

# MODELAGEM DA INATIVAÇÃO DO FUNGO *Aspergillus fumigatus* EM SUCO DE MAÇÃ SOB AQUECIMENTO CONVENCIONAL E ÔHMICO

W.A. Müller<sup>1</sup>, J.R. Sarkis<sup>1</sup>, L.D.F. Marczak<sup>1</sup>

1- Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de pós-graduação em engenharia química – CEP: 90037-007 – Porto Alegre – RS – Brasil, Telefone: (51) 3638-5155 – e-mail: ([wagner.a.muller@hotmail.com](mailto:wagner.a.muller@hotmail.com); [julia@enq.ufrgs.br](mailto:julia@enq.ufrgs.br); [ligia@enq.ufrgs.br](mailto:ligia@enq.ufrgs.br))

**RESUMO** – A diminuição da carga microbiana de produtos alimentícios é um dos pontos mais críticos de seus processos de manufatura. Tradicionalmente, a pasteurização é realizada a partir do escoamento de água a altas temperaturas; entretanto, esse processo apresenta algumas desvantagens, como perda de componentes termossensíveis e baixa eficiência energética. O aquecimento ôhmico é uma alternativa aos processos convencionais, onde o produto é aquecido por efeito Joule. O objetivo desse trabalho foi integrar um modelo térmico com um modelo cinético para analisar a inativação do fungo *Aspergillus fumigatus* em suco de maçã sob aquecimento convencional e ôhmico, a fim de analisar o efeito das variáveis de processo no tempo de pasteurização. Os resultados demonstraram menores tempos de processamento para o aquecimento ôhmico em todos cenários avaliados, mostrando o potencial dessa tecnologia para assegurar a segurança de produtos com tratamentos mais brandos.

**ABSTRACT** – The microbial load diminution of foodstuff is one of the most critical steps of its manufacturing processes. Traditionally, pasteurization is realized by the flow of water at high temperatures; however, this process have some disadvantages, as the loss of thermosensitive compounds and low energetic efficiency. Ohmic heating is an alternative to the conventional processes, where the product is heated by Joule effect. The aim of this work was to integrate a thermal with a kinetic model to investigate the inactivation of the fungi *Aspergillus fumigatus* at apple juice, by conventional and ohmic heating, in order to analyze the effect of the process variables in the pasteurization time. The results showed shorter processing times for ohmic heating in all the analyzed scenarios, showing the potential of this technology to assure food safety with milder treatments.

**PALAVRAS-CHAVE:** micologia; cinética de inativação; transferência de calor; integração de modelos.

**KEYWORDS:** micology; inactivation kinetics; heat transfer; model integration.

## 1. INTRODUÇÃO

Os processos tradicionais de inativação microbiana utilizam troca de calor do produto com um fluido a altas temperaturas, processo conhecido como aquecimento convencional (AC). O efeito deletério do calor em microorganismos diz respeito, basicamente, à desnaturação de enzimas necessárias para o metabolismo da célula. Entretanto, diversos autores têm demonstrado desvantagens associadas ao AC, como baixa eficiência energética, altos tempos de processamento e perda de compostos termolábeis (e.g., vitamina C e carotenoides). Por fim,

estudos têm demonstrado níveis inaceitáveis de contaminação fúngica em sucos mesmo após os binômios tempo/temperatura tipicamente empregados no processamento (Rico-Munoz, 2017).

De forma a contornar essas desvantagens, tecnologias emergentes vêm sendo estudadas; exemplos dessas tecnologias são o uso de altas pressões, ozonização e radiação infravermelha. Uma tecnologia merecedora de especial atenção é o aquecimento ôhmico (AO), onde a inativação também ocorre devido a aplicação de calor ao produto, embora o mecanismo físico de troca térmica seja diferente. Nesse caso, o efeito Joule, causado pela aplicação de uma corrente elétrica ao alimento, faz com que ocorra geração interna de energia, que promove o aquecimento da matriz alimentícia. Vantagens associadas ao AO são alta homogeneidade de aquecimento, alta eficiência energética, baixo custo operacional, taxas adicionais de inativação microbiana em alguns cenários devido ao fenômeno de eletroporação e maior independência da condutividade térmica do sistema. As desvantagens do processamento ôhmico são a erosão de materiais dos eletrodos e alta dependência com a condutividade elétrica (Kaur e Sing, 2016).

