



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DINÂMICA DA PASTEURIZAÇÃO CONTÍNUA DE LEITE: EFEITO DE PERTURBAÇÕES SOBRE A LETALIDADE DO PROCESSO

I. A. CANO e J. A. W. GUT

Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química,
E-mail para contato: jorgewgut@usp.br

RESUMO – *Os objetivos deste trabalho foram o desenvolvimento de uma modelagem matemática fenomenológica para representar a operação transiente de um pasteurizador a placas composto pelas seções de aquecimento, retenção, regeneração e resfriamento, sujeito a perturbações em malha aberta, e a simulação do processo. A modelagem foi composta por balanços diferenciais de energia e de micro-organismos ou atividade enzimática, com variação temporal e espacial, considerando perda de calor no tubo de retenção e em suas conexões. O modelo apresentou um conjunto de equações diferenciais ordinárias de primeira e segunda ordem, sendo resolvido pelo método de diferenças finitas em software gPROMS. Como estudo de caso, foi avaliada a pasteurização contínua de leite bovino, visando a inativação da bactéria *Coxiella burnetii*, em um pasteurizador experimental. Pôde-se analisar os efeitos de perturbações na alimentação de leite e da utilidade de aquecimento sobre a distribuição de temperatura e de letalidade do leite nos estados transiente e estacionário. Em suma, todas as perturbações estudadas afetaram significativamente o tratamento térmico simulado, afetando os perfis de temperatura do produto bem como a letalidade do processo. A modelagem descreveu de forma coerente a dinâmica do processo.*

1. INTRODUÇÃO

A contaminação microbiológica na indústria de alimentos representa um sério perigo para a saúde dos consumidores e acarreta grandes prejuízos econômicos. Os laticínios, pela própria matéria-prima que utilizam, são particularmente suscetíveis a essas contaminações. Por isso que a qualidade do leite é uma constante preocupação, principalmente pelo risco de surtos de origem alimentar (JAY, 2005). A legislação brasileira preconiza que o leite para consumo e insumo de derivados passe pelo tratamento térmico de pasteurização (BRASIL, 2002).

A pasteurização contínua, que é um tratamento térmico relativamente brando no qual o alimento é aquecido a temperaturas inferiores a 100 °C (FELLOWS, 2000). É um processo ao qual o alimento é submetido ao aquecimento indireto até atingir uma temperatura definida e mantido, por tempo determinado, até a inativação do micro-organismo alvo. A pasteurização é utilizada com a finalidade de garantir a inocuidade, conservar as características nutricionais e sensoriais do alimento, prolongando sua vida útil (LADO, YOUSSEF, 2002;).

A fim de entender, controlar e otimizar a pasteurização do leite, preservando a sua qualidade, garantindo a inocuidade e minimizando os custos de fabricação, a modelagem matemática e a

PROMOÇÃO



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO



simulação dos processos são importantes ferramentas. Faz-se necessário uma modelagem fenomenológica da pasteurização contínua do leite, a qual leve em consideração também os modelos cinéticos de letalidade, em regime transiente. Logo, o presente trabalho teve por objetivos: desenvolvimento de uma modelagem matemática de base fenomenológica para representar a operação transiente de um pasteurizador a placas, composto pelas seções de aquecimento, retenção, regeneração e resfriamento, que contemple o efeito da letalidade do tratamento térmico, para um processo contínuo e a realização da simulação dos modelos desenvolvidos, para avaliar a operação com e sem perturbação do sistema e a partida do processo através de estudo de caso.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Na Figura 1 são mostrados os caminhos que os fluidos (leite e utilidades de aquecimento e resfriamento), percorrem no pasteurizador, durante o funcionamento do equipamento. As indicações T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7 e T8 correspondem aos pontos de medição representativos da temperatura do leite ao longo do processo, sendo: entrada do produto cru, entrada e saída da seção de aquecimento, entrada e saída do tubo de retenção, entrada e saída da regeneração e saída do leite – já tratado – após o seu resfriamento, respectivamente. Já as indicações T9, T10, T11 e T12, representam as temperaturas de entrada e saída das utilidades de aquecimento e resfriamento.

