 \cdot \bar{T}_1(z) + 1182$	kg/m ³	0,9945	(5.19)
$C_{p1} = 4,20 \cdot \bar{T}_1(z) + 2232$	J/kg · K	0,9746	(5.20)
$K = -0,017 \cdot \bar{T}_1(z) + 7,12$	Pa · s ⁿ	0,9823	(5.21)
$n = -0,0013 \cdot \bar{T}_1(z) + 0,75$	(-)	0,9969	(5.22)

Fonte: Adaptado de GUNDURAO, RAMASWAMY e AHMED (2011).

No caso dos fluidos de utilidade, foram utilizadas as Equações (5.23), (5.24) e (5.25) para o cálculo das propriedades médias de densidade, calor específico e condutividade térmica da água com os dados de Incropera et al. (2006), válida para a faixa de temperatura de 0 a 126 °C.

$$\rho_2 = 8,78 \cdot 10^{-6} \cdot T_2^3 - 4,64 \cdot 10^{-3} \cdot T_2^2 - 3,77 \cdot 10^{-2} \cdot T_2 + 1000,50 \quad (5.23)$$

$$C_{p2} = 5,201 \cdot 10^{-7} \cdot T_2^4 - 2,152 \cdot 10^{-4} \cdot T_2^3 + 4,175 \cdot 10^{-2} \cdot T_2^2 - 2,617 \cdot 10^{-2} \cdot T_2 + 4227 \quad (5.24)$$

$$k_2 = 0,56 \frac{(T_2)}{534,3} - \frac{(T_2)^2}{1,333 \cdot 10^5} \quad (5.25)$$

Nas seções de pré-aquecimento e resfriamento, os trocadores de calor possuem geometria helicoidal, admitindo um fator de aumento que aproxime o tubo helicoidal em tubos retos, proposto pelo trabalho de Russo (2019). Para as condições do processo, do estudo de caso, foi escolhido os fatores de aumento de 3,21 e 2,54 para as seções de aquecimento e resfriamento, respectivamente. Porém, no caso do tubo de retenção, micro-ondas e conexões não há uma resistência térmica controlando a troca térmica, assim o fator de aumento pouco interfere no coeficiente convectivo.

Dantas, Pegogaro e Gut (2014) determinaram a difusividade mássica típica para fluidos mais viscosos variam entre $6,3 \cdot 10^{-8}$ e $5,2 \cdot 10^{-7}$ m²/s escoando em reatores bitubulares e 10^{-9} m²/s para fluidos menos viscosos a temperatura ambiente. Portanto, para efeitos de simulação, foram considerados os valores de difusividade térmica 10^{-7} m²/s para os tubos que possuem geometria helicoidal (seções de pré-aquecimento, retenção e resfriamento), e 10^{-9} m²/s para os tubos retos (conexões e micro-ondas).

Em suma, os valores dos parâmetros, para cada seção, considerados nas simulações são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Parâmetros do pasteurizador e de suas seções para o estudo de caso

		Símb.	Unid.	PASTEURIZADOR				
				Pré-aq.	Micro-o.	Reten.	Resfr.	Conexão
Dimensões	Comprimento total efetivo da seção [•]	L	m	9,26	0,33	3,12	9,90	
	Raio interno do tubo [•]	R_{tb}	mm	3,88	3,30	3,88	4,70	3,88
	Espessura do tubo [•]	e_{tb}	mm	0,88	100,00	0,88	1,65	0,88
Processo	Atividade inicial da peroxidase	A_0	-	1				
	Concentração de sólidos solúveis [♦]	C_{ss}	°Brix	20	20	20	20	20
	Temperatura ambiente	T_{amb}	°C	25	25	25	25	25
	Temperatura de entrada do fluido produto	T_{1in}	°C	20				20
	Temperatura de entrada do fluido utilidade	T_{2in}	°C	90			5	
	Vazão volumétrica do fluido produto	q_1	L/min	2				
	Vazão volumétrica do fluido utilidade	q_2	L/min	17			17	
Tratamento Térmico	Tempo de redução decimal na temperatura de referência [▲]	$D_{77,2\text{°C}}$	s	4,40	4,40	4,40	4,40	4,40
	Constante de tempo de destruição térmica [▲]	z_{red}	°C	14,30	14,30	14,30	14,30	14,30
Transferência de Calor	Condutividade térmica do tubo [■]	k_{tb}	W/m · K	16	15	16	16	16
	Condutividade térmica do isolamento [■]	k_{iso}	W/m · K	0,039		0,039	0,039	0,039
	Coefficiente convectivo do fluido utilidade [■]	h_2	W/m ² · K	6187			1272	
	Coefficiente global de troca térmica do ar ambiente [■]	U_{amb}	W/m ² · K			45		
	Difusividade mássica efetiva [–]	D_{mass}	m ² /s	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁹
	Fator de aumento da condutividade térmica [■]	F_{a1}	-	3,21	1,00	1,00	2,54	

Fonte: [•] SIGUEMOTO et al. (2018); [♦] GUNDURAO et al. (2011); [▲] SUGAI (2007); [–] DANTAS et al. (2014); [■] RUSSO (2019).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ESTUDO 1: SENSIBILIDADE DO MODELO E SIMULAÇÃO AO NÚMERO DE PONTOS DE DISCRETIZAÇÃO

Com a finalidade de estudar a sensibilidade do modelo de simulação ao número de pontos de discretização nas direções axial e radial, foram realizadas diversas simulações para definir qual seria o número adequado de pontos para a discretização que alcance um resultado aceitável e com um tempo computacional não muito elevado.

Nas simulações, a variável valor de esterilização (S) na saída do processo térmico contínuo convencional (posição final da seção de resfriamento), foi discretizada na direção axial. Esta variável foi analisada, pois representa o quanto do atributo foi destruído ou degradado e apresenta grande sensibilidade ao número de pontos discretizados (dependência na forma de potência da atividade residual, conforme a Equação (5.14)).

Inicialmente, a simulação foi realizada fixando o número de pontos radiais em 30 para o fluido produto e 5 para o tubo, e variando apenas o número de pontos axiais para cada uma das 7 sessões ilustradas na Figura 5.1 (pré-aquecedor, micro-ondas, retenção, resfriador e 3 conexões). Assim foram analisados o valor de esterilização ao final do processo, o número total de pontos discretizados e o tempo computacional necessário para realizar a simulação (Tabela 6.1). A partir destes dados, o gráfico do valor de esterilização em função do total de pontos discretizados é apresentado na Figura 6.1. As simulações com pontos axiais maiores que 130 pontos não convergiram devido ao elevado número de pontos discretizados o que levou à falta de memória computacional.

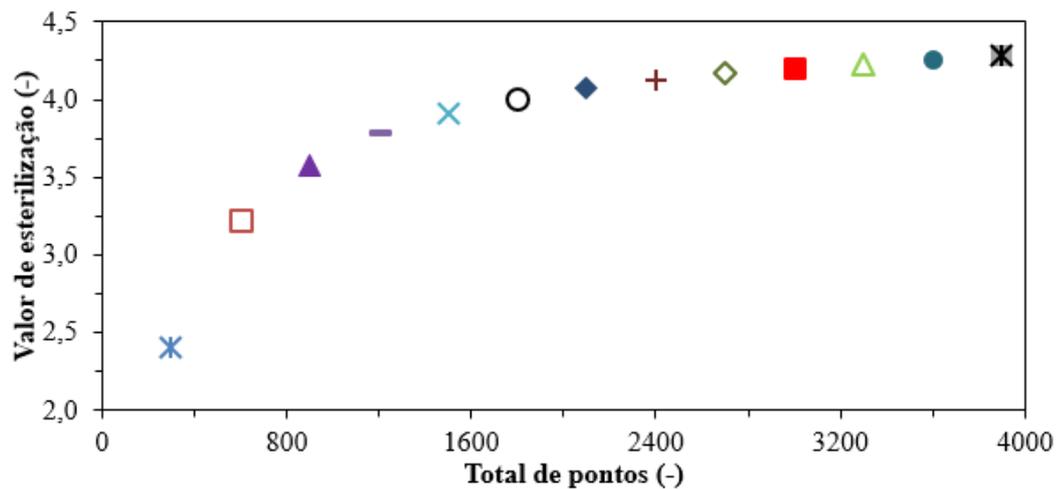
Analisando a Figura 6.1, pode-se observar o aumento de pontos axiais, provoca um aumento no valor de esterilização. Entretanto, ao final da curva do gráfico, o S não varia significativamente, mantendo-se praticamente constante. Além disso, o tempo computacional para as simulações foi pequeno, na ordem de segundos, não sendo considerado como critério para seleção da discretização.

Tabela 6.1. Tempo computacional, total de pontos discretizados e valor de esterilização em função da quantidade de pontos axiais para 30 pontos radiais

Simul.	Quant. pontos axiais	Total de pontos	Tempo simulação (s)	Valor de esterilização (saída resfriamento)	Varição (%)
1	10	300	6	2,41	-
2	20	600	9	3,22	33,61
3	30	900	14	3,58	11,19
4	40	1200	17	3,78	5,73
5	50	1500	23	3,91	3,52
6	60	1800	27	4,00	2,22
9	70	2100	17	4,08	1,88
10	80	2400	18	4,13	1,30
11	90	2700	48	4,17	1,02
12	100	3000	47	4,21	0,84
13	110	3300	58	4,23	0,59
14	120	3600	45	4,26	0,64
15	130	3900	65	4,28	0,49

Fonte: Autor, 2019.

Figura 6.1. Valor de esterilização em função do total de pontos para as discretizações axiais de 10 a 130 pontos para 30 pontos radiais



Fonte: Autor, 2019.

Como critério utilizado para a seleção do número de pontos axiais, foi considerada uma variação percentual do valor atual em relação ao anterior menor que 1 %. Portanto, foram desconsideradas todas as simulações acima de 1%. Seguindo este critério, o valor escolhido foi

a simulação de número 12 (100 pontos axiais).

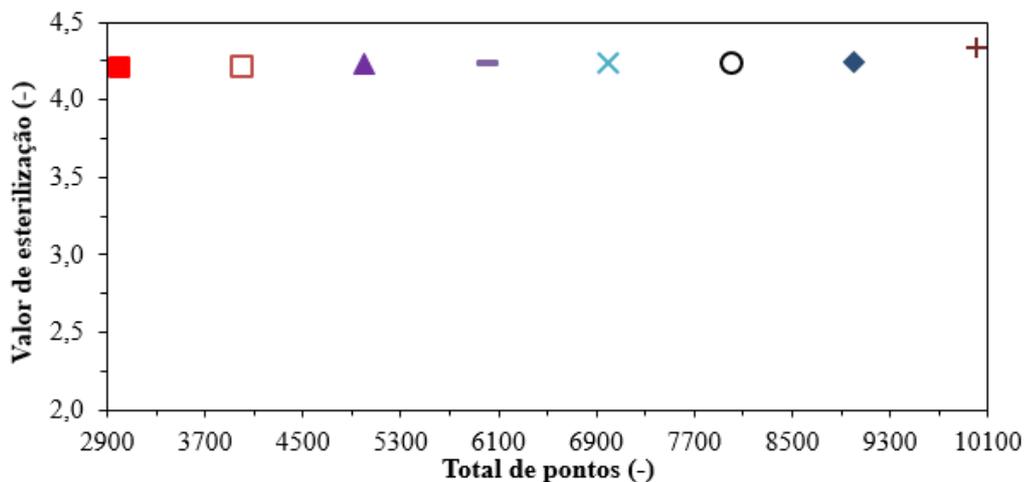
O estudo da discretização do número de pontos na direção radial para o fluido produto é apresentado na Tabela 6.2 e os dados utilizados na Figura 6.2. O número de pontos utilizado na discretização do tubo foi mantido em 5, pois a espessura do tubo é quase 4 vezes menor que o seu raio interno, onde passa o fluido produto, não sendo necessária uma maior discretização.

Tabela 6.2. Tempo computacional, total de pontos discretizados e valor de esterilização em função da quantidade de pontos radiais para 100 pontos axiais

Simul.	Quant. pontos radiais	Total de pontos	Tempo simulação (s)	Valor de esterilização (saída resfriamento)	Variação (%)
1	30	3000	47	4,21	-
2	40	4000	72	4,22	0,31
3	50	5000	87	4,23	0,24
4	60	6000	106	4,23	0,12
5	70	7000	127	4,24	0,05
6	80	8000	104	4,24	0,05
9	90	9000	102	4,24	0,05
10	100	10000	117	4,34	2,38

Fonte: Autor, 2019.

Figura 6.2. Valor de esterilização em função do total de pontos para as discretizações radiais de 30 a 100 pontos para 100 pontos axiais



Fonte: Autor, 2019.

A Figura 6.2 apresenta valores de esterilização praticamente constantes com o aumento

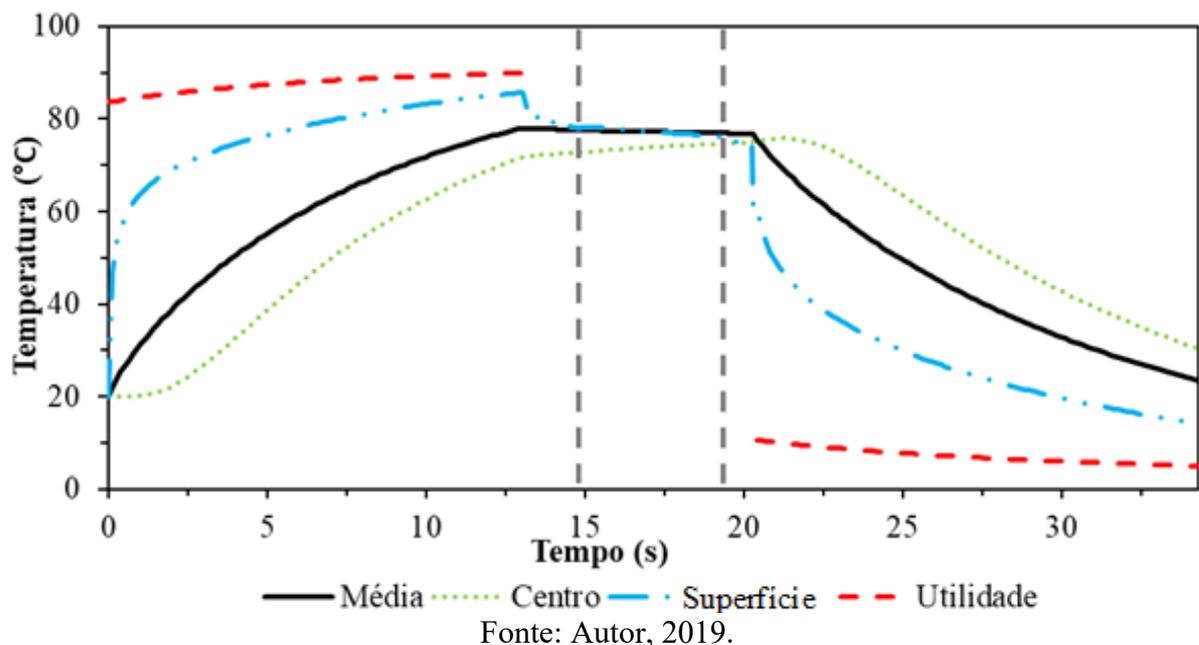
da discretização radial. Desta forma, é possível observar que o valor de esterilização é mais sensível à variação do número de pontos discretizados axialmente do que na direção radial.

