

Anderson Cesar Dutra

**MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO  
NUMÉRICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE POLPA DE  
TOMATE EM TROCADOR DE CALOR COM MICRO-ONDAS**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

Coorientador: Prof. Dr. Jhony Tiago Teleken

Florianópolis/SC  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Dutra, Anderson Cesar  
MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO  
TRATAMENTO TÉRMICO DE POLPA DE TOMATE EM TROCADOR DE  
CALOR COM MICRO-ONDAS / Anderson Cesar Dutra ;  
orientador, Bruno Augusto Mattar Carciofi,  
coorientador, Jhony Tiago Teleken, 2019.  
83 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Alimentos, Florianópolis,  
2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Alimentos. 2. Microondas. 3.  
Inativação Térmica. 4. Bacillus Coagulans. 5. Polpa  
de Tomate. I. Carciofi, Bruno Augusto Mattar. II.  
Teleken, Jhony Tiago . III. Universidade Federal de  
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Alimentos. IV. Título.

# “MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE POLPA DE TOMATE EM AQUECEDOR COM MICRO-ONDAS”

Por

**Anderson Cesar Dutra**

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Alimentos**, área de Concentração de **Desenvolvimento de Processos da Indústria de Alimentos**, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina.



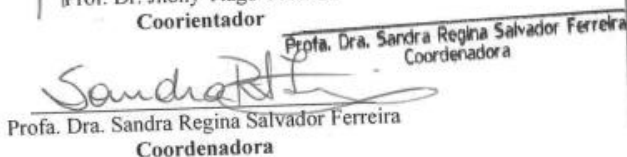
Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

**Orientador**



Prof. Dr. Jhony Tiago Teixeira

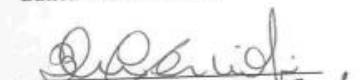
**Coorientador**

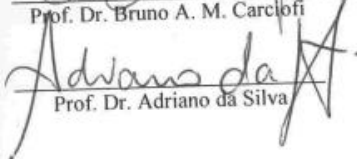


Profa. Dra. Sandra Regina Salvador Ferreira

**Coordenadora**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Bruno A. M. Carciofi

  
Prof. Dr. Adriano da Silva

  
Prof. Dr. Jorge A. W. Gut  
(videoconferência)

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos

Florianópolis, 15 de outubro de 2018.

  
Profa. Dra. Sandra Regina Salvador Ferreira



## AGRADECIMENTOS

A Deus pela dádiva da vida e pela oportunidade de poder ser cada dia melhor. Aos meus pais José Valter e Marlilene Dutra pelo amor, carinho, dedicação e educação ao longo desses 29 anos. Aos meus irmãos (Mônica, Rodrigo, André e Beatriz) meus primeiros amigos da vida, pela amizade e companheirismo. As minhas sobrinhas (Sophia e Samira) pelo amor, carinho e felicidade que trouxeram em minha vida. A toda minha família pelo amor, apoio e amizade, em especial minha amada vó (Albertina).

A minha parceira e amiga Laiz que Deus me presenteou, por todos os momentos que me ouviu e apoiou com todo amor e carinho. Aos meus irmãos de alma Martinho, Bruna, Izaura, Lucas e Sônia e todos irmãos da Organização Internacional Nova Acrópole sede Lagoa da Conceição, pela amizade na caminhada, conselhos, união e amor.

Aos meus amigos do EQA e em especial aqueles que tive oportunidade de compartilhar moradias, momentos e experiências valiosas (Everton, Victor, Klayson, Alex, Ramon, Igor, João, Otávio, Lucas e Barbara). Ao meu amigo Alexsandro por todos esses anos de convivência e aprendizado.

Aos meus amigos e companheiros de laboratório, pela convivência, apoio e amizade.

Aos meus orientadores Bruno Carciofi e Jhony Tiago Teleken por serem exemplos de profissionais. Obrigado pelo apoio, atenção, pelos ensinamentos e ideias que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho e da minha formação. Pela amizade, preocupação e oportunidades que vocês proporcionaram e continuam proporcionando.

À UFSC, ao PPGEAL e à CAPES pela oportunidade, pelo apoio e pela bolsa de estudos. Aos professores que fazem parte do corpo docente e que ajudaram a contribuir com a minha formação acadêmica e profissional. Ao Laboratório de Propriedades Físicas de Alimentos (PROFI), que ofereceu totais condições e suporte para realização deste trabalho.

À banca que se dispôs em avaliar e contribuir com este trabalho.



## RESUMO

O objetivo desse trabalho foi propor um modelo matemático e a solução numérica do tratamento térmico da polpa de tomate em um aquecedor micro-ondas, simulando a degradação do licopeno e a inativação de fungos termorresistentes durante o processo. A modelagem acoplou os fenômenos do eletromagnetismo, descrito pelas equações de Maxwell, da transferência de quantidade de movimento, descrita pela equação de Navier Stokes e pela equação da continuidade, e da transferência de calor, descrita pelo balanço de energia. A inativação térmica dos esporos de *B. coagulans* foi descrito pelo modelo de Weibull e a degradação do licopeno pela equação cinética de primeira ordem. Para a solução numérica nos domínios de cálculos (guia de onda, cavidade de aplicação e tubo de aquecimento), assumiu-se a polpa de tomate com propriedades termofísicas constantes e as propriedades dielétricas em função da temperatura. Ainda, foram avaliadas duas hipóteses: com e sem mudança de fase da água constituinte da polpa, o que resultou em maior demanda energia quando houve mudança de fase. O aproveitamento energético foi de 64%, 76,3% e 94,6% para tubos de aquecimento de 24, 31,8 e 39,6 mm de diâmetro, respectivamente. A diferença de temperatura entre os pontos mais frios e mais quentes no fluido variou em função da vazão, da potência e do diâmetro, além de ser dependente da presença da mudança de fase. No sistema com mudança de fase, para os os diâmetros de 24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm na temperatura média final de 95 °C, ao aumentar a vazão de fluido, o comprimento de homogeneização passou de 0,38 m para 0,45 m (21,62 % maior), de 0,58 m para 0,82 m (41,38 % maior) e de 0,74 m para 0,97 m (31,09 % maior) respectivamente. No sistema sem mudança de fase também ocorreu o aumento do comprimento de homogeneização em função do aumento da vazão. Houve aumento do comprimento do tubo de homogeneização com a concentração da solução, passando de 0,84 m (7 °Brix) para 1,56 m (29 °Brix). Na saída do tubo aquecedor, a variação da concentração de *B. coagulans* foi maior para o sistema com mudança de fase variando de 3 até -21,5 Log(UFC.mL<sup>-1</sup>), sendo de 3 até 2,29 Log(UFC.mL<sup>-1</sup>) sem mudança de fase. O comprimento do tubo de retenção para seis reduções decimais na concentração de esporos no geral foi maior para o sistema sem mudança de fase. A degradação do licopeno foi inferior a 2% em todos os processos, exceto para vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> no diâmetro de 39,6 mm e na temperatura de 95 °C para o sistema com mudança de fase (4,52%). O modelo proposto foi capaz reproduzir o tratamento térmico da polpa de tomate por micro-ondas, sendo validado por dados da literatura. A

homogeneização de fluidos viscosos, como o molho de tomate, pode ser alcançada utilizando tubos helicoidais. A ferramenta estudada mostrou-se capaz de avaliar a influência do diâmetro do tubo, da vazão e da potência aplicada na distribuição do campo elétrico, da energia dissipada e no perfil de temperatura da polpa de tomate, sendo efetiva para simular o tratamento térmico deste tipo de alimento.

**Palavras chave:** inativação térmica, *Bacillus coagulans*, fluxo contínuo



## ABSTRACT

The objective of this study was to develop a complete 3-D model based on iterative coupling of electromagnetism Maxwell's equation with heat and momentum transport equations (energy balance and Navier Stokes) of the continuous microwave heat treatment of tomato pulp and to perform a numerical simulation of this model evaluating a kinetics of thermal destruction of the *Bacillus coagulans* (Weibull model) and lycopene (first order Kinect equation). For the numerical solution in the domains of calculations (waveguide, application cavity and heating tube), the tomato pulp was assumed with constant thermophysical properties and dielectric properties as a function of temperature. Also, two hypotheses were evaluated: with and without phase change of the water constituent of the pulp, which resulted in a higher energy demand when there was a phase change. The vigorous utilization was 64%, 76.3% and 94.6% for heating tubes of 24, 31.8 and 39.6 mm in diameter, respectively. The temperature difference between the cooler and hotter points in the fluid varied according to the flow, power and diameter, besides being dependent on the presence of the phase change. In the system with phase change, for the diameters of 24 mm, 31.8 mm and 39.6 mm at the final average temperature of 95 ° C, as the fluid flow increased, the homogenization length increased from 0.38 m to 0.45 m (21.62 % higher), from 0.58 m to 0.82 m (41.38 % greater) and from 0.74 m to 0.97 m (31.09 % greater), respectively. In the system without phase change, also occurred the increase of the homogenization length due to the increase of the flow. There was an increase in the length of the homogenization tube with the solution concentration, from 0.84 m (7 ° Brix) to 1.56 m (29 ° Brix). At the outlet of the heater tube, the *B. coagulans* concentration variation was higher for the system with phase change ranging from 3 to -21.5 Log (UFC.mL<sup>-1</sup>), from 3 to 2.29 Log (CFU .mL<sup>-1</sup>) without phase change. The length of the retention tube for six decimal reductions in spore concentration was generally higher for the system without phase change. Lycopene degradation was less than 2% in all processes, except for flow of 0.1 L min<sup>-1</sup> in the diameter of 39.6 mm and at the temperature of 95 ° C for the system with phase change (4.52 %). The proposed model was able to reproduce the heat treatment of the tomato pulp by microwave, being validated by data from the literature. The homogenization of viscous fluids, such as tomato sauce, can be achieved using helical tubes. The studied tool was able to evaluate the influence of the tube diameter, the flow and the power applied in the

distribution of the electric field, the dissipated energy and the temperature profile of the tomato pulp, being effective to simulate the heat treatment of this type of food.

**Keywords:** thermal inactivation, *Bacillus coagulans*, continuous flow.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Esquema básico de um aquecedor de fluidos por micro-ondas. ....	30
<b>Figura 2</b> - Perfil de velocidade no interior do tubo para o escoamento laminar. ....	35
<b>Figura 3</b> - Curvas de inativação comumente observadas. Na Figura 1(A), temos: ( $\Delta$ ) linear; (x) linear com cauda; ( $\square$ ) sigmoidal; ( $\circ$ ) linear precedida de ombro. Na Figura 1(B), temos: ( $\Delta$ ) bifásica; (x) côncava; ( $\square$ ) bifásica com ombro; ( $\circ$ ) convexa. ....	37
<b>Figura 4</b> - Sistema de aquecimento estudado. ....	39
<b>Figura 5</b> - Tubo de retenção utilizado no estudo. ....	40
<b>Figura 6</b> - Malha numérica utilizada para a resolução do modelo: (a) guia de onda, cavidade e aplicador; (b) detalhe do refino de malha no aplicador; (c) tubo de retenção; ....	50
<b>Figura 7</b> - Perfil de temperatura na saída do tubo aplicador para o sistema com mudança de fase (1) e sem mudança de fase (2). ....	53
<b>Figura 8</b> - Distribuição espacial das densidades de potência dissipada ( $W m^{-3}$ ) na água previsto pelo modelo de Salvi (2008) e pelo modelo proposto no presente trabalho. ....	55
<b>Figura 9</b> - Comparação da resolução numérica do modelo de destruição térmica de Weibull previsto por Zimmermann (2012) e pelo modelo implementado no <i>software</i> COMSOL. ....	56
<b>Figura 10</b> - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $W m^{-3}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 1, no diâmetro de 31,8 mm, diferentes vazões volumétricas (0,1, 1 e 2 $L min^{-1}$ ) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do magnetron de 630, 6483 e 13227 W, respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade e os perfis axiais foram obtidos no centro do aplicador (Transversal a direção da onda eletromagnética). ....	57
<b>Figura 11</b> - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $W m^{-3}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 2, no diâmetro de 31,8 mm, diferentes vazões volumétricas (0,1, 1 e 2 $L min^{-1}$ ) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do aquecedor de 612, 6162 e 12309 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade e os perfis axiais foram obtidos no centro do aplicador (Transversal a direção da onda eletromagnética). ....	58
<b>Figura 12</b> - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $W m^{-3}$ ) na polpa de tomate para os Sistema 1 e 2, na vazão de 0,1 $L min^{-1}$ para diferentes	

diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do aquecedor de 732, 631 e 505 W para o sistema 1 e 733, 612 e 502 W para o sistema 2 respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.....59

**Figura 13** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para o Sistema 1, na vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup>, para diferentes diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do aquecedor de 732, 631 e 505 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.....60

**Figura 14** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para o Sistema 2, na vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup>, para diferentes diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do aquecedor de 733, 612 e 502 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.....61

**Figura 15** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para o Sistema 1, no diâmetro do aplicador de 24 mm, nas vazões de 0,1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup> e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de (a) de 95 °C (potência do aquecedor de 732, 7380 e 15073 W respectivamente) e (b) de 100 °C (potência do aquecedor de 1142, 11378 e 22383 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade. ....62

**Figura 16** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para o Sistema 2, no diâmetro do aplicador de 24 mm, nas vazões de 0,1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup> e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de (a) de 95 °C (potência do aquecedor de 733, 7342 e 14714 W respectivamente) e (b) de 100 °C (potência do aquecedor de 793, 7935 e 15897 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade. ....63

**Figura 17** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para os Sistemas 1 e 2, no diâmetro do aplicador de 39,6 mm, na vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de 95 °C, 97 °C e 100 °C (potência do aquecedor de 505, 521, e 744 W para o sistema 1 e 502, 515 e 537 W para o sistema 2 respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade. ....64

**Figura 18** - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 1, na vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup>, diâmetros de 24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm e nas condições de temperatura média de

saída do aplicador de 95, 97 e 100 °C, em função da potência gerada pelo magnetron.....	65
<b>Figura 19</b> - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 2, na vazão de 0,1 L min <sup>-1</sup> , diâmetros de 24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm e nas condições de temperatura média de saída do aplicador de 95, 97 e 100 °C, em função da potência gerada pelo magnetron.....	66
<b>Figura 20</b> - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 1, na condição de temperatura média de saída do aplicador de 95 °C e para as vazões de 0,1 L min <sup>-1</sup> , 1 L min <sup>-1</sup> e 2 L min <sup>-1</sup> em função do diâmetro do tubo. ....	67
<b>Figura 21</b> - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 2, na condição de temperatura média de saída do aplicador de 95 °C e para as vazões de 0,1 L min <sup>-1</sup> , 1 L min <sup>-1</sup> e 2 L min <sup>-1</sup> em função do diâmetro do tubo. ....	67
<b>Figura 22</b> - Perfis de temperatura ao longo do tubo de retenção em diferentes posições (1 perfil no centro geométrico do tubo e 4 perfis em diferentes posições da superfície do tubo). Tubo de retenção de 31,8 mm de diâmetro, vazão 2 L min <sup>-1</sup> , temperatura de projeto de 97 °C e (a) viscosidade para a polpa com 7 °Brix, (b) 23 °Brix e (c) 29 °Brix. ....	69
<b>Figura 23</b> - Perfis de concentração de células de micro-organismos (Log UFC mL <sup>-1</sup> ) para o sistema 1, no tubo aplicador na saída da cavidade e no ponto de homogeneização do tubo de retenção. (a) tubo com diâmetro de 24 mm, vazão 0,1 L min <sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C; (b) tubo com diâmetro de 31,8 mm, vazão de 0,1 L min <sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C. ....	71
<b>Figura 24</b> - Perfis de concentração de células de micro-organismos (Log UFC mL <sup>-1</sup> ) no sistema 2, no tubo aplicador na saída da cavidade e no ponto de homogeneização do tubo de retenção. (a) tubo com diâmetro de 24 mm, vazão 0,1 L min <sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C; (b) tubo com diâmetro de 31,8 mm, vazão de 0,1 L min <sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C. ....	72
<b>Figura 25</b> - Perfis de concentração de licopeno (µg g <sup>-1</sup> ), nos sistemas 1 e 2, no ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção, para dos diâmetros de tubo de (a) 24 mm e (b) 31,8 mm e (c) 39,6 mm, vazão de 0,1 L min <sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C. ....	75



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Composição Centesimal do Tomate.....	27
<b>Tabela 2</b> - Composição centesimal polpa de tomate. ....	46
<b>Tabela 3</b> - Propriedades termofísicas dos constituintes da polpa de tomate na temperatura de 60°C. ....	46
<b>Tabela 4</b> - Propriedades Físicas da polpa de tomate utilizada no modelo. ....	47
<b>Tabela 5</b> - Número de elementos e tempo médio gasto na simulação dos modelos, para todos os processos do sistema 1. ....	50
<b>Tabela 6</b> - Número de elementos e tempo médio gasto na simulação dos modelos, para todos os processos do sistema 2. ....	51
<b>Tabela 7</b> - Propriedades físicas das polpas de tomate em diferentes concentrações de sólidos solúveis. ....	68
<b>Tabela 8</b> - Comprimento de homogeneização, número de Reynolds e número de Dean para o sistema com vazão de 2 L min <sup>-1</sup> , diâmetro de tubo de 31,8 mm e temperatura de processo de 97 °C. ....	70
<b>Tabela 9</b> - Comprimento do tubo de retenção ( <i>L</i> ) para realizar seis reduções decimais na concentração de <i>B. Coagullans</i> para o sistema 1. ....	73
<b>Tabela 10</b> - Comprimento do tubo de retenção ( <i>L</i> ) para realizar seis reduções decimais na concentração de <i>B. Coagullans</i> para o sistema 2. ....	74
<b>Tabela 11</b> - Porcentagem de redução da concentração de licopeno (Li) após o tratamento térmico para atingir seis reduções decimais na concentração de <i>B. coagullans</i> , para o sistema 1. ....	76
<b>Tabela 12</b> - Porcentagem de redução da concentração de licopeno (Li) após o tratamento térmico para atingir seis reduções decimais na concentração de <i>B. coagullans</i> , para o sistema 2. ....	76
<b>Tabela 13</b> - Potência gerada entregue na cavidade para promover o aquecimento desejado da polpa de tomate no sistema 1. ....	77
<b>Tabela 14</b> - Potência gerada entregue na cavidade para promover o aquecimento desejado da polpa de tomate no sistema 2. ....	77





## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
<b>Eletromagnetismo</b>		
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico	[V m <sup>-1</sup> ]
$\vec{E}_s$	Vetor fasor campo elétrico	[V m <sup>-1</sup> ]
$\vec{E}_s^*$	Vetor fasor campo elétrico conjugado	[V m <sup>-1</sup> ]
$\vec{H}$	Vetor campo magnético	[A m <sup>-1</sup> ]
$\vec{H}_s$	Vetor fasor campo magnético	[A m <sup>-1</sup> ]
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente elétrica	[A m <sup>-2</sup> ]
$\vec{B}$	Vetor indução magnética	[T]
$\vec{D}$	Vetor indução elétrica	[H]
$\rho_m$	Densidade de carga	[C m <sup>3</sup> ]
$\mu_m$	Permeabilidade magnética	[H m <sup>-1</sup> ]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no espaço livre	[H m <sup>-1</sup> ]
$\epsilon$	Permissividade elétrica	[F m <sup>-1</sup> ]
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica no espaço livre	[F m <sup>-1</sup> ]
$\sigma_m$	Condutividade elétrica	[S m <sup>-1</sup> ]
$\mu_r$	Permeabilidade magnética complexa	[-]

$\epsilon_c$	Permissividade elétrica relativa complexa	[-]
$\epsilon'$	Constante dielétrica	[-]
$\epsilon''$	Constante de perda dielétrica	[-]
$\alpha$	Constante de atenuação da onda	[m <sup>-1</sup> ]
$\lambda$	Comprimento da onda	[m]
$\omega$	Frequência angular	[rad s <sup>-1</sup> ]
$f$	Frequência	[Hz]
$Q_{MW}$	Potência dissipada	[W m <sup>-3</sup> ]

### Fenômenos de transporte

$\rho$	Massa específica	[kg m <sup>-3</sup> ]
Re	Número de Reynolds	[-]
$\mu$	Viscosidade	[Pa s]
d	Diâmetro do tubo	[m]
Dean	Número de Dean	[-]
D	Diâmetro da curvatura da espiral	[m]
u	Velocidade	[m s <sup>-1</sup> ]
P	Pressão	[Pa]
T	Temperatura	[°C]
$C_p$	Calor específico	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
k	Condutividade térmica	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$Q_p$	Energia perdida pelo sistema	[W m <sup>-3</sup> ]
$C_{p_{ap}}$	Calor específico aparente	[J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$C_L$	Distribuição do calor latente	[kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\theta_i$	Fração da fase i	[-]
$\dot{\gamma}$	Taxa de cisalhamento	[s <sup>-1</sup> ]

$m$	Coefficiente de consistência do fluido	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$n$	Índice de comportamento de fluxo	[-]
<b>Inativação Térmica</b>		
$t$	Tempo	[s]
$\beta$	Fator de localização	[-]
$\alpha$	Fator de forma	[-]
$N_t$	População de esporos no tempo t	[UFC ml <sup>-1</sup> ]
$N_0$	População de esporos no tempo igual a 0	[UFC ml <sup>-1</sup> ]

---



## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	7
<b>ABSTRACT</b> .....	9
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	11
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	15
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	17
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	23
1.1 OBJETIVOS .....	25
1.1.1 Objetivo geral.....	25
1.1.2 Objetivos específicos:.....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	27
2.1 TOMATE: ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS, NUTRICIONAIS E PROCESSAMENTO INDUSTRIAL .....	27
2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO UTILIZANDO MICRO-ONDAS .....	30
2.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE LÍQUIDOS POR MICRO-ONDAS.....	33
2.3.1 Aquecimento Eletromagnético.....	33
2.3.2 Escoamento em tubulações: conservação da quantidade de movimento .....	35
2.3.3 Escoamento em tubulações: conservação da energia térmica .....	36
2.3.4 Cinética de Destruição Térmica .....	37
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
3.1 CONDIÇÃO FÍSICA ESTUDADA .....	39
3.2 MODELO MATEMÁTICO .....	41
3.3 PARÂMETROS DO MODELO .....	45
3.4 RESOLUÇÃO NUMÉRICA MODELO .....	48
3.4.1 Estudo de malha.....	51
3.5 VALIDAÇÃO NUMÉRICA .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	53
4.1 ESTUDO DE MALHA.....	53
4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO .....	54
4.3 POLPA DE TOMATE: APLICADOR .....	56

4.4 POLPA DE TOMATE: TUBO DE RETENÇÃO .....	64
<b>4.4.1 Homogeneidade em função da concentração de sólidos solúveis .....</b>	<b>68</b>
4.5 POLPA DE TOMATE: DESTRUIÇÃO TÉRMICA DE <i>B. COAGULLANS</i> .....	70
4.6 POLPA DE TOMATE: DESTRUIÇÃO TÉRMICA DE LICOPENO .....	74
4.7 CONSUMO DE ENERGIA .....	77
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>79</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

---

O uso de calor no processamento de alimentos tem como um dos principais objetivos a destruição parcial ou total de microrganismos patogênicos e/ou deteriorantes presentes nos alimentos. Além de estender a vida útil do produto e torná-lo seguro para o consumo, o tratamento térmico pode também ser utilizado para diversificação de alimentos (AWUAH, RAMASWAMY e ECONOMIDES, 2007). Os principais métodos para conservação de alimentos líquidos utilizando calor são a pasteurização e esterilização. Em ambos os métodos, geralmente, trocadores de calor a placas são utilizados (SINGH e HELDMAN, 2009).

A principal desvantagem da utilização de calor no tratamento de fluidos alimentícios é o efeito da temperatura sobre os componentes termosensíveis. A utilização de altas temperaturas por longos tempos de processo pode alterar significativamente a cor, odor, textura e a disponibilidade de nutriente (vitaminas, por exemplo), tornando o alimento inadequado ou tendo pouca aceitação para o consumo (SINGH e HELDMAN, 2009).

Entre os principais alimentos líquidos tratados termicamente pela indústria estão os produtos a base de tomate tais como, molho e extrato de tomate. A polpa de tomate possui cerca de 4 °Brix a 8 °Brix, e é definida como um condimento feito à base de tomate e, às vezes, acrescido de orégano, cebola, manjeriço, sal, óleo, alho e vários outros condimentos para conferir sabor (ANVISA, 2005). Possui um pH em torno de 4,10 e acidez titulável entre 0,5 e 1,0 (JAIME et al., 1998).

Dada as características físico-químicas e a riqueza de nutrientes, o molho de tomate é um excelente meio para o desenvolvimento de fungos (PIECKOVÁ, BERNÁT e JESENSKÁ, 1994; TOURNAS, 1994). Entre os fungos de maior interesse para a indústria do setor estão os fungos termoresistentes. Essa classe de microrganismos é capaz de sobreviver às temperaturas normalmente utilizadas no processo de pasteurização (62 °C a 85 °C). Os micro-organismos de maior interesse na polpa de tomate estão o *Byssochlamys fulva* (TOURNAS, 1994; HOCKING e PITT, 2001) e *Bacillus coagulans* (OOMES et al, 2007; LUCAS et al., 2006).

O uso de ondas eletromagnéticas na frequência das micro-ondas tem sido visto como uma alternativa interessante em relação aos processos convencionais para o processamento térmico de alimentos líquidos. A principal vantagem é o aquecimento volumétrico obtido com as micro-ondas, o qual reduz o tempo para o alimento atingir a

temperatura de tratamento e conseqüentemente ameniza os danos provocados pelo calor (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

As ondas eletromagnéticas são formadas por um campo elétrico e um campo magnético dispostos perpendicularmente um ao outro. Quando a onda se propaga em um meio, os campos elétrico e magnético apresentam comportamento oscilatório. Na frequência de micro-ondas (300 MHz e 300 GHz) as ondas são capazes de penetrar em materiais dielétricos, tais como os alimentos, e dissipar parte da energia na forma de calor. O aquecimento micro-ondas ocorre por dois mecanismos: rotação dipolar e a migração oscilatória de íons, ambos causados pela influência da oscilação do campo elétrico no interior do alimento. Essa característica tem sido explorada em outros processos da indústria podendo-se citar: cozimento, descongelamento, secagem, extração, entre outros (DATTA E ANANTHESWARAN, 2001).

O tratamento térmico de fluidos utilizando micro-ondas é complexo pois envolve fenômenos como: dissipação de energia eletromagnética, escoamento de fluido, transferência de calor, destruição térmica de microrganismos e componentes dos alimentos. Todos esses fenômenos estão inter-relacionados, portanto, o projeto de equipamentos destinados ao tratamento térmico ou a otimização de condições operacionais, seria extremamente custosa do ponto de vista experimental. Uma alternativa de análise é aliar modelos teóricos e análises de simulação numérica ao desenvolvimento experimental. Além de reduzir custos, o uso de ferramentas numéricas pode contribuir para uma maior compreensão acerca dos fenômenos envolvidos no processo e que seriam muito difíceis de serem avaliadas experimentalmente.

Entretanto, apesar da importância de estudos de modelagem matemática e simulação numérica voltada ao processamento térmico utilizando micro-ondas, poucos estudos têm sido destinados a avaliar de forma fenomenológica a dinâmica do processo, quando se trata da polpa de tomate. Alguns estudos representativos nessa linha pesquisa, utilizando outras matérias primas, são os trabalhos de Sierra et al. (1999) aplicado ao tratamento térmico de leite; Gentry e Roberts (2005) para o tratamento térmico de suco de maçã e Lešková et al. (2006) no tratamento térmico de suco de laranja. Basicamente, a formulação matemática do fenômeno físico inclui: as Equações de Maxwell do eletromagnetismo, continuidade, Navier Stokes e conservação da energia, incluindo o transporte de calor por condução e advecção.

Nesse contexto o presente estudo foi concebido visando a modelagem e simulação do tratamento térmico em fluxo contínuo da polpa de tomate, analisando os perfis de temperatura, qualidade do



produto obtido e variáveis de projeto, como dimensões de tubulação e temperatura de operação.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 **Objetivo geral**

Propor um modelo matemático para descrever o tratamento térmico da polpa de tomate em um aquecedor micro-ondas operando em modo contínuo e avaliar o consumo de energia, a inativação do fungo termorresistente *Bacillus coagulans* e a degradação do licopeno para diferentes diâmetros dos tubos do aquecedor e vazão e concentração de sólidos da polpa de tomate.

### 1.1.2 **Objetivos específicos:**

- a) Descrever matematicamente os fenômenos eletromagnéticos e o aquecimento por micro-ondas acoplados à conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento.
- b) Obter a solução numérica do modelo proposto pelo método dos elementos finitos e validar o modelo a partir dos resultados disponíveis na literatura;
- c) Avaliar por meio de simulação numérica os efeitos de: vazão de escoamento da polpa ( $0,1 \text{ L min}^{-1}$ ,  $1 \text{ L min}^{-1}$  e  $2 \text{ L min}^{-1}$ ); diâmetro da tubulação (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e temperatura média final do fluido ( $95 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), sobre a distribuição da temperatura da polpa de tomate durante o tratamento térmico;
- d) Estudar a homogeneização da temperatura em um tubo de retenção do tipo helicoidal frente as diferentes condições de operação;
- e) Estudar o efeito das variáveis de processo (vazão, diâmetro de tubo e temperatura de tratamento térmico) na qualidade microbiológica e nutricional do produto por meio de simulações de destruição térmica de *Bacillus coagulans* e do licopeno.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TOMATE: ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS, NUTRICIONAIS E PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

O tomate é uma das principais hortaliças produzida atualmente no Brasil, chegando ao mercado de maneira *in natura* ou processada, como molho, polpa, ketchup ou extrato (TREICHEL et al., 2016). Segundo dados publicados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o Brasil produziu cerca 4,4 milhões de toneladas de tomate na safra de 2017 (IBGE, 2018). Informações do Anuário Brasileiro do Tomate 2016, indicam que cerca de 65%, do tomate destinado para a indústria, é para fabricação de molhos; 21% para catchup; 8% para polpas e 6% para extrato. O mesmo anuário publicou que o consumo per capita do brasileiro de produtos processados a base de tomate ultrapassa os cinco quilos por ano (TREICHEL et al., 2016).

O tomate é um fruto com alto valor nutricional, destacando-se pela elevada concentração de vitamina C, carotenoides, especialmente licopeno e  $\beta$ -caroteno, e alguns compostos fenólicos, que têm efeito benéfico para a saúde (MONTEIRO et al., 2000, SOBREIRA et al., 2010). A composição média do tomate está ilustrada na Tabela 1 (USDA, 2012).

**Tabela 1** - Composição Centesimal do Tomate

Componente	Quantidade por 100g
Água	94,52 g
Energia	18 kcal/ 74 kJ
Proteínas	0,88 g
Lipídios Totais	0,20 g
Carboidratos	3,89 g
Fibras dietéticas	1,20 g
Açúcares Totais	2,63 g
Frutose	1,37 g
Glicose	1,25 g
Vitamina C	13,7 mg
K, Ca, Mg e P	282 mg
Licopeno	2573 $\mu$ g
$\alpha$ -caroteno	101 $\mu$ g
$\beta$ -caroteno	449 $\mu$ g

Fonte: USDA (2012)

A composição média do tomate pode variar em virtude de inúmeros fatores como: maturação, condições climáticas, variedade do cultivar, solo, etc. Em média cerca de 94 % é água e 6 % são compostos inorgânicos, ácidos orgânicos, açúcares, sólidos insolúveis entre outros.

O licopeno é um antioxidante natural e responsável pela coloração vermelha do fruto. Ele consiste de 83 % do total de carotenoides presentes no tomate (SHARMA e LE MAGUER, 1996). A quantidade de licopeno presente no tomate varia de acordo com sua maturação, variedade e condições de cultivo da planta.

A composição nutricional de produtos à base de tomate depende da qualidade da fruta in natura e das condições de processamento e estocagem do produto final. Em geral, qualquer operação unitária, na qual ocorre incorporação de ar ou tratamento térmico, provocará redução na qualidade nutricional do produto. A vitamina C presente na fruta in natura é muito sensível a presença de oxigênio e a elevadas temperaturas. Já o licopeno apresenta uma estabilidade térmica maior não sendo observadas mudanças substanciais na quantidade de licopeno de produtos enlatados ou processados termicamente. Tem sido relatado que o processamento térmico da fruta torna o licopeno mais disponível quando comparado aos tomates in natura, devido a mudança de estrutura molecular do licopeno após o aquecimento (SCHWARTZ et al., 2007). No tomate maduro a quantidade de licopeno varia de 32,0 a 133,8 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ), no suco varia de 68,7 a 121,4 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ), no ketchup varia entre 102,9 e 414,0 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) e no molho de tomate varia de 65,1 a 194,5 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) (LIN e CHEN, 2005; SAHLIN, SAVAGE e LISTER, 2004; SHI e LE MAGUER, 2000).

Na produção da polpa de tomate em forma de purê (9 a 17 % de sólidos solúveis), simples concentrado (18 a 24 % de sólidos solúveis), duplo concentrado (25 a 34 % de sólidos solúveis) e triplo concentrado (acima de 35 % de sólidos solúveis) estão envolvidas basicamente as seguintes etapas: preparo da matéria-prima (seleção, lavagem, corte); redução de tamanho/corte e tratamento térmico inicial, chamado *break*; operações de polimento, filtração, evaporação e esterilização (HAYES, SMITH e MORRIS, 1998, ANVISA).

O primeiro tratamento térmico pode ser realizado através de dois métodos, *hot break* ou *cold break*. O *hot break* envolve um rápido aquecimento dos tomates para aproximadamente 95 °C, enquanto o *cold break* envolve o aquecimento a temperaturas mais baixas (aproximadamente 65 °C). No *hot break* o calor fornecido ao tomate inibe enzimas proteolíticas e protege os constituintes do tomate, especialmente a pectina de alterações enzimáticas, mantendo assim a viscosidade do produto. Na *cold break* os tomates são mantidos por tempos variados no

tanque de processamento, de modo a facilitar a quebra da pectina pelas enzimas liberadas na etapa de corte do tomate. O produto apresenta uma viscosidade menor, mas maior preservação da cor e sabor do tomate (HAYES, SMITH e MORRIS, 1998).

Ao final do tratamento térmico inicial, ocorre a extração do suco de tomate. O produto pré-aquecido passa por uma série de extratores ou ciclones para remover sementes, peles ou qualquer impureza. O material resultante é concentrado em evaporadores a vácuo de vários estágios que variam em perfis tempo-temperatura, dependendo da viscosidade necessária para o produto acabado. A pasta de tomate pode ser produzida para ter entre 21 % a 37 % de sólidos solúveis dependendo das necessidades de fabricação. Após a evaporação, a pasta é esterilizada (aproximadamente 100 °C por 3-5 min), refrigerada e embalada em recipientes assepticamente (HAYES, SMITH e MORRIS, 1998; KOH, CHAROENPRASERT e MITCHELL, 2012).

Antigamente a maior parte do tratamento térmico de polpa de tomate era realizado com o produto já enlatado em autoclaves a vapor (GOULD, 1992). Porém atualmente as latas deram lugar a embalagens cartonadas multicamadas e o processo de esterilização asséptica da polpa em trocadores de calor tubular passou a ser preferencialmente utilizada na indústria (PACHECO, 2001; MICROTHERMICS, 1999, HAYES, SMITH e MORRIS, 1998). O tratamento térmico de alimentos ácidos ( $4,0 < \text{pH} < 4,5$ ), tais como produtos à base de tomate, geralmente são ajustados para reduzir a um nível aceitável o desenvolvimento de *Bacillus coagulans* ( $D_{121}$  aproximadamente 0,07 min), o que permite, ao mesmo tempo, evitar a alteração por outras bactérias mesófilas que são mais termolábeis que a anterior. O crescimento *Bacillus coagulans* pode ocorrer entre 30 e 61 °C, sendo a temperatura ótima de crescimento situada entre 37 e 45 °C. O pH ótimo para crescimento é de 7, podendo crescer em pH entre 4 e 11 (De CLERCK et al., 2004).

Um grande problema da indústria processadora de tomate é o desenvolvimento de fungos termoresistentes no interior de embalagens, mesmo após o produto ter sido tratado termicamente (PIECKOVÁ, BERNÁT e JESENSKÁ, 1994; TOURNAS, 1994; HOCKING e PITT, 2001). O fungo do gênero *Byssochlamys* apresenta duas espécies economicamente importantes (*B. nivea* e *B. fulva*), que causam deterioração de frutas e produtos de frutas mesmo após processamento térmico (TOURNAS, 1994; HOCKING e PITT, 2001; CHAPMAN et al., 2007). Kotzekidou, (1997) isolou vinte culturas de fungos filamentosos termorresistentes em pasta de tomate enlatada. Dentre as cepas isoladas, foram identificados ascósporos de nove linhagens, sendo três de

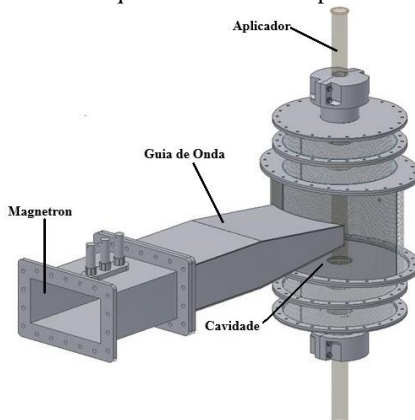
*Byssochlamys fulva*, duas de *Byssochlamys nivea* e quatro de *Neosartorya fischeri*. O gênero *Byssochlamys* possui capacidade de produção de micotoxinas como a patulina, ácido bissoclâmico, bissotoxina A, assimetrina e variotina (BEUCHAT e RICE, 1979; HOCKING e PITT, 2001; PUEL et al., 2007). A patulina é considerada tóxica para plantas, microrganismos e animais, sendo extremamente nociva à saúde humana (MORALES et al., 2007).