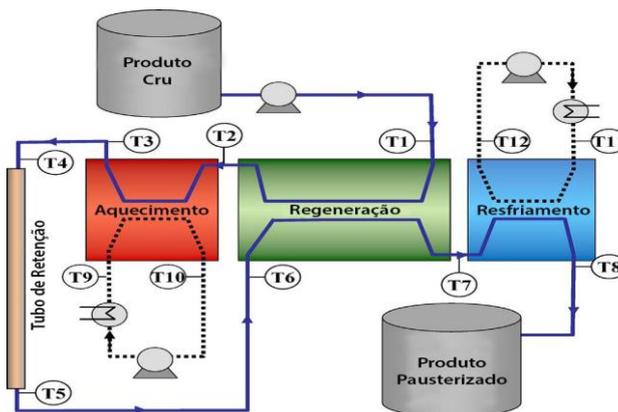


Figura 1 – Visão global do processo de pasteurização e seus pontos de controle de temperatura (GUTIERREZ et al., 2014).

Algumas considerações ou hipóteses são adotadas antes da modelagem, sendo elas: fluidos newtonianos, incompressíveis e homogêneos; sem geração de energia devido ao atrito viscoso e sem mudança de fase; temperatura da placa uniforme em sua seção transversal; temperatura do fluido uniforme na seção transversal do canal; perdas de calor para o ambiente são consideradas apenas nos tubos; o perfil de velocidade do escoamento é achatado (escoamento pistonado); distribuição uniforme de fluxo nos passes do PHE, considerada mistura perfeita nas entradas e saídas dos canais do trocador de calor; nas placas há difusão axial de calor. Além disso, as propriedades físicas constantes e uniformes em cada seção do processo, sendo calculados os seus valores médios. Então, pelo balanço de energia diferencial em um canal genérico i de um dos trocadores de calor, tem-se:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} \cdot \tau_i + \frac{\partial T_i}{\partial \eta} \cdot S_i = \alpha_i \cdot U_i \cdot [-2 \cdot T_i(\eta) + T_{p,i}(\eta) + T_{p,i-1}(\eta)] \quad (1)$$

Pelo balanço da concentração de micro-organismos, em um canal genérico i , considerando cinética de inativação de 1ª ordem, tem-se:

$$\tau_i \cdot \frac{\partial C_{A,i}}{\partial t} + \frac{\partial C_{A,i}}{\partial \eta} \cdot s_i = - \left[\tau_i \cdot \left(\frac{2,3026 \cdot C_{A,i}(\eta, t)}{D_{ref} \cdot 10^{\left(\frac{T_{ref} - T}{Z}\right)}} \right) \right] \cdot s_i \quad (2)$$

A letalidade (SV) do processo é avaliada por:

$$SV = \log \left(\frac{C_{A,0}}{C_A} \right) \quad (3)$$

Como resultado do balanço de energia numa placa genérica i , tem-se:

$$\frac{\partial T_{p,i}}{\partial t} \cdot J_p - \frac{\partial^2 T_{p,i}}{\partial \eta^2} = \beta \cdot \{U_i \cdot [-T_{p,i}(\eta) + T_i(\eta)] + U_{i+1} \cdot [T_{i+1}(\eta) - T_{p,i}(\eta)]\} \quad (4)$$

Pelo balanço de energia nos tubos:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cdot \tau_T = -Z \cdot (T_X - T_\infty) - \frac{\partial T_T}{\partial \eta} \quad (5)$$

Já para micro-organismos, o mesmo modelo dos canais é utilizado nos tubos (Eqs. 2 e 3).

3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado em um pasteurizador do tipo placas FT-43 (Armfield, UK), com placas lisas de aço inoxidável, separadas por gaxetas de silicone. O sistema também é composto pelo tanque de alimentação (4 L), pelo tubo de retenção (75 mL) e suas duas conexões e pela válvula diversora de fluxo. A condição padrão para processamento do leite é 72 °C por 15 s no tubo de retenção, em uma vazão de 20 L/h. Já a vazão da utilidade (água), foi de 60 L/h.

O *software* escolhido para a realização da solução do conjunto de equações diferenciais foi o gPROMS (*Process System Enterprise*, versão 3.2). O micro-organismo estudo foi a bactéria *Coxiella burnetii* e os fluidos simulados foram água e leite bovino integral.

