



DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE RESIDÊNCIA E DE TEMPERATURA EM UM PASTEURIZADOR BITUBULAR

SILVA*¹, R.N.; PEGORARO², P.R.; GUT³, J.A.W.

¹Aluno da EP/USP ²Mestranda da EP/USP ³Professor da EP/USP
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, trav.3, n.380, 05508-010 - São Paulo - SP
e-mail: jorgewgut@usp.br

RESUMO – É proposta a realização de um estudo da distribuição de tempo de residência (DTR) em um pasteurizador bitubular contínuo usado para processamento térmico de alimentos viscosos. As distribuições de tempo de residência e de temperatura do produto ao longo do processo são essenciais para a avaliação do efeito da temperatura sobre microrganismos, enzimas e aspectos de qualidade. O modelo alimentício testado neste trabalho é uma solução 1,0% de CMC (carboxi-metil-celulose, líquido não-Newtoniano pseudoplástico). O tempo de residência é determinado usando um traçador iônico e uma célula de fluxo para condutividade elétrica. São obtidas as curvas $E(t)$ para cada ensaio realizado em triplicata e diferentes modelos matemáticos de DTR são ajustados aos dados para caracterização do escoamento. A combinação dos dados de distribuição de temperatura e de tempo de residência permitirá cálculos cinéticos para avaliação do processo.

Palavras chave: trocador de calor, pasteurização, troca térmica.

INTRODUÇÃO

O processamento térmico contínuo de alimentos líquidos tem como objetivo a inativação de microrganismos patogênicos e deterioradores e ainda enzimas indesejáveis. Neste processo se busca segurança microbiológica do alimento e o aumento de sua vida de prateleira, mas preservando suas características sensoriais e valor nutricional. O trocador bitubular é muito usado para as etapas de aquecimento e resfriamento indireto de alimentos de média e alta viscosidade, já que é difícil o uso de trocadores de calor de placas. O dimensionamento deste tipo de processo é tradicionalmente realizado com ampla margem de segurança, considerando que a inativação térmica ocorre exclusivamente na etapa de retenção a temperatura constante e na

velocidade da partícula mais lenta. Desta forma é desprezada a inativação que ocorre nas etapas de aquecimento e resfriamento e também o sobre-processamento das partículas mais lentas. Como resultado tem-se um produto sobre-processado de menor qualidade e maior custo. Informações de distribuição do tempo de residência (DTR) e da distribuição de temperatura são fundamentais para a correta análise da letalidade do processo e a conseqüente otimização das condições operacionais no processo de pasteurização.

OBJETIVOS

Estudar a distribuição do tempo de residência de um fluido viscoso de comportamento não-Newtoniano em um

* Bolsista CNPq.

pasteurizador bitubular contínuo em diversas condições operacionais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos de distribuição do tempo de residência (DTR) foram realizados em um pasteurizador bitubular de escala piloto. Este equipamento já foi utilizado anteriormente para processamento de purês de banana e de manga. Os trocadores são constituídos por grampos interconectados, de forma que é possível alterar a área de troca térmica. Aquecimento e resfriamento estão conectados a circuitos fechados com controle de temperatura.

A tubulação do produto permite a inserção de termopares entre os grampos bitubulares. Um sistema de aquisição CompactDAQ de 12 canais (National Instruments) e um programa em linguagem LabView (National Instruments) fazem a coleta de dados de temperatura. A vazão mássica do produto foi medida em triplicata para cada condição usando balança e cronômetro. A Figura mostra um termopar inserido entre dois grampos da região de retenção do trocador de calor.



Figura 1 – Termopar inserido no trocador.

As curvas de DTR para escoamento da solução 1,0% CMC (carboxi-metil-celulase,

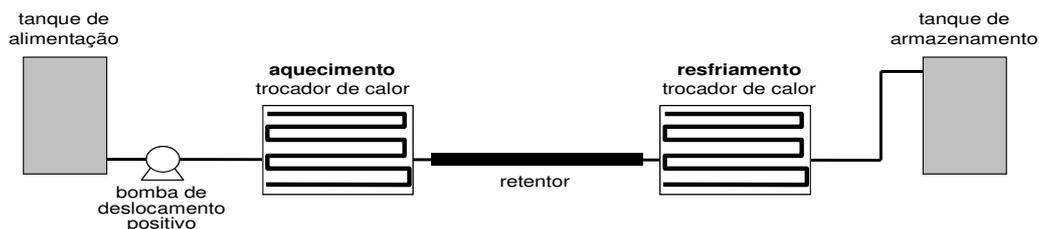


Figura 3 – Esquema do tratamento térmico contínuo (Murata e Gut, 2010).

líquido não-Newtoniano pseudoplástico) foram obtidas através da técnica condutimétrica. Uma perturbação no escoamento foi provocada em forma de impulso instantâneo através da injeção de um traçador iônico que eleva a condutividade elétrica do líquido. Neste caso, foi utilizada uma pequena seringa contendo a solução 1,0% CMC saturada com cloreto de sódio. Um condutivímetro YSI 3200 (YSI, Clifton George, EUA) com célula para escoamento registrou a condutividade elétrica ao longo do tempo na saída do processo.