Tendo em vista o baixo número de estudos analisando o impacto do AO em processos de inativação fúngica, o objetivo do presente trabalho foi integrar um modelo cinético com um modelo térmico para analisar a influência de variáveis de processamento na inativação do fungo *Aspergillus fumigatus* em suco de maçã. Para elaboração do modelo térmico, considerou-se a existência de agitação vigorosa no meio (meio espacialmente isotérmico). Para o AC, o modelo foi utilizado para prever a influência da temperatura e da vazão volumétrica da água de aquecimento no tempo de pasteurização; já para o AO, o modelo foi utilizado para analisar a influência do campo elétrico e da temperatura.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Propriedades termofísicas

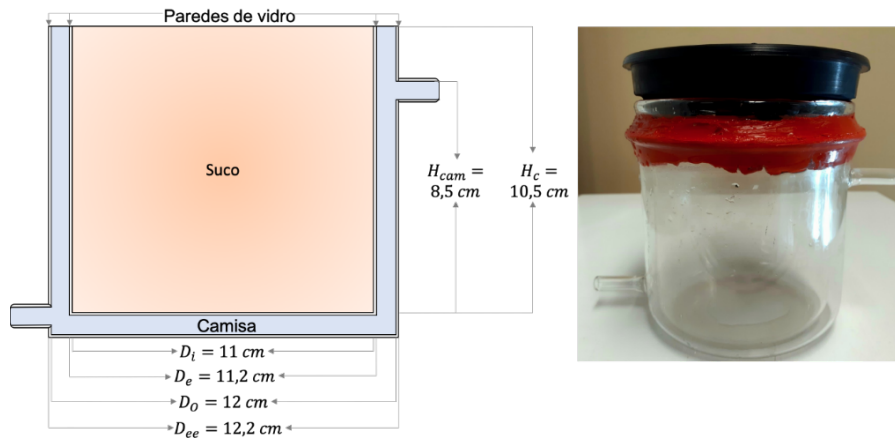
Para a correta aplicação dos modelos térmicos, deve-se inicialmente determinar as propriedades termofísicas relevantes. Nesse contexto, o calor específico foi mensurado por calorimetria diferencial de varredura (DSC), a massa específica por picnometria e a condutividade elétrica a partir do conhecimento da dependência da resistência elétrica do material com a temperatura, conforme discutido em Sarkis (2011). Todas propriedades foram descritas em função da temperatura.

### 2.2 Modelos térmicos

Os modelos térmicos elaborados nesse estudo foram obtidos a partir da hipótese de agitação vigorosa do meio (especialmente isotérmico). Nesse contexto, partiu-se de um balanço de energia ( $e$ ) no volume de controle:

$$\{e_{ENTRA}\} - \{e_{SAI}\} + \{e_{GER}\} = \{e_{ACUMULADA}\} \quad (\text{Eq.1})$$

A célula ôhmica considerada para análise é mostrada na Figura 1, com capacidade de 1 litro de amostra, e é constituída de um compartimento interno para o suco, duas paredes de vidro, e uma camisa, na qual há circulação de água no AC e ar estagnado no AO. No caso do AC, analisou-se o efeito da vazão volumétrica e da temperatura de aquecimento no tempo total de pasteurização. Já no caso do AO, analisou-se o efeito do campo elétrico médio aplicado e da temperatura. O dispositivo utilizado para aquecimento foi aquele previamente descrito em Sarkis (2011). Ambos modelos térmicos foram validados com sucesso na referida célula.

**Figura 1:** Célula ôhmica utilizada nos experimentos


Fonte: Elaborado pelo autor.