Assim, para a seleção do número de pontos radiais para o fluido produto, escolheu-se o menor número total de pontos discretizados (simulação 1: 100 pontos axiais, 30 pontos radiais para o fluido produto e 5 pontos radiais para o tubo).

6.2 ESTUDO 2: PERFIS DE TEMPERATURA, ATIVIDADE RESIDUAL E VALOR DE ESTERILIZAÇÃO

Com os valores da discretização escolhidos, foi possível realizar as simulações dos perfis de temperatura, atividade residual e valor de esterilização utilizando o aquecimento convencional (aquecido apenas pelo pré-aquecedor) e assistido por micro-ondas com o intuito de analisar as respostas obtidas pelo modelo proposto. Os perfis de temperatura da polpa de manga no centro e na superfície do tubo, assim como, a temperatura média da polpa e as temperaturas médias dos fluidos utilidades para os dois tipos de aquecimento: convencional e micro-ondas são apresentados nas Figuras 6.3 e 6.4, respectivamente. Vale ressaltar que as temperaturas médias da mistura foram calculadas pela Equação 5.10.

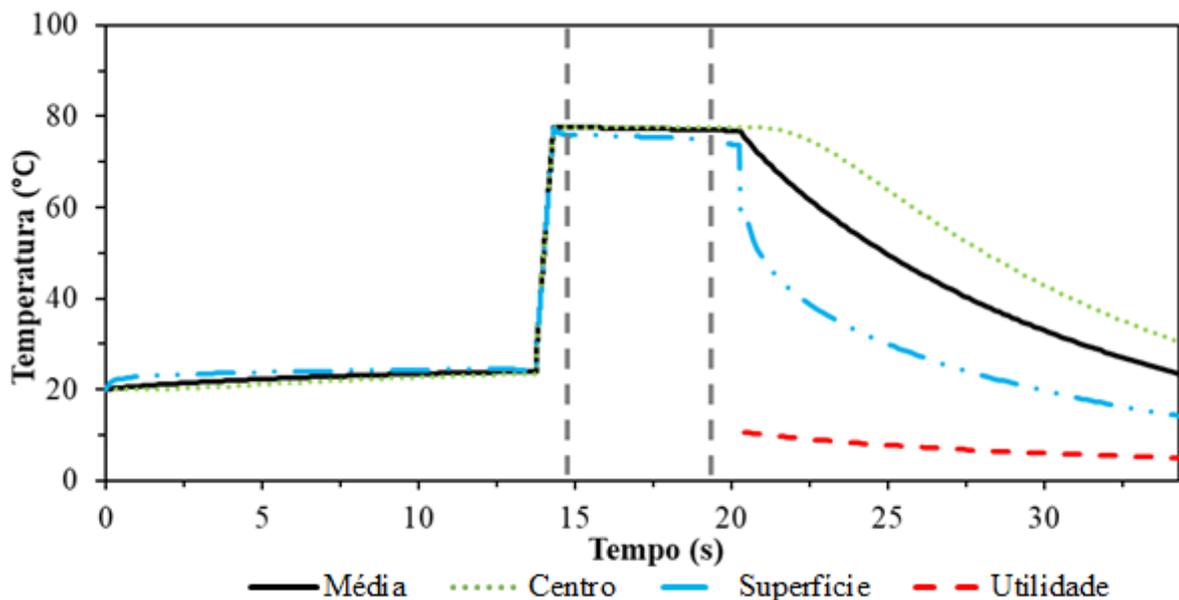
Figura 6.3. Perfis de temperatura no tratamento térmico contínuo convencional da polpa de manga no centro e na superfície do tubo, temperatura média e dos fluidos utilidades



Analisando a Figura 6.3, foi calculada a diferença de temperatura entre a entrada e saída do fluido utilidade nas seções de pré-aquecimento e resfriamento, ambas apresentaram uma diferença menor que 7 °C. Isto se deve pelo fato de que a vazão e a capacidade calorífica (vazão x calor específico) dos fluidos utilidade serem muito maiores (maior ou igual a 10 vezes) que as do fluido produto.

Para a polpa de manga, fluido produto, nota-se que a diferença média entre a temperatura no centro e na superfície do tubo é de 30 °C no pré-aquecimento e 27 °C no resfriamento. Como o fluido é viscoso e está escoando em regime laminar, isto dificulta a troca térmica entre as lâminas de fluido.

Figura 6.4. Perfis de temperatura do tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas da polpa de manga no centro e na superfície do tubo, temperatura média e do fluido utilidade



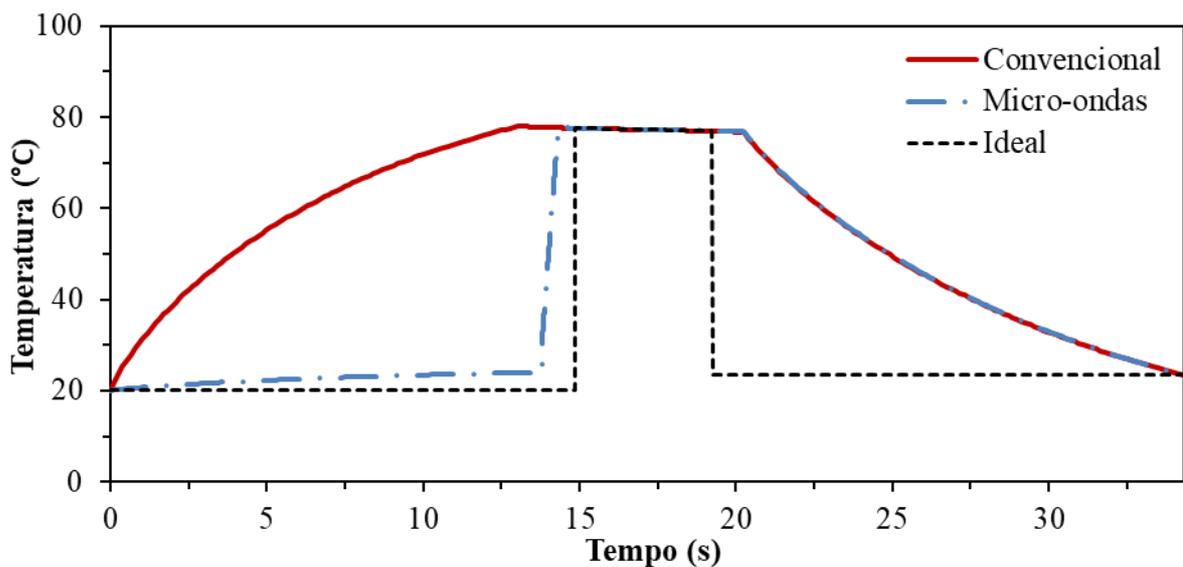
Fonte: Autor, 2019.

Entretanto, na Figura 6.4 a modelagem da sessão de micro-ondas foi desenvolvida considerando um aquecimento volumétrico, uniforme e linear. Desta forma, o modelo atende ao esperado de que não há diferença entre as temperaturas da superfície e do centro do tubo no aquecimento por micro-ondas e o aquecimento ocorre linearmente. Devido ao aquecimento do micro-ondas ser quase instantâneo (demorando apenas 0,5 segundo para aquecer à temperatura de processo na vazão de 2 L/min), a pasteurização assistida por micro-ondas é capaz de atingir a temperatura de processamento mais rapidamente e com economia de energia e recursos (água

de aquecimento).

A Figura 6.5 ilustra a comparação entre os perfis de temperatura dos processamentos térmicos convencional, assistido por micro-ondas e ideal (aquecimento e resfriamento instantâneos).

Figura 6.5. Comparação entre os perfis de temperatura média do tratamento térmico contínuo convencional e assistido por micro-ondas da polpa de manga

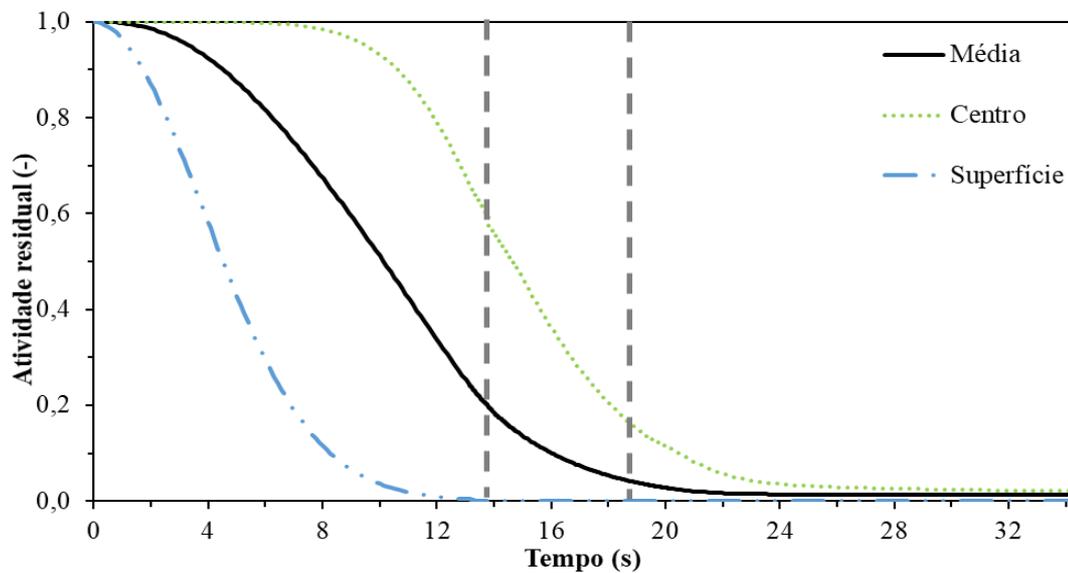


Fonte: Autor, 2019.

Na Figura 6.5, tanto no aquecimento convencional e o por micro-ondas foram analisados a mesma temperatura na entrada da seção de retenção (77,5 °C). Desta forma, os comportamentos na seção de resfriamento foram semelhantes. A taxa de aquecimento para o convencional foi de 4 °C/s, enquanto que para o micro-ondas foi 102 °C/s. Assim, é possível observar que o aquecimento convencional é muito mais lento que o assistido por micro-ondas.

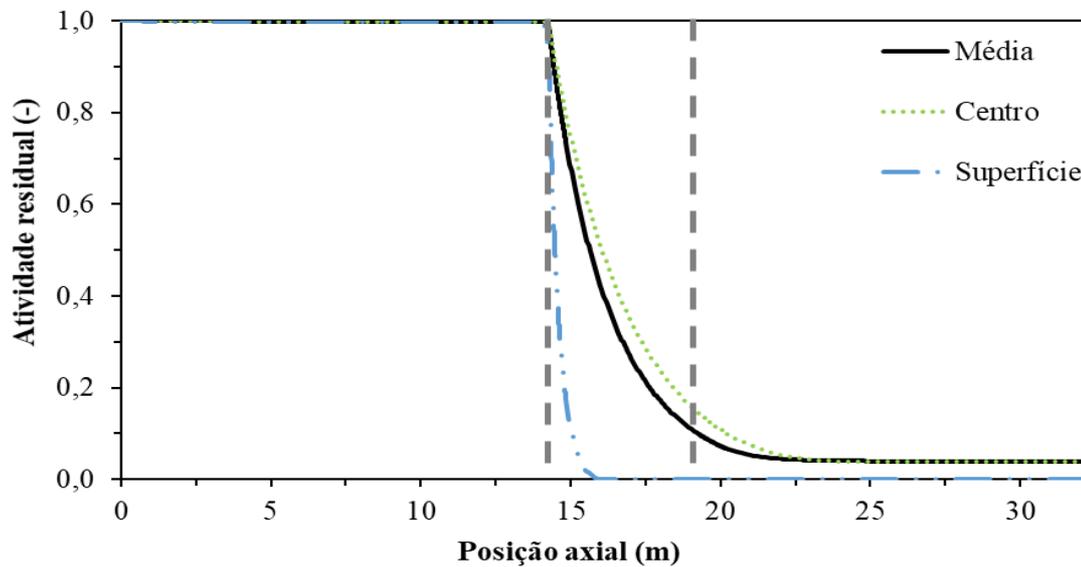
A atividade da enzima peroxidase presente na polpa de manga é reduzida devido ao binômio tempo e temperatura mostrados anteriormente. Na Figura 6.6 e 6.7, são apresentados os perfis de atividade residual da peroxidase no centro, na superfície interna do tubo e o valor da atividade residual média nos processamentos térmicos contínuos convencional e assistido por micro-ondas. Sendo a atividade residual média da mistura calculada através da Equação 5.9.

Figura 6.6. Perfis de atividade residual da peroxidase no tratamento térmico contínuo convencional



Fonte: Autor, 2019.

Figura 6.7. Perfis de atividade residual da peroxidase no tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas



Fonte: Autor, 2019.

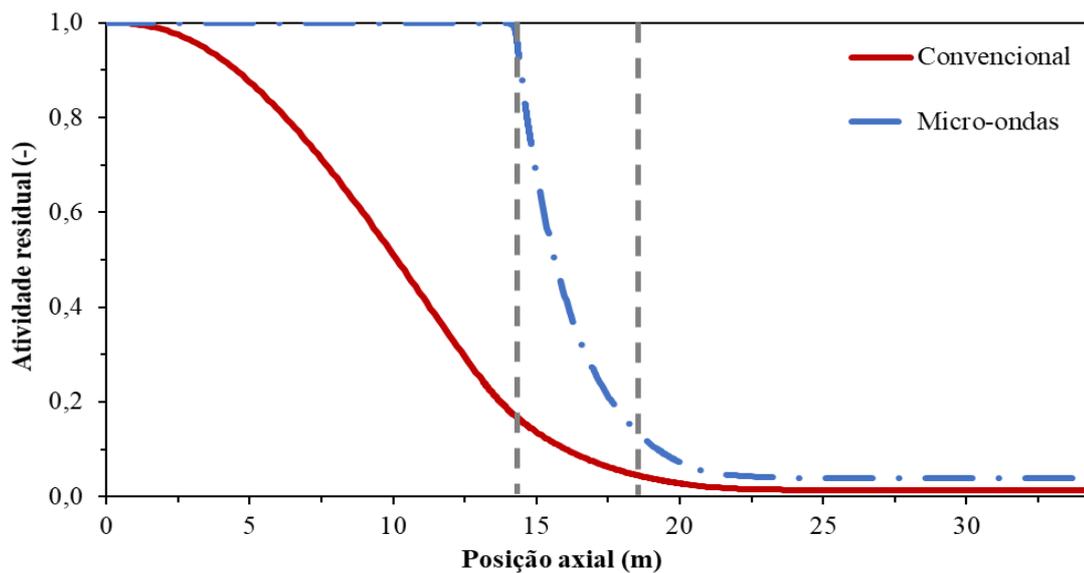
Analisando a Figura 6.6, há uma diferença significativa entre as atividades residuais na superfície e no centro do tubo. É possível observar a redução da atividade da enzima peroxidase ocorre principalmente na etapa de pré-aquecimento e de maneira não uniforme, podendo

ocasionar zonas de sobreprocessamento (próximas a superfície do tubo) e de subprocessamento (no centro do tubo).

No entanto, para o tratamento térmico assistido por micro-ondas (Figura 6.7), a inativação enzimática na seção de micro-ondas é desprezível, sendo necessária a seção de retenção para a redução da atividade da enzima. A modelagem da seção de micro-ondas foi realizada considerando um aquecimento volumétrico e uniforme, sendo possível observar que a redução da atividade residual ocorreu de maneira mais uniforme, menor diferença entre as atividades residuais do centro e superfície do tubo.