Os casos estudados foram: partida do pasteurizador (estado transiente), pasteurização em estado estacionário e perturbações no processo (vazão, temperatura e concentração de bactérias).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2, tem-se os perfis de temperatura do leite (3) e de água de processo (1 e 2), ao longo do tempo, durante partida do equipamento. Ou seja, a figura é dividida em 3 estágios: processo estacionário isotérmico com água (1), processo transiente com água (2) e entrada do leite cru (3).

O pasteurizador é inicializado com água ao invés de leite, até o instante $t = 360$ s. A partir do instante $t = 60$ s, as utilidades de aquecimento e resfriamento assumem seus valores padrões operacionais, neste caso, 90 °C e 5 °C, respectivamente, sendo esse o estágio 2. Após estabilização do sistema, a partir do instante $t = 360$ s, o processo é operado com leite bovino cru – estágio 3.

A partida do equipamento se deu no instante $t = 60$ s, e a primeira perturbação observada na

Figura 2 é na temperatura de entrada da água de processo, a 10 °C (T1), no estágio 2. Seguindo, outras perturbações também foram observadas nos perfis de temperatura da água de processo, só que nas seções de resfriamento e de aquecimento (T8 e T3), devido ao fato de as utilidades atingirem suas temperaturas padrões de processo, 90 °C e 5 °C.

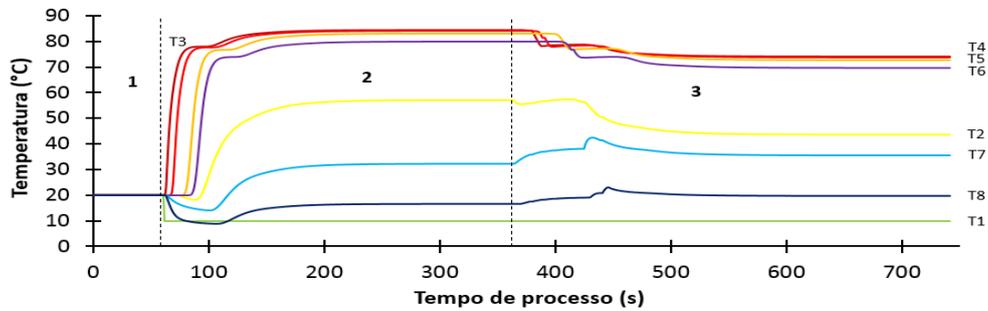


Figura 2 – Histórico de temperatura do leite ao longo do tempo de processo durante a simulação da partida do pasteurizador.

De acordo com o perfil de temperatura ao longo do processo, é razoável afirmar que o mesmo permaneceu em estado transiente até, aproximadamente, o instante $t = 300$ s, apresentando a máxima e mais significativa variação nos perfis de temperatura até o instante $t = 150$ s. Após esse período, nota-se uma estabilização do sistema no estágio 2 ainda com água. É correto afirmar que o processo tendeu ao estado estacionário, pois o perfil de temperatura começou a se manter constante.

O valor de esterilização do tratamento térmico simulado em relação ao tempo de processo, em cada seção e no tudo de retenção do pasteurizador, pode ser visto na Figura 3. As indicações L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7 e L8 correspondem ao decaimento logarítmico decimal na concentração de micro-organismos similares aos pontos de medição de temperatura. Além disso, de mesmo modo que no caso anterior, os estágios 2 e 3 referem-se ao pasteurizador com água e com leite.

A Figura 3 apresenta valores de esterilização acumulados apenas no estágio 3, pois é nesse momento que o pasteurizador é preenchido com leite. Além disso, percebe-se que as primeiras medições são observadas em L1, L2, L3...até L7, nesta exata sequência, o que representa o tempo que o leite leva para preencher todo o equipamento.