## 2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRATAMENTO TÉRMICO UTILIZANDO MICRO-ONDAS

O uso do aquecimento por micro-ondas para o tratamento térmico de alimentos oferece algumas vantagens em relação ao processo convencional: o aquecimento é mais rápido, conseqüentemente, o tempo de exposição do produto a altas temperaturas é menor, resultando em uma menor degradação compostos termossensíveis (SIERRA et al., 1999).

Basicamente os sistemas projetados e estudados para realizar o tratamento térmico de líquidos em fluxo contínuo utilizando micro-ondas consistem de um tubo de politetrafluoretileno, PTFE (transparente as ondas eletromagnéticas) por onde o fluido circula (aplicador); o qual atravessa uma cavidade conectada a um guia de onda e um magnetron (gerador de ondas), conforme ilustrado esquematicamente na figura 1 (CHANDRASEKARAN et al., 2013).

**Figura 1** - Esquema básico de um aquecedor de fluidos por micro-ondas.



Adaptado de Salvi (2008)

A distribuição dos campos eletromagnéticos nesse tipo de sistema depende de fatores geométricos (tamanho e forma da cavidade; tamanho, forma e posição do aplicador), da frequência de propagação das ondas (915 MHz ou 2450 MHz) e das propriedades físicas do líquido. A quantidade de energia micro-ondas dissipada no alimento depende da distribuição local do campo eletromagnético. Para contabilizar os fenômenos eletromagnéticos, inúmeros autores têm utilizado as equações de Maxwell do eletromagnetismo, levando em conta a geometria do sistema estudado e a dependência das propriedades dielétricas com a temperatura (SALVI, 2008; ZHU, KUZNETSOV e SANDEEP, 2007)

A dissipação da energia eletromagnética é acoplada na equação da conservação de energia como um termo fonte. Além do termo fonte relacionado com a dissipação de micro-ondas, alguns autores incluem um termo fonte para contabilizar os efeitos relacionados a mudança de fase (PRYOR, 2007; SALVI, 2008). O transporte de energia térmica no líquido ocorre por condução (Lei de Fourier) e por advecção (CUCCURULLO, GIORDANO e VICCIONE, 2014; NGUYEN et al., 2013). Para descrever o escoamento do fluido no aplicador tem sido empregado, basicamente, as equações de Navier-Stokes e em alguns casos, modelos de turbulência (CHOI et al., 2015; SALVI et al., 2010; TUTA e PALAZOĞLU, 2017).

A seguir são apresentados alguns estudos de simulação numérica do tratamento térmico de líquidos utilizando micro-ondas:

Sierra et al. (1999) realizou um estudo onde foi comparada a perda de vitamina B1 em processo contínuo por aquecimento eletromagnético e processo utilizando trocador de calor a placas, medindo-se a retenção da vitamina no final do processo. O tratamento por micro-ondas sem fase de espera (40 s) não modificou o conteúdo de vitamina B1 no leite enquanto o tratamento térmico convencional por trocador de calor a placas provocou perda dessa vitamina (4 %). Porém quando ocorre a fase de espera, ambos os tratamentos apresentam perda de vitamina, sendo 4 % no tratamento por micro-ondas e 8 % no tratamento convencional. O estudo mostrou que a pasteurização por micro-ondas é um bom tratamento para evitar a perda de vitamina B1 do leite.

Gentry e Roberts (2005) projetaram um sistema de pasteurização por micro-ondas e avaliaram alguns parâmetros como capacidade volumétrica (0,50 e 1,38 L), potência (900-2000 W) e temperatura de entrada (3 °C, 21 °C e 40 °C). Água e dois sucos de maçã, um de uma extração a frio e outro de uma extração a quente, foram os fluidos estudados. O escoamento volumétrico e a absorção da energia

eletromagnética foram avaliados. O sistema de pasteurização consistiu em tubos helicoidais em uma cavidade cubica grande ( $0,68 \text{ m}^3$ ) que se mostrou capaz de produzir um aquecimento uniforme através da cavidade. As viscosidades dos fluidos foram medidas entre  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  para caracterização do escoamento (Laminar) nos tubos helicoidais baseado no número de Dean. A letalidade do processo foi verificada baseada na inoculação de *Escherichia coli*.

Coronel et al. (2007) em um aparato com cavidade tubular submetido a energia eletromagnética, estudaram as propriedades dielétricas de soluções de água destilada contendo diferentes concentrações de sal, açúcar, carboximetilcelulose (CMC) e misturas dessas soluções, em um sistema de fluxo contínuo. O objetivo desse estudo foi avaliar o comportamento das propriedades dielétricas como a constante dielétrica  $\epsilon'$  e o fator de perda dielétrica  $\epsilon''$  em função da concentração e temperatura, e estabelecer correlações para os mesmos. A partir disso esse comportamento das propriedades dielétricas foi comparado com as mesmas propriedades do leite e da batata doce, assim também como o perfil de temperatura na saída do tubo.

Salvi et al. (2011) desenvolveram um método numérico para simular o perfil de temperatura para fluidos Newtonianos e não Newtonianos durante o aquecimento por micro-ondas em fluxo contínuo por acoplamento interativo do eletromagnetismo, escoamento de fluidos e transporte de calor no COMSOL Multiphysics. A geração de energia eletromagnética e a temperatura média obtida numericamente ficou muito próxima da temperatura média obtida experimentalmente para soluções de CMC e de água.

Cuccurullo et al. (2014) estudaram um modelo diferente para simulação da temperatura para líquidos incompressíveis em fluxo contínuo escoando em duto circular sujeito ao aquecimento por micro-ondas. Um modelo híbrido que acopla resultados numéricos e cálculos analíticos foi desenvolvido fornecendo uma ferramenta para uma predição mais precisa da distribuição de temperatura e reduzindo significativamente o tempo computacional. As simulações foram realizadas com a intenção de validar a solução híbrida quando comparada a solução numérica correspondente. Os resultados para diferentes velocidades de entrada, assegurou a precisão do modelo proposto com um tempo computacional dez vezes menor que o modelo.

Lee et al. (2015) comparou dois tipos de aquecimento para alimentos particulados, o aquecimento ôhmico e eletromagnético. O perfil de temperatura de fluidos particulados com concentração de sal entre 5 e  $20 \text{ g L}^{-1}$ , pedaços de frango e batata em diferentes frações mássicas foram



coletados e comparados para aquecimentos individuais (MO e ôhmico) e combinados. Os resultados mostraram que o tamanho das partículas e a concentração de sal afetaram a variação de temperatura entre a solução e as partículas no aquecimento ôhmico. Para o aquecimento por MO a temperatura da solução ficou menor em relação às partículas. Quando os dois tratamentos foram combinados a máxima diferença caiu para 3,08 °C entre solução e partícula.

Tuta e Palazoğlu (2017) estudaram e modelaram o aquecimento de vários fluidos como água destilada, e soluções de CMC 0,5 % e 1 %. Esse processo foi simulado pelo método dos elementos finitos usando COMSOL Multiphysics. Os resultados numéricos e experimentais mostraram que o aquecimento foi mais uniforme para água destilada em comparação com as soluções CMC em todas as vazões. O estudo mostrou que um aquecimento mais uniforme para fluidos com alta viscosidade pode ser alcançado utilizando tubos helicoidais em um sistema de aquecimento por micro-ondas em fluxo contínuo.

## 2.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE LÍQUIDOS POR MICRO-ONDAS

Neste item são apresentadas as formulações matemáticas dos fenômenos eletromagnéticos, de conservação da massa, quantidade de movimento e energia, recorrentemente utilizadas na literatura para simular o processo de tratamento térmico de líquidos utilizando micro-ondas. Também são apresentadas as formulações matemáticas para contabilizar as cinéticas de destruição térmica de micro-organismos e componentes do alimento (CHOI et al., 2015; NGUYEN et al., 2013; SALVI, 2008; TUTA e PALAZOĞLU, 2017; ZHU, KUZNETSOV e SANDEEP, 2007).

### 2.3.1 Aquecimento Eletromagnético

A dissipação da energia micro-ondas em um meio dielétrico é proporcional a intensidade do campo elétrico local ao quadrado, e pode ser contabilizada utilizando o teorema de Poynting, de acordo com a Equação 1 (SADIKU, 2012).

$$Q_{MW}(x, y, z, t) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_s|^2 \quad (1)$$

na qual  $Q_{MW}$  é a potência (W),  $\omega$  é a frequência angular ( $\text{rad s}^{-1}$ ),  $\varepsilon_0$  representa a permissividade do vácuo ( $10^{-9}/36\pi \text{ F m}^{-1}$ ), onde  $\vec{E}_s$  é o campo elétrico ( $\vec{E}$ ,  $\text{V m}^{-1}$ ) e  $\varepsilon''$  é fator de perda dielétrica.

A distribuição dos campos eletromagnéticos no interior do alimento que escoa no aplicador é influenciada por fatores físicos e geométricos e pode ser determinada através das equações de Maxwell do Eletromagnetismo (SADIKU, 2012). Assim as equações de Maxwell escritas na forma fasorial, para um meio isotrópico, homogêneo e isento de carga fonte são descritas pelas Equações 2, 3, 4 e 5 (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001).

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}_s = j\omega\varepsilon_0\varepsilon_c\vec{E}_s \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}_s = -j\omega\mu_0\mu_r\vec{H}_s \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{H}_s = 0 \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \varepsilon_c\vec{E}_s = 0 \quad (5)$$

nas quais  $\vec{E}_s$  e  $\vec{H}_s$  são os fasores do vetor campo elétrico ( $\vec{E}$ ,  $\text{V m}^{-1}$ ) e campo magnético ( $\vec{H}$ ,  $\text{A m}^{-1}$ ), respectivamente, expressos pelas Equações 6 e 7 (SADIKU, 2012).

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{E}_s(x, y, z)e^{-j\omega t}] \quad (6)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \text{Re}[\vec{H}_s(x, y, z)e^{-j\omega t}] \quad (7)$$

nas quais  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular em  $\text{rad s}^{-1}$  e  $\text{Re}$  é a parte real. A variável  $f$  é a frequência em Hz.

Nas equações (2-6),  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ ),  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa do meio,  $\varepsilon_0$  representa a permissividade elétrica do vácuo ( $10^{-9}/36\pi \text{ F m}^{-1}$ ) e  $\varepsilon_c$  é a permissividade elétrica relativa complexa do meio, e é definida pela Equação 8.

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (8)$$

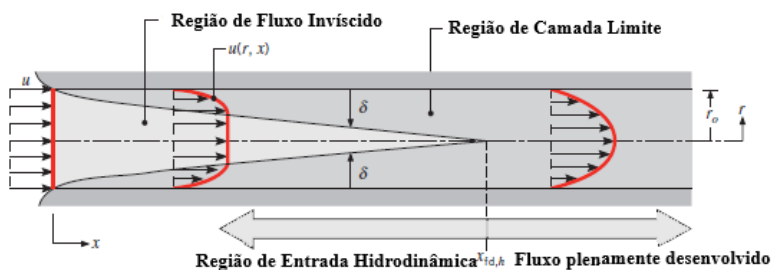
na qual  $\varepsilon'$  é a constante dielétrica e representa a habilidade do material em estocar energia. Essa propriedade influencia principalmente a distribuição dos campos EM no interior do material. O fator de perda dielétrica  $\varepsilon''$  informa quanto de energia é dissipada dentro do material (DATTA e ANANTHESWARAN, 2001). As propriedades dielétricas de

um material são influenciadas por alguns fatores e, no caso de alimentos, são eles: frequência da radiação eletromagnética, temperatura e composição química (SCHUBERT E REGIER, 2005).

### 2.3.2 Escoamento em tubulações: conservação da quantidade de movimento

O regime de escoamento de um fluido no interior de um tubo é função das propriedades físicas do fluido (massa específica e viscosidade, especificadamente) e da geometria e dimensões do duto. Quando um líquido escoar no interior de uma tubulação, a camada de moléculas de fluido em contato com a parede do tubo entra em repouso e os efeitos das forças viscosas são transmitidos para camada de moléculas adjacente, desta para a próxima, e assim por diante, retardando o escoamento. A região do escoamento onde os efeitos viscosos são sentidos é definida como camada limite hidrodinâmica. A espessura da camada limite aumenta na direção escoamento principal até a fusão completa no eixo central do tubo (região de entrada). Após essa fusão, os efeitos viscosos se estendem por toda a seção transversal do tubo e o perfil de velocidades não mais se altera na direção do escoamento (região plenamente desenvolvida) (Figura 2).

**Figura 2** - Perfil de velocidade no interior do tubo para o escoamento laminar.



Fonte: Incropera et al., (2011).

O perfil de velocidades depende do regime de escoamento e pode ser caracterizado através do número adimensional de Reynolds, definida pela Equação 9, para fluidos Newtonianos e pela Equação 10, para fluidos não newtonianos.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho(V)^{(2-n)}D^n}{8^{n-1}K} \left( \frac{4n}{3n+1} \right) \quad (10)$$

nas quais  $V$  é a velocidade média ( $m\ s^{-1}$ ),  $\rho$  é a massa específica ( $kg\ m^{-3}$ ),  $\mu$  é a viscosidade ( $Pa\ s$ ) do fluido,  $D$  é o diâmetro característico da tubulação ( $m$ ),  $n$  é o índice de comportamento de fluxo e  $K$  é o coeficiente de consistência do fluido ( $Pa\ s^n$ ). Quando Reynolds é menor que 2000 o regime de escoamento é laminar, entre 2300 e 2400 é definida como região transição, e maior que 2400 o regime é turbulento (FOX e McDONALD, 1985; BHAMIDIPATI e SINGH, 1990; INCROPERA et al, 2011).

No tratamento térmico de fluidos, o perfil de velocidade desenvolvido no interior dos tubos, é muito importante uma vez que interferem diretamente na transmissão da energia térmicas para o alimento. O perfil de velocidades pode ser obtido realizando um balanço de forças no fluido (BEJAN, 1948). No caso do escoamento de um líquido (fluido incompressível,  $\rho = \text{constante}$ ) e as forças de campo são desprezíveis, o perfil de velocidades no interior da tubulação pode ser obtido resolvendo a equação da continuidade (Equação 11) e as equações do momento ou equações de Navier-Stokes (Equação 12) (BEJAN, 1948).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) \quad (12)$$

nas quais,  $\mathbf{u}$  é o vetor velocidade ( $\mathbf{u} = u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} + u_z \mathbf{k}$ ) ( $m\ s^{-1}$ ),  $\mu$  é a viscosidade dinâmica ( $Pa\ s$ ) e  $P$  é a pressão ( $Pa$ ).

### 2.3.3 Escoamento em tubulações: conservação da energia térmica

Ao escoar no interior de uma tubulação, se o fluido não estiver em equilíbrio térmico com a mesma, ocorre a transferência de calor por convecção entre superfície e fluido e uma camada limite térmica é formada (INCROPERA et al., 2011). Nesse caso a transmissão de energia para o fluido depende das condições fluido dinâmicas e das propriedades térmicas do fluido ( $k$  condutividade térmica e  $C_p$  calor específico). Nos trocadores de calor convencionais (placas e casco e tubo) a transferência de calor para o alimento é exclusivamente por convecção. Com a utilização de micro-ondas a energia eletromagnética é dissipada

no interior do alimento aumentando a velocidade do processo de aquecimento.

A distribuição de temperaturas no interior de um alimento pode ser obtida a partir da conservação da energia, expressa pela da Equação 13.

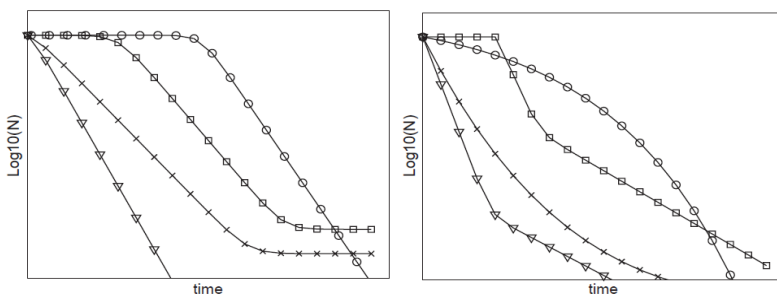
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T = k \nabla^2 T + Q_{MW} + Q_{vap} \quad (13)$$

na qual  $T$  é a temperatura (K),  $\rho$  é a densidade do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $k$  é a condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $C_p$  é o calor específico ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\mathbf{u}$  é ao vetor velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $Q_{MW}$  o termo fonte que contabiliza a dissipação de energia micro-ondas ( $\text{W m}^{-3}$ ) e  $Q_{vap}$  é o termo que contabiliza os efeitos relacionados com mudanças de fases ( $\text{W m}^{-3}$ ).

### 2.3.4 Cinética de Destruição Térmica

Durante o processamento térmico o aumento da temperatura do alimento é utilizado como agente externo para reduzir a população de micro-organismos ou enzimas presentes no alimento. A população de células vegetativas, irá diminuir segundo os padrões mostrados na Figura 3.

**Figura 3** - Curvas de inativação comumente observadas. Na Figura 1(A), temos: ( $\Delta$ ) linear; ( $\times$ ) linear com cauda; ( $\square$ ) sigmoidal; ( $\circ$ ) linear precedida de ombro. Na Figura 1(B), temos: ( $\Delta$ ) bifásica; ( $\times$ ) côncava; ( $\square$ ) bifásica com ombro; ( $\circ$ ) convexa.



Fonte: Geeraerd e Valdramidis (2005)

Existem micro-organismos que apresentam comportamento log-linear de inativação e outros, como os esporos termoresistentes,

apresentam uma curva de inativação térmica ( $\log N/N_0$  versus tempo) não log-linear. Nesta curva é possível visualizar um ombro inicial, representando uma maior lentidão de morte por parte dos esporos, seguido de uma taxa de morte acelerada, que dá à curva um aspecto log-linear e, por fim, pode apresentar uma “calda”, onde os esporos mais resistentes demoram mais tempo para completa inativação.

Modelos de inativação microbiana não-log-lineares têm sido frequentemente apresentados na literatura e são usados para descrever a cinética de crescimento e inativação de uma ampla variedade de microrganismos, com o mais variado comportamento (PELEG e COLE, 1998; PELEG, 2003; GEERAERD et al., 2005; VALDRAMIDIS et al., 2006). Entre eles, o modelo de Weibull é comumente utilizados para descrever a inativação de microrganismos (MAFART et al., 2001).