Figura 2 – Aparelhagem montada para ensaio de DTR, detalhe para célula monitora

Neste trabalho, é de interesse a obtenção de curvas de DTR de quatro regiões do trocador: região de aquecimento, resfriamento, retenção e todo o trocador. Entretanto, devido à alta pressão associada ao escoamento viscoso ao longo do trocador, ficou inviável a injeção do traçador no ponto de alimentação. Desta forma, foram testados trechos menores do equipamento, que equivalem a um ou meio grampo do trocador bitubular. Além disso, os ensaios de DTR foram realizados na temperatura ambiente.

Para a obtenção das curvas de DTR, a injeção de sal foi feita no início da região estudada e a célula que mede a condutividade foi conectada no término desta. A injeção foi feita em uma tampa (rosca), que pode ser conectada em diversos pontos do trocador, preenchida com silicone para que seja possível a introdução da agulha da seringa.

Para os ensaios realizados, foram medidos valores experimentais da vazão da solução de CMC em função da frequência da bomba de deslocamento positivo. Foi feita uma curva de calibração para converter a frequência da bomba em vazão volumétrica do líquido. Os testes para determinar a distribuição do tempo de residência foram feitos para as vazões de 10, 20, 30, 40 e 50 L/h. Para cada vazão, região de teste e solução diferentes, foram feitas medidas de DTR em triplicata.

O método mais simples para se representar graficamente a DTR de um sistema é através da curva C , sendo C a condutividade da solução na saída do sistema, em função do tempo (t), descontando-se a concentração base, caso exista (Murata e Gut, 2010). Sendo isto, a resposta a um sinal tipo impulso na entrada do sistema no instante $t = 0$ s. Neste trabalho, considerou-se que a concentração do traçador iônico é proporcional à condutividade elétrica medida, já que a temperatura não variou durante o período de aquisição.

Normalizando a curva C para ter área unitária sob a curva, obtemos a curva E (E x t). Sendo que E segue a equação (1).

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (1)$$

A integral da eq. (1) foi calculada numericamente a partir dos dados experimentais através da técnica dos trapézios.

O tempo médio de residência experimental (t_m) foi calculado segundo a eq. (2), também avaliada pela técnica dos trapézios.

$$t_m = \int_0^{\infty} t.E(t)dt \quad (2)$$

A partir da curva E , obteve-se a curva E_{θ} (E_{θ} x θ), que é uma forma adimensional da curva E . As eq. (3) e (4) mostram como se calcula essas variáveis.

$$\theta = \frac{t}{t_m} \quad (3)$$

$$E_{\theta}(\theta) = t_m.E(t) \quad (4)$$

Diversos modelos matemáticos teóricos existem para representar a curva DTR de um sistema. Neste trabalho, foram testados quatro tipos de modelos matemáticos.

Modelos Matemáticos Teóricos

Modelo laminar modificado (Gutierrez *et al.*, 2010): Modelo baseado no modelo teórico de Rutheven (1971) para tubos helicoidais. Seus parâmetros são n e t_m .

$$E_{\theta}(\theta) = \frac{(n-2)^{n-1}}{\theta^n(n-1)^{n-2}} \text{ para } \theta \geq \theta_i = \frac{n-2}{n-1} \quad (5)$$

Modelo de associação PFR+CSTR (Levenspiel, 2000): Este modelo considera o comportamento hidrodinâmico do sistema análogo ao de uma associação em série de um tanque de mistura perfeito (CSTR, *mixed flow*) e um tubo com escoamento pistonado (PFR, *plug flow*). Os parâmetros são t_m^M (tempo médio de residência no CSTR) e t_m^P (tempo médio de residência no PFR), sendo $t_m = t_m^M + t_m^P$.

$$E(t) = \frac{1}{t_m^M} \exp\left(-\frac{t_m^P - t}{t_m^M}\right) \text{ para } t \geq t_m^P \quad (6)$$

Modelo de dispersão axial (Gouvêa *et al.*, 1990): É um modelo comumente utilizado para escoamento turbulento em tubos. Seus parâmetros são Pe (número de Peclet) e t_m .

$$E_{\theta}(\theta) = \sqrt{\frac{Pe+1}{4\pi\theta^3}} \exp\left(\frac{-(Pe+1)(1-\theta)^2}{4\theta}\right) \quad (7)$$

Modelo tanques em série (Levenspiel, 2000): O modelo de tanques em série considera o sistema em estudo análogo a uma série de N tanques perfeitamente agitados (CSTRs) em série, todos de igual volume. Seus parâmetros são N e t_m .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

$$E(t) = \frac{1}{t_m} \sqrt{\frac{Pe+1}{4\pi\left(\frac{t}{t_m}\right)^3}} \exp\left[\frac{-(Pe+1)\left(1-\left(\frac{t}{t_m}\right)^2\right)}{4\left(\frac{t}{t_m}\right)}\right] \quad (8)$$

Ajuste de Parâmetros

A partir dos dados de condutividade em função do tempo obtidos para cada ensaio, foi obtida a curva do tipo E (distribuição diferencial). Sobre estas formas foram ajustadas as equações que representam o comportamento observado com mínimo erro entre dados experimentais e teóricos. A soma do erro quadrático foi minimizada com ajuda da ferramenta “Solver” do software Microsoft Excel, esta ferramenta permite calcular o mínimo erro entre a curva experimental e a curva teórica (obtida a partir do modelo matemático) a partir da variação dos parâmetros que regem a forma da curva teórica.

Em alguns modelos matemáticos utilizados foi necessário levar em conta a distorção na DTR das regiões causada pelo escoamento através da célula. Isto por vezes é necessário, pois o volume interno da célula pode ser significativo em relação ao volume total da região em estudo. Para que isso fosse feito, foi preciso tratar os dados através de uma operação matemática chamada convolução (o método de convolução de sinais foi realizado de acordo com Gutierrez *et al.*, 2010). Assim, foi necessária a determinação da DTR da própria célula de vidro que mede a condutividade do líquido, isto foi feito injetando o traçador logo na entrada da célula e registrando-se o sinal de condutividade com a própria célula. Para a DTR de cada vazão diferente é utilizado a DTR da célula da vazão respectiva. Vale ressaltar que este procedimento foi feito apenas para vazões operando no regime laminar e foi utilizado o modelo de dispersão axial para ajustar os dados experimentais da célula.

O tratamento de dados foi realizado com o software Microsoft Excel, para obtenção dos gráficos de DTR experimental, integração numérica e para ajuste dos parâmetros dos modelos.

Até o momento, foram feitos os ensaios para partes da região de aquecimento do trocador de calor, que é composta por 5 grampos bitubulares. Para estudar o escoamento nesta seção, foram feitos testes para: uma reta; uma reta e uma curva; e uma reta, uma curva e uma reta que é chamado de grampo para trocadores bitubulares. O fluido utilizado foi uma solução 1% de CMC (fluido não-newtoniano pseudoplástico). As vazões testadas foram: 10, 20, 30, 40 e 50 L/h. Cada ensaio foi realizado em triplicada. As curvas de DTR da célula do condutímetro também foram obtidas para caracterizar sua interferência sobre os resultados medidos no trocador.

A Figura 4 mostra um exemplo de curva do tipo $E(\theta) \times \theta$ (adimensionalizado) obtida experimentalmente para a DTR da célula do condutímetro assim como o modelo teórico de dispersão axial para uma vazão volumétrica de 20 L/h.

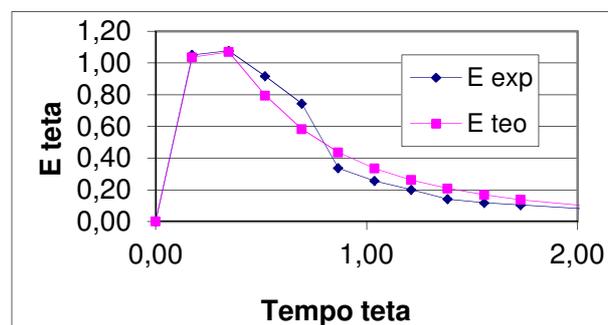


Figura 4 – Curva de DTR para a célula à vazão 20 L/h (modelo de dispersão axial)

Analisando a curva da Figura 5 podemos perceber que, como esperado, a passagem da solução na célula é bem rápida e poucos pontos experimentais são coletados o que dificulta um ajuste ideal da DTR da célula. Apesar disso, é possível observar que o modelo de dispersão axial se ajustou bem aos dados experimentais obtidos para a célula, ou seja, resulta em um erro quadrático pequeno visto a pequena diferença entre a curva experimental e teórica.

A Tabela 1 apresenta os valores médios dos parâmetros (adimensionais) ajustados para a curva de DTR para uma reta da região de aquecimento.

Tabela 1 – Ajuste dos modelos, vazão 10 L/h

Modelo	Dispersão axial	Tanques em série	Laminar modificado	Associação PFR+CSTR
Parâmetro	Pe	N	θ_0	θ_p
Valor	4,443	3,249	0,393	0,347
Erro Quadrático	1,354	2,505	4,454	0,78

A análise dos ajustes pelos modelos matemáticos das curvas de DTR para uma reta da região de aquecimento em todas as vazões permite chegar à conclusão de que o modelo que melhor se ajusta, ou seja, resulta em um menor erro quadrático é o de associação PFR+CSTR (Figura 5). Vale ressaltar que foi nos ensaios com as vazões mais altas (40 e 50 L/h) que o modelo de associação PFR+CSTR apresentou melhor ajuste.

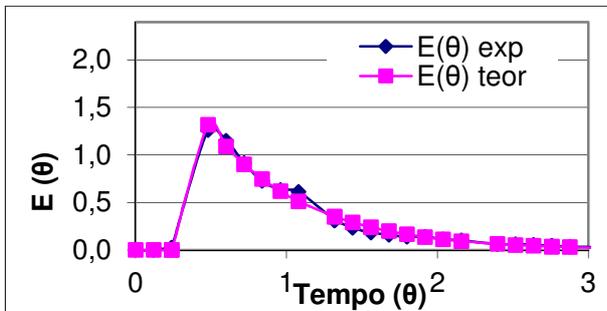


Figura 5 – Curva de DTR para 1 reta à vazão 40 L/h (modelo de associação PFR+CSTR)

A Figura 6 abaixo apresenta um gráfico com o tempo médio de residência (tempo para que todo o traçador passe a região) em função da vazão para os ensaios de 1 reta.

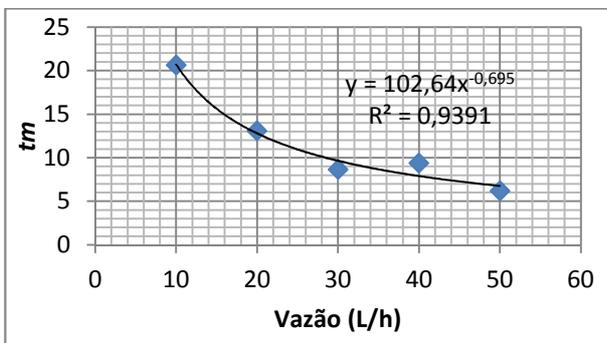


Figura 6 – Gráfico do tempo médio de residência em função da vazão – 1 reta

Analisando o gráfico, é possível notar uma tendência na forma de potência, porém o

valor de tm para a vazão de 40 L/h fugiu um pouco do esperado.

Apesar do modelo de associação PFR+CSTR apresentar melhor ajuste nos ensaios para uma reta, o modelo que melhor se ajustou nos ensaios em regiões mais abrangentes, uma reta e uma curva; e uma reta, uma curva e uma reta, foi o de dispersão axial.

A Tabela 2 abaixo apresenta os valores médios dos parâmetros e o erro quadrático encontrados para a curva de DTR para uma reta e uma curva da região de aquecimento. Esta tabela evidencia que o melhor ajuste para esta região em questão foi apresentado pelo modelo de dispersão axial.

Tabela 2 – Ajuste dos modelos, vazão 30 L/h

Modelo	Dispersão axial	Tanques em série	Laminar modificado	Associação PFR+CSTR
Parâmetro	Pe	N	θ_0	θ_p
Valor	3,194	2,798	0,389	0,214
Erro Quadrático	0,101	0,517	3,54	0,341

A Figura 7 abaixo mostra um exemplo de ajuste pelo modelo de dispersão axial para uma reta e uma curva à vazão de 30L/h.