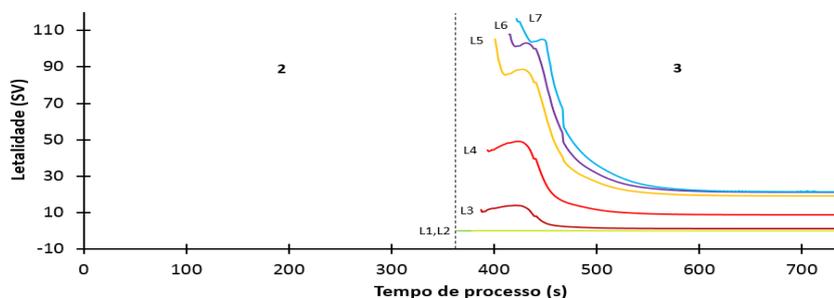


Figura 3 – Distribuição da letalidade ao tratamento térmico simulado durante a partida.

Pela Figura 4, tem-se a distribuição de temperatura do leite e do histórico da letalidade do tratamento térmico avaliado, de acordo com o tempo espacial, em estado estacionário.

Sobre o intervalo de instantes $t = 360$ s e $t = 450$ s, percebe-se que cada perturbação

acometida no perfil de temperatura de leite, resulta em uma perturbação no perfil de letalidade, confirmando a relação entre a temperatura e inativação de células de *C. burnetii*. Esse resultado mostra como o modelo cinético depende da temperatura do leite. Além disso, durante esse período, o tratamento térmico do leite é superdimensionado, ou seja, a redução da carga microbiana do leite é elevada, chegando até $SV = 116$, como consequência das altas temperaturas.

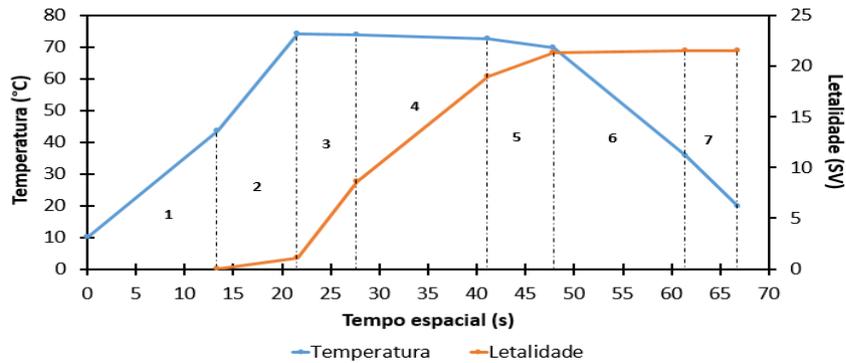


Figura 4 – Histórico de temperatura e distribuição da letalidade simulada para *C. burnetii* em relação ao tempo espacial do processo de pasteurização do leite.

Pela Figura 4, observa-se que apenas quando a temperatura do leite atinge valor mínimo (≈ 70 °C), na seção de aquecimento (2), começa a ocorrer o decaimento decimal na concentração da *C. burnetii* de modo significativo, tornando o produto cada vez mais inócuo.

Houve variação na temperatura do leite (queda de 4,4 °C) desde a entrada no tubo 1 (3) até a entrada da regeneração (5) devido à perda de calor para o ambiente. Essa perda de calor é indesejável porque resulta em perda de eficiência e qualidade. As taxas máximas de destruição microbiana são observadas nos tubos (3, 4 e 5), pois o leite está na maior temperatura (até 74,1 °C).

Com o intuito de avaliar o quanto a vazão da utilidade de aquecimento afeta a pasteurização em estado estacionário, fez a comparação para 4 condições diferentes. As Figuras 5 e 6 representam esses casos, para todas as seções e tubos do equipamento, ao longo do tempo espacial. As curvas foram obtidas nas vazões de 30, 60 (vazão nominal), 90 e 120 L/h, como mostrado pela legenda abaixo. Mais uma vez, as indicações 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, correspondem às seções de regeneração, aquecimento, conexão 1, tubo de retenção, conexão 2, regeneração e resfriamento, respectivamente.