O modelo de Weibull (Equação 14), tem como vantagem a sua simplicidade matemática e a grande flexibilidade.

$$\frac{\log N(t)}{\log N_0} = e^{(-\frac{t}{\beta})^\alpha} \quad (14)$$

na qual  $\beta$  é o fator de localização,  $\alpha$  é o fator de forma,  $t$  é o tempo (s) e  $N_0$  é a população de esporos no tempo igual a zero.

Quando  $\alpha > 1$ , as curvas apresentam concavidades voltadas para baixo, indicando que o tempo para inativar um mesmo número de microrganismos diminui progressivamente. Quando  $\alpha < 1$ , as curvas apresentam concavidades voltadas para cima, assumindo que a população microbiana reduz rapidamente. Porém, à medida que o processo de destruição ocorre, uma cauda é formada, indicando que a população residual é altamente resistente (ARAGAO et al., 2007; PELEG, 2006).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CONDIÇÃO FÍSICA ESTUDADA

Para estudar o processamento térmico por micro-ondas do molho de tomate em fluxo contínuo, foi utilizado o sistema descrito por Salvi (2008). O sistema conta com um magnetron, que gera micro-ondas na frequência de 915 MHz e potência de 4,5 kW, conectado a uma cavidade elíptica, por meio de um guia de onda retangular. No interior da cavidade, um tubo cilíndrico de politetrafluoretileno (PTFE) é utilizado para escoar a polpa de tomate. Uma representação esquemática e do sistema de aquecimento está ilustrada na Figura 4. Os resultados obtidos por Salvi (2008) foram utilizados para validar a solução numérica do presente modelo nas mesmas condições de estudo.

**Figura 4** - Sistema de aquecimento estudado.

**D3 = 24 mm; 31,8 mm**

**e 39,6 mm**

**A = 463,5 mm**

**B = 343,5 mm**

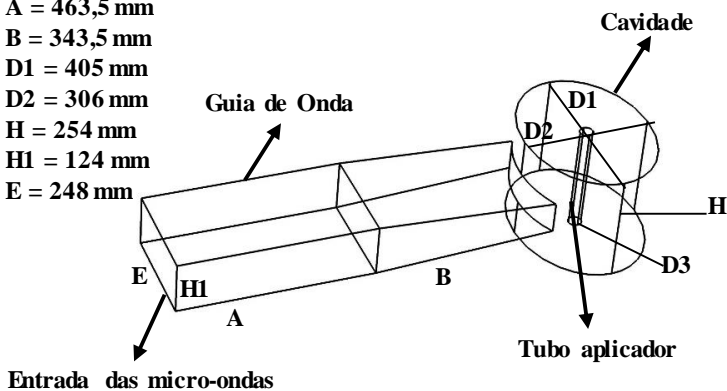
**D1 = 405 mm**

**D2 = 306 mm**

**H = 254 mm**

**H1 = 124 mm**

**E = 248 mm**

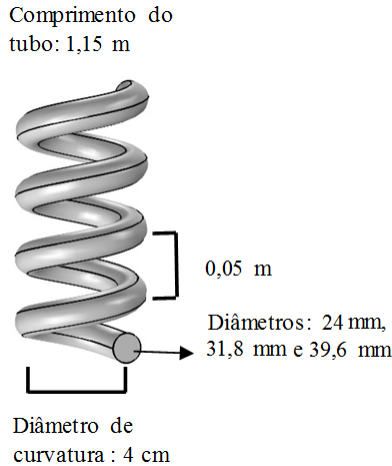


Fonte: Adaptado de Salvi (2008).

Conectado ao tubo que sai da cavidade, está um tubo de retenção com configuração helicoidal, conforme ilustrado na **Figura 5**. O escoamento nessa configuração geométrica contribui para a homogeneização da temperatura, em virtude do aparecimento de um escoamento secundário induzido pelas forças centrífugas (INCROPERA

et al., 2011). O comprimento do tubo de retenção foi definido por meio de simulações prévias do processo que exigiu o maior comprimento de tubo (24 mm de diâmetro, vazão de  $2 \text{ L min}^{-1}$  e temperatura final de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Figura 5** - Tubo de retenção utilizado no estudo.



Fonte: realizado pelo autor.

As condições de processo e configurações do sistema estudadas foram:

- Frequência das micro-ondas 915 MHz;
- Vazões volumétricas utilizadas nas simulações foram de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$ ,  $1 \text{ L min}^{-1}$  e  $2 \text{ L min}^{-1}$ .
- Diâmetros utilizados nas simulações foram de 24 mm, 31,8 mm e 39,6mm.
- Temperatura média molho de tomate na entrada do aplicador é de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  e temperaturas médias do molho que sai do aplicador (e entra no tubo de retenção) deve ser 95, 97 e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , obtidas com ajuste da potência.
- Foram modelados dois sistemas diferentes. O sistema 1 foi considerado a ocorrência de mudança de fase na polpa de tomate. O sistema 2 foi considerado uma válvula de contrapressão que não permite a ocorrência de mudança de fase durante o processo.



### 3.2 MODELO MATEMÁTICO

O processamento térmico por micro-ondas envolve o acoplamento de fenômenos de aquecimento eletromagnético, transporte de massa, quantidade de movimento e energia, além de reações de destruição térmica. Para modelar os sistemas 1 e 2, algumas hipóteses foram assumidas, são elas:

- Fluido não newtoniano e incompressível;
- Escoamento laminar;
- Processo em estado estacionário;
- Aplicador e tubo de retenção isolados termicamente;
- Tubo do aplicador transparente às micro-ondas;
- Paredes da cavidade e guia de onda condutores elétricos perfeitos;

O aquecimento eletromagnético do molho de tomate é função da intensidade do campo elétrico local (Equação 01), que por sua vez depende da geometria do sistema e das propriedades do alimento. Para uma descrição detalhada da distribuição do campo elétrico as equações de Maxwell do eletromagnetismo (Equações 02-05) foram resolvidas em todo o sistema. As equações de Maxwell podem ser reescritas na forma de uma equação de onda em termos do campo elétrico de acordo com a Equação 15 (SALVI, 2008; COMSOL, 2008)

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E}_s \right) - \frac{\omega^2}{c} (\epsilon' - i\epsilon'') \vec{E}_s = 0 \quad (15)$$

na qual  $c$  é a velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ) e  $\omega$  é a frequência angular ( $\text{rad s}^{-1}$ ).

Para obter a solução da Equação 15 foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- As paredes metálicas foram consideradas condutores elétricos perfeitos, ou seja, as ondas eletromagnéticas são completamente refletidas (Equação 16).

$$\mathbf{n} \times \vec{E}_s = 0 \quad (16)$$

na qual  $\mathbf{n}$  é o vetor unitário normal à interface.

- Na interface ar e tubo aplicador há continuidade do campo elétrico, descrito pela Equação 17.

$$\mathbf{n} \times \vec{E}_{s,ar} = \mathbf{n} \times \vec{E}_{s,aplicador} \quad (17)$$

As micro-ondas entregues pelo magnetron foram modeladas através de um guia de onda retangular. A forma e as dimensões do guia de onda permitem a propagação da onda no modo transverso elétrico, TE<sub>10</sub> (modo dominante), transmitindo assim a máxima potência do magnetron para cavidade (SADIKU, 2012).

Conhecida a distribuição de campos no interior do fluido, o aquecimento eletromagnético,  $Q_{MW}$ , é calculado pela Equação 1 e contabilizado como um termo fonte na equação da conservação de energia, de acordo com a Equação 18 (Sistema 1) e Equação 19 (Sistema 2).

$$\rho C_{p,ap} \mathbf{u} \nabla T = k \nabla^2 T + Q_{MW} \quad (18)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \nabla T = k \nabla^2 T + Q_{MW} \quad (19)$$

Além da alteração de energia térmica provocada pela dissipação das micro-ondas, para o sistema 1, foram considerados também os efeitos térmicos de possíveis mudanças de fase (ebulição) no molho de tomate. A concentração dos campos elétricos em uma determinada posição do fluido (regiões de interferência construtiva da onda conhecidas como “hot spots”) leva à dissipação de grande quantidade de energia em um pequeno volume de líquido que pode então entrar em ebulição.

Os efeitos térmicos da mudança de fase não foram contabilizados como um termo fonte na Equação 18, mas utilizando um calor específico aparente, que contabiliza os efeitos do calor específico e do calor latente de vaporização do molho de tomate. Essa abordagem tem sido utilizada em alguns trabalhos (VALLEJOS e DUSTON, 2005, CURET et al. 2006, PRYOR, 2007).

O calor específico aparente está representado pela Equação 20, a condutividade térmica aparente pela Equação 21 e massa específica aparente pela Equação 22.

$$C_{p,ap} = \frac{1}{\rho} (\theta_1 \rho_1 C_{p_1} + \theta_2 \rho_2 C_{p_2}) + C_L \quad (20)$$

$$k_{ap} = \theta_1 k_1 + (1 - \theta_1) k_2 \quad (21)$$

$$\rho_{ap} = \theta_1 \rho_1 + (1 - \theta_1) \rho_2 \quad (22)$$

na qual  $C_{p_1}$  e  $C_{p_2}$  são os calores específicos da fase líquida e da fase vapor,  $\rho_1$  e  $\rho_2$  são as massas específicas, das respectivas fases;  $k_1$  e  $k_2$  são as condutividades térmicas, das respectivas fases,  $\theta_1$  e  $\theta_2$  as frações volumétricas de ambas as fases ( $0 \leq \theta \leq 1$ ), e  $C_L$  contabiliza os efeitos do calor latente de vaporização.

A hipótese dessa abordagem assume que a mudança de fase não ocorre instantaneamente quanto o fluido atinge a temperatura de ebulição,  $T_{pc}$ , mas que essa mudança ocorre de maneira suave em um intervalo de temperatura entre  $T_{pc} - \frac{\Delta T}{2}$  e  $T_{pc} + \frac{\Delta T}{2}$ . Neste intervalo,  $\theta_1$ , muda suavemente do valor 1, antes da transição, para 0, depois da transição ( $\theta_1 + \theta_2 = 1$ ). Dessa maneira, o método é descrito pelas Equações 23 e 24 (PRYOR, 2007).

$$C_L = L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (23)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{\theta_2 \rho_2 - \theta_1 \rho_1}{\theta_1 \rho_1 + \theta_2 \rho_2} \quad (24)$$

nas quais  $C_L$  é definido como a função de distribuição do calor latente entre as fases no intervalo de temperatura especificado,  $L$  é o calor latente de vaporização e  $\alpha_m$  é a fração mássica de líquido e vapor durante a mudança de fase.

A equação da conservação de energia (Equações 18 e 19) foi resolvida no aplicador ( $Q_{MW} \neq 0$ ) e no tubo de retenção ( $Q_{MW} = 0$ ). Para resolução do modelo as seguintes condições de contorno foram utilizadas:

- Isolamento térmico perfeito nas paredes da tubulação descrita pela Equação 25.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (25)$$

na qual  $q = -k\nabla T$  e  $\mathbf{n}$  é o vetor unitário normal a interface.

- Temperatura média prescrita do fluido que entra no sistema descrito pela Equação 26.

$$\mathbf{T} = T_0 \quad (26)$$

na qual  $T_0$  é a temperatura inicial do fluido igual a 25 °C.

- Condição de saída de tubulação ao final do tubo de retenção descrita pela Equação 27.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (27)$$

na qual  $q = -k\nabla T$  e  $\mathbf{n}$  é o vetor unitário normal a interface.

- Foram definidas as potências dissipadas na amostra, para cada sistema modelado, através de um balanço global, para atingir as temperaturas finais de 95 °C, 97 °C e 100 °C.

O transporte de energia no interior do fluido ocorre por condução e por advecção, para uma descrição detalhada dos fenômenos os perfis de velocidade do escoamento do molho de tomate na tubulação foram obtidos resolvendo as equações de Navier-Stokes (Equações 10 e 11) em estado estacionário, definido pelas Equações 28 e 29.

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (28)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot \left( \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right) \quad (29)$$

Como condições de contorno foi assumido:

- Perfil de velocidades plenamente desenvolvido na entrada do tubo aplicador (perfil parabólico), definido pela Equação 30.

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (30)$$

na qual  $\mathbf{t}$  é a componente tangencial de escoamento.

- Condição de não deslizamento nas paredes da tubulação, definido pela Equação 31.

$$\mathbf{u} = 0 \quad (31)$$

- Pressão prescrita definida pelas Equações 32 e 33.

$$\mathbf{n}^T [-p + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \mathbf{n} = -\hat{p}_0 \quad (32)$$

$$\hat{p}_0 \leq p_0, \mathbf{u} \cdot \mathbf{t} = 0 \quad (33)$$

na qual  $p_0$  é a pressão definida na saída do tubo (nesse caso é a pressão relativa ( $p_0=0$ ), ou seja, pressão atmosférica).

Após a obtenção dos perfis de temperatura no aplicador e do tubo de retenção, foi utilizado o modelo não isotérmico baseado na equação de

Weibull (Equação 13) para descrever a cinética de inativação térmica de *Bacillus coagulans*. O modelo não isotérmico segue a proposta de Zimmermann (2012) sendo descrito pela Equação 34.

$$\frac{dN}{dt} = - \left( \frac{\log(N)}{\beta \left(\frac{N}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}}} \right) \log(N_0) \quad (34)$$

na qual  $N$  é a concentração de esporos,  $N_0$  é a concentração inicial de esporos,  $\beta$  é o fator de localização e  $\alpha$  é o fator de forma.

Foi assumido uma concentração inicial de micro-organismos no molho de tomate de 1000 UFC/mL (esse valor foi escolhido para diminuir o erro numérico) na entrada do tubo aplicador e a reação de inativação foi resolvida apenas quando a temperatura atingiu o valor de 95 °C. foi considerado para a simulação de inativação do *B. coagulans* uma redução de 6 ciclos logarítmicos.

A destruição térmica do licopeno segue uma cinética de primeira ordem, que é descrita pela Equação 35.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (35)$$

na qual  $C$  é a concentração de licopeno ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) e  $k$  a constante de velocidade da reação ( $\text{min}^{-1}$ ). Esse modelo foi resolvido no tubo aplicador e no tubo de retenção assumindo como concentração de entrada no sistema 194,5 ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) (SHI et al., 2003). Para esse modelo a reação só ocorreu quando a temperatura atingiu 50 °C.

### 3.3 PARÂMETROS DO MODELO

A polpa de tomate, da marca OLE, contém tomate, açúcar e sal, foi utilizada como fluido modelo no presente estudo. A composição centesimal do produto está ilustrada na Tabela 2 (PARISOTTO, 2016).

**Tabela 2** - Composição centesimal polpa de tomate.

Componente	Fração Mássica (%)
Água	91,48± 0,04
Carboidratos	4,6± 0,1
Cinzas	1,17 ± 0,01
Proteínas	0,92 ± 0,05
Fibras	0,64 ± 0,01
Gordura	0,60 ± 0,05

Fonte: Parisotto, 2016.

A partir da composição centesimal as propriedades físicas: massa específica ( $\rho$ ), capacidade calorífica ( $C_p$ ) e condutividade térmica ( $k$ ) foram calculadas utilizando as Equações 36, 37 e 38, respectivamente (RAO, RIZVI e DATTA, 2005).

$$C_{pp} = \sum_{i=1}^I x_i C_{pi} \quad (36)$$

$$k_p = \sum_{i=1}^I x_i k_i \quad (37)$$

$$\frac{1}{\rho_p} = \sum_{i=1}^I \frac{x_i}{\rho_i} \quad (38)$$

nas quais  $x_i$  é a fração mássica de cada componente da amostra (Tabela 2) e  $C_{pi}$ ,  $k_i$  e  $\rho_i$  são o calor específico, condutividade térmica e massa específica de cada componente, conforme representado na tabelas 3.

**Tabela 3** - Propriedades termofísicas dos constituintes da polpa de tomate na temperatura de 60°C.

Componente	$c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$k$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )
Água	4197	0,6616	979
Proteína	2086	0,2492	1293
Gordura	2061	0,0171	896
Carboidrato	1657	0,2773	1573
Fibras	1951	0,2553	1951
Cinzas	1207	0,4134	2404

Fonte: Adaptado de Rao, Rizvi e Datta (2005).

As propriedades físicas da polpa de tomate utilizada no presente modelo podem ser visualizadas na tabela 4 abaixo.

**Tabela 4** - Propriedades Físicas da polpa de tomate utilizada no modelo.

Propriedade	Valor
$k$ ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	0,63
$c_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	3973,5
$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	1014,6

A polpa de tomate apresenta comportamento de fluido não newtoniano e a Equação 39 foi utilizada como modelo para descrever a viscosidade da polpa de tomate ( $\mu$ ) (BHAMIDIPATI E SINGH, 1990).

$$\mu = m(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (39)$$

na qual  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento ( $\text{s}^{-1}$ ),  $m$  é o coeficiente de consistência do fluido ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e  $n$  é o índice de comportamento de fluxo. A dependência dos parâmetros  $m$  e  $n$  com a temperatura foi considerada no modelo, sendo descrita pelas Equações 40 e 41 (BHAMIDIPATI E SINGH, 1990).

$$n = 0,3727 \times e^{(0,0094T)} \quad (40)$$

$$m = 0,5249 \times e^{(-0,054T)} \quad (41)$$

onde  $T$  é a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$  e os valores de  $m$  e  $n$  foram avaliados para a faixa de temperatura compreendida entre 20 e 100  $^{\circ}\text{C}$ . As equações (38) e (39) são válidas para uma polpa de tomate com 7  $^{\circ}\text{Brix}$ .

As propriedades dielétricas da polpa de tomate a 915 MHz também foram consideradas funções da temperatura. As relações para a constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) e para a constante de perda ( $\epsilon''$ ), foram obtidas a partir do estudo de Kumar et al. (2008). Com dados experimentais obtidos na faixa de temperatura compreendida entre 20 e 130 $^{\circ}\text{C}$ , o autor chegou as seguintes Equações (42 e 43) abaixo:

$$\epsilon' = 70,7 + 0,028 T - 0,001 T^2 \quad (42)$$

$$\epsilon'' = 28,5 + 0,1055 T + 0,0031 T^2 \quad (43)$$

na qual  $T$  é a temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ .

A constante de velocidade ( $k$ ,  $\text{min}^{-1}$ ) da reação de degradação de licopeno (Equação 35) foi modelada como uma função da temperatura de acordo com a Equação 44 (GOULA et al., 2006).

$$k = 0,121238 \cdot \exp(0,0188X) \cdot \exp\left(-\frac{2317}{T}\right) \quad (44)$$

na qual  $X$  é a umidade em base úmida,  $T$  a temperatura em K. A equação 44 é válida para  $X \geq 0,55$ .

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , do modelo não isotérmico de inativação de Weibull para *Bacillus Coagulans* em polpa de tomate, são funções da temperatura e foram descritos pelas Equações 45 e 46 (ZIMMERMANN, 2012).

$$\alpha = -0,025 T + 3,85^2 \quad (45)$$

$$\beta = 6^9 e^{(-0,22 T)} \quad (46)$$

na qual  $\beta$  é o fator de localização em s e  $\alpha$  o fator de forma adimensional.

#### 3.4 RESOLUÇÃO NUMÉRICA MODELO

O modelo matemático foi resolvido com o método dos elementos finitos utilizando o *software* comercial COMSOL Multiphysics® versão 5.3a. As equações governantes do problema eletromagnético foram resolvidas na cavidade e no aplicador utilizando o módulo *RF module* com a interface *Frequency Domain*. No aplicador e no tubo de retenção foram resolvidas: as equações de Navier-Stokes e da continuidade utilizando o módulo *CFD* com a interface *Laminar Flow*; a equação da conservação da energia utilizando o módulo *Heat Transfer* com a interface *Heat Transfer in Fluids*; e as equações de destruição térmica de *Bacillus Coagulans* e licopeno utilizando o módulo *Chemical Reaction Engineering* com a interface *Transport of Diluted Species*. Os modelos foram resolvidos de forma desacoplada.

Para reduzir os tempos de cálculo o modelo foi resolvido em duas etapas. Na primeira etapa foi calculado o aquecimento da polpa de tomate no aplicador, incluindo nesse caso: modelo eletromagnético, modelos de transporte e modelos de destruição térmica. Na segunda etapa os cálculos foram realizados apenas no tubo de retenção, incluindo nesse caso os modelos de transporte e destruição térmica. Para que isso fosse possível,



as condições de saída do aplicador foram utilizadas como condições de contorno (condição de entrada) no tudo de retenção.

O software COMSOL Multiphysics® sugere a utilização de seis elementos com função de interpolação de segunda ordem por comprimento de onda ( $\lambda$ ), descrito pela Equação 45, para obter resultados do modelo eletromagnético independentes do tamanho da malha. Utilizando a Equação (45) (SADIKU, 2012) foi calculado o comprimento da onda eletromagnética na frequência de 915 MHz, no ar, 32,68 cm e no tubo, 3,80 cm.

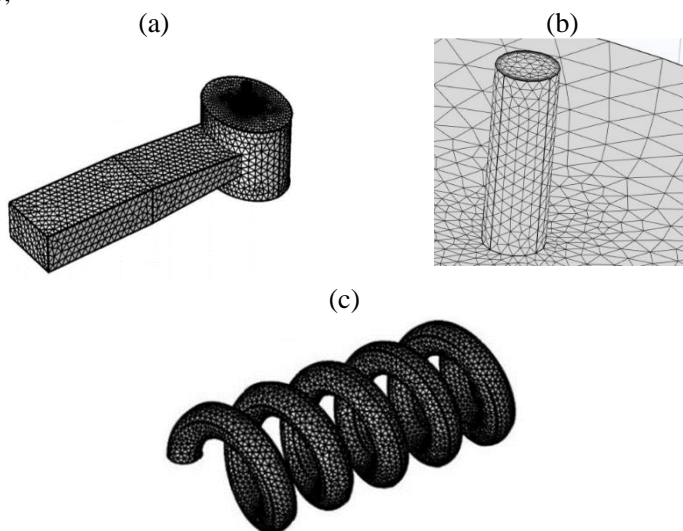
$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon'}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon'}\right)^2} + 1 \right]}} \quad (45)$$

Para o sistema 1, foi observada em simulações prévias que devido aos efeitos de mudança de fase o gradiente de temperatura no tubo foi menor que no sistema 2. Devido a esse gradiente maior do sistema 2, a convergência do modelo é dificultada, necessitando de uma malha mais refinada no tubo.

Para o sistema 1, na cavidade o tamanho máximo da malha foi de 0,02 m e no tubo foi de 0,005 m com um refino de malha na superfície. O menor tamanho de elemento na cavidade foi de 1,64 mm e no tubo foi de 0,6 mm.

Para o sistema 2 o tamanho máximo da malha no tubo foi de 0,003 m com refino da malha na superfície. O menor tamanho de elemento na cavidade foi de 1,64 mm e no tubo foi de 0,6 mm. A Figura 6 ilustra a malha utilizada na solução do modelo para o sistema 1 e 2.

**Figura 6** - Malha numérica utilizada para a resolução do modelo: (a) guia de onda, cavidade e aplicador; (b) detalhe do refino de malha no aplicador; (c) tubo de retenção;



A resolução numérica dos modelos foi em um computador Intel® Core™ i7-4790K, CPU de 4 GHz, com memória RAM de 32 GB. As Tabelas 5 e 6 resumiram o número de elementos dos modelos em função dos diâmetros da tubulação e também o tempo médio gasto nas simulações em função das vazões de polpa de tomate estudadas.

**Tabela 5** - Número de elementos e tempo médio gasto na simulação dos modelos, para todos os processos do sistema 1.

Diâmetro (m)	Sistema	N° de elementos	Vazão (L min <sup>-1</sup> )		
			0,1	1	2
			Tempo (min)		
24	Cavidade	89.977	67	100	116
	T. Reten.	73.014	31	31	31
31,8	Cavidade	119.410	81	191	206
	T. Reten.	129.330	48	48	48
39,6	Cavidade	149.286	104	241	267
	T. Reten.	206.218	69	69	69

**Tabela 6** - Número de elementos e tempo médio gasto na simulação dos modelos, para todos os processos do sistema 2.

Diâmetro (m)	Sistema	Nº de elementos	Vazão (L min <sup>-1</sup> )		
			0,1	1	2
			Tempo (min)		
24	Cavidade	293.595	61	72	96
	T. Reten.	212.443	44	56	70
31,8	Cavidade	385.829	88	101	122
	T. Reten.	373.890	71	92	108
39,6	Cavidade	512.313	122	151	188
	T. Reten.	578.937	90	113	143

Os critérios de convergência utilizados nas simulações foram tolerâncias de 0,0001 para campo elétrico, temperatura e velocidade, e 0,001 para as concentrações de licopeno e microrganismos.

### 3.4.1 Estudo de malha

Para sustentar a confiabilidade das malhas utilizadas nas simulações, foram realizadas simulações testes para analisar a não dependência da malha nos resultados obtidos. Nesse estudo de malha foi realizado duas simulações com tamanho máximo da malha no tubo aplicador de 5 mm e 3 mm para o sistema 1. Para o sistema 2, devido ao maior gradiente de temperatura, os testes realizados foram com tamanho de malha de 3 mm e 1,5 mm no tubo aplicador.

## 3.5 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

A geometria do sistema de aquecimento micro-ondas utilizado neste trabalho (Figura 4) foi baseada na pesquisa de Salvi (2008). Para a validação do modelo matemático e da solução numérica, foram utilizados os resultados experimentais e numérico obtidos por Salvi (2008). Neste trabalho, Salvi (2008), propôs um modelo matemático baseado nas equações de Maxwell, conservação da massa, do momento e da energia, para descrever o aquecimento de água com o magnetron entregando 5 kW de potência na frequência de 915 MHz. O modelo foi resolvido numericamente utilizando o *software* ANSYS Multiphysics<sup>TM</sup>, que é baseado no método dos volumes finitos. A solução numérica do modelo de destruição térmica de *Bacillus Coagulans* em polpa de tomate foi validada pela comparação dos resultados com aqueles obtidos por Zimmermann (2012).

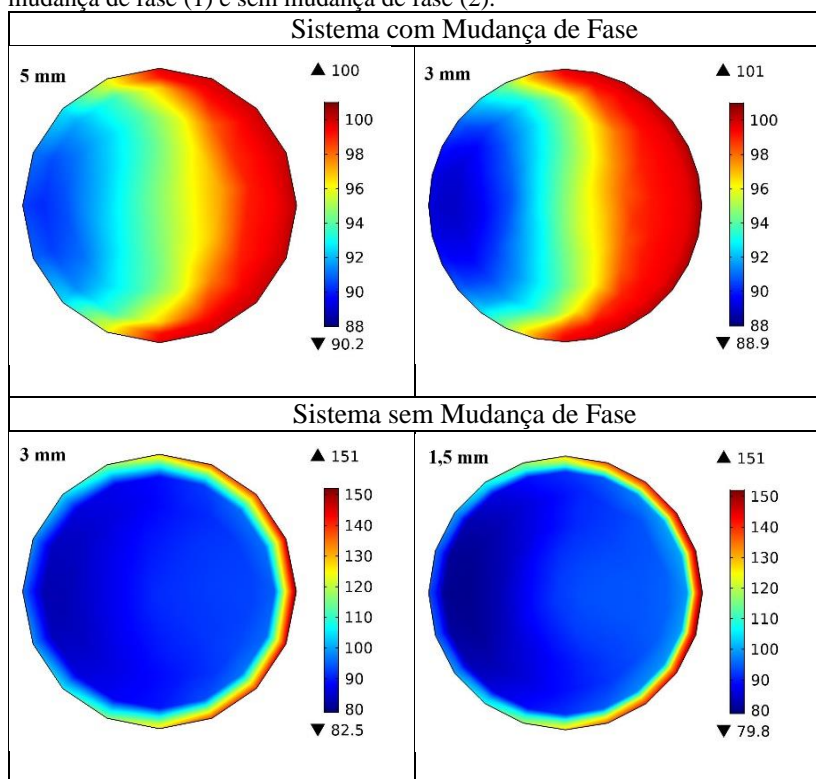


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ESTUDO DE MALHA

A figura 7 abaixo mostra a diferença de resultados quando a malha foi refinada no domínio do tubo aplicador. Para o sistema com mudança de fase a diferença do menor valor de temperatura foi de  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e do maior valor de temperatura (hot spot) foi de  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A temperatura média final do fluido na saída do tubo aplicador foi de  $95,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a malha de  $5\text{ mm}$  e de  $95\text{ }^{\circ}\text{C}$  para a malha de  $3\text{ mm}$ , uma diferença de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O tempo de simulação quando a malha foi diminuída passou de 1 hora 25 minutos e 11 segundos para 25 horas 2 minutos.

**Figura 7** - Perfil de temperatura na saída do tubo aplicador para o sistema com mudança de fase (1) e sem mudança de fase (2).



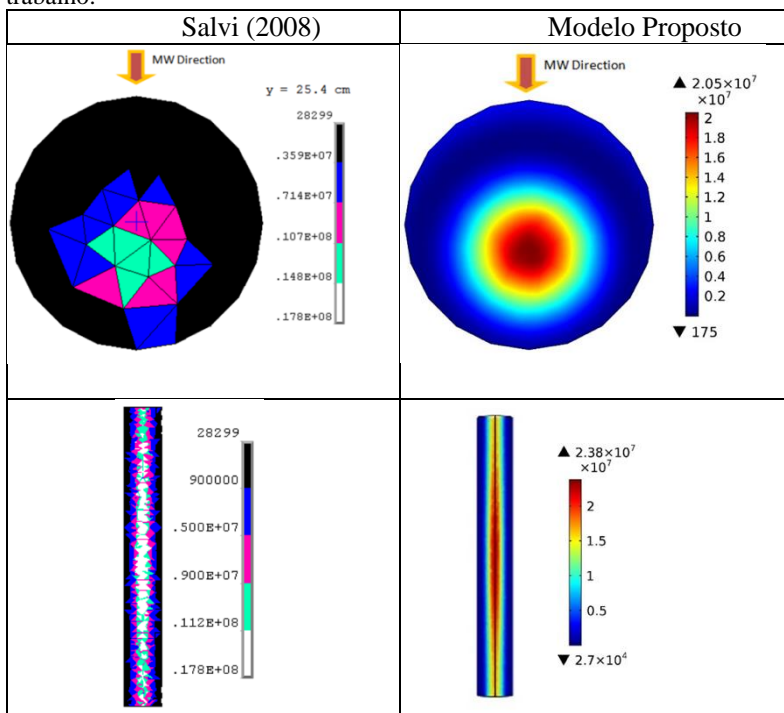
Para o sistema sem mudança de fase, o gradiente de temperatura no fluido foi maior, e consequentemente, um tamanho de malha menor foi necessário para atingir resultados independentes da malha. A figura 7 mostra um valor igual para a maior temperatura dentro do fluido (hot spot) de 151 °C e para o menor valor de temperatura uma diferença de 2,7 °C. A temperatura média final para os dois tamanhos de malha foi igual (91,9 °C). O tempo de simulação obtida aumentou de 1 hora e 36 minutos para 28 horas e 7 minutos, quando a malha diminuiu de 3 mm para 1,5 mm.

Os resultados acima justificam o uso da malha de 5 mm no tubo aplicador e de retenção para o estudo com mudança de fase e de 3 mm para o estudo sem mudança de fase. Em ambos os estudos foi utilizado uma malha de 2 cm para o domínio da cavidade e guia de onda.

## 4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A Figura 8 ilustra os perfis de potência eletromagnética dissipada na água prevista pelo modelo proposto neste estudo e pelo modelo de Salvi (2008). Nesta figura estão ilustrados os perfis de potência na seção transversal ao escoamento do fluido (na saída da cavidade) e na seção paralela ao escoamento no tubo (direção longitudinal do tubo e transversal a direção da micro-ondas, xz).

**Figura 8** - Distribuição espacial das densidades de potência dissipada ( $\text{W m}^{-3}$ ) na água previsto pelo modelo de Salvi (2008) e pelo modelo proposto no presente trabalho.



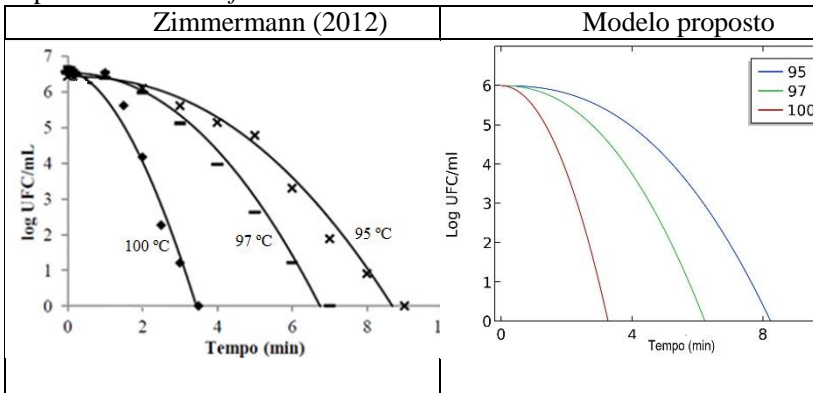
Os dois modelos previram um comportamento semelhante com uma concentração de potência dissipada próximo ao centro do duto. Os resultados obtidos por Salvi (2008), indicam uma variação no valor da potência entre  $2,83 \times 10^4$  a  $1,78 \times 10^7 \text{ W m}^{-3}$  e um total de potência dissipada de 700 W, enquanto os resultados do modelo proposto indicam uma variação entre 175 a  $2,48 \times 10^7 \text{ W m}^{-3}$  e um total de potência dissipada de 1005,5 W.

Para a vazão volumétrica de  $1,6 \text{ L min}^{-1}$  a temperatura média calculada na seção transversal ao escoamento no tubo localizada na metade da cavidade foi de  $28,40 \text{ }^\circ\text{C}$  e na saída da cavidade foi de  $32,99 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pelo modelo de Salvi (2008) os resultados foram de  $28,6 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $31,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. Os valores previstos pelo modelo proposto ficaram também muito próximos ao valor da temperatura experimental média obtida por Salvi (2009) na saída da cavidade, que foi de  $35,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . As

temperaturas obtidas estão de acordo com o balanço térmico, visto que a potência dissipada na amostra é baixa.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados do modelo de inativação térmica obtidos por Zimmermann (2012) e os resultados numéricos do mesmo modelo implementado no *software* COMSOL. Os resultados foram gerados para as temperaturas de 95, 97 e 100 °C e confirmam a adequada solução numérica do modelo no *software* de cálculo.

**Figura 9** - Comparação da resolução numérica do modelo de destruição térmica de Weibull previsto por Zimmermann (2012) e pelo modelo implementado no *software* COMSOL.



Esses resultados confirmam que as hipóteses físicas consideradas na modelagem do sistema e as condições numéricas utilizados para a resolução modelo.

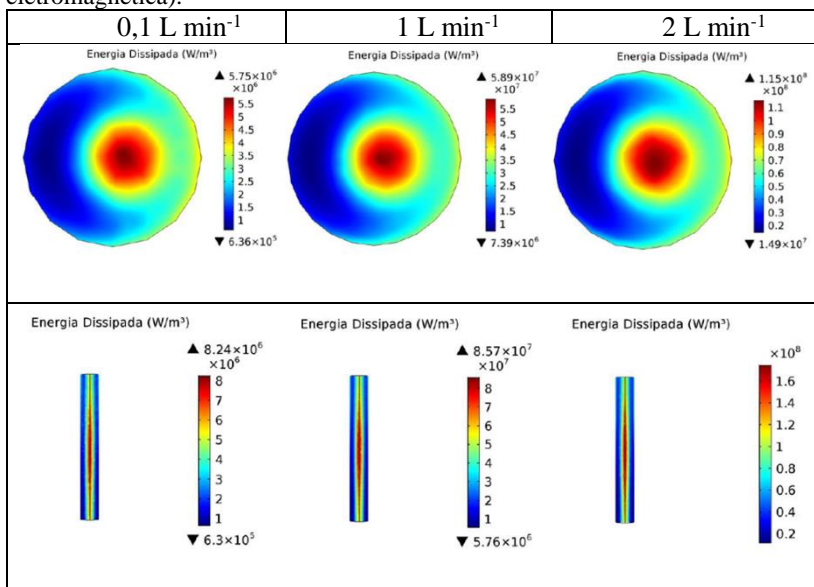
#### 4.3 POLPA DE TOMATE: APLICADOR

A Figura 10 ilustra os perfis de potência dissipada na polpa de tomate escoando no aplicador com diâmetro de 31,8 mm nas vazões de 0,1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup>, com a temperatura média de saída de 95 °C, obtidos com o modelo que inclui a mudança de fase. Para para o modelo que não inclui a mudança de fase os perfis de energia dissipada podem ser vistos na Figura 11. Os perfis de dissipação de energia são muito semelhantes, diferenciando-se apenas na intensidade da energia dissipada. Para o sistema 2 a potência dissipada foi menor que no sistema 1 e para ambos os resultados a intensidade da potência decresceu com a redução do tempo

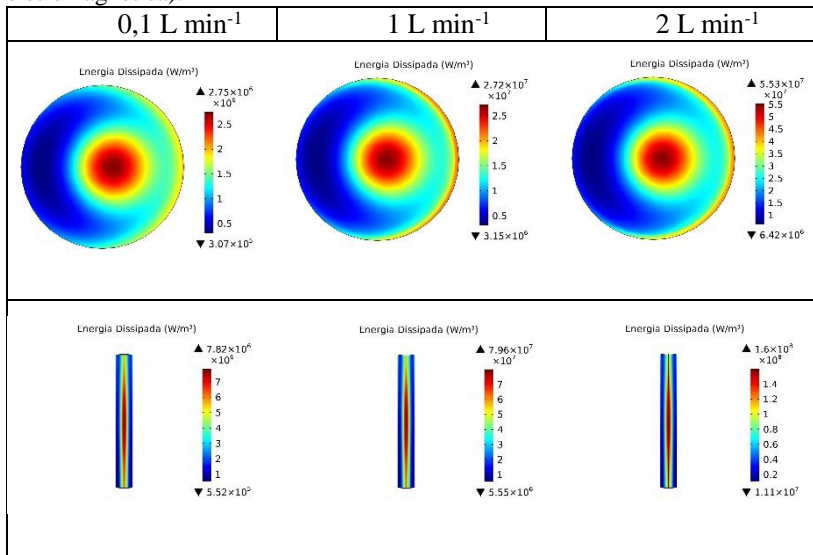


de residência. A diferença de intensidade de potência dissipada entre os dois modelos está relacionada principalmente a alteração das propriedades dielétricas da polpa de tomate. A constante dielétrica e o fator de perda são funções da temperatura e conforme será discutido subsequentemente, o modelo sem mudança de fase sofre um maior aumento de temperatura.

**Figura 10** - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $\text{W m}^{-3}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 1, no diâmetro de 31,8 mm, diferentes vazões volumétricas (0,1, 1 e 2  $\text{L min}^{-1}$ ) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de 95 °C (potência do magnetron de 630, 6483 e 13227 W, respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade e os perfis axiais foram obtidos no centro do aplicador (Transversal a direção da onda eletromagnética).

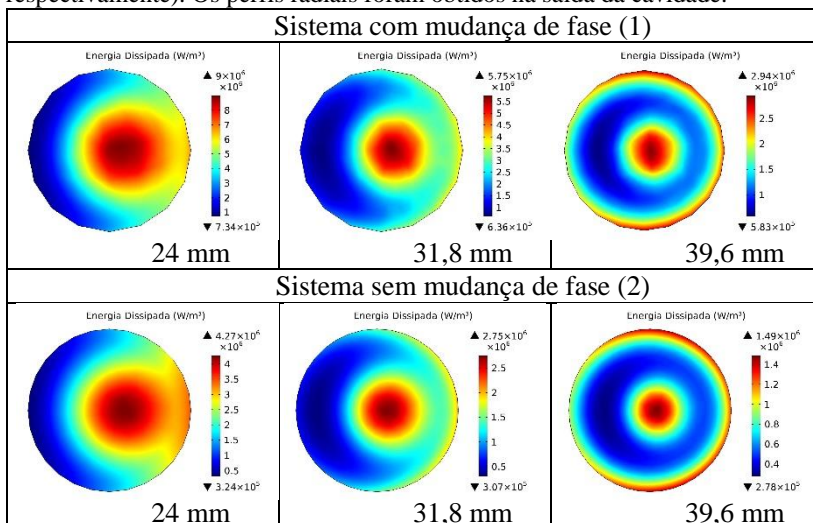


**Figura 11** - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $\text{W m}^{-3}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 2, no diâmetro de 31,8 mm, diferentes vazões volumétricas ( $0,1, 1$  e  $2 \text{ L min}^{-1}$ ) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  (potência do aquecedor de 612, 6162 e 12309 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade e os perfis axiais foram obtidos no centro do aplicador (Transversal a direção da onda eletromagnética).



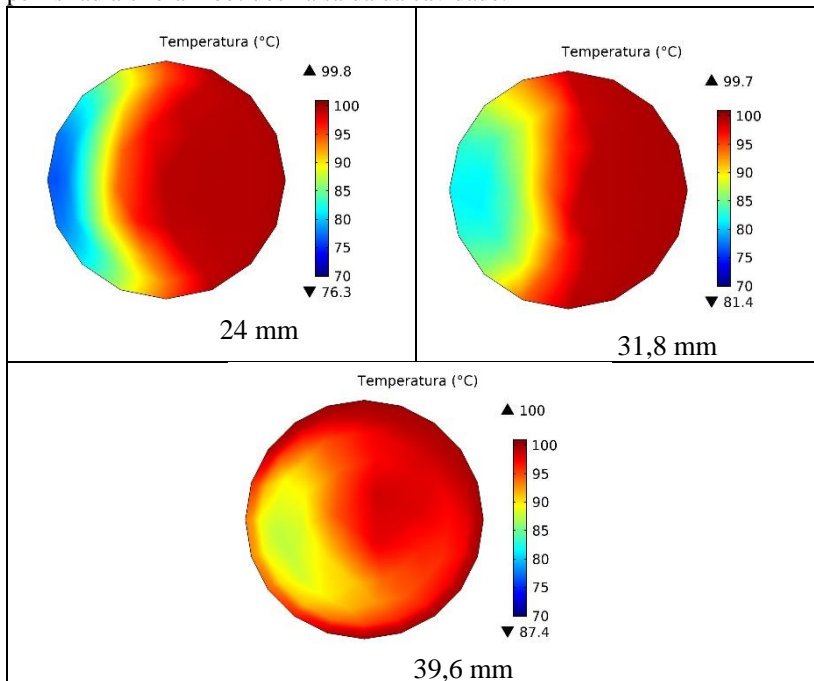
Os perfis de dissipação de potência para os Sistemas 1 e 2 foram principalmente afetados pelo diâmetro do aplicador, conforme pode ser visualizado na Figura 12. A potência dissipada na polpa de tomate é proporcional a intensidade local do campo elétrico. Este por sua vez, tem sua distribuição afetada pela geometria do sistema, frequência da onda e pela composição do fluido, assim a alteração do diâmetro do aplicador tem efeito direto sobre a distribuição de potência dissipada. Os perfis de potência ilustrados nas Figuras 10, 11 e 12 com concentração de onda próximo ao centro geométrico, são característicos de amostras com superfície curvada, comportamento este que pode ser explicado pela lei de Snell ou lei da refração da onda (ZHANG E DATTA, 2005).

**Figura 12** - Perfis de potência eletromagnética dissipada ( $\text{W m}^{-3}$ ) na polpa de tomate para os Sistema 1 e 2, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$  para diferentes diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$  (potência do aquecedor de 732, 631 e 505 W para o sistema 1 e 733, 612 e 502 W para o sistema 2 respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.



Na Figura 13 estão ilustrados os perfis de temperatura, para o sistema 1 na saída do tubo aplicador, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$  para os diferentes diâmetros de aplicador. Nesta figura pode-se observar que a amplitude de temperatura (diferença entre temperatura máxima e temperatura mínima) diminuiu com o aumento do diâmetro do tubo. Isso pode ser explicado pela diferença de distribuição da energia dissipada na amostra. A menor amplitude, cerca de  $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , foi observada no diâmetro de 39,6 mm, isso se deve a distribuição do campo elétrico, com concentração de potência dissipada no centro e próximo a superfície do duto (Figura 12).

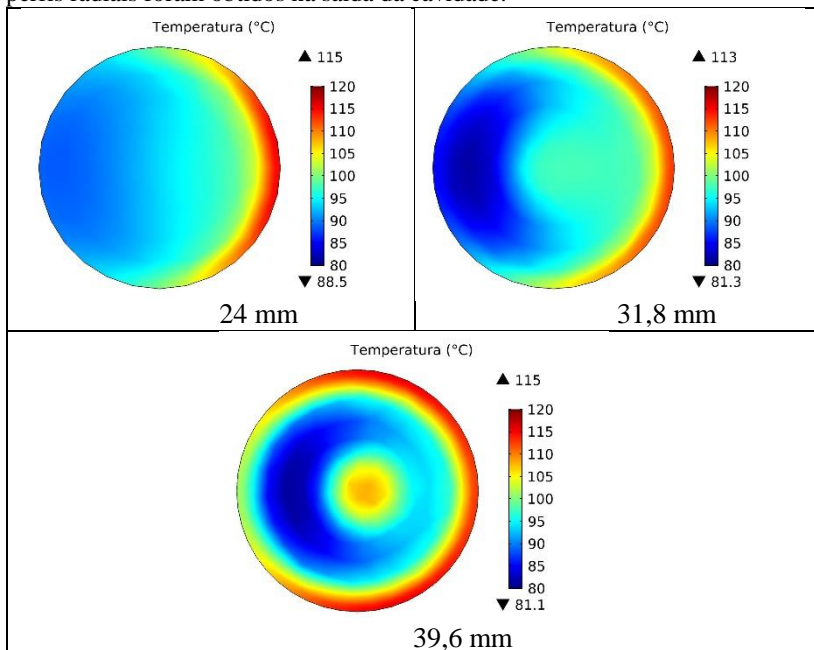
**Figura 13** - Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 1, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$ , para diferentes diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de  $95 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 732, 631 e 505 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.



Na Figura 14 estão ilustrados os perfis de temperatura, para o sistema 2 na saída do tubo aplicador na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$  para os diferentes diâmetros de aplicador. É possível observar que a amplitude de temperatura aumentou com o aumento do diâmetro do tubo, comportamento inverso ao sistema 1. As diferentes amplitudes são resultado da diferente distribuição de energia dissipada na amostra para cada diâmetro estudado (Figura 12). Já o comportamento inverso em relação ao sistema 1, onde a amplitude de temperatura diminui com aumento do diâmetro, ocorre em virtude da ausência da mudança de fase.

No sistema 2 toda potência dissipada é convertida diretamente em calor sensível resultando no aumento da temperatura, enquanto no sistema 1 parte do calor fornecido ao alimento é convertido em calor latente.

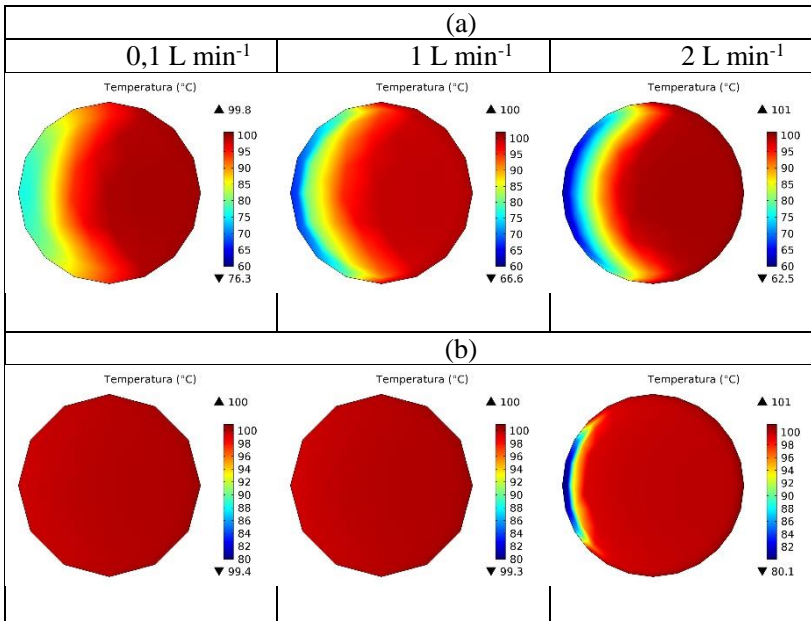
**Figura 14** - Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 2, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$ , para diferentes diâmetros do aplicador (24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm) e na condição de processo que deve garantir uma temperatura média de saída de  $95^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 733, 612 e 502 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.



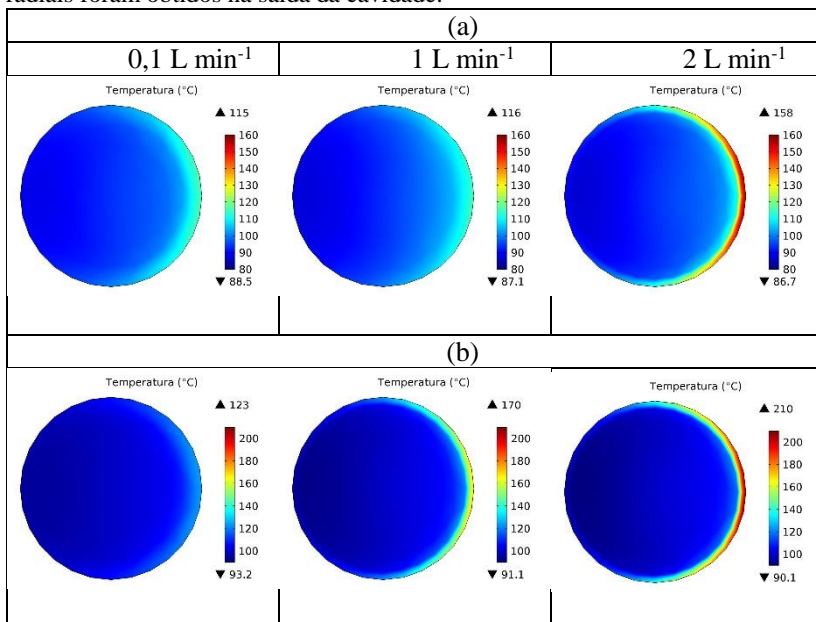
Zhu, Kuznetsov e Sandeep, (2007) também constataram a forte influência do diâmetro do tubo, diâmetro da cavidade e posição do tubo no interior da cavidade na absorção e distribuição da energia e consequentemente no perfil de temperatura

Na Figura 15 e 16 estão ilustrados os perfis de temperatura para os sistemas com mudança de fase (1) e sem mudança de fase (2) na saída do tubo aplicador com diâmetro de 24 mm nas diferentes vazões de fluido. Nestas condições, observa-se o aumento da amplitude de temperatura com o aumento da vazão para os dois sistemas. Esse comportamento pode estar relacionado com o menor tempo de residência no fluido, ou seja, a energia dissipada em um ponto tem menos tempo para ser transferida (condução) para as regiões mais frias do líquido. Esse comportamento também ocorre para os processos 1 e 2, com tubos de 31,8 mm e 39,6 mm de diâmetro.

**Figura 15** - Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 1, no diâmetro do aplicador de 24 mm, nas vazões de 0,1, 1 e 2  $\text{L min}^{-1}$  e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de (a) de  $95^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 732, 7380 e 15073 W respectivamente) e (b) de  $100^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 1142, 11378 e 22383 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.



**Figura 16** - Perfis de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) na polpa de tomate para o Sistema 2, no diâmetro do aplicador de 24 mm, nas vazões de 0,1, 1 e 2  $\text{L min}^{-1}$  e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de (a) de  $95^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 733, 7342 e 14714 W respectivamente) e (b) de  $100^{\circ}\text{C}$  (potência do aquecedor de 793, 7935 e 15897 W respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.

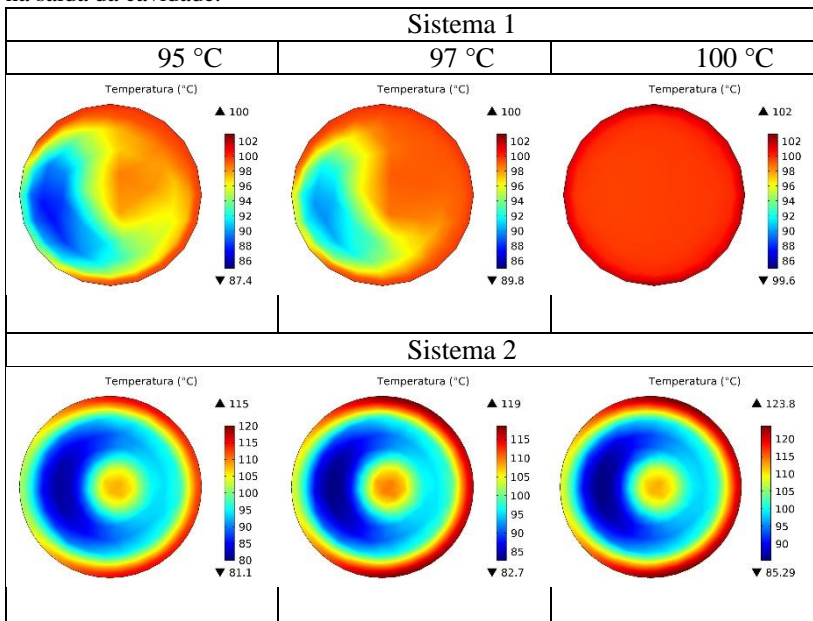


A Figura 17 ilustra os perfis de temperatura na saída do aplicador para o sistema 1 e 2, com diâmetro de aplicador de 39,6 mm, de 0,1  $\text{L min}^{-1}$  e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de  $95^{\circ}\text{C}$ ,  $97^{\circ}\text{C}$  e  $100^{\circ}\text{C}$ . Observa-se os maiores gradientes de temperatura para o sistema 2. Essa resposta é resultado da negligência da mudança de fase no modelo.

A partir dos resultados do sistema 1 ilustrados na Figura 17 pode-se também destacar que: quando a condição de processo deve garantir que a temperatura média de saída atinja  $97^{\circ}\text{C}$  a amplitude de temperatura é menor que aquela observada para a condição de  $95^{\circ}\text{C}$  e maior que a observada para a condição de  $100^{\circ}\text{C}$ . A explicação para tal diminuição da amplitude de temperatura ocorre pois a temperatura de ebulição da polpa de tomate é de aproximadamente  $101,4^{\circ}\text{C}$ . Dessa maneira quando se aumentou a potência para atingir temperaturas maiores, uma maior

quantidade do fluido entrou em ebulição não havendo aumento de temperatura (101,4 °C) no ponto de hot spot.

**Figura 17** - Perfis de temperatura (°C) na polpa de tomate para os Sistemas 1 e 2, no diâmetro do aplicador de 39,6 mm, na vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e nas condições de processo que devem garantir uma temperatura média de saída de 95 °C, 97 °C e 100 °C (potência do aquecedor de 505, 521, e 744 W para o sistema 1 e 502, 515 e 537 W para o sistema 2 respectivamente). Os perfis radiais foram obtidos na saída da cavidade.



#### 4.4 POLPA DE TOMATE: TUBO DE RETENÇÃO

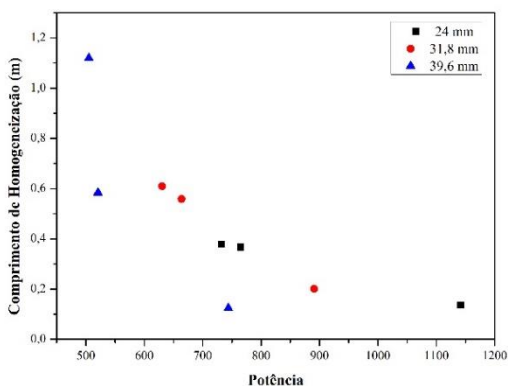
Ao sair do sistema de aquecimento com micro-ondas a temperatura do fluido não é homogênea (Figuras 13 a 17). O tubo de retenção acoplado tem a função de homogeneizar essa temperatura e garantir que a polpa de tomate permaneça o tempo necessário para assegurar a qualidade microbiológica do alimento.

Conforme discutido no item 4.3 o perfil de temperatura na saída do aplicador depende da vazão de fluido, dimensões do tubo e condição de temperatura média desejada na saída. Na Figura 18 estão ilustrados os valores de comprimento do tubo de retenção, para o sistema 1, até a temperatura do fluido se tornar homogênea em função da potência micro-



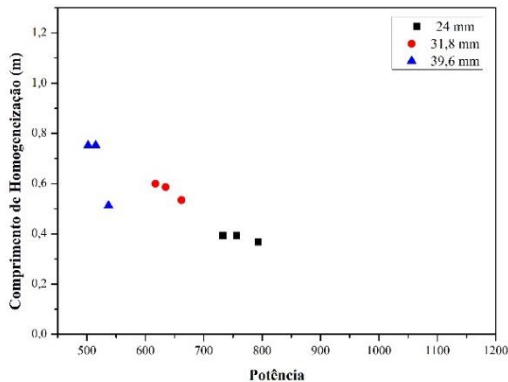
ondas necessária para atingir as temperaturas desejadas de 95, 97 e 100 °C ao sair do aplicador. Pode-se observar que a medida que o diâmetro do tubo aumenta também o comprimento do tubo helicoidal no qual a temperatura torna-se homogênea. Com aumento do diâmetro, a relação entre as forças de inércia e forças viscosas do escoamento (número de Reynolds) diminui, dessa forma a formação do escoamento secundário, induzido pela geometria helicoidal é amortecido. Assim, o fluido leva um caminho mais longo para ter sua temperatura homogeneizada. Além disso, pode-se observar que com o aumento da potência do aquecedor, para o mesmo diâmetro (Figura 17), o comprimento de homogeneização diminuiu. Isso está relacionado a diminuição da amplitude de temperatura com aumento da potência.

**Figura 18** - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 1, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$ , diâmetros de 24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm e nas condições de temperatura média de saída do aplicador de 95, 97 e 100 °C, em função da potência gerada pelo magnetron.



A Figura 19 ilustra os resultados obtidos com o sistema 2. Observa-se que valores do comprimento até a homogeneização completa do fluido ficaram bem próximos (para um dado diâmetro de tubo) quando comparados ao sistema 1. No sistema 2 apesar de o gradiente de temperatura na saída do aplicador aumentar com o aumento da potência (Figura 17) para o mesmo diâmetro, o comprimento de homogeneização se mantém constante ou diminui. Isso pode ser explicado pela diminuição da viscosidade com aumento da temperatura facilitando a transferência de calor por advecção.

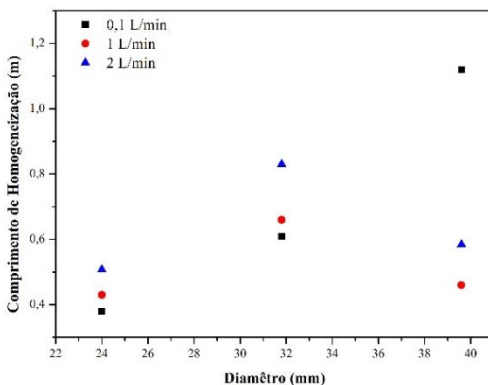
**Figura 19** - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 2, na vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$ , diâmetros de 24 mm, 31,8 mm e 39,6 mm e nas condições de temperatura média de saída do aplicador de 95, 97 e  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , em função da potência gerada pelo magnetron.



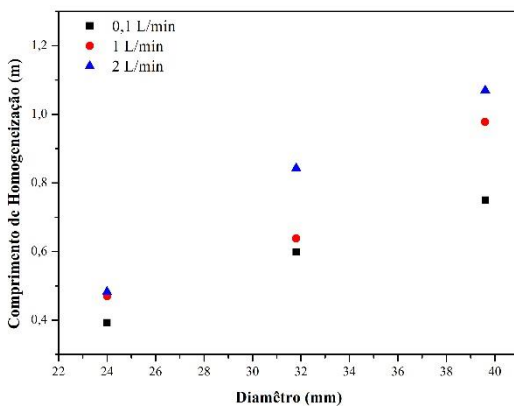
Na Figura 20 estão ilustrados os resultados obtidos com o sistema 1 para o comprimento de homogeneização em função do diâmetro do tubo. O comprimento do tubo de retenção até o ponto de homogeneização da temperatura aumentou, para os diâmetros de 24 mm e 31,8 mm, quando se aumentou a vazão. Para o diâmetro de 39,6 mm foi observado um maior comprimento para a menor vazão. Esse comportamento pode ser explicado pela distribuição da energia dissipada no aplicador com diâmetro de 39,6 mm (Figura 12), o qual leva uma menor amplitude de temperatura na saída, conforme previamente discutido.

Para o sistema 2 os resultados estão ilustrados Figura 21 e quando comparado ao sistema 1 (Figura 20) foi verificado que os valores dos comprimentos de homogeneização foram maiores. Isso pode ser explicado pela maior amplitude de temperatura na saída do aplicador

**Figura 20** - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 1, na condição de temperatura média de saída do aplicador de 95 °C e para as vazões de 0,1 L min<sup>-1</sup>, 1 L min<sup>-1</sup> e 2 L min<sup>-1</sup> em função do diâmetro do tubo.



**Figura 21** - Comprimento do ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção para o sistema 2, na condição de temperatura média de saída do aplicador de 95 °C e para as vazões de 0,1 L min<sup>-1</sup>, 1 L min<sup>-1</sup> e 2 L min<sup>-1</sup> em função do diâmetro do tubo.



#### 4.4.1 Homogeneidade em função da concentração de sólidos solúveis

Uma análise sobre a capacidade de mistura do fluido foi realizada com polpas de tomate de diferentes concentrações (Figura 7). Para essa análise foi utilizado o modelo que não inclui a mudança de fase (Sistema 2).

**Tabela 7** - Propriedades físicas das polpas de tomate em diferentes concentrações de sólidos solúveis.

Concentração de Sólidos Solúveis	Propriedades				
	$\rho^1$	$k^2$	$C_p^3$	$m^4$	$n^5$
7 °Brix	1014	0,627	3973	Eq. 40	Eq. 41
23 °Brix	1190	0,534	3394	34	0,52
29 °Brix	1331	0,471	3372	208	0,27

1-Densidade ( $\text{kg m}^{-3}$ )

2-Condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

3-Calor Específico ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )

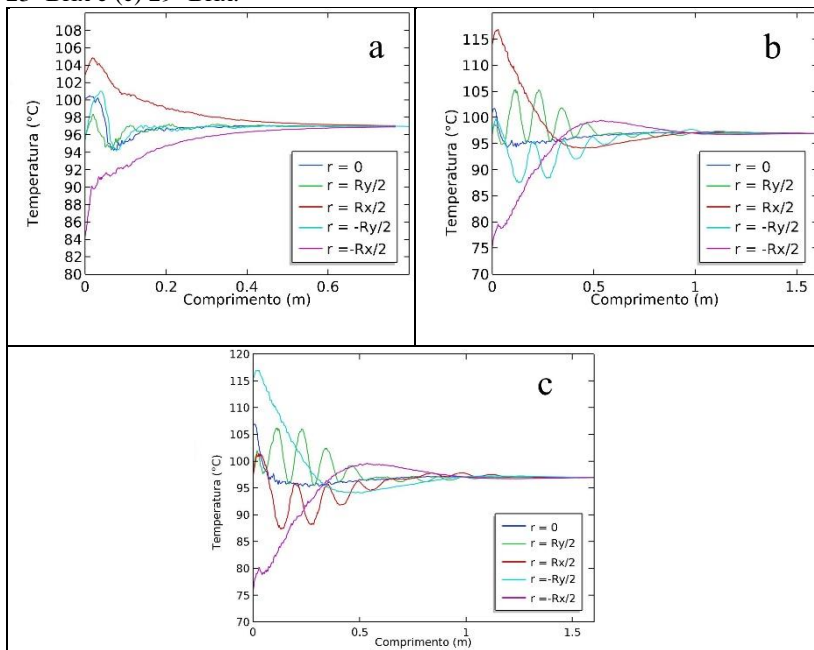
4-Coeficiente de consistência de fluxo ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ )

5- Índice de comportamento de fluxo (adimensional)

Fonte: RAO, RIZVI e DATTA, (2005).

Na Figura 22 foram apresentados os perfis de temperatura no tubo de retenção na direção do escoamento para o tubo com diâmetro de 31,8 mm para a vazão de  $2 \text{ L min}^{-1}$  e temperatura média de saída do aplicador de  $97^\circ\text{C}$ , para as polpas com diferentes concentrações. Os perfis de temperatura foram plotados no centro do duto, e na metade do raio nas direções x e y ( $\pm \frac{R_x}{2}$  e  $\pm \frac{R_y}{2}$ ), onde R é o raio do tubo.

**Figura 22** - Perfis de temperatura ao longo do tubo de retenção em diferentes posições (1 perfil no centro geométrico do tubo e 4 perfis em diferentes posições da superfície do tubo). Tubo de retenção de 31,8 mm de diâmetro, vazão 2 L min<sup>-1</sup>, temperatura de projeto de 97 °C e (a) viscosidade para a polpa com 7 °Brix, (b) 23 °Brix e (c) 29 °Brix.



Uma forma quantitativa para avaliar a presença de escoamento secundário em um tubo helicoidal é através do cálculo do número de Dean. O número de Dean é definido como  $N_{De} = Re_e \sqrt{D_{tubo}/D_{helicoides}}$ , na qual  $Re_e$  é o número de Reynolds;  $D_{tubo}$  é o diâmetro do tubo e  $D_{helicoides}$  é o diâmetro de curvatura do espiral (DEAN, 1927).

Na Tabela 8 estão sumarizados os resultados de comprimento de homogeneização da temperatura para as diferentes viscosidades de pasta de tomate. Segundo Dean (1927) escoamentos com  $N_{De}$  menor que 60 indicam um fluxo completamente unidirecional sem a presença de escoamento secundário, por isso, nessa tabela, as polpas de tomate com concentrações de 23 e 29 °Brix apresentam comprimentos de homogeneização maior que na concentração de 7 °Brix.

**Tabela 8** - Comprimento de homogeneização, número de Reynolds e número de Dean para o sistema com vazão de 2 L min<sup>-1</sup>, diâmetro de tubo de 31,8 mm e temperatura de processo de 97 °C.

Concentração (°Brix)	Re	Dean	Comprimento de Homogeneização (m)
7	384	342	0,84
23	0,113	0,101	1,51
29	0,016	0,014	1,56

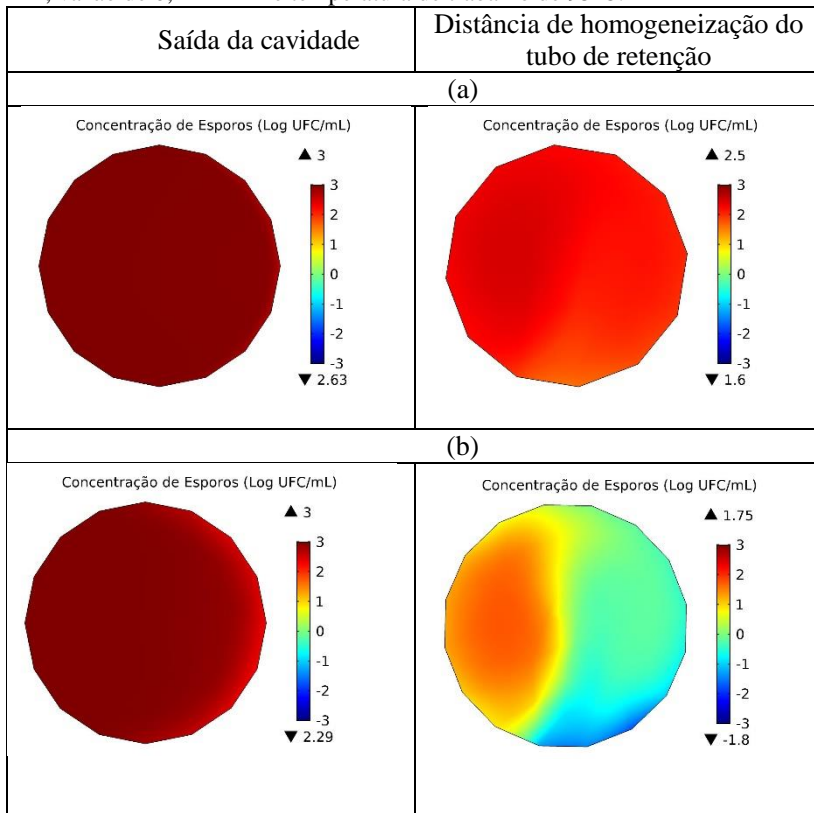
O aumento da concentração de sólidos solúveis acarreta em um aumento das forças viscosas que diminuem a intensidade do escoamento secundário no interior do tubo de retenção. Também ocorre a diminuição da condutividade térmica (tabela 7) que diminui a transferência de calor no interior do fluido e gera nesse caso, maiores amplitudes de temperatura na saída do aquecedor, e necessita mais tempo para alcançar o equilíbrio térmico no tubo de retenção.

Essa análise permitiu entender a homogeneização da temperatura do fluido utilizando-se de tubos helicoidais como constatado por Tuta e Palazoğlu, (2017), Koutsky e Adler, (1964) e Coronel et al., (2005).

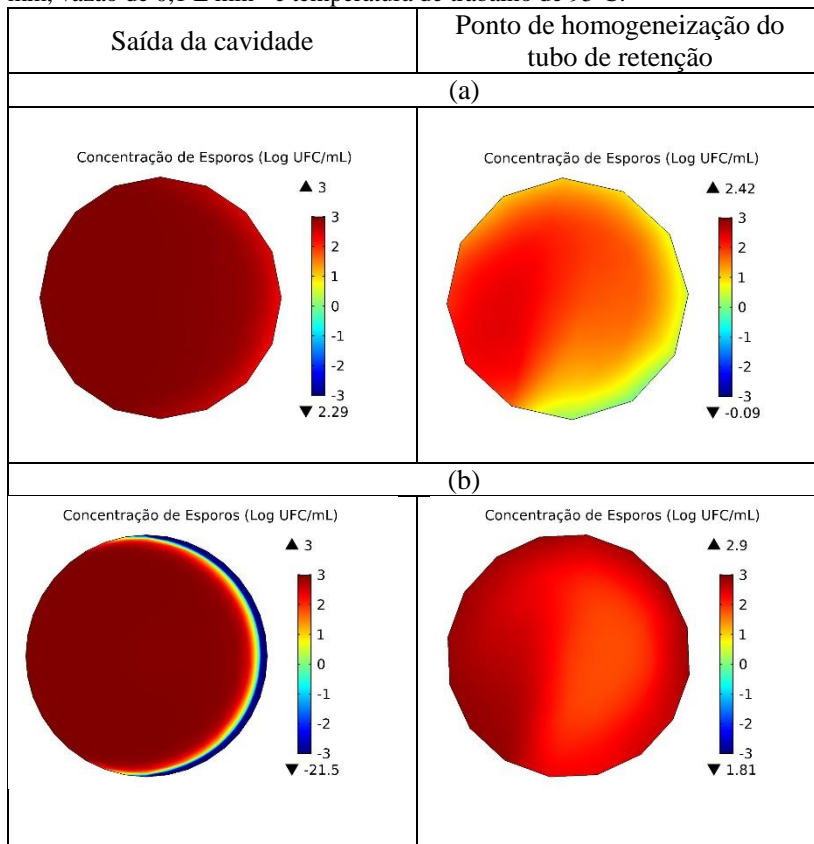
#### 4.5 POLPA DE TOMATE: DESTRUÇÃO TÉRMICA DE *B. COAGULLANS*

As Figura 23 e 24 ilustram os perfis de concentração de células de *B. Coagullans* obtidos pelos sistemas 1 e 2, respectivamente. Os resultados apresentados são na saída do tubo aplicador na cavidade de micro-ondas e na posição do tubo de retenção em que a temperatura do fluido é homogênea. Conforme esperado, as maiores reduções decimais e os maiores gradientes de concentração foram obtidos pelo modelo sem mudança de fase.

**Figura 23** - Perfis de concentração de células de micro-organismos (Log UFC mL<sup>-1</sup>) para o sistema 1, no tubo aplicador na saída da cavidade e no ponto de homogeneização do tubo de retenção. (a) tubo com diâmetro de 24 mm, vazão 0,1 L min<sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C; (b) tubo com diâmetro de 31,8 mm, vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C.



**Figura 24** - Perfis de concentração de células de micro-organismos (Log UFC mL<sup>-1</sup>) no sistema 2, no tubo aplicador na saída da cavidade e no ponto de homogeneização do tubo de retenção. (a) tubo com diâmetro de 24 mm, vazão 0,1 L min<sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C; (b) tubo com diâmetro de 31,8 mm, vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e temperatura de trabalho de 95°C.



Nas Tabelas 9 e 10 estão ilustrados os resultados de comprimento de tubo de retenção para obter um tratamento térmico equivalente a seis reduções logarítmicas na concentração de *B. Coagullans* para os sistemas 1 e 2, respectivamente. É possível constatar que o aumento da vazão da polpa de tomate resulta no aumento do comprimento do tubo de retenção, enquanto o aumento da temperatura de processo e do diâmetro do tubo tem resposta inversa para os dois modelos (sistema 1 e 2).

Para o sistema 1, o aumento em 5 °C na temperatura média final resultou em uma redução de cerca de 55,3 % no comprimento dos tubos



para o diâmetro de 24 mm, 64,7 % para o diâmetro de 31,8 mm e 63,1 % para o diâmetro de 39,6 mm em todas as vazões. Somente para a vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e diâmetro de 39,6 mm houve uma diminuição de 50 % no comprimento do tubo de retenção. Quando se aumentou o diâmetro do tubo de 24 mm para 39,6 mm na temperatura de projeto de 95 °C, houve uma diminuição de 55,4 %, 58,4 % e 62,2 % para as vazões de 0, 1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup>, respectivamente. Para a temperatura de projeto de 100 °C, houve uma diminuição de 55 %, 64,3 % e 66,11 % para as vazões de 0,1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup>, respectivamente. Para a temperatura de projeto de 97 °C, houve uma diminuição de 27,7 %, 56,3 % e 61,9 % para as vazões de 0, 1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para o sistema 2, o aumento em 5 °C na temperatura média final resultou em uma redução de cerca de 59 % no comprimento dos tubos para o diâmetro de 24 mm, 58,3 % para o diâmetro de 31,8 mm e 61,1 % para o diâmetro de 39,6 mm em todas as vazões. Somente para a vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> e diâmetro de 39,6 mm houve uma diminuição de 46,1 % no comprimento do tubo de retenção. Quando se aumentou o diâmetro do tubo de 24 mm para 39,6 mm na temperatura de projeto de 95 °C, houve uma diminuição de 34,7 %, 55 % e 60,4 % para as vazões de 0, 1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup> respectivamente. Para a temperatura de projeto de 97 °C, houve uma diminuição de 58,7 %, 58,8 % e 65,4 % para as vazões de 0, 1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup> respectivamente. Para a temperatura de projeto de 100 °C, houve uma diminuição de 17,4 %, 58,9 % e 59,6% para as vazões de 0, 1, 1 e 2 L min<sup>-1</sup> respectivamente.