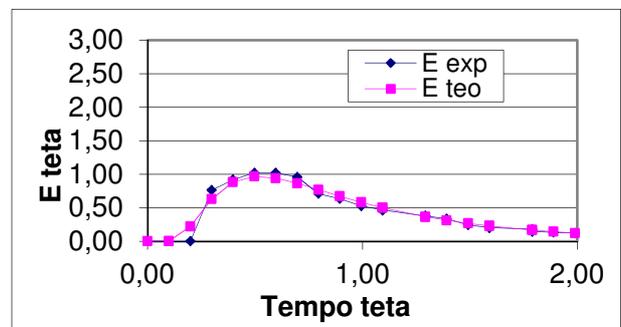


Figura 7 – Curva de DTR para 1 reta e 1 curva à vazão de 30L/h (modelo de dispersão axial)

As Tabelas 3, 4, 5 e 6 apresentam os valores médios encontrados para os parâmetros dos modelos matemáticos e os desvios padrão em função da vazão para uma reta e uma curva da região de aquecimento. É interessante notar que apesar do melhor ajuste ser do modelo de dispersão axial, o modelo de associação PFR+CSTR é o que apresenta menor desvio padrão entre os valores encontrados para o parâmetro em diferentes ensaios à mesma vazão.

Tabela 3 – Modelo dispersão axial

Vazão (L/h)	10	20	30	40	50
Pe	4,94	3,875	4,023	4,863	6,057
Desvio padrão	0,403	0,349	0,731	2,347	1,573

Tabela 4 – Modelo tanques em série

Vazão (L/h)	10	20	30	40	50
N	3,523	3,068	3,165	3,61	4,058
Desvio padrão	0,113	0,153	0,333	1,078	0,693

Tabela 5 – Modelo laminar modificado

Vazão (L/h)	10	20	30	40	50
θ_0	0,381	0,304	0,414	0,34	0,463
Desvio padrão	0,026	0,079	0,052	0,084	0,004

Tabela 6 – modelo associação PFR+CSTR

Vazão (L/h)	10	20	30	40	50
θ_p	0,365	0,305	0,293	0,373	0,460
Desvio padrão	0,059	0,04	0,082	0,147	0,071

Com relação à tendência dos parâmetros e aos desvios relativos, os resultados dos modelos de dispersão axial e de tanques em série são similares; o que era esperado visto que o formato das curvas $E(t)$ são parecidos para os dois modelos.

Dado o desvio padrão dos parâmetros, é difícil extrair uma boa correlação com a vazão. Deixando de lado os pontos da vazão 10 L/h, há uma tendência de aumento do parâmetro com a vazão. Entretanto, os pontos a 10 L/h aparentam ter uma dispersão maior do que a esperada, provavelmente devido ao maior espalhamento do traçador no escoamento laminar de baixa velocidade. A pseudo-plasticidade do fluido ajudaria a explicar esta mudança de comportamento já que, vazões menores implicam em maior viscosidade e, conseqüentemente, há uma alteração no perfil de velocidade desenvolvido no tubo, deixando-o mais alongado.

CONCLUSÕES

Analisando as curvas de DTR com seus ajustes pelos modelos matemáticos, já é possível perceber certa tendência e chegar a algumas conclusões.

Os modelos de melhor ajuste foram o modelo de associação PFR+CSTR e o modelo de dispersão axial. Porém o modelo de associação PFR+CSTR só teve um ajuste melhor do que o de dispersão axial quando considerado regiões pequenas do trocador de calor, somente em uma reta da seção de aquecimento. Analisando as curvas de DTR para regiões mais abrangentes do trocador de calor como um grampo da seção de aquecimento, o modelo de dispersão axial apresentou melhor ajuste.

Outro ponto importante que pôde ser notado é que o aumento da vazão, geralmente, resultou em um melhor ajuste por parte dos modelos matemáticos.

As curvas de distribuição de tempo de residência e de temperatura serão utilizadas, posteriormente, para cálculos de letalidade utilizando o modelo cinético de primeira ordem (parâmetros D e z).

REFERÊNCIAS

- GOUVÊA, M. T.; PARK, S. W.; GIUDICI, R. (1990), “Estimação de coeficiente de dispersão axial em leitos fixos” Anais do XVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Nova Friburgo. v.2, p.607-616.
- GUTIERREZ, C. G. C. C.; DIAS, E. F. T. de S.; GUT, J. A. W. (2010), “Residence time distribution in holding tubes using generalized convection model and numerical convolution for non-ideal tracer detection” Journal of Food Engineering.
- LEVENSPIEL, O. (2000), Engenharia das reações químicas. São Paulo: Edgard Blucher.
- MURATA, L. K. Y.; GUT, J. A. W. Determinação da distribuição do tempo de residência em um pasteurizador bitubular. Relatório de Iniciação Científica CNPq, 2010.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pelo auxílio financeiro (09/07934-3) e ao CNPq pelas bolsas concedidas.