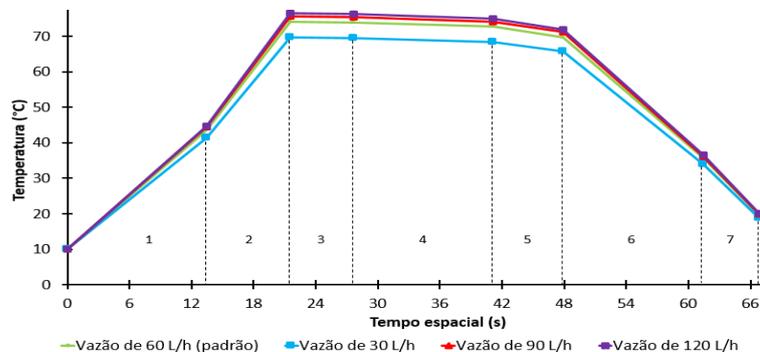


Figura 5 – Históricos de temperatura do leite em relação ao tempo espacial, em quatro diferentes vazões da utilidade de aquecimento, durante a pasteurização.

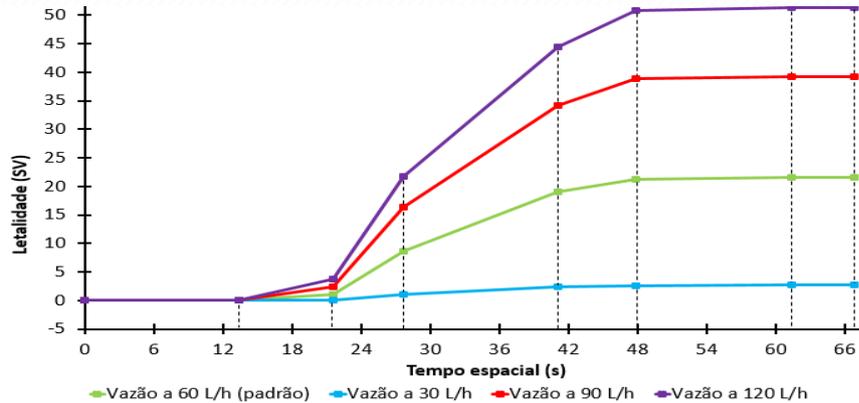


Figura 6 – Distribuições da letalidade simulada em relação ao tempo espacial, em quatro diferentes vazões da utilidade de aquecimento, durante a pasteurização.

Esses resultados demonstram que, quanto maior a vazão da água de aquecimento, maior será a taxa de transferência de calor para o leite, resultando em temperaturas mais elevadas, e, conseqüentemente, levando a uma maior destruição microbiana e letalidade devido a tratamento térmico simulado. Por exemplo, na vazão de 60 L/h (nominal), o valor final para esterilização foi igual a 21 SV, enquanto que para uma vazão de 120 L/h foi equivalente a 51 SV.

As Figuras 7 e 8 mostram o comportamento dinâmico dos perfis de temperatura do leite e da letalidade no tratamento térmico, ao longo do tempo de processo, nos canais e nos tubos do equipamento, quando ocorrem perturbações na temperatura da utilidade de aquecimento.

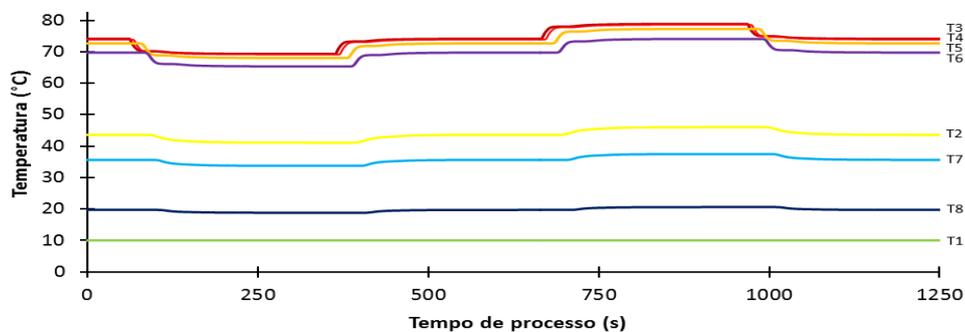


Figura 7 – Histórico de temperatura do leite ao longo do tempo de processo durante a simulação da perturbação na temperatura de entrada da utilidade de aquecimento.