A comparação entre os perfis de atividade residual média de mistura da enzima peroxidase em ambos os tratamentos térmicos contínuos são apresentados na Figura 6.8.

Figura 6.8. Comparação entre os perfis de atividade residual média da peroxidase no tratamento térmico contínuo assistido por micro-ondas



Fonte: Autor, 2019.

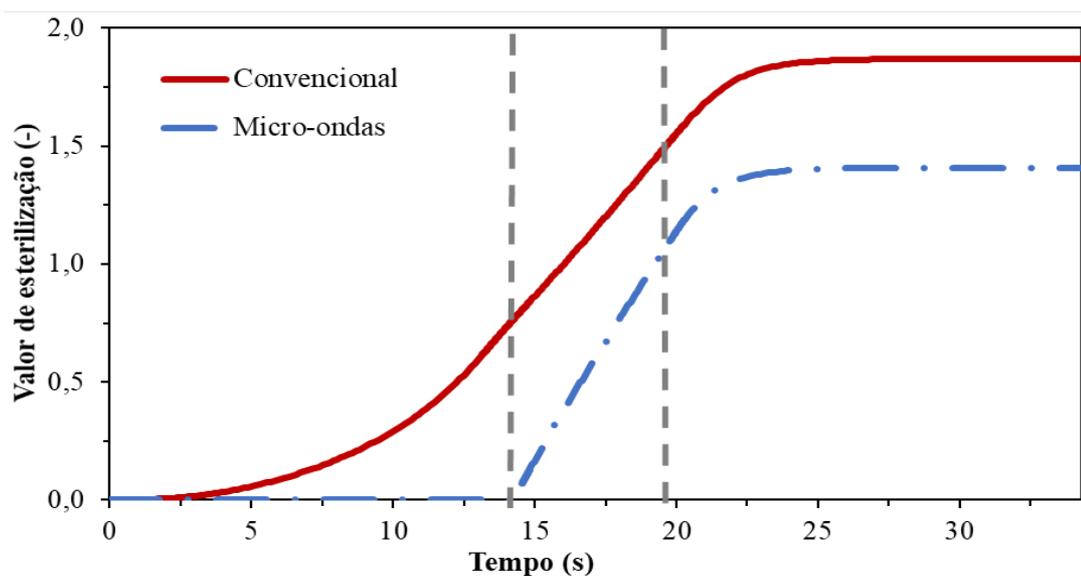
Em ambos os processamentos térmicos contínuos, durante o resfriamento, a atividade residual se manteve próxima de zero. Porém, percebe-se que no processamento térmico convencional a diminuição da atividade residual ocorreu durante todo o processo, sendo a maior parte no pré-aquecedor. No entanto, para o tratamento térmico assistido por micro-ondas, a atividade residual aconteceu em sua maior parte na retenção.

Para o estudo de caso, tem-se que a atividade residual da enzima peroxidase ao final do

processamento térmico é de 0,01 % para o aquecimento convencional e 3,20 % para o assistido por micro-ondas. Levando em consideração apenas a contribuição do aquecimento na atividade residual média (entrada da retenção), tem-se 98,5 % de redução no aquecimento convencional e apenas 4,0 % no micro-ondas.

O perfil do valor de esterilização ao longo de todo o processo térmico é apresentado na Figura 6.9. Este valor representa o número de ciclos de reduções decimais que o indicador biológico alvo sofre, sendo 1,8 para o aquecimento convencional e 1,4 para o micro-ondas. Observa-se a uma mesma temperatura de processo, o tratamento térmico convencional apresentou maior tempo de processamento, devido a redução da atividade residual ocorreu durante todo o processamento térmico, o que pode causar um sobreprocesso da polpa de manga e uma possível menor retenção de nutrientes e sensorial.

Figura 6.9. Perfis do valor de esterilização da enzima peroxidase para o processamento térmico contínuo convencional e assistido por micro-ondas



Fonte: Autor, 2019.

6.3 ESTUDO 3: EFEITO DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICA E MÁSSICA

Para este estudo de caso, objetiva-se verificar quais são os efeitos da variação da condutividade térmica efetiva radial (k_{ef1}) e da difusividade mássica efetiva radial (D_{massef}), no valor de esterilização do processamento térmico convencional. Desta maneira, foram

realizadas simulações com diferentes fatores de aumento da condutividade térmica do fluido produto (F_{a1}) para diferentes difusividades mássicas efetivas e vice-versa. O fator de aumento é aplicado apenas aos trocadores de calor (pré-aquecedor e resfriador), pois apresentam uma resistência térmica e a geometria helicoidal.

Os valores das difusividades mássicas efetivas usadas nas simulações foram determinados utilizando o trabalho de Dantas, Pegoraro e Gut (2014). Os autores determinaram que a difusividade mássica para fluidos mais viscosos variam entre $6,3 \cdot 10^{-8}$ e $5,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ escoando em reatores bitubulares e $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ para fluidos menos viscosos a temperatura ambiente. Desta forma, foram determinados, para efeitos de simulação, a faixa de difusividades mássicas efetivas de 10^{-9} a $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, sendo possível verificar a difusividade térmica dos tubos helicoidais e tubos retos.

Para a escolha das condutividades térmicas efetivas usadas nas simulações, o trabalho de Russo (2019) determinou os fatores de aumento de 3,21 e 2,54 para as sessões de pré-aquecimento e resfriamento em trocadores de calor com tubo helicoidal. Portanto, foram selecionados os fatores de aumento na faixa de 1 a 5. Na Tabela 6.3 são apresentadas as difusividades mássicas efetivas radiais e condutividades térmicas efetivas, assim como, os valores de esterilização na saída da seção de resfriamento como resultado das simulações.

Tabela 6.3. Efeitos das diferentes difusividades mássicas efetivas radiais e condutividades térmicas efetivas no valor de esterilização do processamento térmico contínuo convencional para a enzima peroxidase

$k_{ef1}(\text{W}/\text{m} \cdot \text{K})$	Difusividade mássica efetiva radial (m^2/s)					
	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}
$1 \times k_1$	0,141	0,159	0,299	0,824	1,216	1,278
$3 \times k_1$	0,710	0,720	0,833	1,558	2,287	2,411
$5 \times k_1$	2,171	2,174	2,243	3,106	4,206	4,496
$7 \times k_1$	4,004	4,003	4,044	4,992	6,511	6,812
$9 \times k_1$	5,653	5,651	5,690	6,697	8,434	8,807

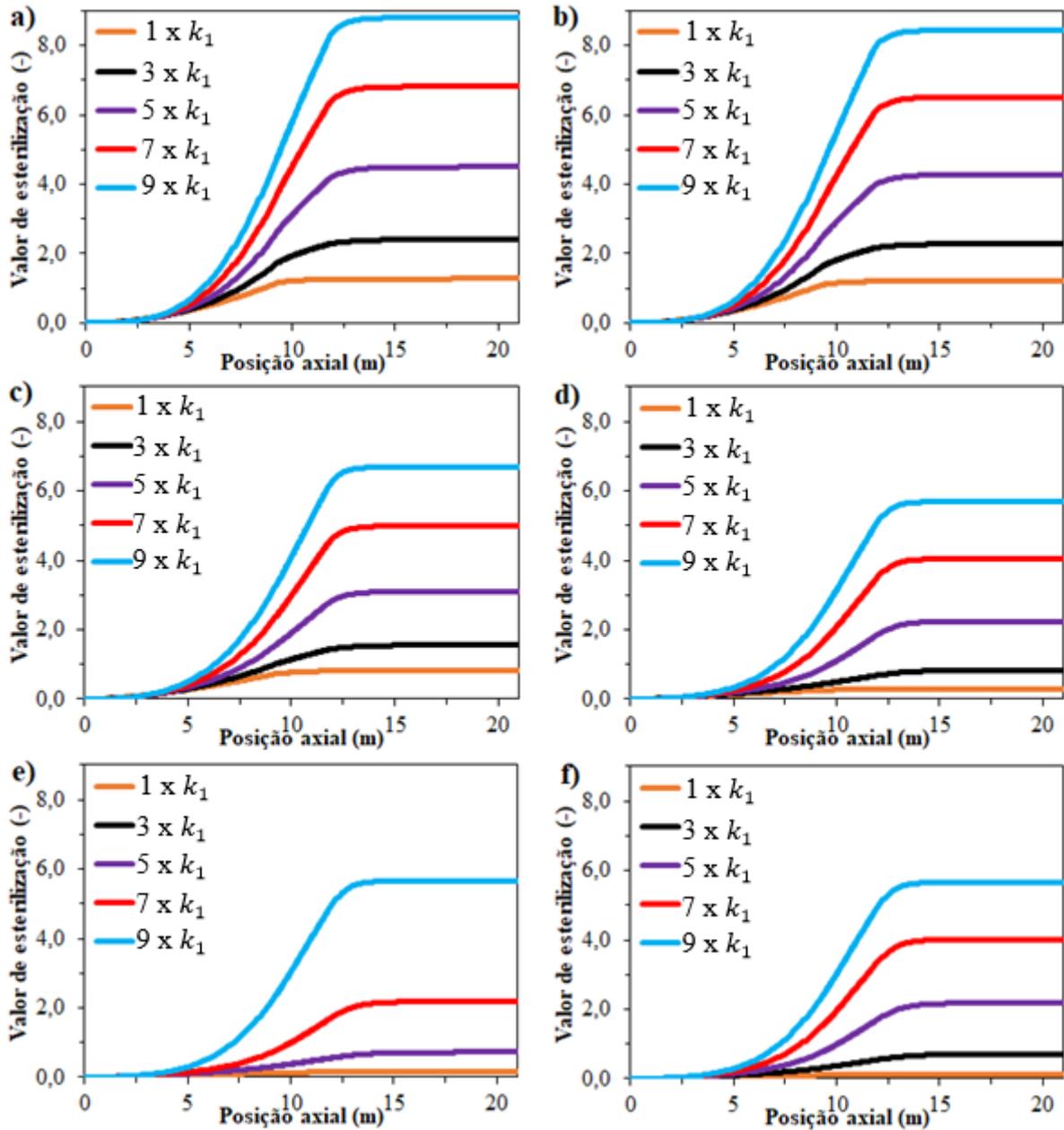
Fonte: Autor, 2019.

Analisando a Tabela 6.3, pode-se observar que quanto maior a condutividade térmica e difusividade mássica efetivas, maiores são os valores de esterilização, pois ocorre o efeito da mistura das lâminas pela penetração do calor (tornando o fluido menos viscoso) e pelo transporte difusivo de massa. Vale salientar, que para um fator de aumento da condutividade térmica igual a 1, os valores de esterilização para as difusividades mássicas 10^{-8} e 10^{-9} são muito pequenos, pois praticamente toda a troca térmica e mássica se dá por efeitos de difusão entre todas as lâminas na direção radial, ocorrendo conseqüentemente um tratamento térmico ineficiente, para o equipamento estudado.

Os perfis do valor de esterilização para as difusividades mássicas efetivas estudadas variando os valores das condutividades térmicas efetivas e para diversos valores de condutividade térmica mudando a difusividade mássica são apresentados nas Figuras 6.10 e 6.11, respectivamente.

Observa-se pela Figura 6.10, que quanto maior o valor da condutividade térmica efetiva maior a letalidade do processo, pois há uma maior troca térmica entre o fluido produto e utilidade. Já no caso da Figura 6.11, o aumento da difusividade mássica efetiva aumenta a letalidade pelo aumento da mistura radial das lâminas do fluido produto, o que facilita a distribuição do calor pelo fluido e diminui as diferenças de temperatura entre a superfície e o centro do tubo.

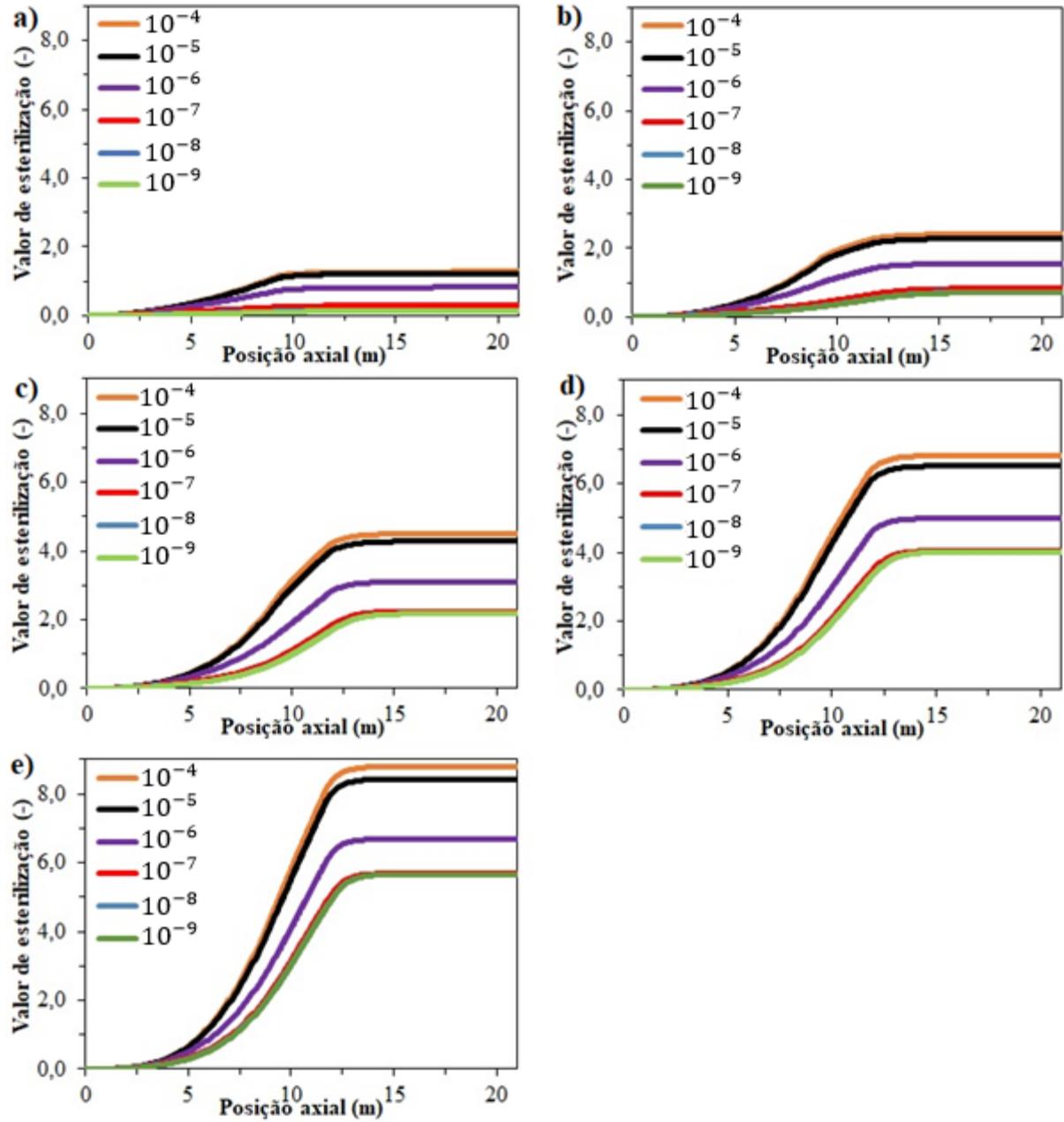
Figura 6.10. Perfis do valor de esterilização para as difusividades térmicas efetivas na direção radial de $1 \times k_1$, $3 \times k_1$, $5 \times k_1$, $7 \times k_1$ e $9 \times k_1$ maiores que a difusividade térmica para as difusividades mássicas de: a) 10^{-4} , b) 10^{-5} , c) 10^{-6} , d) 10^{-7} , e) 10^{-8} , f) 10^{-9}



Fonte: Autor, 2019.

Figura 6.11. Perfis do valor de esterilização para as difusividades mássicas efetivas na direção radial de 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} e 10^{-9} para as difusividades térmicas efetivas

a) $1 \times k_1$, b) $3 \times k_1$, c) $5 \times k_1$, d) $7 \times k_1$, e) $9 \times k_1$



Fonte: Autor, 2019.

6.4 ESTUDO 4: INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO E DA VAZÃO DO PRODUTO NO VALOR DE ESTERILIZAÇÃO

Para verificar a influência das variáveis do processo no valor de esterilização da enzima peroxidase ao final do processamento térmico (saída da seção de resfriamento em z_{r2}), foi analisada a contribuição das temperaturas de processamento térmico do alimento na entrada do tubo de retenção (z_{t1}) com a vazão volumétrica da polpa de manga (q_1). Sendo estas variáveis escolhidas devido a facilidade de controle no equipamento e são diretamente relacionadas ao valor de esterilização.

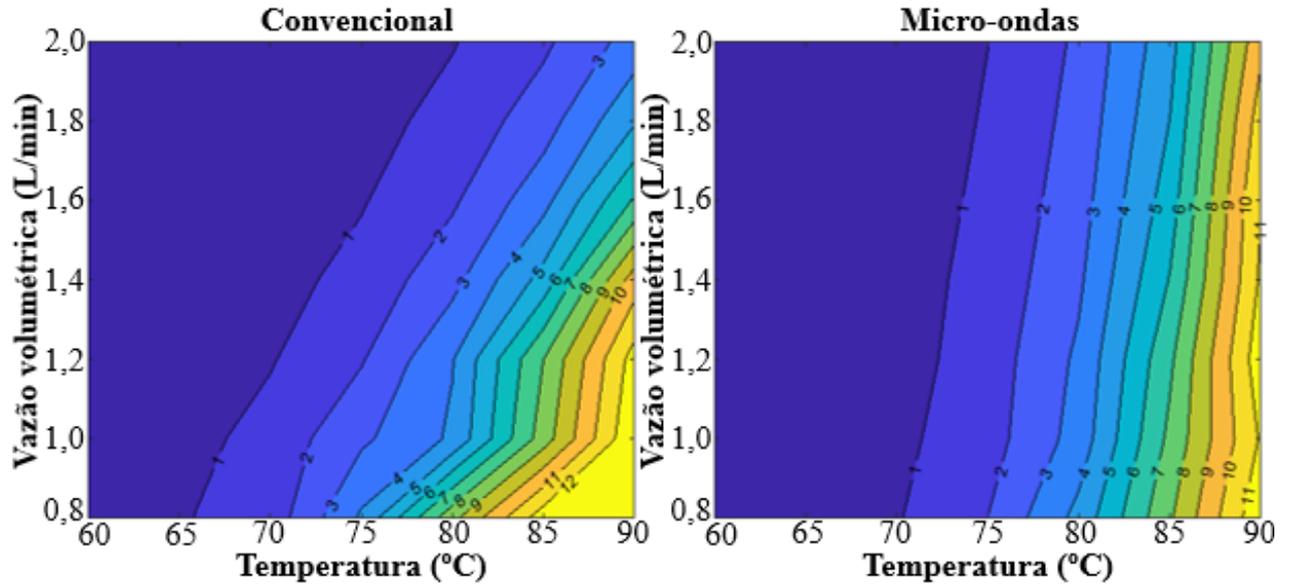
Assim, foram realizadas um total de 49 simulações para cada tipo de tratamento térmico (convencional e micro-ondas) combinando 7 temperaturas de processo (60, 65, 70, 75, 80, 85 e 90 °C) e 7 vazões volumétricas do alimento (0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 e 2,0 L/min), como resultado analisado destas simulações, foi o valor de esterilização ao final do processo. Utilizando estes dados, foi possível realizar os gráficos de contorno para cada tratamento térmico (Figuras 6.12).

Apesar do equipamento possuir capacidade nominal de aquecimento até 150 °C, as simulações com temperaturas acima de 90 °C não convergiram. Isto pode ser devido ao elevado valor de esterilização, responsável por calcular o número de reduções logarítmicas da enzima peroxidase.

Observando a Figura 6.12, em ambos os tipos de processamento térmico o aumento da temperatura de processo resulta em altos valores de esterilização do processo. Já no caso da vazão volumétrica, vazões mais altas reduzem o tempo de processamento e, assim, resultam em menores valores de esterilização.

No entanto, no aquecimento convencional a influência do aumento da vazão volumétrica do alimento com o valor de esterilização é maior do que no aquecimento por micro-ondas. Ou seja, no micro-ondas a letalidade possui linhas mais definidas (vertical) e não variam tanto com o aumento da vazão. Desta maneira, o processamento térmico assistido é capaz de atingir um determinado valor de esterilização com a combinação de uma vazão volumétrica mais alta (menor tempo de processamento) e maior temperatura de processo, resultando nas condições do processamento térmico da pasteurização com altas temperaturas em um curto espaço de tempo (HTST)

Figura 6.12. Gráfico de contorno das diferentes vazões volumétricas e temperaturas de aquecimento para o valor de esterilização do processamento térmico contínuo convencional e micro-ondas a uma temperatura de referência de 77,2 °C



Fonte: Autor, 2019.

De acordo com a FDA (2004), o sistema de pasteurização de suco de frutas deve atingir uma redução de pelo menos $5 - \log_{10}$, ou o equivalente ao tempo de 5 reduções decimais, para o indicador biológico de maior preocupação deteriorante. Considerando a Figura 6.13, para um valor de esterilização de 5, os valores de maior temperatura e menor tempo (maior vazão) que atendem a pasteurização HTST são 90 °C e 1,8 L/min no aquecimento convencional e 87 °C e 2,0 L/min para o micro-ondas.

7 CONCLUSÕES

O modelo foi desenvolvido para o tratamento térmico contínuo de alimentos, utilizando equações diferenciais de conservação de energia e atividade residual, e resolvido pelo método de diferenças finitas. A modelagem matemática da troca térmica e da letalidade de um processamento térmico de um fluido não-Newtoniano, escoando sob regime laminar, foi apresentada e testada por meio de simulações e um estudo de caso.

Para testar o modelo, foi considerado um estudo de caso de polpa de manga com 20 °Brix (fluido pseudoplástico), em que a enzima peroxidase foi o indicador biológico alvo. Foi possível determinar os perfis do valor de esterilização, atividade residual e temperatura em todas as seções dos processamentos térmicos contínuos convencional e assistido por micro-ondas, de acordo com as hipóteses consideradas no modelo, que incluiu dispersões de massa e energia, e as perdas de calor para o ambiente, além do perfil de velocidade.

Com o primeiro estudo de caso, foi observada a maior sensibilidade do valor de esterilização do processo com os pontos discretizados na direção axial. Sendo possível realizar a seleção do número de pontos para a discretização nas direções axial e radial.

No segundo estudo de caso, foram comparados os perfis de temperatura, atividade residual e valor de esterilização para os processamentos térmicos contínuos convencional e assistido por micro-ondas. Foi possível calcular a taxa de aquecimento, contribuição do aquecimento na atividade residual e o número de ciclos decimais que a enzima peroxidase sofre na saída do tratamento térmico.

Os valores das difusividades efetivas térmica e mássica radial possuem grande influência no perfil de temperatura, atividade residual e no valor de esterilização, pois afetam os efeitos de mistura e troca térmica das lâminas de fluido. Sendo assim, o aumento desses parâmetros contribui com o aumento do valor de esterilização.

No estudo da influência da vazão volumétrica e temperatura de aquecimento da polpa de manga com o valor de esterilização foi apresentado o gráfico de contorno comparando os processamentos térmicos contínuos convencional e micro-ondas. Pode-se observar uma maior influência da vazão no valor de esterilização do processo térmico convencional e também linhas melhor definidas no tratamento térmico por micro-ondas.

7.1 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

As principais contribuições realizadas neste trabalho foram:

- a) Adaptação da modelagem proposta por Kechichian (2012) e Dantas (2018) em trocadores de calor bitubulares para a unidade piloto de pasteurização composta por dois trocadores de calor tipo serpentina em casco;
- b) Utilização do fator de aumento para o tubo serpentina helicoidal nos trocadores de calor e no tubo de retenção;
- c) Foi considerada na modelagem matemática desenvolvida a perda de calor nas conexões entre as seções de pré-aquecimento, micro-ondas, retenção e resfriamento;
- d) Equacionamento e desenvolvimento do modelo para a seção de micro-ondas;
- e) Avaliação da letalidade da enzima peroxidase, presente naturalmente na polpa de manga, durante o processamento térmico contínuo convencional e por micro-ondas;
- f) Determinação do gráfico de contorno para verificar a influência da vazão volumétrica com a temperatura de processo no valor de esterilização.

7.2 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para aperfeiçoamento do modelo proposto:

- a) Desenvolver um integrador de tempo e temperatura (TTI) enzimático para avaliar a letalidade real do equipamento e comparar com a letalidade prevista no modelo;
- b) Validar o modelo térmico e mássico utilizando o TTI enzimático e testar em polpa de manga;
- c) Realizar gráfico de contorno considerando a retenção de um nutriente presente na polpa de manga;
- d) Otimização usando o software gPROMS 3.2 (PSE) para determinação da vazão volumétrica e temperatura de processo ótimas.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, H. F.; GUT, J. A. W. Continuous HTST pasteurization of liquid foods and plate heat exchangers: Mathematical modeling and experimental validation using time-temperature integrator. *Journal of Food Engineering*, v. 123, p. 78-86, 2014.
- AGUIAR, H. F.; YAMASHITA, A. S.; GUT, J. A. W. Development of enzymic time-temperature integrators with rapid detection for evaluation of continuous HTST pasteurization processes. *LWT – Food Science and Technology*, v. 47, p. 110-116, 2012.
- AHMED, J.; RAMASWAMY, H. S. Microwave pasteurization and sterilization of foods. In M. S. Rahman (Ed.). *Handbook of food preservation*, Boca Ratón: CRC Press, 691-712, 2007.
- ANGELINO, P. D.; CHIRSTEN, G. L.; PENFIELD, M. P.; BEATTIE, S. Residual Alkaline Phosphatase Activity in Pasteurized Milk Heated at Various Temperatures – Measurements with the Fluorophos and Scharer Rapid Phosphatase Tests. *Journal of Food Protection*, v. 62, n. 1, p. 81-85, 1999.
- AWUAHA, G. B.; RAMASWAMY, H. S.; ECONOMIDES, A. Thermal processing and quality: Principles and overview. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v.46, p. 584-602, 2007.
- BANGA, J. R.; BALSACANTO, E.; MOLES, C. G.; ALONSO, A. A. Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, v. 14, p. 131-144, 2003.
- BANGA, J. R.; SAA, J.; ALONSO, A. A. Model-based optimization of microwave heating of bioproducts. In *Proceedings of 7th International Conference of Microwave & High Frequency Heating*. Valencia, 1999.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; KOKINI, J. L.; MA, L.; IBARZ, A. The rheology of semiliquid foods. *Advances in Food and Nutrition Research*, v. 39, p. 1-69, 1996.
- BENZE, R. V. Modelagem matemática do processo térmico contínuo de alimentos líquidos em trocadores de calor a placas. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- BHATTACHARYA, S.; RASTOGI, N. K. Rheological properties of enzyme-treated mango pulp. *Journal of Food Engineering*, v. 35, p. 249-262, 1998.
- BIGELOW, W. D. The logarithmic nature of thermal death time curves. *The Journal of Infectious Diseases*, p. 528-536, 1921.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. 2nd ed. Nova York: John Wiley & Sons, p. 895, 2002.
- BOLDOR, D.; BALASUBRAMANIAN, S.; PUROHIT, S.; RUSCH, K. A. Design and implementation of a continuous microwave heating system for ballast water treatment. *Environmental Science Technology*, v. 42, p. 4121-4127, 2008.
- BRADDOCK, R. J. *Handbook of citrus by-products and processing technology*. 1 ed. New York: Wiley, 1999, p. 53-83.
- BRASIL. MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Instrução Normativa*

- nº 37. Padrões de Identidade e Qualidade de Suco e Polpa de Fruta. Brasília, 2018. Disponível em : <<http://www.in.gov.br/materia/2018-10-08-instrucao-normativa-n-37-de-1-de-outubro-de-2018-44304612>>
- BYLUND, G. Dairy Processing Handbook. 1 ed. Lund: Tetra Pak Processing Systems AB, 1995, cap. 6, p. 75-89.
- CANO, I. A. Modelagem e simulação dinâmica da pasteurização contínua de leite sujeito à incrustação. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em ciências – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.
- CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, T. Microwave food processing – A review. *Food Research International*, v. 52, p. 243-261, 2013.
- CHEKOVA, E.; BARTON, P. I.; GORAK, A. Optimal operation processes of discrete-continuous biochemical processes. *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, p. 1167, 2000.
- CLAEYS, W. L.; VAN LOEY, A. M.; HENDRICKX, M. E. Intrinsic time temperature integrators for heat treatment of milk. *Trends of Food Science & Technology*, v. 13(9-10), p. 293-311, 2002.
- CORONEL, P.; SANDEEP, K. P. Heat transfer coefficient in helical heat exchangers under turbulent flow conditions. *International Journal of Food Engineering*, v.4(1), 2008.
- DANTAS, J. A. T. A.; GUT, J. A. W. Modeling sterilization value and nutrient degradation in the thermal processing of liquid foods under diffusive laminar flow with associations of tubular heat exchangers. *Journal of Food Process Engineering*, 2018.
- DANTAS, J. A. T. A.; PEGORARO, P. R.; GUT, J. A. W. Determination of the effective radial mass diffusivity in tubular reactors under non-Newtonian laminar flow using residence time distribution. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.71, p. 18-25, 2014.
- EMOND, S. P.; CAMPDEN, C. Continuous heat processing. In: Richardson, P. *Thermal Technologies in Food Processing*. Boca Raton: CRC press, p. 29-48, 2001.
- ERDOGDU, F.; KARATAS, O.; SARGHINI, F. A short update on heat transfer modelling for computational food processing in conventional and innovative processing. *Current Opinion in Food Science*, v. 23, p. 113-119, 2018.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 2019. Disponível em: <<http://www.fao.org/food-safety/en/>> Acessado em: 20/05/2019.
- FDA. Juice HACCP hazards and controls guidance. 2004. Disponível em: <<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/guidance-industry-juice-hazard-analysis-critical-control-point-hazards-and-controls-guidance-first>> Acessado em: 15/11/2018.
- FELLOWS, P. Food processing technology principles and practice. Boca Raton: CRC press, p. 241-249, 2006.
- FOX, P. F.; McSWEENEY, P. L. H. Dairy Chemistry and Biochemistry. 1 ed. London: Blackie Academic & Professional, p. 324-327, 1998.
- FRYER, P.J. Thermal treatment of foods. In FRYER, P.J.; PYLE, D.L.; & RIELLY, C.D. *Chemical engineering for the food industry*. 1 ed. London: Blackie A & P, 1997, p. 331-382.

- GAVA, A. J.; DA SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. *Tecnologia de Alimentos*. 1 ed. São Paulo: Nobel, cap VI e VIII, p. 177-182 e 227-238, 2008.
- GEORGIARDIS, M. C.; ROTSTEIN, G. E.; MACCHIETTO, S. Modeling and simulation of shell and tube heat exchangers under milk fouling. *AIChE Journal*, v. 44, p. 959.
- GROVIER, G. W.; AZIZ, K. *The flow of complex mixtures in pipes*. Nova York: Van Nostrand Reinhold Co., 1972. 792p.
- GUIAVARCO, Y.; VAN LOEY, A.; ZUBER, F.; HENDRICKX, M. Development characterization and use of a high-performance enzymatic time-temperature integrator for the control of sterilization process' impacts. Wiley Periodicals, 2004.
- GULATI, T.; DATTA, A. K. Enabling computer-aided food process engineering: Property estimation equations for transport phenomena-based models. *Journal of Food Engineering*, v. 116, p. 483-504, 2013.
- GUNDURAO, A.; RAMASWAMY, H. S., AHMED, J. Effect of soluble solids concentration and temperature on thermo-physical and rheological properties of mango puree. *International Journal of Food Properties*, v. 14(5), p. 1018-1036, 2011.
- GUT, J. A. W.; PINTO, J. M. Modeling of plate heat exchangers with generalized configurations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 46, p. 2571- 2585, 2003.
- GUT, J. A. W.; TADINI, C. C. *Processamento térmico de alimentos*. In TADINI, C. C. et al. *Operações Unitárias na Indústria de Alimentos*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016, cap. 13, p. 443-488.
- HENDRICKX, M.; MAESMANS, G.; DE CORDT, S.; NORONHA, J.; VAN LOEY, A.; TOBACK, P. Evaluation of integrated time-temperature effect in thermal processing of food. *Critical Reviews in Food Science and nutrition*, v. 35(3), p.231-262, 1995.
- IBARZ, A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. *Thermal processing of foods*. In IBARZ, A. et al. *Unit Operations in Food Engineering*. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, cap. 15, p. 491-499, 2003.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York, John Wiley & Sons, 2006.
- KAUSHIK, N.; RAO, P. S.; MISHRA, H. N. Comparative analysis of thermal-assisted high pressure and thermally processed mango pulp: Influence of processing, packaging, and storage. *Food Science and Technology International*, v. 24, p.1, 2017.
- KECHICHIAN, V.; CRIVELLARI, G. P.; GUT, J. A. W.; TADINI, C. C. Modeling of continuous thermal processing of a non-Newtonian liquid food under diffusive laminar flow in a tubular system. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 55, p. 5783-5792, 2012.
- KHAN, A. A.; ROBINSON, D. S. The thermostability of purified mango isoperoxidases. *Food Chemistry*, v. 47, p. 53-59, 1993.
- LING, B.; TANG, J.; KONG, F.; MITCHAM, E. J.; WANG, S. Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review. *Food and Bioprocess Technology*, v.8, p.343-358, 2015.
- LEE, A. P.; BARBANO, D. M.; DRAKE, M. A. The influence of ultra-pasteurization by

- indirect heating versus direct steam injection on skim and 2% fat milks. *J. Dairy Sci.*, v.100, p.1-14, 2017.
- LEITE, J. A. S. Impacto do processo térmico assistido por micro-ondas sobre a funcionalidade do leite humano. Dissertação de doutorado apresentada para obtenção do título de Doutor em ciências – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- LEWIS, M.; HEPPELL, N. *Continuous thermal processing of foods: pasteurization and UHT sterilization*. 1 ed. Gaithersburg: Aspen Publishers, 2000.
- LINNEMAN, A. R., Meerdink, G., Meulenberg, M. T. C., & Jongen, W. M. F. (1999). Consumer-oriented technology development. *Trends in Food Science and Technology*, 9, 409-414.
- PARKIN, K. L. General Characteristics of Enzymes. In: NAGODAWITHANA, T.; REED, G. *Enzymes in Food Processing*. 3 ed. San Diego: Academic Press, 1993, cap. 2, p. 7-35.
- PEREIRA, R. N.; VICENTE, A. A. Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, v. 43, 1936-1943, 2010.
- PIRES, M. N. Estudo do tratamento térmico contínuo do suco de maçã não clarificado usando tecnologia de micro-ondas. Relatório de iniciação científica apresentado à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química, 2015.
- PRADA, C. D. Advanced control and supervision in the sugar industry. In: *First workshop on mathematical and computing techniques for agrofood technologies*. Barcelona, CIMNE (UPC), 2001.
- RAJU, M.; KUMAR, S. Modeling of a Helical Coil Heat Exchanger for Sodium Alanate Based On-board Hydrogen Storage System. *COMSOL Conference*, Boston, 2010.
- RAO, M. A. Food rheology and texture. In *Food Engineering - vol. II*. Geneva: EOLSS, 1 ed., p. 1-8, 2005.
- RAWSON, A.; PATRAS, A.; TIWARI, B. K.; NOCI, F.; KOUTCHMA, T.; BRUNTON, N. Effect of thermal and non-thermal processing technologies on the bioactive content of exotic fruits and their products: review of recent advances. *Food Research International*, v. 44, n. 7, p. 1875-1887, 2011.
- ROMERO, J. T.; DITCHFIELD, C. Reologia de produtos alimentícios. In TADINI, C. C. et al. *Operações Unitárias na Indústria de Alimentos*. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, cap. 3, p. 72-93, 2016.
- RUSSO, G. Estudo e modelagem da transferência de calor em um processo de pasteurização em sistema tubular. Dissertação de mestrado apresentada para obtenção do título de Mestre em ciências – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.
- RUTHVEN, D. M. The residence time distribution for ideal laminar flow in helical tube. *Chemical Engineering Science*, v. 26, n. 7, p. 1113–1121, 1971.
- SAA, J.; ALONSO, A. A.; BANGA, J. R. Optimal control of microwave heating using mathematical models of medium complexity. In *Proceedings of ACoFoP IV (Automatic Control of Good and Biological Processes)*. Göteborg, 1998.
- SAGUY, I. S.; SINGH, R. P.; JOHNSON, T; FRYER, P. J.; SASTRY, S. K. Challenges facing

- food engineering. *Journal of Food Engineering*, n. 119, p. 332-342, 2013.
- SALAZAR-GONZÁLEZ, C.; MARTÍN-GONZÁLEZ, M. F. S.; LÓPEZ-MALO, A.; SOSA-MORALES, M. E. Recent studies related to microwave processing of fluid foods. *Food Bioprocess Technol*, v. 5, p.31-46, 2012.
- SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. Heat transfer in food processing. In: SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. *Introduction to Food Engineering*. Oxford: Academic press, p. 247-402, 2009.
- SIGUEMOTO, É. S.; PIRES, M. N.; FUNCIA, E. S.; GUT, J. A. W. Evaluation and modeling of a microwave-assisted unit for continuous flow pasteurization of liquid foods: Residence time distribution, time-temperature history, and integrated lethality. *Journal of Food Process Engineering*, v. 41(8), p.1-13, 2018a.
- SIGUEMOTO, É. S. Continuous-flow microwave thermal processing of cloudy apple juice. *Dissertação de doutorado apresentada para obtenção do título de Doutor em ciências – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018b.*
- SKOGLUND, T.; DEJMEK, P. A dynamic object-oriented model for efficient simulation of microbial reduction in dispersed turbulent flow. *Journal of Food Engineering*, v. 86, p. 358-369, 2008.
- STEFFE, J. F. *Rheological methods in food process engineering*. East Lansing: Freeman Press, 2 ed., p 20-27, 1996.
- STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Pipeline Design Calculations for Newtonian and Non-Newtonian Fluids. In: VALENTAS, K. J.; SINGH, R. P.; ROTSTEIN, E. *Handbook of Food Engineering Practice*. Boca Raton: CRC Press, cap. 1, 1997.
- SUGAI, A. Y. Processamento contínuo de purê de manga (*Mangifera indica* Linn.), variedade palmer. *Dissertação de doutorado apresentada para obtenção do título de Doutor em engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.*
- SUN, Y.; PANTELIDES, C. C.; CHALABI, Z. S. Mathematical modeling and simulation of near-ambient grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 11, p. 341-359, 1995.
- TAOUKIS, P. S.; LABUZA, T. P. Applicability of time-temperature indicators as shelf life monitors of food products. *Journal of Food Science*, v. 54, p. 783-788, 1989.
- TEIXEIRA, A. A.; DIXON, J. R.; ZHRADNIK, J. W.; ZINSMEISTER, G. E. Computer optimization of nutriente retention in the termal processing of conduction-heated foods. *Food Technology*, v. 23, 137-142, 1969.
- TOLEDO, R.T. *Fundamentals of Food Process Engineering*. 2 ed. New York: Springer, 1999.
- TORRES, A. P.; OLIVEIRA, F. A. R. Residence time distribution studies in continuous thermal processing of liquid foods: a review. *Journal of Food Engineering*, v. 36, p. 1-30, 1998.
- TRIBESS, T. B.; RODAS, M. A.; TORRE, J. C. M. D.; TADINI, C. C. The effect of refrigerated storage on sensory profile and physical-chemical characteristics of minimally pasteurized orange juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 33, p. 264-280, 2009.
- VAN BOEKEL, M. A. J. S. Bayesian solutions for food-science problems? In: VAN BOEKEL,

- M. A. J. S.; STEIN, A.; VAN BRUGGEN, A. H. C. Bayesian Statistics and Quality Modeling in the Agro-Food Production Chain. 1 ed. Dordrecht: Kluwer Academic Press, p. 17-25, 2004.
- VAN BOEKEL, M. A. J. S. Kinetic modeling of food quality: a critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 7, n. 1, p. 144-158, 2008.
- VAN LOEY, A.; HAENTJENS, T.; SMOUT, C.; HENDRICKX, M. E. Enzymic time-temperature integrators for the quantification of thermal process in terms of food safety. In OLIVEIRA, F. A. R.; OLIVEIRA, J. C. *Processing foods: quality optimization and process assessment*. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 1999.

APÊNDICE A: ARQUIVO FONTE DO gPROMS

Variable types:

Name	Lower bound	Default value	Upper bound	Units
Adimensional	1.0E-15	0.2	1.0E15	-
AtividadeRes	1.0E-15	0.5	1.0E15	-
Calor	-1.0E15	1000	1.0E15	W/m ³
CalorEspecifico	1.0E-15	4000	1.0E15	J/kg·K
CondTermica	1.0E-15	0.5	1.0E15	W/m·K
Difusividade	1.0E-15	1.0E-6	1.0E15	m ² /s
MassaEspecifica	1.0E-15	900	1.0E15	kg/m ³
n_reo	1.0E-15	0.5	1.0E15	-
Svalue	1.0E-15	0.5	1.0E15	
TaxaReacao	-10	0.5	1.0E15	mol/m ³ ·s
Temperatura	1.0E-20	320	1.0E15	K
Tempo	1.0E-15	0.5	1.0E15	s
Velocidade	-1.0E15	0.5	1.0E15	m/s
ViscosidadeAbsoluta	1.0E-15	0.1	1.0E15	N·s/m ²

MODEL: Pasteurizador (gPROMS_Microondas_manga)

```

=====
                                PARAMETER
=====
#TEMPERATURA DE ENTRADA DO FLUIDO PRODUTO
T1_in      AS REAL
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb      AS REAL
#COEFICIENTE CONVECTIVO EFETIVO DO AR AMBIENTE (Levando-se em #conta a
radiação e convecção natural)
Uamb       AS REAL
#COEFICIENTE CONVECTIVO PARA AS CONEXOES
Uamb2      AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DA SEÇÃO
Ar_in      AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DO PASTEURIZADOR
Ar_inaq    AS REAL
=====
                                UNIT
=====
aq         AS Trocador
aq2        AS Conexao
mo         AS Micro_ondas
mo2        AS Conexão
ret        AS Retencao
ret2       AS Conexao
resf       AS Trocador
=====
                                BOUNDARY
=====
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE AQUECIMENTO-----
within aq do

```

```

#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM x=0 (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
    T1(A,y)= T1_in;
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
    Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
end
#EM y=Raio_int_1 (TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
for x:=A|+ to B do
    Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
end
#Atividade residual no fluido produto
#BALANÇO MOLAR
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM x=A (ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
    Ar(A,y)= Ar_in;
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
    partial (Ar(x,0),Radial1)=0;
end
#EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
for x:=A|+ to B do
    partial (Ar(x,Raio_int_tubo1),Radial1)=0;
end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
    K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),axial)=0;
end
#EM Z=B
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
    T_tubo_1(B,y)=aq2.T_tubo_1(aq2.A,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=Raio_int_1 (TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP.
PAREDE DO TUBO INTERNO)
for x:=A|+ to B|- do
    T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1)=T1(x,Raio_int_tubo1);
end
#EM R=Raio_ext_1 (TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
for x:=A|+ to B|- do
    K_tubo*(partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1),radialtubo1))= -
h2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T2(x));
end
#-->PARA O FLUIDO UTILIDADE
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL

```

```

#EM Z=A
Kef_FU*partial(T2(A),axial2)=0;
#EM Z=B
T2(B)=T2_in;
end
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE CONEXAO AQ2-
  within aq2 do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
  #BALANÇO DE ENERGIA
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM Z=A (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
    for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
      T1(A,y) = aq.T1(aq.B,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
    for x:=A|+ to B do
      Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
    end
    #EM R=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
    for x:=A|+ to B do
      Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
      K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
    end
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM Z=A(ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
    for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
      Ar(A,y) = aq.Ar(aq.B,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
    for x:=A|+ to B do
      (partial(Ar(x,0),radial1))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0*(1/(Ar_media(A)*1e2));
    end
    #EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
    for x:=A|+ to B do
      (partial(Ar(x,Raio_int_tubo1),radial1))*(1/(Ar_media(A)))=0*(1/(Ar_media(A)
      *1e2));
    end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
  #BALANÇO DE ENERGIA
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM Z=A
    for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
      K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),Axial)= 0;
    end
    #EM Z=B
    for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
#(TEMP. DO TUBO NA SAIDA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA ENTRADA DO
RESF.)
      T_tubo_1(B,y)=ret.T_tubo_1(ret.A,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM R=Raio_int_1 (TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP.
PAREDE DO TUBO INTERNO)
    for x:=A|+ to B|- do
      T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1)=T1(x,Raio_int_tubo1);

```

```

end
#EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
for x:=A|+ to B|- do
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1),radialtubo1)=
-Uamb2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T_amb);
end

end #within
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE MICRO-ONDAS-
within mo do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM x=0 (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
T1(A,y)= aq2.T1(aq2.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
end
#EM y=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
end
#Atividade residual no fluido produto
#BALANÇO MOLAR
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM x=A (ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
Ar(A,y)= aq2.Ar(aq2.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
partial (Ar(x,0),Radial1)=0;
end
#EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
for x:=A|+ to B do
partial (Ar(x,Raio_int_tubo1),Radial1)=0;
end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),axial)=0;
end
#EM Z=B
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
T_tubo_1(B,y)=mo2.T_tubo_1(mo2.A,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=Raio_int_1 (TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP.
PAREDE DO TUBO INTERNO)
for x:=A|+ to B|- do
T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1)=T1(x,Raio_int_tubo1);

```

```

end
#EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
for x:=A|+ to B|- do
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1),radialtubo1)=
-Uamb2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T_amb);
end

end
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE CONEXAO MO2-
within mo2 do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
T1(A,y) = mo.T1(mo.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
end
#EM R=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
end
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A(ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
Ar(A,y) = mo.Ar(mo.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
(partial(Ar(x,0),radial1))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0*(1/(Ar_media(A)*1e2));
end
#EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
for x:=A|+ to B do
(partial(Ar(x,Raio_int_tubo1),radial1))*(1/(Ar_media(A)))=0*(1/(Ar_media(A)
*1e2));
end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do # (TEMP. DO
TUBO NA ENTRADA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA SAIDA DO AQUEC.)
K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),Axial)= 0;
end
#EM Z=B
for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
# (TEMP. DO TUBO NA SAIDA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA ENTRADA DO
RESF.)
T_tubo_1(B,y)=ret.T_tubo_1(ret.A,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=Raio_int_1

```

```

#(TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP. PAREDE DO TUBO INTERNO)
  for x:=A|+ to B|- do
    T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1)=T1(x,Raio_int_tubo1);
  end
  #EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
  for x:=A|+ to B|- do
    K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1),radialtubo1)=
      -Uamb2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T_amb);
  end
end #within
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE RETENÇÃO---
  within ret do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
  #BALANÇO DE ENERGIA
  #NA DIREÇÃO AXIAL
  #EM Z=A (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
  for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
    T1(A,y) = mo2.T1(mo2.B,y);
  end
  #NA DIREÇÃO RADIAL
  #EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
  for x:=A|+ to B do
    Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
  end
  #EM R=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
  for x:=A|+ to B do
    Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
  end
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
  #NA DIREÇÃO AXIAL
  #EM Z=A(ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
  for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
    Ar(A,y) = mo2.Ar(mo2.B,y);
  end
  #NA DIREÇÃO RADIAL
  #EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
  for x:=A|+ to B do
    (partial(Ar(x,0),radial1))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0*(1/(Ar_media(A)*1e2));
  end
  #EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
  for x:=A|+ to B do
    (partial(Ar(x,Raio_int_tubo1),radial1))*(1/(Ar_media(A)))=0*(1/(Ar_media(A)
*1e2));
  end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
  #BALANÇO DE ENERGIA
  #NA DIREÇÃO AXIAL
  #EM Z=A
  for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do # (TEMP. DO
TUBO NA ENTRADA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA SAIDA DO AQUEC.)
    K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),Axial)= 0;
  end
  #EM Z=B
  for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do # (TEMP. DO TUBO
NA SAIDA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA ENTRADA DO RESF.)
    T_tubo_1(B,y)=ret2.T_tubo_1(ret2.A,y);
  end
end

```

```

#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=Raio_int_1
#(TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP. PAREDE DO TUBO INTERNO)
for x:=A|+ to B|- do
T_tubo_1(x,Raio_int_tubol)=T1(x,Raio_int_tubol);
end
#EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
for x:=A|+ to B|- do
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubol),radialtubol)=
-Uamb*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubol)-T_amb);
end
end #within
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE CONEXAO RET2---
within ret2 do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubol do
T1(A,y) = ret.T1(ret.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
end
#EM R=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
for x:=A|+ to B do
Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubol),radial1)=
K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubol),radialtubol);
end
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A(ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
for y:=0 to Raio_int_tubol do
Ar(A,y) = ret.Ar(ret.B,y);
end
#NA DIREÇÃO RADIAL
#EM R=0 (SIMETRIA DE EIXO)
for x:=A|+ to B do
(partial(Ar(x,0),radial1))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0*(1/(Ar_media(A)*1e2));
end
#EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
for x:=A|+ to B do
(partial(Ar(x,Raio_int_tubol),radial1))*(1/(Ar_media(A)))=0*(1/(Ar_media(A)*1e2));
end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
#BALANÇO DE ENERGIA
#NA DIREÇÃO AXIAL
#EM Z=A
for y:=Raio_int_tubol to Raio_ext_tubol do # (TEMP. DO
TUBO NA ENTRADA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA SAIDA DO AQUEC.)
K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),Axial)= 0;
end
#EM Z=B
for y:=Raio_int_tubol to Raio_ext_tubol do # (TEMP. DO TUBO
NA SAIDA DA RETENÇÃO IGUAL A TEMP. DO TUBO NA ENTRADA DO RESF.)

```

```

        T_tubo_1(B,y)=resf.T_tubo_1(resf.A,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM R=Raio_int_1
    #(TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP. PAREDE DO TUBO INTERNO)
    for x:=A|+ to B|- do
        T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1)=T1(x,Raio_int_tubo1);
    end
    #EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
    for x:=A|+ to B|- do
        K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1),radialtubo1)=
            -Uamb2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T_amb);
    end
end #within
#-----CONDIÇÕES DE CONTORNO NA SEÇÃO DE Resfriamento---
    within resf do
#-->PARA O FLUIDO PRODUTO
    #BALANÇO DE ENERGIA
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM x=0 (TEMP. DE ENTRADA CONHECIDA)
    for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
        T1(A,y) = ret2.T1(ret2.B,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
    for x:=A|+ to B do
        Kef_FP(x)*partial(T1(x,0),radial1)=0;
    end
    #EM y=Raio_int_1(TRANSF. DE CALOR PELO CONTORNO)
    for x:=A|+ to B do
        Kef_FP(x)*partial(T1(x,Raio_int_tubo1),radial1)=
        K_tubo*partial(T_tubo_1(x,Raio_int_tubo1),radialtubo1);
    end
    #Atividade residual no fluido produto
    #BALANÇO MOLAR
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM x=A(ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA CONHECIDA)
    for y:=0 to Raio_int_tubo1 do
        Ar(A,y) = ret2.Ar(ret2.B,y);
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM y=0 (SIMETRIA DE EIXO)
    for x:=A|+ to B do
        partial (Ar(x,0),Radial1)=0;
    end
    #EM R=Raio_int_1 (IMPERMEABILIDADE)
    for x:=A|+ to B do
        partial (Ar(x,Raio_int_tubo1),Radial1)=0;
    end
#-->PARA A PAREDE DO TUBO INTERNO
    #BALANÇO DE ENERGIA
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM Z=A
    for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do
        K_tubo*partial(T_tubo_1(A,y),axial)=0;
    end
    #EM Z=B
    for y:=Raio_int_tubo1 to Raio_ext_tubo1 do

```

```

        K_tubo*partial(T_tubo_1(B,y),axial)=0;
    end
    #NA DIREÇÃO RADIAL
    #EM R=Raio_int_1
#(TEMP.FLUIDO PRODUTO IGUAL A TEMP. PAREDE DO TUBO INTERNO)
    for x:=A|+ to B|- do
        T_tubo_1(x,Raio_int_tubol)=T1(x,Raio_int_tubol);
    end
    #EM R=Raio_ext_1(TAXA DE CALORES TROCADOS IGUAL)
    for x:=A|+ to B|- do
K_tubo*(partial(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubol),radialtubol))= -
        h2*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubol)-T2(x));
    end
#-->PARA O FLUIDO UTILIDADE
    #BALANÇO DE ENERGIA
    #NA DIREÇÃO AXIAL
    #EM Z=A
    Kef_FU*partial(T2(A),axial2)=0;
    #EM Z=B
    T2(B)=T2_in;

End

```

MODEL: Trocador (gPROMS_Microondas_manga)

```

#=====
                                PARAMETER
#=====
    # TEMPERATURA DO AMBIENTE
    T_amb          AS REAL
    #ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DA SEÇÃO
    Ar_in          AS REAL
    #ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DO PASTEURIZADOR
    Ar_inaq       AS REAL
#-----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)
    #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
    Prop_FP_Dif_Mass AS REAL
    #CONDUTIVIDADE TÉRMICA
    T2_in          AS REAL
#-----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO-----
    #CONDUTIVIDADE TÉRMICA
    K_tubo         AS REAL
#-----PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO-----
    #TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
    Tref           AS REAL
    #TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
    D_red_dec_ref AS REAL
    #CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA (Variação de temperatura
necessária para promover uma redução de 10 vezes no valor de D)
    Z_red          AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO-----
    #VAZAO VOLUMÉTRICA
    Vazao1        AS REAL
    #VELOCIDADE MÉDIA
    Vb1           AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO UTILIDADE--
    #VAZAO VOLUMÉTRICA
    Vazao2        AS REAL

```

```

#VELOCIDADE MÉDIA
Vb2          AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO TROCADOR-----
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L            AS REAL
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1 AS REAL
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1 AS REAL
#RAIO INTERNO DO TUBO EXTERNO
Raio_int_tubo2 AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DO TROCADOR DE CALOR-----
#COEFICIENTE CONVECTIVO DO FLUIDO UTILIDADE
h2          AS REAL
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A           AS REAL
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B           AS REAL
#=====
#                               DISTRIBUTION_DOMAIN
#=====
#-----DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO AXIAL DA SEÇÃO EM ESTUDO-----
#AQUECIMENTO
Axial      AS [A:B]
Axial2    AS [A:B]
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DO FLUIDO PRODUTO----
Radial1   AS [0:Raio_int_tubo1]
#DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DA PAREDE DO TUBO INTERNO
Radialtubo1 AS [Raio_int_tubo1:Raio_ext_tubo1]
#=====
PORT
#                               VARIABLE
#=====
#-----FLUÍDO                PRODUTO-----
#TEMPERATURA DO FLUIDO (T1=f(z,r))
T1 AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF Temperatura
#TEMPERATURA MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
T1_media AS DISTRIBUTION (Axial) OF Temperatura
#PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS
#COEF CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP AS DISTRIBUTION (Axial) of CondTermica
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP AS DISTRIBUTION (Axial) of MassaEspecificica
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP AS DISTRIBUTION (Axial) of CalorEspecificico
#PROPRIEDADES REOLÓGICAS
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n AS DISTRIBUTION (Axial) of n_reo
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO (Vz=f(r))
Vz AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) of Velocidade
#Atividade residual (Ar=f(z,r))
Ar AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) of AtividadeRes
#ATIVIDADE RESIDUAL MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
Ar_media AS DISTRIBUTION (Axial) OF ATIVIDADERES
#VALOR S
Svalue AS DISTRIBUTION (Axial) OF Adimensional
#-----PAREDE DO TUBO INTERNO-----

```

```

#TEMPERATURA DO PAREDE (Ttubol=f(z,r))
T_tubo_1 AS DISTRIBUITION (Axial,Radialtubol)OF Temperatura

#-----FLUIDO UTILIDADE-----
#TEMPERATURA DO FLUIDO (T2=f(z))
T2 AS DISTRIBUITION (Axial2) OF Temperatura
#TAXA DE CALOR TROCADO, POR VOL. DE FLUIDO UTILIDADE, PELO FLUIDO
UTILIDADE
#COM A PAREDE EXTERNA DO TUBO INTERNO
Q2_tubo1 AS DISTRIBUITION (Axial) OF Calor
#RÖPRIEDADES TERMO-FÍSICAS
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FU AS MassaEspecificica
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FU AS CalorEspecifico
#CONDUTIVIDADE TERMICA
Kef_FU AS CondTermica

#=====
# EQUATION
#=====
# X = direção Axial Y = direção radial
#-----EQUAÇÕES PARA O FLUIDO PRODUTO-----
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO
#NÃO- NEWTONIANO (Lei de Potência)
for y := 0 to Raio_int_tubol do
for x := A to B do
Vz(x,y) = Vb1*((3*Exp_n(x) + 1)/(Exp_n(x) + 1)) *
(1 - (y/Raio_int_tubol)^((Exp_n(x) + 1)/Exp_n(x)));
end
end
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# y=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# x=]A:B] , A é C.C
for y :=0|+ to Raio_int_tubol|- do
for x := A|+ to B do
y*Rho_FP(x)*Cp_FP(x)*Vz(x,y)*partial(T1(x,y),Axial) = +
partial(y*Kef_FP(x)*partial(T1(x,y),Radial1),Radial1);
end
end
#TEMPERATURA MEDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
for x := A to B do
T1_media(x)= integral(y:=0:Raio_int_tubol;Vz(x,y)*T1(x,y)*2*y)/
(Vb1*(Raio_int_tubol^2));
end #FÖR
#BALANÇO MOLAR
#Domínios:
# z =]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# x =]A:B] , A é C.C
for y := 0|+ to Raio_int_tubol|- do
for x := A|+ to B do
#Calculo (Através das propriedades termo-físicas)
((y*Vz(x,y)*partial(Ar(x,y),Axial)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))-
(Prop_FP_Dif_Mass*partial(y*partial(Ar(x,y),Radial1),Radial1))*(1/(Ar_media
(A)*1e2))+ (y*LOG(10)*(Ar(x,y))/((D_red_dec_ref)*10^((Tref
T1(x,y))/Z_red)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0;
end

```

```

end
#ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL DO ATRIBUTO, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO
for x := A to B do
Ar_media(x)=integral(y:=0:Raio_int_tubo1;Vz(x,y)*Ar(x,y)*2*y)/
(Vb1*Raio_int_tubo1^2);
end #FOR
#VALOR S
for x := A to B do
10^(Svalue(x)/10)=10^((LOG10(1/(Ar_media(x))))/10);
end
#-----EQUAÇÕES PARA O TUBO INTERNO-----
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
#y=]Raio_int_1:Raio_ext_1[, Raio_int_1 e Raio_ext_1 são C.C
# x=]A:B[, A e B são C.C
for y :=Raio_int_tubo1|+ to Raio_ext_tubo1|- do
for x := A|+ to B|- do
((partial(y*K_tubo*partial(T_tubo_1(x,y),Radialtubo1),Radialtubo1))+
y*(partial(K_tubo*partial(T_tubo_1(x,y),Axial),Axial))) =0;
end
end
#-----EQUAÇÕES PARA O FLUIDO ESCOANDO NA REGIÃO ANULAR-----
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# z=]B:A[ , A e B são C.C
for x := A|+ to B|- do
Rho_FU*Cp_FU*Vb2*partial(T2(x),Axial2) = +
partial(Kef_FU*partial(T2(x),Axial2),Axial2) + Q2_tubo1(x);
end
#TAXA DE CALOR, POR VOL. DE FLUIDO UTILIDADE, TROCADO PELO FLUIDO
UTILIDADE
for x := A to B do
Q2_tubo1(x) = h2(2*Raio_ext_tubo1/(Raio_int_tubo2^2-
(Raio_ext_tubo1)^2))*(T_tubo_1(x,Raio_ext_tubo1)-T2(x));
end
#-----PACOTE DE PROPRIEDADES-----
#MANGA
for x := A to B do
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP(x)= -0.3*T1_media(x)+1182.4;
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP(x)=(0.0042*T1_media(x)+2.2328)*1000;
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP(x)= 5*(0.2208*exp(0.0027*T1_media(x)));
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n(x)= -0.0013*T1_media(x)+0.7538;
end
#FLUIDO UTILIDADE
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FU=(1001.4 - 3.5e-1*(T2_in-273.15) + 1.15e-3*((T2_in-273.15)^2) -
2.77e-5*((T2_in-273.15)^3) + 1001.4 -
3.5e-1*(T2_in-273.15) + 1.15e-3*((T2_in-273.15)^2) - 2.77e-5*((T2_in-
273.15)^3))/2;
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FU=(5.2019e-7*(T2_in-273.15)^4 - 2.1528e-4*(T2_in-273.15)^3 +
4.1758e-2*(T2_in-273.15)^2 - 2.6171*
(T2_in-273.15) + 4227.1 + 5.2019e-7*(T2_in-273.15)^4 - 2.1528e-4*(T2_in-