### Aquecimento convencional

O aquecimento convencional ocorreu a partir do escoamento de água a altas temperaturas na camisa da célula ôhmica. Medições prévias indicaram que a temperatura de entrada e de saída da água no sistema eram praticamente iguais, de forma que foi possível desconsiderar as perdas de energia do sistema. Em adição, não ocorre geração de energia nesse tipo de aquecimento, de forma que a Equação 1 pode ser resumida a igualdade entre a taxa de energia acumulada e a taxa de energia entrando no sistema:

$$m c_p(T) \frac{dT}{dt} = U_{AC} A_i (T_{\infty} - T(t)) \quad (\text{Eq.2})$$

Onde  $m$  é a massa (kg),  $c_p$  é o calor específico ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  $T$  é a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $A_i$  é a área abrangida pela camisa de aquecimento ( $\text{m}^2$ ),  $T_{\infty}$  a temperatura de escoamento da água ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $U_{AC}$  o coeficiente global de troca térmica, dependente do coeficiente convectivo de troca de calor da água fluindo na camisa de aquecimento. Esse coeficiente convectivo foi determinado pelo uso de correlações empíricas disponibilizadas na literatura e é nele que se encontra o efeito da vazão volumétrica, simulada no presente trabalho.

### Aquecimento ôhmico

O AO aquece o produto devido a geração interna de energia. Em adição, ocorrem perdas de calor para o meio externo. Dessa forma, pode-se descartar somente o termo de entrada de energia na Equação 1. O balanço aplicado ao volume de controle é dado pela Equação 3:

$$m c_p(T) \frac{dT}{dt} = V \sigma(T) \vec{\nabla} E^2 - U_{AO} A_{ee} (T(t) - T_{\infty}) \quad (\text{Eq.3})$$

onde  $V$  é o volume ( $\text{m}^3$ ),  $\sigma$  é a condutividade elétrica ( $\text{S.m}^{-1}$ ),  $\vec{\nabla} E$  é o gradiente de potencial elétrico ( $\text{V.m}^{-1}$ ),  $U_{AO}$  é o coeficiente global de perdas do AO ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ ) e  $A_{ee}$  é a área externa da célula ôhmica ( $\text{m}^2$ ).

Ambos modelos matemáticos foram implementados em Matlab 2012b (Mathworks), utilizando o método de Euler temporalmente explícito.

## 2.3 Modelo cinético

O modelo cinético foi obtido de Müller (2019), a partir da aplicação do modelo de Weibull diferencial, dado pela Equação 4.

$$\frac{dN}{dt} = b(T)nt^{n-1} \exp(-b(T)t^n) \quad (\text{Eq.4})$$

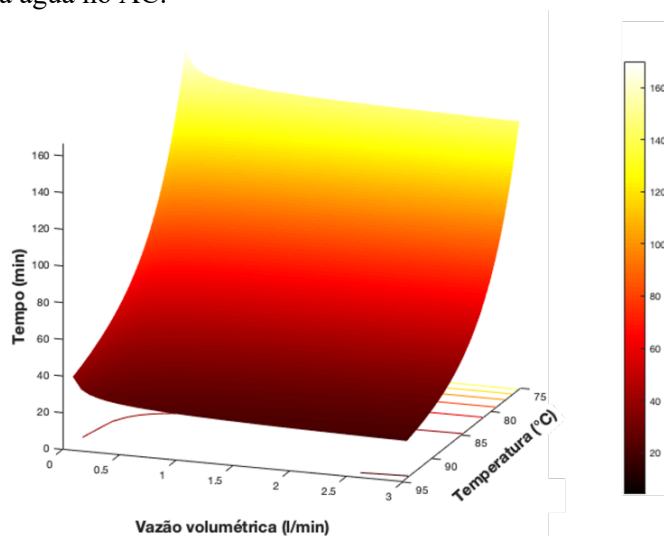
onde  $b$  e  $n$  são os parâmetros de escala e tempo do modelo e  $N$  é o número de células fúngicas. As simulações prosseguiram até a inativação de 5 ciclos logarítmicos do fungo analisado, parâmetro utilizado comumente para cálculo de processos de pasteurização.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Aquecimento convencional

A figura 2 mostra o tempo de processamento em função da vazão volumétrica e da temperatura do fluido de aquecimento. Observa-se que o tempo de processamento foi reduzido em função do aumento da temperatura e da vazão volumétrica, que variou de 156,4 min ( $T_{\infty} = 75^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{Q} = 0,04 \text{ l/min}$ ) até 18,9 min ( $T_{\infty} = 94^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{Q} = 3 \text{ l/min}$ ).

**Figura 2:** Tempo para inativação de cinco ciclos logarítmicos do fungo *A. fumigatus* em função da vazão volumétrica e da temperatura da água no AC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando o efeito da temperatura de escoamento do fluido na camisa, observa-se que ao se aumentar a variável do nível mínimo ( $75^{\circ}\text{C}$ ) para o máximo ( $94^{\circ}\text{C}$ ), uma redução no tempo de processo variando entre 76,9% e 86,1% foi observada. O efeito da temperatura na cinética de inativação diz respeito, basicamente, à desnaturação das proteínas necessárias ao metabolismo microbiano. Sabe-se que, quanto maior a temperatura

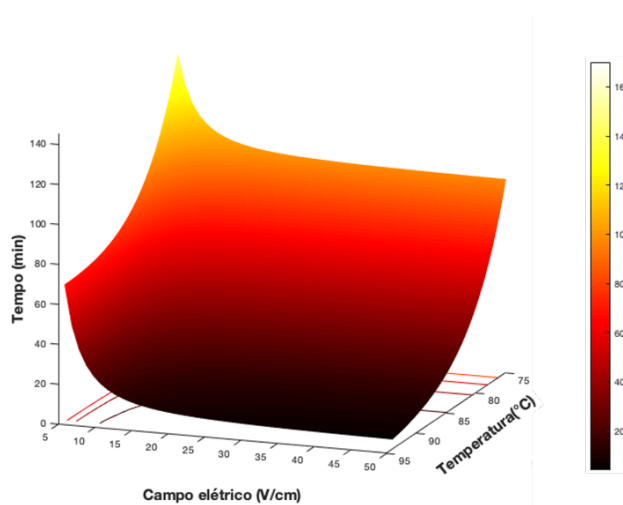
empregada, menor o tempo de processo necessário para uma mesma redução de qualquer célula microbiana, desde que essa temperatura esteja acima da temperatura letal mínima para um determinado microrganismo (Cebrián et al., 2017). Esse comportamento foi confirmado nas simulações apresentadas.

Com respeito ao efeito da vazão volumétrica, observa-se que ao aumentar a variável do nível mínimo (0,04 l/min) para o nível máximo (3 l/min), reduções variando entre 12,9% e 48,0% foram observadas. O efeito da vazão volumétrica é observado na rampa de aquecimento do produto (altas vazões volumétricas geram maiores coeficientes convectivos). Dessa forma, quanto maior a vazão, maior o coeficiente global de troca térmica do processo, uma vez que a resistência à convecção na camisa tende a valores próximos a 0 em vazões suficientemente altas (Çengel e Ghajar, 2012). Entretanto, esse efeito é sentido até, aproximadamente, 1,9 l/min; após esse valor, variações na ordem de apenas 2% são observadas.

### 3.2 Aquecimento ôhmico

A Figura 3 mostra o tempo de processamento para uma redução de 5 ciclos logarítmicos do fungo *Aspergillus fumigatus* em suco de maçã em função do campo elétrico e da temperatura de processamento para o AO. Observa-se redução do tempo tanto em função do aumento da temperatura quanto do campo elétrico aplicado, variando de 143,5 min ( $T = 75^{\circ}\text{C}$  e  $E = 5 \text{ V/cm}$ ) até 4,9 min ( $T = 94^{\circ}\text{C}$  e  $E = 50 \text{ V/cm}$ ).

**Figura 3:** Tempo para inativação de cinco ciclos logarítmicos do fungo *A. fumigatus* em função do campo elétrico e da temperatura no AO.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se novamente uma alta dependência do tempo de processo com a temperatura (diminuições no tempo de processamento variando entre 55,1% e 94,9%). Considerando o efeito do campo elétrico, observa-se diminuições do tempo de processamento variando entre 32,4% até 92,3%. Os efeitos do campo estão relacionados ao aumento da taxa de geração de calor no AO, o que diminui o tempo necessário para o produto atingir a temperatura de processo. Resultados similares envolvendo a taxa de inativação microbiana em função da aplicação do campo elétrico já foram observados anteriormente (e.g., Sagong et al.(2011)).

Em adição, a análise da Figura 3 indica que, quando campos maiores que 40 V/cm são aplicados, efeitos adicionais de diminuição de tempo de processo não são observados (alterações menores que 5% em todas temperaturas). De forma geral, processos ôhmicos a 10 V/cm foram praticamente equivalentes aos processos convencionais na maior vazão volumétrica (3 l/min), para uma mesma temperatura. Informações referentes a

processos equivalentes também podem ser úteis para o entendimento da diferença entre as tecnologias. Por exemplo:

- o mesmo tempo de processo (18,92 min) é observado a 94°C e 3 l/min no AC e a 85,5°C e 38 V/cm no AO;
- um tratamento convencional a 85°C e vazão de 1,5 l/min leva o mesmo tempo (41,1 min) que um tratamento ôhmico à 80°C e 28 V/cm;
- o tratamento de AO com menor tempo (4,9 min) não é possível no AC dentro das condições analisadas.

Desse modo, pode-se concluir que o AO é uma tecnologia que pode potencialmente diminuir os tempos de processamento nos cenários avaliados. Isso pode acarretar em diminuições de tempo de processamento para uma mesma temperatura, diminuição de gastos energéticos e manutenção dos componentes sensoriais e nutricionais do produto.

## 4. CONCLUSÕES

O objetivo do presente trabalho foi analisar a influência das variáveis de processo do AC e do AO no tempo para a inativação de 5 ciclos logarítmicos do fungo *Aspergillus fumigatus* em suco de maçã. As simulações apresentadas mostraram tempos de processo consideravelmente mais curtos para o AO, indicando que essa tecnologia pode potencialmente ser aplicada para inativação de fungos em sucos. Trabalhos futuros podem atentar para a utilização dessa análise em outras espécies de fungos, a análise de diferentes tipos de sucos ou aplicação de diferentes modelos térmicos para a predição do tempo de processamento.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa no Rio Grande do Sul (FAPERGS).

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cebrián, G., Condón, S., & Mañas, P. (2017). Physiology of the inactivation of vegetative bacteria by thermal treatments: Mode of action, influence of environmental factor and inactivation kinetics. *Foods*, 6(12), 107.
- Çengel, Y.A., & Ghajar, A.J. (2012). *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática* (4. ed.). Nova York: McGraw Hill.
- Rico-Munoz, E. (2017). Heat resistant molds in foods and beverages: recent advances on assessment and prevention. *Current Opinion in Food Science*, 17(1), 75-83.
- Kaur, N., & Singh, A. (2016). Ohmic heating: concept and applications – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(14), 2338-2351.
- Sarkis, J. R. (2011). *Construção de um sistema de aquecimento ôhmico e sua aplicação no tratamento térmico de polpa de mirtilo* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Müller, W. A. (2019). *Aspectos cinéticos e térmicos da inativação do fungo Aspergillus fumigatus em suco de maçã sob aquecimento convencional e ôhmico* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Sagong, H.G., Park, S. H., Choi, Y. J., Ryu, S., & Kang, D.H. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in orange and tomato juice using ohmic heating. *Journal of Food Protection*, 74(6), 899-904.