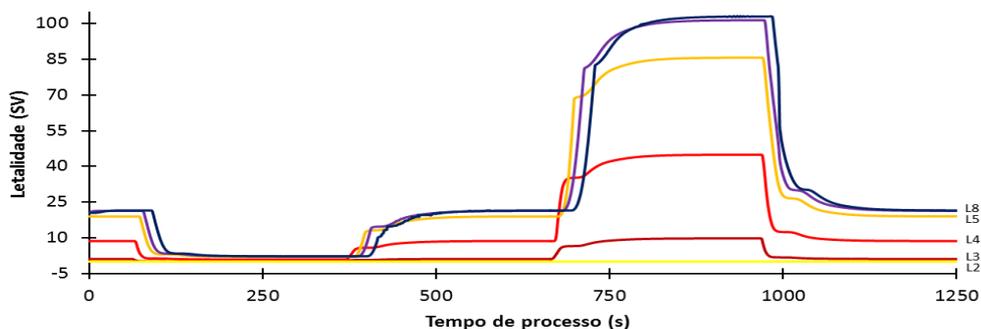


Figura 8 – Distribuição da letalidade durante a perturbação na temperatura de entrada da água.

Percebe-se que quando a temperatura da utilidade de aquecimento foi alterada, para o valor menor (60 s) ou para maior (660 s), isso acarretou em variações consideráveis nos perfis de temperatura do leite, em todas as seções dos trocadores de calor a placas e nos tubos, exceto em T1, que é a entrada do produto cru no equipamento, o qual independe da temperatura da utilidade. Quando a temperatura da água de aquecimento foi aumentada (96 °C), a temperatura do leite também aumentou, principalmente na seção de aquecimento, e quando ela diminuiu (84 °C), a do leite também o fez.

Similarmente, as Figuras 9 e 10 representam os resultados obtidos quando o sistema sofreu perturbações (para mais e para menos) na temperatura de entrada do leite cru, no início da pasteurização (T1).

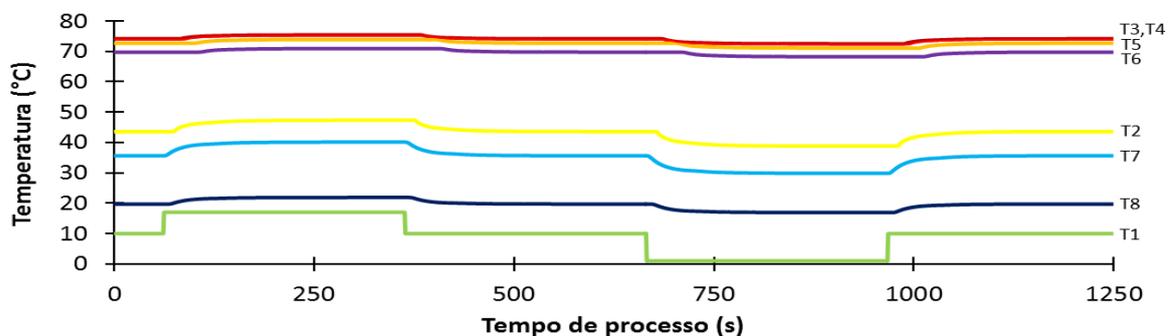


Figura 9 – Histórico de temperatura do leite ao longo do tempo de processo durante a simulação da perturbação na temperatura de entrada do leite cru.