```

```

273.15)^3 + 4.1758e-2*(T2_in-
273.15)^2 - 2.6171*(T2_in-273.15) + 4227.1)/2;
#CONDUTIVIDADE TERMICA
Kef_FU=0.56890554 + (T2_in-273.15)/534.3636 - (T2_in-273.15)^2/133333;

```

MODEL: Micro-ondas (gPROMS_Microondas_manga)

```

#=====
PARAMETER
#=====
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb AS REAL
#TEMPERATURA DE ENTRADA DO MICRO-ONDAS
Tin_mo AS REAL
#TEMPERATURA DE SAÍDA DO MICRO-ONDAS
Tout_mo AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DA SEÇÃO
Ar_in AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL NA ENTRADA DO PASTEURIZADOR
Ar_inaq AS REAL
#---PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)----
#DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (m²/s)
Prop_FP_Dif_Mass AS REAL
#-----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO TUBO 1-----
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo AS REAL
#-----PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO-----
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (K)
Tref AS REAL
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (s)
D_red_dec_ref AS REAL
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA (K)
z_red AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO-----
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol AS REAL
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1 AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO TROCADOR-----
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L AS REAL
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubol AS REAL
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubol AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR-----
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A AS REAL
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B AS REAL
#=====
DISTRIBUTION_DOMAIN
#=====
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO AXIAL DA SEÇÃO EM ESTUDO---
#RETENCAO

```

```

#A=COMPR. SEÇÃO AQUEC.
#B=COMPR. SEÇÃO AQUEC. + COMPR. SEÇÃO RETENÇÃO
Axial      AS [A:B]
#----DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DO FLUIDO PRODUTO---
Radial1    AS [0:Raio_int_tubo1]
#DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DA PAREDE DO TUBO INTERNO
Radialtubo1 AS [Raio_int_tubo1:Raio_ext_tubo1]
#=====
#                               VARIABLE
#=====
#-----FLUÍDO PRODUTO-----
#TEMPERATURA DO FLUIDO (T1=f(z,r))
T1         AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF Temperatura
#TEMPERATURA MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
T1_media   AS DISTRIBUTION (Axial) OF Temperatura
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO (Vz=f(r))
Vz         AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF Velocidade
#Atividade residual (Ar=f(z,r))
Ar         AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) of AtividadeRes
#ATIVIDADE RESIDUAL MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
Ar_media   AS DISTRIBUTION (Axial) OF ATIVIDADERES
#VALOR S
Svalue     AS DISTRIBUTION (Axial) OF Svalue
#PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS e REOLOGICAS
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP     AS DISTRIBUTION (Axial) OF MassaEspecificica
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP      AS DISTRIBUTION (Axial) OF CalorEspecifico
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP     AS DISTRIBUTION (Axial) OF CondTermica
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n      AS DISTRIBUTION (Axial) OF n_reo
#-----PAREDE DO TUBO INTERNO-----
#TEMPERATURA DO PAREDE (Ttubo1=f(z,r))
T_tubo_1   AS DISTRIBUTION (Axial,Radialtubo1)OF Temperatura
#=====
#                               EQUATION
#=====
#           x = direção Axial           y = direção radial
#-----EQUAÇÕES PARA O FLUIDO PRODUTO-----
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO NÃO-NEWTONIANO (Lei de Potência)
for y := 0 to Raio_int_tubo1 do
  for x := A to B do
    Vz(x,y) = Vb1*((3*Exp_n(x)+1)/(Exp_n(x)+1))*
(1 - (y/Raio_int_tubo1)^((Exp_n(x)+1)/Exp_n(x)));
  end
end
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# z=]A:B] , A é C.C
for y :=0|+ to Raio_int_tubo1|- do
for x := A|+ to B do
  T1(x,y)=((Tout_mo-Tin_mo)/0.3708)*x+Tin_mo;
end
end
#TEMPERATURA E ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO

```

```

for x := A to B do
T1_media(x)=integral(y:=0:Raio_int_tubo1;Vz(x,y)*T1(x,y)*2*y)/
(Vb1*(Raio_int_tubo1^2));
end #FOR
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
#Domínios:
# y=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# x=]A:B] , A é C.C
for y := 0|+ to Raio_int_tubo1|- do
for x := A|+ to B do
((y*Vz(x,y)*partial(Ar(x,y),Axial)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))-
(Prop_FP_Dif_Mass*partial(y*partial(Ar(x,y),Radial1),Radial1))*(1/(Ar_media
(A)*1e2))+ (y*LOG(10)*(Ar(x,y))/((D_red_dec_ref)*10^((Tref
T1(x,y))/z_red)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0;
end
end
#ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL DO ATRIBUTO, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO
for x := A to B do
Ar_media(x)=integral(y:=0:Raio_int_tubo1;Vz(x,y)*C(x,y)*2*y)/
(Vb1*Raio_int_tubo1^2);
end #FOR
#VALOR S
for x := A to B do
#Svalue(x)=log10(Cin/C_media(x));
10^(Svalue(x)/10)=10^((LOG10(1/(A_media(x))))/10);
end
#-----EQUAÇÕES PARA O TUBO INTERNO-----
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]Raio_int_1:Raio_ext_1[ , Raio_int_1 e Raio_ext_1 são C.C
# z=]A:B[, A e B são C.C
for y :=Raio_int_tubo1|+ to Raio_ext_tubo1|- do
for x := A|+ to B|- do
K_tubo*((partial(y*partial(T_tubo_1(x,y),Radialtubo1),Radialtubo1))+y*(part
ial(partial(T_tubo_1(x,y),Axial),Axial))) = 0;
end
end
#-----PACOTE DE PROPRIEDADES-----
#MANGA 20 brix
for x := A to B do
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP(x)= -0.3*T1_media(x)+1182.4;
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP(x)=(0.0042*T1_media(x)+2.2328)*1000;
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP(x)= (0.2208*exp(0.0027*T1_media(x)));
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n(x)=-0.0013*T1_media(x)+0.7538;
end

```

MODEL: Conexão (gPROMS_Microondas_manga)

```

#=====
PARAMETER
#=====
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb AS REAL

```

```

#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO ATRIBUTO      (mol/m³)
  Ar_in      AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO ATRIBUTO NO AQ
Ar_inaq     AS REAL
#----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)---
#  #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA      (m²/s)
  Prop_FP_Dif_Mass  AS REAL
#-----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO TUBO 1-----
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
  K_tubo      AS REAL
#-----PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO-----
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA      (K)
  Tref      AS REAL
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA  (s)
  D_red_dec_ref  AS REAL
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA      (K)
  z_red      AS REAL
#----CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO-----
#VAZAO VOLUMÉTRICA
  Vazaol     AS REAL
#VELOCIDADE MÉDIA
  Vb1       AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO TROCADOR-----
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
  L         AS REAL
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
  Raio_int_tubo1  AS REAL
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
  Raio_ext_tubo1  AS REAL
#-----CARACTERÍSTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR-----
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
  #INFERIOR (Início da seção em estudo)
  A         AS REAL
  #SUPERIOR (Final da seção em estudo)
  B         AS REAL
#=====
#                               DISTRIBUTION_DOMAIN
#=====
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO AXIAL DA SEÇÃO EM ESTUDO---
#Conexao
  Axial     AS [A:B]
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DO FLUIDO PRODUTO---
  Radial1  AS [0:Raio_int_tubo1]
#DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DA PAREDE DO TUBO INTERNO
  Radialtubo1 AS [Raio_int_tubo1:Raio_ext_tubo1]
#=====
#                               VARIABLE
#=====
#-----FLUÍDO PRODUTO-----
#TEMPERATURA DO FLUIDO (T1=f(z,r))
  T1      AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1)  OF Temperatura
#TEMPERATURA MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
  T1_media AS DISTRIBUTION (Axial)        OF Temperatura
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO (Vz=f(r))
  Vz      AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1)  OF Velocidade
#ATIVIDADE RESIDUAL DO ATRIBUTO NO PRODUTO (Ar=f(z,r))
  Ar      AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1)  OF AtividadeRes
#ATIVIDADE RESIDUAL MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE,

```

```

Ar_media AS DISTRIBUTION (Axial)          OF AtividadeRes
#VALOR S
Svalue          AS DISTRIBUTION (Axial)          OF Svalue
#PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS e REOLOGICAS
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP AS DISTRIBUTION (Axial)          OF MassaEspecifica
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP AS DISTRIBUTION (Axial)          OF CalorEspecifico
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP AS DISTRIBUTION (Axial)          OF CondTermica
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n AS DISTRIBUTION (Axial)          OF n_reo
#-----PAREDE DO TUBO INTERNO-----
#TEMPERATURA DO PAREDE (Ttubo1=f(z,r))
T_tubo_1 AS DISTRIBUTION (Axial,Radialtubo1)OF Temperatura
#=====
EQUATION
#=====
# x = direção Axial y = direção radial
#-----EQUAÇÕES PARA O FLUIDO PRODUTO-----
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO
#NAO-NEWTONIANO (Lei de Potência)
for y := 0 to Raio_int_tubo1 do
for x := A to B do
Vz(x,y) = Vb1*((3*Exp_n(x) + 1)/(Exp_n(x) + 1)) *
(1 - (y/Raio_int_tubo1)^((Exp_n(x)+1)/Exp_n(x)));
end
end
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# z=]A:B] , A é C.C
for y :=0|+ to Raio_int_tubo1|- do
for x := A|+ to B do
y*Rho_FP(x)*Cp_FP(x)*Vz(x,y)*partial(T1(x,y),Axial)=+
Kef_FP(x)*partial(y*partial(T1(x,y),Radial1),Radial1);
end
end
#TEMPERATURA E ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO
for x := A to B do
T1_media(x) = integral(y:=0:Raio_int_tubo1;Vz(x,y)*T1(x,y)*2*y)/
(Vb1*(Raio_int_tubo1^2));
end #FOR
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
#Domínios:
# y=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# x=]A:B] , A é C.C
for y := 0|+ to Raio_int_tubo1|- do
for x := A|+ to B do
((y*Vz(x,y)*partial(Ar(x,y),Axial)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))-
(Prop_FP_Dif_Mass*partial(y*partial(Ar(x,y),Radial1),Radial1))*(1/(Ar_media
(A)*1e2)))+(y*LOG(10)*(Ar(x,y))/((D_red_dec_ref)*10^((Tref-
T1(x,y))/z_red)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0;
end
end
#ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL DO ATRIBUTO, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO

```

```

    for x := A to B do
Ar_media(x)=integral(y:=0:Raio_int_tubo1;Vz(x,y)*Ar(x,y)*2*y)/
(Vb1*Raio_int_tubo1^2);
    end #FOR
#VALOR S
    for x := A to B do
        10^(Svalue(x)/10)=10^((LOG10(1/(Ar_media(x))))/10);
    end
#-----EQUAÇÕES PARA O TUBO INTERNO-----
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]Raio_int_1:Raio_ext_1[ , Raio_int_1 e Raio_ext_1 são C.C
# z=]A:B[ , A e B são C.C
for y :=Raio_int_tubo1|+ to Raio_ext_tubo1|- do
    for x := A|+ to B|- do

K_tubo*((partial(y*partial(T_tubo_1(x,y),Radialtubo1),Radialtubo1))+
y*(partial(partial(T_tubo_1(x,y),Axial),Axial))) = 0;
        end
    end
#-----PACOTE DE PROPRIEDADES-----
#MANGA 20 brix
for x := A to B do
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP(x)= -0.3*T1_media(x)+1182.4;

#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP(x)=(0.0042*T1_media(x)+2.2328)*1000;

#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP(x)= (0.2208*exp(0.0027*T1_media(x)));

#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n(x)=-0.0013*T1_media(x)+0.7538;
End

```

MODEL: Retenção (gPROMS_Microondas_manga)

```

#=====
PARAMETER
#=====
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO ATRIBUTO (mol/m³)
Ar_in AS REAL
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO ATRIBUTO NO AQ
Ar_inaq AS REAL
#----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)----
# #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA (m²/s)
Prop_FP_Dif_Mass AS REAL
#-----PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO TUBO 1-----
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo AS REAL
#-----PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO-----
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (K)
Tref AS REAL
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA (s)
D_red_dec_ref AS REAL

```

```

#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA (K)
z_red AS REAL
#-----CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO-----
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol AS REAL
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1 AS REAL
#-----CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR-----
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L AS REAL
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1 AS REAL
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1 AS REAL
#-----CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR-----
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A AS REAL
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B AS REAL
#=====
DISTRIBUTION_DOMAIN
#=====
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO AXIAL DA SEÇÃO EM ESTUDO---
#RETENCAO
Axial AS [A:B]
#---DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DO FLUIDO PRODUTO---
Radial1 AS [0:Raio_int_tubo1]
#DOMÍNIO DIMENSIONAL NA DIREÇÃO RADIAL DA PAREDE DO TUBO INTERNO
Radialtubo1 AS [Raio_int_tubo1:Raio_ext_tubo1]
#=====
VARIABLE
#=====
#-----FLUÍDO PRODUTO-----
#TEMPERATURA DO FLUIDO (T1=f(z,r))
T1 AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF Temperatura
#TEMPERATURA MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE, DO FLUIDO
T1_media AS DISTRIBUTION (Axial) OF Temperatura
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO (Vz=f(r))
Vz AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF Velocidade
#ATIVIDADE RESIDUAL DO ATRIBUTO NO PRODUTO (Ar=f(z,r))
Ar AS DISTRIBUTION (Axial,Radial1) OF AtividadeRes
#ATIVIDADE RESIDUAL MÉDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE
Ar_media AS DISTRIBUTION (Axial) OF AtividadeRes
#VALOR S
Svalue AS DISTRIBUTION (Axial) OF Svalue
#PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS e REOLOGICAS
#MASSA ESPECÍFICA
Rho_FP AS DISTRIBUTION (Axial) OF MassaEspecificica
#CALOR ESPECÍFICO
Cp_FP AS DISTRIBUTION (Axial) OF CalorEspecificico
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
Kef_FP AS DISTRIBUTION (Axial) OF CondTermica
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
Exp_n AS DISTRIBUTION (Axial) OF n_reo
#-----PAREDE DO TUBO INTERNO-----
#TEMPERATURA DO PAREDE (Ttubo1=f(z,r))
T_tubo_1 AS DISTRIBUTION (Axial,Radialtubo1) OF Temperatura

```

```

#=====
#                               EQUATION
#=====
#           x = direção Axial           y = direção radial
#-----EQUAÇÕES PARA O FLUIDO PRODUTO-----
#VELOCIDADE AXIAL DO FLUIDO
#NAO-NEWTONIANO (Lei de Potência)
for y := 0 to Raio_int_tubol do
for x := A to B do
Vz(x,y) = Vb1*((3*Exp_n(x) + 1)/(Exp_n(x) + 1)) *
(1 - (y/Raio_int_tubol)^((Exp_n(x)+1)/Exp_n(x)));
end
end
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# z=]A:B[ , A é C.C
for y :=0|+ to Raio_int_tubol|- do
for x := A|+ to B do
y*Rho_FP(x)*Cp_FP(x)*Vz(x,y)*partial(T1(x,y),Axial) = +
Kef_FP(x)*partial(y*partial(T1(x,y),Radial1),Radial1);
end
end
#TEMPERATURA E ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO
for x := A to B do
T1_media(x) = integral(y:=0:Raio_int_tubol;Vz(x,y)*T1(x,y)*2*y)/
(Vb1*(Raio_int_tubol^2));
end #FOR
#BALANÇO MOLAR DO ATRIBUTO
#Domínios:
# y=]0:Raio_int_1[ , 0 e Raio_int_1 são C.C
# x=]A:B[ , A é C.C
for y := 0|+ to Raio_int_tubol|- do
for x := A|+ to B do
((y*Vz(x,y)*partial(Ar(x,y),Axial)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))-
(Prop_FP_Dif_Mass*partial(y*partial(Ar(x,y),Radial1),Radial1))*(1/(Ar_media
(A)*1e2))+ (y*LOG(10)*(Ar(x,y))/((D_red_dec_ref)*10^((Tref -
T1(x,y))/z_red)))*(1/(Ar_media(A)*1e2))=0;
end
end
#ATIVIDADE RESIDUAL MEDIA RADIAL DO ATRIBUTO, PONDERADA NA VELOCIDADE,
DO FLUIDO
for x := A to B do
Ar_media(x)=integral(y:=0:Raio_int_tubol;Vz(x,y)*Ar(x,y)*2*y)/
(Vb1*Raio_int_tubol^2);
end #FOR
#VALOR S
for x := A to B do
10^(Svalue(x)/10)=10^((LOG10(1/(Ar_media(x))))/10);
end
#-----EQUAÇÕES PARA O TUBO INTERNO-----
#BALANÇO DE ENERGIA
#Domínios:
# r=]Raio_int_1:Raio_ext_1[ , Raio_int_1 e Raio_ext_1 são C.C
# z=]A:B[ , A e B são C.C
for y :=Raio_int_tubol|+ to Raio_ext_tubol|- do
for x := A|+ to B|- do

```

```
K_tubo*((partial(y*partial(T_tubo_1(x,y),Radialtubo1),Radialtubo1))+y*(partial(partial(T_tubo_1(x,y),Axial),Axial))) = 0;
end
```

```
end
```

```
#-----PACOTE DE PROPRIEDADES-----
```

```
#MANGA 20 brix
```

```
for x := A to B do
```

```
#MASSA ESPECÍFICA
```

```
Rho_FP(x) = -0.3*T1_media(x)+1182.4;
```

```
#CALOR ESPECÍFICO
```

```
Cp_FP(x) = (0.0042*T1_media(x)+2.2328)*1000;
```

```
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
```

```
Kef_FP(x) = (0.2208*exp(0.0027*T1_media(x)));
```

```
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
```

```
Exp_n(x) = -0.0013*T1_media(x)+0.7538;
```

```
End
```

```
PROCESS: Simul (gPROMS_Microondas_manga)
```

```
#=====
```

```
UNIT
```

```
#=====
```

```
past as Pasteurizador
```

```
#=====
```

```
SET
```

```
#=====
```

```
#-----VALORES DOS PARAMETROS GERAIS DO PASTEURIZADOR-----
```

```
within past do
```

```
#TEMPERATURA DE ENTRADA DO FLUIDO PRODUTO
```

```
T1_in {K} := 273.15+20;
```

```
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
```

```
T_amb := 273.15+25;
```

```
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO COMPONENTE 'a'
```

```
Ar_in := 100;
```

```
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO COMPONENTE 'a'
```

```
Ar_inaq := 100;
```

```
#COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA
```

```
Uamb := 16;
```

```
#COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA MICRO-ONDAS
```

```
Uamb2 := 30;
```

```
end #WITHIN
```

```
#--VALORES DOS PARAMETROS DA SECAO DE AQUEC. DO PASTEURIZADOR--
```

```
within past.aq do
```

```
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
```

```
T_amb := past.T_amb;
```

```
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO COMPONENTE 'a'
```

```
Ar_in := past.Ar_in;
```

```
#TEMPERATURA DE ENTRADA DO FLUIDO UTILIDADE NA SEÇÃO DE AQUECIMENTO
```

```
T2_in {K} := 273.15+25;
```

```
#-->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)
```

```
#DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
```

```
Prop_FP_Dif_Mass := 10^(-5);{0.0000000503}
```

```
#-->PARAMETROS DE REOLOGIA
```

```
#ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
```

```
#Exp_n := 0.30;
```

```
#-->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
```

```
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
```

```
Tref := 273.15+77.2;
```

```

#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
D_red_dec_ref      := 4.4; {S}
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA (Variação de temperatura
necessária para promover uma redução de 10 vezes no valor de D)
Z_red              := 14.3;
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo             := 16;
#--->CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazao1{m3/s}       := 1.2 {L/min}/60000{(m3/s)/(L/m)};
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1{m/s}           := Vazao1/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#--->CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO UTILIDADE
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazao2{m3/s}       := 17.5{L/min}/60000{(m3/s)/(L/min)};
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb2{m/s} := -Vazao2/(past.PI*(Raio_int_tubo2^2-Raio_ext_tubo1^2));
#--->CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L{m}               := 9.27;
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m}  := 3.88e-3;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m} := 4.76e-3;
#RAIO INTERNO DO TUBO EXTERNO
Raio_int_tubo2     := 7.78e-2;
#--->CARACTERÍSTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#COEFICIENTE CONVECTIVO DO FLUIDO UTILIDADE
h2                 := 2000;
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A                  := 0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B                  := L;
#--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMÍNIOS
Axial              := [BFDM,1, 100];
Axial2             := [FFDM,1, 100];
Radial1            := [CFDM,2, 30];
Radialtubo1       := [CFDM,2, 5];
end #WITHIN
#VALORES DOS PARAMETROS DA CONEXAO AQ2 DO PASTEURIZADOR-----
within past.aq2 do
  # TEMPERATURA DO AMBIENTE
  T_amb             := past.T_amb;
  #ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA
  Ar_in             := past.Ar_in;
  #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
  Prop_FP_Dif_Mass:=past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#--->PARAMETROS DE REOLOGIA
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo             := past.aq.K_tubo;
#--->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
Tref               := past.aq.Tref;
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

```

```

D_red_dec_ref      := past.aq.D_red_dec_ref;
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA
Z_red              := past.aq.Z_red;
#--->CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol{m3/s}       := past.aq.Vazaol;
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1{m/s}           := Vazaol/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#--->CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L {m}              := 0.45;
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m}  := past.aq.Raio_int_tubo1;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m}  := past.aq.Raio_ext_tubo1;
#--->CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A                  :=0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B                  :=L;
#--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMINIOS
Axial              := past.aq.Axial;
Radial1            := past.aq.Radial1;
Radialtubo1       := past.aq.Radialtubo1;
end #WITHIN
#-----VALORES DOS PARAMETROS DA SECAO DE MICRO-ONDAS-----
within past.mo do
#TEMPERATURA DE ENTRADA DO MICRO-ONDAS
Tin_mo             :=273.15+25;
#TEMPERATURA DE SAÍDA DO MICRO-ONDAS
Tout_mo            :=273.15+ 90;
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb              := past.T_amb;
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO COMPONENTE 'a'
Ar_in              := past.Ar_in;
#DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
Prop_FP_Dif_Mass   := past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#--->PARAMETROS DE REOLOGIA
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO TUBO 1 E 2
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo             := past.aq.K_tubo;
#--->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
Tref               := past.aq.Tref;
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
D_red_dec_ref      := past.aq.D_red_dec_ref;
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA
Z_red              := past.aq.Z_red;
#--->CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol{m3/s}       := past.aq.Vazaol;
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1{m/s}           := Vazaol/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#--->CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L {m}              := 0.3708;

```

```

#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m}      := 3.30e-3;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m}     := 100e-3;
#--->CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A                      :=0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B                      :=L;
#--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMINIOS
Axial                  := past.aq.Axial;
Radial1                := past.aq.Radial1;
Radialtubo1           := past.aq.Radialtubo1;
end #WITHIN
#VALORES DOS PARAMETROS DA CONEXAO MO2 DO PASTEURIZADOR-----
within past.mo2 do
# TEMPERATURA DO AMBIENTE
T_amb                  := past.T_amb;
#ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA
Ar_in                  := past.Ar_in;
#DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
Prop_FP_Dif_Mass:=past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#--->PARAMETROS DE REOLOGIA
#--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo                 := past.aq.K_tubo;
#--->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
Tref                   := past.aq.Tref;
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
D_red_dec_ref         := past.aq.D_red_dec_ref;
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUÇÃO TÉRMICA
Z_red                  := past.aq.Z_red;
#--->CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol{m3/s}           := past.aq.Vazaol;
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1{m/s}              := Vazaol/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#--->CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L {m}                  := 0.3708;
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m}     := past.aq.Raio_int_tubo1;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m}     := past.aq.Raio_ext_tubo1;
#--->CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A                      :=0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B                      :=L;
#--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMINIOS
Axial                  := past.aq.Axial;
Radial1                := past.aq.Radial1;
Radialtubo1           := past.aq.Radialtubo1;
end #WITHIN

```

```

#---VALORES DOS PARAMETROS DA SECAO DE RET DO PASTEURIZADOR----
  within past.ret do
    # TEMPERATURA DO AMBIENTE
    T_amb := past.T_amb;
    #ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA DO COMPONENTE 'a'
    Ar_in := past.Ar_in;
    #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
    Prop_FP_Dif_Mass := past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
    #--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#--->PARAMETROS DE REOLOGIA
    #--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO
    #CONDUTIVIDADE TÉRMICA
    K_tubo := past.aq.K_tubo;
    #--->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
    #TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
    Tref := past.aq.Tref;
    #TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
    D_red_dec_ref := past.aq.D_red_dec_ref;
    #CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA
    Z_red := past.aq.Z_red;
    #--->CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
    #VAZAO VOLUMÉTRICA
    Vazaol{m3/s} := past.aq.Vazaol;
    #VELOCIDADE MÉDIA
    Vb1{m/s} := Vazaol/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
    #--->CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
    #COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
    L := 3.12;
    #RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
    Raio_int_tubo1{m} := past.mo.Raio_int_tubo1;
    #RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
    Raio_ext_tubo1{m} := past.mo.Raio_ext_tubo1;
    #--->CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
    #DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
    #INFERIOR (Início da seção em estudo)
    A := 0;
    #SUPERIOR (Final da seção em estudo)
    B := L;
    #--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMINIOS
    Axial := past.aq.Axial;
    Radial1 := past.aq.Radial1;
    Radialtubo1 := past.aq.Radialtubo1;
  end #WITHIN
#VALORES DOS PARAMETROS DA SECAO DE AQ2 DO PASTEURIZADOR-----
  within past.ret2 do
    # TEMPERATURA DO AMBIENTE
    T_amb := past.T_amb;
    #ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA
    Ar_in := past.Ar_in;
    #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
    Prop_FP_Dif_Mass := past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
    #--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#--->PARAMETROS DE REOLOGIA
    #--->PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL DO TUBO
    #CONDUTIVIDADE TÉRMICA
    K_tubo := past.aq.K_tubo;
    #--->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
    #TEMPERATURA DE REFERÊNCIA

```

```

Tref                := past.aq.Tref;
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
D_red_dec_ref      := past.aq.D_red_dec_ref;
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA (Variação de temperatura
necessária para promover uma redução de 10 vezes no valor de D)
Z_red              := past.aq.Z_red;
#-->CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol{m3/s}       := past.aq.Vazaol;
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb1{m/s}           := Vazaol/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#-->CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L {m}              := 0.71;
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m} := past.aq.Raio_int_tubo1;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m} := past.aq.Raio_ext_tubo1;
#-->CARACTERÍSTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A                  :=0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B                  :=L;
#-->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMÍNIOS
Axial              := past.aq.Axial;
Radial1           := past.aq.Radial1;
Radialtubo1      := past.aq.Radialtubo1;
end #WITHIN
#---VALORES DOS PARAMETROS DA SECAO DE RESF. DO PASTEURIZADOR--
within past.resf do
  # TEMPERATURA DO AMBIENTE
  T_amb            := past.T_amb;
  #ATIVIDADE RESIDUAL DE ENTRADA
  Ar_in           := past.Ar_in;
  #TEMPERATURA DE ENTRADA DO FLUIDO UTILIDADE
  T2_in {K}       := 273.15+5;
  #-->PRÓPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO ALIMENTO (FLUIDO PRODUTO)
  #DIFUSIVIDADE MÁSSICA EFETIVA
  Prop_FP_Dif_Mass := past.aq.Prop_FP_Dif_Mass;
  #-->PRÓPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DA ÁGUA (FLUIDO UTILIDADE)
#-->PARAMETROS DE REOLOGIA
  #ÍNDICE DE COMPORTAMENTO
  #Exp_n           := 0.30;
#-->PARAMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO
#TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
Tref              := past.aq.Tref;
#TEMPO DE REDUÇÃO DECIMAL NA TEMPERATURA DE REFERÊNCIA
D_red_dec_ref     := past.aq.D_red_dec_ref; {S}
#CONSTANTE DE TEMPO DE DESTRUIÇÃO TÉRMICA
Z_red             := past.aq.Z_red;
#-->PRÓPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DO MATERIAL TUBO
#CONDUTIVIDADE TÉRMICA
K_tubo            := past.aq.K_tubo;
#-->CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO PRODUTO
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazaol{m3/s}      := past.aq.Vazaol;
#VELOCIDADE MÉDIA

```

```

Vb1{m/s}      := Vazao1/(past.PI*Raio_int_tubo1^2);
#--->CARACTERISTICAS DO ESCOAMENTO DO FLUIDO UTILIDADE
#VAZAO VOLUMÉTRICA
Vazao2{m3/s} := 17.5{L/min}/60000{(m3/s)/(L/min)};
#VELOCIDADE MÉDIA
Vb2{m/s}:= -Vazao2/(past.PI*(Raio_int_tubo2^2-Raio_ext_tubo1^2));
#--->CARACTERISTICAS FÍSICAS DO TROCADOR
#COMPRIMENTO DA SEÇÃO EM ESTUDO
L{m}          := 9.90;
#RAIO INTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_int_tubo1{m} := past.aq.Raio_int_tubo1;
#RAIO EXTERNO DO TUBO INTERNO
Raio_ext_tubo1{m} := past.aq.Raio_ext_tubo1;
#RAIO INTERNO DO TUBO EXTERNO
Raio_int_tubo2 := 7.78e-2;
#--->CARACTERISTICAS TERMICAS DO TROCADOR DE CALOR
#COEFICIENTE CONVECTIVO DO FLUIDO UTILIDADE
h2           := 1272;
#DOMÍNIOS DIMENSIONAIS
#INFERIOR (Início da seção em estudo)
A            :=0;
#SUPERIOR (Final da seção em estudo)
B           :=L;
#--->METODOS UTILIZADOS PARA DISCRETIZAR OS DOMINIOS
Axial       := past.aq.Axial;
Axial2      := past.aq.Axial2;
Radial1     := past.aq.Radial1;
Radialtubo1 := past.aq.Radialtubo1;
end #WITHIN

#=====
#                               INITIAL
#=====
#                               STEADY_STATE
#=====

SOLUTIONPARAMETERS
  DASolver := "DASOLV" [
    "InitialisationNLSolver" := "BDNLSOL" [
      "BlockSolver" := "SPARSE" [
        "LASolver" := "MA28",
        "ConvergenceTolerance" := 0.0001
      ],
      "LASolver" := "MA28"
    ]
  ]
]

```