**Tabela 9** - Comprimento do tubo de retenção (*L*) para realizar seis reduções decimais na concentração de *B. Coagullans* para o sistema 1.

Diâmetro (mm)	Vazão (L/min)	T (°C)	L (m)	T (°C)	L (m)	T (°C)	L (m)
24	0,1	95,8	1,66	97,4	1,3	99,9	0,82
	1	95,2	17,96	97,4	13,42	99,9	7,71
	2	95,1	36,57	97,1	27,85	99,7	15,23
31,8	0,1	95,3	1,52	7,3	1,07	99,8	0,48
	1	95,1	10,78	96,9	8,17	99,8	4,07
	2	95,2	21,02	96,9	15,91	99,9	7,66
39,6	0,1	95,0	0,74	96,9	0,94	99,9	0,37
	1	95,5	7,47	97,4	5,87	9,9	2,75
	2	95,0	13,95	97,4	10,62	99,9	5,16

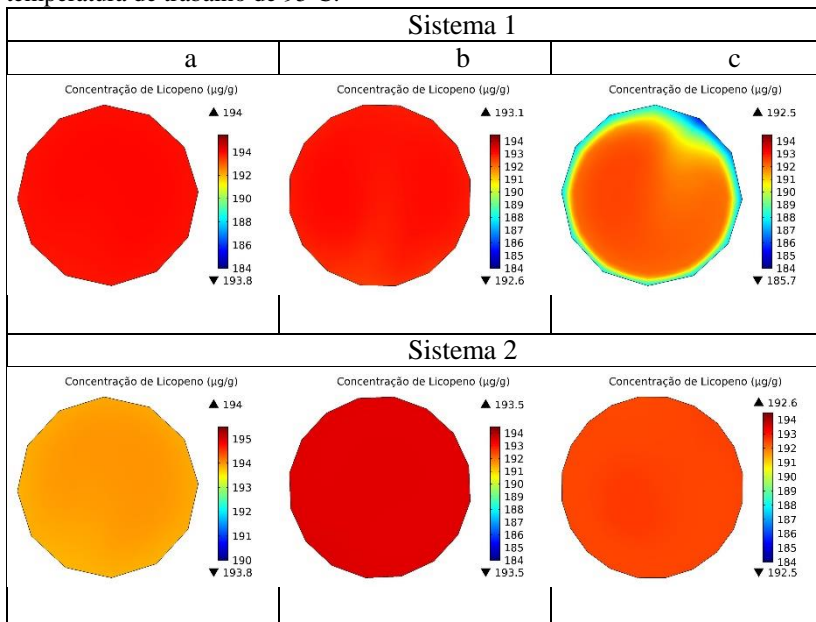
**Tabela 10** - Comprimento do tubo de retenção (*L*) para realizar seis reduções decimais na concentração de *B. Coagullans* para o sistema 2.

Diâmetro (mm)	Vazão (L/min)	T (°C)	L (m)	T (°C)	L (m)	T (°C)	L (m)
24	0,1	95	2,16	97	1,67	100	0,92
	1	95	19,50	97	14,62	100	7,88
	2	95	38,20	97	29,00	100	15,28
31,8	0,1	95	1,63	97	1,26	100	0,74
	1	95	11,48	97	8,70	100	4,64
	2	95	22,40	97	16,75	100	8,69
39,6	0,1	95	1,41	97	0,69	100	0,76
	1	95	8,77	97	6,02	100	3,24
	2	95	15,12	97	10,40	100	6,17

#### 4.6 POLPA DE TOMATE: DESTRUIÇÃO TÉRMICA DE LICOPENO

A Figura 25 ilustra os perfis de concentração de licopeno no ponto no qual a temperatura do fluido no tubo de retenção é homogênea, para os sistemas 1 e 2. De maneira geral o licopeno se mostrou estável as temperaturas aplicadas, o que justifica a pequena degradação desse carotenoide durante o processamento térmico. Além disso, a elevada velocidade de aumento da temperatura e os reduzidos tempos de exposição do produto, também são responsáveis pela pequena degradação observada. Os resultados apresentados nas tabelas 11 e 12 subsidiam esta afirmação.

**Figura 25** - Perfis de concentração de licopeno ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ), nos sistemas 1 e 2, no ponto de homogeneização da temperatura no tubo de retenção, para dos diâmetros de tubo de (a) 24 mm e (b) 31,8 mm e (c) 39,6 mm, vazão de  $0,1 \text{ L min}^{-1}$  e temperatura de trabalho de  $95^\circ\text{C}$ .



Nas Tabelas 11 e 12 estão apresentadas as reduções percentuais de licopeno nas diferentes condições de processo em um tratamento térmico equivalente a seis reduções decimais na concentração de *B. coagulans*, para o sistema 1 e sistema 2.

**Tabela 11** - Porcentagem de redução da concentração de licopeno (Li) após o tratamento térmico para atingir sei reduções decimais na concentração de *B. coagulans*, para o sistema 1.

Vazão (L/min)	Diâmetro do Tubo (mm)					
	24		31,8		39,6	
	T (°C)	Li (%)	T (°C)	Li (%)	T (°C)	Li (%)
0,1	95,8	1,43	95,3	1,86	94,0	4,52
	97,4	1,08	97,3	1,49	96,8	1,32
	99,9	0,69	99,8	1,01	99,9	0,91
1	95,2	1,05	95,1	1,09	95,5	1,09
	97,4	0,82	96,9	0,86	97,4	0,91
	99,9	0,45	99,8	0,50	99,9	0,50
2	95,1	1,00	95,2	1,04	95,0	1,03
	97,1	0,78	96,0	0,80	97,1	0,87
	99,7	0,40	99,8	0,45	99,9	0,45

**Tabela 12** - Porcentagem de redução da concentração de licopeno (Li) após o tratamento térmico para atingir sei reduções decimais na concentração de *B. coagulans*, para o sistema 2.

Vazão (L/min)	Diâmetro do Tubo (mm)					
	24		31,8		39,6	
	T (°C)	Li (%)	T (°C)	Li (%)	T (°C)	Li (%)
0,1	95	1,30	95	1,49	95	2,00
	97	1,07	97	1,23	97	1,08
	100	0,68	100	0,81	100	1,39
1	95	1,05	95	1,08	95	1,29
	97	0,82	97	0,86	97	0,98
	100	0,45	100	0,50	100	0,60
2	95	0,99	95	1,04	95	1,14
	97	0,78	97	0,81	97	0,90
	100	0,40	100	0,46	100	0,59

Para os sistemas e processos simulados a degradação de Licopeno foi menor que 2 % exceto para a vazão de 0,1 L min<sup>-1</sup> no diâmetro de 39,6 mm e na temperatura de 95 °C para o sistema 1, na qual se observou uma degradação de 4,52 %. Segundo Shi (2003) para temperaturas abaixo de 100 °C o licopeno é relativamente estável. Miki and Akatsu (1970) observaram uma perda de 1-2% de licopeno no suco de tomate quando aquecido a 100 °C por 7 minutos. Zanoni, Peri, Nani, and Lavelli (1999), durante a secagem de tomates cortados pela metade constataram uma perda de 10% após a secagem a 110 °C e nenhuma perda quando seco a 80 °C.

#### 4.7 CONSUMO DE ENERGIA

Uma análise simplificada do consumo de energia do processo foi realizada contabilizando a potência gerada pelo magnétron para atingir as temperaturas de processo desejadas (95, 97 e 100 °C) nas diferentes configurações e condições de operação do sistema. Nesta análise o consumo de energia para promover o escoamento do fluido na tubulação foi desconsiderado. Os resultados estão apresentados na Tabela 13 e 14.

**Tabela 13** - Potência gerada entregue na cavidade para promover o aquecimento desejado da polpa de tomate no sistema 1.

Vazão (L/min)	Diâmetro do Tubo (mm)					
	24		31,8		39,6	
	T (°C)	P (W)	T (°C)	P (W)	T (°C)	P (W)
0,1	95,8	731,83	95,3	630,47	94,0	505,02
	97,4	764,62	97,3	663,83	96,9	520,64
	99,9	1141,7	99,9	890,94	99,9	743,72
1	95,2	7379,8	95,1	6483,1	95,5	5144,8
	97,4	7806,7	96,9	7102,0	97,4	5514,0
	99,9	11378	99,8	8885,1	99,9	7399,1
2	95,1	15073	95,2	13227	95,0	10366
	97,1	16171	96,0	13622	97,1	10992
	99,7	22383	99,8	17560	99,9	14751

**Tabela 14** - Potência gerada entregue na cavidade para promover o aquecimento desejado da polpa de tomate no sistema 2.

Vazão (L/min)	Diâmetro do Tubo (mm)					
	24		31,8		39,6	
	T (°C)	P (W)	T (°C)	P (W)	T (°C)	P (W)
0,1	95	733	95	618	95	502
	97	758	97	635	97	515
	100	793	100	662	100	537
1	95	7342	95	6162	95	4982
	97	7581	97	6343	97	5120
	100	7935	100	6608	100	5322
2	95	14714	95	12309	95	9946
	97	15188	97	12664	97	10219
	100	15897	100	13199	100	10624

Os resultados mostrados nas Tabelas 13 e 14 indicam que as quantidades requeridas pelo magnetron para realizar o aquecimento da polpa de tomate foram afetadas pela vazão de escoamento, como era de

se esperar, e pelo diâmetro do tubo. Neste segundo, observou-se que quanto menor a relação de tamanho da tubulação pelo tamanho de carcaça, maior foi a quantidade de energia eletromagnética convertida em calor. Esse comportamento também foi relatado por Teleken (2017) através de observações experimentais e de simulação numérica no aquecimento de cargas de água em um forno de micro-ondas doméstico.

Para a simulação realizada com o tubo de 24 mm de diâmetro a energia útil aproveitada pelo fluido, ou seja, a relação entre a energia dissipada no fluido e a energia fornecida pelo forno (tabelas 13 e 14), foi de 64 % em média. Para o diâmetro de 31,8 mm foi de 76,3 % e para o diâmetro de 39,6 mm foi de 94,6% em média para os sistemas 1 e 2. Esse resultado indica que geometria (diâmetro e comprimento do tubo, tamanho da carcaça) é o principal parâmetro que influenciou na quantidade de energia útil dissipada e energia total requerida. Outro resultado esperado foi a maior energia requerida pelo sistema 1, uma vez que o modelo contempla a mudança de fase.

## 5 CONCLUSÃO

---

O modelo matemático tridimensional de tratamento térmico de polpa de tomate por micro-ondas proposto foi resolvido numericamente pelo método dos elementos finitos e validado a partir de resultados da literatura. Concluiu-se que o modelo proposto foi simulado com sucesso usando um pacote de software COMSOL Multiphysics por acoplamento iterativo de eletromagnetismo de alta frequência, fluxo de fluidos não newtonianos e transferência de calor. A inativação térmica de B. coagulans e a degradação térmica do licopeno também foram simuladas com sucesso

A geometria do sistema (diâmetro do tubo), a vazão de escoamento e a potência aplicada mostrou grande influência na distribuição do campo elétrico, potência dissipada e nos perfis de temperatura no fluido.

A homogeneidade da temperatura da polpa de tomate foi alcançada utilizando-se de tubos helicoidais. A viscosidade do fluido e a velocidade de escoamento influenciaram diretamente a distância de homogeneização da polpa de tomate.

Todas essas variáveis de processo foram importantes para a qualidade do produto. A modelagem e simulação da inativação térmica e degradação de licopeno para temperaturas, vazões e diâmetros diferentes resultou em número de microrganismos diferentes quando analisados no ponto de homogeneização do fluido. Conseqüentemente, a distância total do tubo de retenção para alcançar seis reduções logarítmicas também foi diferente.

A configuração do sistema com diâmetro de 39,6 mm foi o que mais aproveitou a energia disponível, 94,6 %, porem para a vazão mais baixa ( $0,1 \text{ L min}^{-1}$ ) e temperaturas de tratamento de  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , sendo que esta resultou em maior perda de licopeno (entre 4 e 5%). Essa configuração seria bem proveitosa para temperaturas de tratamento maior ( $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) e vazões mais altas. A configuração de 31,8 mm de diâmetro apresentou um aproveitamento de 76,3 % da energia disponível e apresentou degradação de licopeno baixa, inferior a 2%.

Este trabalho e seus resultados podem ser muito úteis no projeto de sistemas de tratamento térmico que utilizam micro-ondas como fonte de energia.





## 6 REFERÊNCIAS

---

- ARAGAO, G. M. F. et al. Evaluation of the Weibull and log normal distribution functions as survival models of *Escherichia coli* under isothermal and non isothermal conditions. *International Journal of Food Microbiology*, v. 119, n. 3, p. 243–257, 2007.
- BEJAN, A. *Convection Heat Transfer*. Third Edit ed. Durham, North Carolina: John Wiley & Sons, 1948.
- BHAMIDIPATI, S.; SINGH, R. K. FLOW BEHAVIOR of TOMATO SAUCE WITH OR WITHOUT PARTICULATES IN TUBE FLOW. *Journal of Food Process Engineering*, v. 12, n. 4, p. 275–293, 1990.
- CHOI, W. et al. A finite element method based flow and heat transfer model of continuous flow microwave and ohmic combination heating for particulate foods. *Journal of Food Engineering*, v. 149, p. 159–170, 2015.
- CUCCURULLO, G.; GIORDANO, L.; VICCIONE, G. A fast and accurate hybrid model for simulating continuous pipe flow microwave heating of liquids. *International Journal of Mechanics*, v. 8, n. 1, p. 45–52, 2014.
- DATTA, A. K.; ANANTHESWARAN, R. C. *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. Nova Iorque: [s.n.].
- GOULA, A. M. et al. Prediction of lycopene degradation during a drying process of tomato pulp. *Journal of Food Engineering*, v. 74, n. 1, p. 37–46, 2006.
- HAYES, W. A.; SMITH, P. G.; MORRIS, A. E. J. *The Production and Quality of Tomato Concentrates*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 38, n. 7, p. 537–564, 1998.
- INCROPERA, F. P. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Seventh ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.
- KOH, E.; CHAROENPRASERT, S.; MITCHELL, A. E. Effects of industrial tomato paste processing on ascorbic acid, flavonoids and carotenoids and their stability over one-year storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 92, n. 1, p. 23–28, 2012.
- KOTZEKIDOU, P. Heat resistance of *Byssoschlamys nivea*, *Byssoschlamys fulva* and *Neosartorya fischeri* isolated from canned tomato paste. *Journal of Food Science*, v. 62, n. 2, p. 410–412, 1997.
- LIN, C. H.; CHEN, B. H. Stability of carotenoids in tomato juice during storage. *Food Chemistry*, v. 90, n. 4, p. 837–846, 2005.
- MAFART, P. et al. On calculating sterility in thermal preservation methods : Application of the Weibull frequency distribution model. *Acta Horticulturae*, v. 566, p. 107–114, 2001.
- NGUYEN, L. T. et al. Exploring the heating patterns of multiphase foods in a continuous flow, simultaneous microwave and ohmic combination heater. *Journal of Food Engineering*, v. 116, n. 1, p. 65–71, 2013.

- PELEG, M. Advanced quantitative microbiology for foods and biosystems: Models for predicting growth and inactivation. [s.l.: s.n.].
- PIECKOVÁ, E.; BERNÁT, D.; JESENSKÁ, Z. Heat resistant fungi isolated from soil. *International journal of food microbiology*, v. 22, n. 4, p. 297–299, 1994.
- PRYOR, R. W. Modeling Materials through a Phase Transition: Using COMSOL Multiphysics and Applying Physics First Principles Techniques. COMSOL Conference. Anais...Boston, U: 2007Disponível em: <<http://www.comsol.com/papers/3333/>>
- RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. Engineering Properties of Foods. Third ed. Boca Raton, Flórida: Taylor & Francis Group, 2005.
- SAHLIN, E.; SAVAGE, G. P.; LISTER, C. E. Investigation of the antioxidant properties of tomatoes after processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 17, n. 5, p. 635–647, 2004.
- SALVI, D. Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating - Coupling of High Frequency Electromagnetism with Fluid Flow and Heat Transfer. [s.l.] Louisiana State University, 2008.
- SALVI, D. et al. Numerical Modeling of Continuous Flow Microwave Heating: A Critical Comparison of COMSOL and ANSYS. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, v. 44, n. 4, p. 187–197, 2010.
- SALVI, D. et al. COMSOL Multiphysics model for continuous flow microwave heating of liquids. *Journal of Food Engineering*, v. 104, n. 3, p. 422–429, 2011.
- SCHWARTZ, S. J. et al. Lycopene from heat-induced cis-isomer-rich tomato sauce is more bioavailable than from all-trans-rich tomato sauce in human subjects. *British Journal of Nutrition*, v. 98, n. 1, p. 140–146, 2007.
- SHARMA, S. K.; LE MAGUER, M. Kinetics of lycopene degradation in tomato pulp solids under different processing and storage conditions. *Food Research International*, v. 29, n. 3–4, p. 309–315, 1996.
- SHI, J. et al. Kinetics of lycopene degradation in tomato puree by heat and light irradiation. *Journal of Food Process Engineering*, v. 25, n. 6, p. 485–498, 2003.
- SHI, J.; LE MAGUER, M. Critical Reviews in Biotechnology Lycopene in Tomatoes: Chemical and Physical Properties Affected by Food Processing. *Critical Reviews in Biotechnology*, v. 204, n. 204, p. 37–41, 2000.
- TELEKEN, Jhony Tiago et al. Modelagem multifísica e validação experimental da secagem de meios porosos em micro-ondas a vácuo. 2017.
- TOURNAS, V. Heat-resistant fungi of importance to the food and beverage industry. *Critical reviews in microbiology*, v. 20, n. 4, p. 243–63, 1994.
- TUTA, S.; PALAZOĞLU, T. K. Finite element modeling of continuous-flow microwave heating of fluid foods and experimental validation. *Journal of*

Food Engineering, v. 192, p. 79–92, 2017.

ZHU, J.; KUZNETSOV, A. V.; SANDEEP, K. P. Mathematical modeling of continuous flow microwave heating of liquids (effects of dielectric properties and design parameters). *International Journal of Thermal Sciences*, v. 46, n. 4, p. 328–341, 2007.

ZIMMERMANN, M. RESISTÊNCIA DE ESPOROS DE *Byssochlamys fulva* E *Bacillus coagulans* EM POLPA DE TOMATE SOB CONDIÇÕES ISOTÉRMICAS, NÃO ISOTÉRMICAS E DE ALTAS PRESSÕES HIDROSTÁTICAS. Universidade Federal de Santa catarina, 2012.