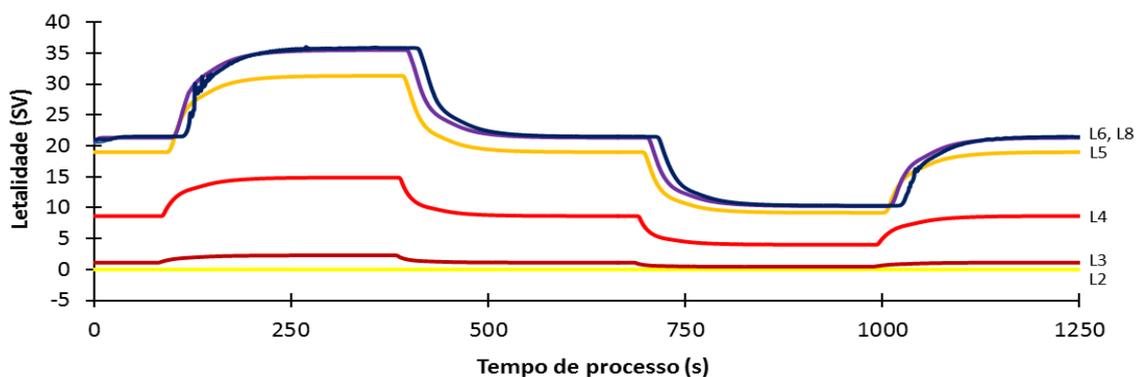


Figura 10 – Distribuição da letalidade ao tratamento térmico simulado ao longo do tempo durante a simulação da perturbação na temperatura de entrada do leite cru.

Através dos resultados obtidos, constatou-se que quanto maior a temperatura da utilidade de aquecimento, maior será a temperatura do leite na seção de aquecimento e no tubo de retenção, para um mesmo tempo de retenção, resultando em maiores valores para SV, sendo a recíproca verdadeira.

Gutierrez et al. (2014) obtiveram resultados similares quando simularam e validaram as perturbações nos modelos dinâmicos, de uma unidade de pasteurização a placas, também em gPROMS, porém sem levar em conta os efeitos de letalidade.

Percebe-se que sempre que ocorre uma perturbação na vazão da utilidade de aquecimento,



XXI Congresso Brasileiro
de Engenharia Química

Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro



XVI Encontro Brasileiro sobre o
Ensino de Engenharia Química
Fortaleza/CE
25 a 29 de setembro

tanto para valores mais altos (~ 250 s) quanto para valores mais baixos (~ 900 s), novos perfis de temperatura eram formados após curto período de tempo, em todas as seções e nos tubos do pasteurizador, sendo essas mudanças mais significativas no aquecimento e nos tubos.

Neste trabalho, os dados mostraram que, por exemplo para o caso de perturbação da vazão de aquecimento, quando a temperatura subiu de 73,9 °C para 74,8 °C ($\Delta T \cong 1,0$ °C), na entrada do tubo de retenção, a letalidade variou de 8,64 SV para 14,42 SV ($\Delta L \cong 6$ SV). Em outras palavras, isso representa que o desvio de 1 °C na temperatura do produto causa um desvio de aproximadamente 69,44 %, para mais, no efeito da pasteurização.

5. CONCLUSÕES

Desenvolveu-se com sucesso uma modelagem matemática de base fenomenológica para representar a operação transiente de um pasteurizador genérico, composto pelas seções de aquecimento, regeneração e resfriamento e tubo de retenção, que contemplou o efeito da letalidade para um micro-organismo alvo, para um processo contínuo, em relação ao espaço e tempo.

Foram realizadas simulações com os modelos obtidos, tais como a partida de processo, processo estacionário plenamente desenvolvido e perturbações no sistema, através de estudo de caso em um pasteurizador experimental. Os resultados encontrados, representados pelas distribuições de letalidade e históricos de temperatura, condizem com a realidade e estão de acordo com a literatura.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 51, de 18 de setembro de 2002. Regulamentos Técnicos de Produção, Identidade e Qualidade do Leite tipo A, do Leite tipo B, do Leite tipo C, do Leite Pasteurizado e do Leite Cru Refrigerado e o Regulamento Técnico da Coleta de Leite Cru Refrigerado e seu Transporte a Granel.

FELLOWS, P. Food processing technology: principles and practice. 2nd ed. Boca Raton: Woodhead publishing Ltda e CRC Press LLC, 575 p., 2000.

GUTIERREZ, C. G. C. C.; DINIZ, G. N.; GUT, J. A. W. Dynamic simulation of a plate pasteurizer unit: Mathematical modeling and experimental validation. Journal of Food Engineering 131, 124–134, 2014.

JAY, J. M. Microbiologia de Alimentos. 6ª edição. Editora Artmed. Porto Alegre (RS), 2005.

LADO, B. H.; YOUSSEF, A. E. Alternative Food-Preservation Technologies: Efficacy and Mechanisms. Microbes and Infections, v. 4, n. 4, p. 433-440, 2002.

PROMOÇÃO



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO

