

## **SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO PROCESSAMENTO ASSÉPTICO DE POLPAS DE MORANGO NUM AQUECEDOR ÓHMICO CONTÍNUO**

I. Castro, N. Reis, J. A. Teixeira, A. A. Vicente\*  
Centro de Engenharia Biológica, Universidade do Minho, Campus de Gualtar,  
4710-057 Braga, Portugal.  
Email: avicente@deb.uminho.pt; Web: www.deb.uminho.pt

**Palavras-chave:** aquecimento óhmico, polpa de morango, *CFD*, processamento asséptico, *DTR*

**Resumo.** Neste trabalho efectuaram-se simulações numéricas dos padrões de fluxo num aquecedor óhmico contínuo, em estado estacionário, com recurso ao programa Fluent™. Para tal, criou-se uma grelha hexagonal (não estruturada) com base na geometria do aquecedor óhmico. A precisão dos resultados simulados foi optimizada através da diminuição do espaçamento entre as células junto às paredes. O número total de células na grelha foi minimizado por aplicação de uma condição de simetria axial (378 348 células). Para um fluido newtoniano (água) e um outro não newtoniano (polpa de morango) simularam-se diversas condições de escoamento, correspondendo a valores do número de Reynolds (*Re*) inferiores a 2000 (regime de escoamento laminar). Para a simulação com polpa de morango foi necessário determinar experimentalmente a dependência da viscosidade com a temperatura, cujo efeito foi expresso num modelo reológico do tipo “plástico de Bingham”. Após obter os padrões de fluxo no interior do aquecedor, calculou-se a distribuição dos tempos de residência (*DTR*) do fluido em todo o seu volume. Recorrendo à *DTR* exclusivamente na zona de aquecimento (entre os eléctrodos) foi possível prever o perfil térmico do fluido tratado no final da etapa de aquecimento. Consequentemente, obteve-se uma equação de projecto que relaciona a temperatura final com as variáveis operacionais (caudal de fluido, voltagem aplicada e tipo de fluido), conseguindo-se otimizar as condições de operação do aquecedor óhmico de acordo com a segurança microbiológica dos produtos processados e na minimização dos gastos energéticos.

No final do estudo concluiu-se que a aplicação deste aquecedor às polpas de morango está limitada a caudais máximos de 2 kg/min e voltagens mínimas de 100 V.

## 1. INTRODUÇÃO

O aquecimento óhmico é definido como um processo onde a corrente eléctrica passa através dos alimentos com o objectivo de os aquecer. O calor é gerado internamente devido à resistência eléctrica dos alimentos (de Alwis e Fryer, 1992).

Pode ser considerado um processo HTST e a sua maior vantagem é o facto de permitir um aquecimento rápido e uniforme dos materiais. As potenciais aplicações industriais deste processo são muito vastas e incluem a descongelação (Naveh e outros, 1983) o branqueamento (Mizrahi e outros, 1975), a evaporação, a desidratação, a fermentação, a pasteurização, etc. (de Alwis e Fryer, 1990). No caso de alimentos de elevada viscosidade ou alimentos contendo partículas sólidas esta tecnologia de aquecimento é particularmente interessante uma vez que é possível que a fase líquida e sólida tenham a mesma taxa de aquecimento evitando, assim, o sobreaquecimento das partículas/zonas mais externas (Parrot, 1992).

A técnica de CFD é uma importante ferramenta para simulação de padrões de fluxo, determinação da distribuição de tempos de residência, perfis térmicos, entre outros dados importantes, na caracterização e/ou optimização de reactores.

Na indústria alimentar esta ferramenta informática poderá ter diversas aplicações nomeadamente para assegurar que os produtos alimentares são processados de uma forma eficiente que lhes permita cumprir com os critérios de segurança estabelecidos e com as directrizes do sistema HACCP implementado. Pode ainda ser utilizada para determinação da dimensão da secção de aquecimento e *holding* de permutadores tubulares, e para simular o processamento em contínuo de alimentos (simulando um processo *High Temperature Short Time - HTST*) permitindo minimizar as zonas sobreprocessadas e maximizando a qualidade do produto final obtido.

Este trabalho teve como principais objectivos a simulação do comportamento hidrodinâmico de um aquecedor óhmico contínuo (à escala piloto) e a simulação da distribuição dos tempos de residência das várias fracções de fluido na zona de aquecimento. Por último, foi determinada a equação de projecto do reactor e foram optimizadas as condições de operação do aquecedor em termos de caudal de operação e voltagem utilizada na fase de aquecimento.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. O aquecedor óhmico contínuo

O aquecedor óhmico (Figura 1a) foi projectado para o processamento asséptico contínuo de produtos alimentares, mais especificamente polpas de fruta. Este aquecedor tem um volume de 1,2 L e opera a um caudal máximo de 2 L/min. A gama de temperaturas usada no processamento industrial de preparados de fruta situa-se entre os 40 (temperatura de pré-mistura) e os 90 °C (temperatura de pasteurização).

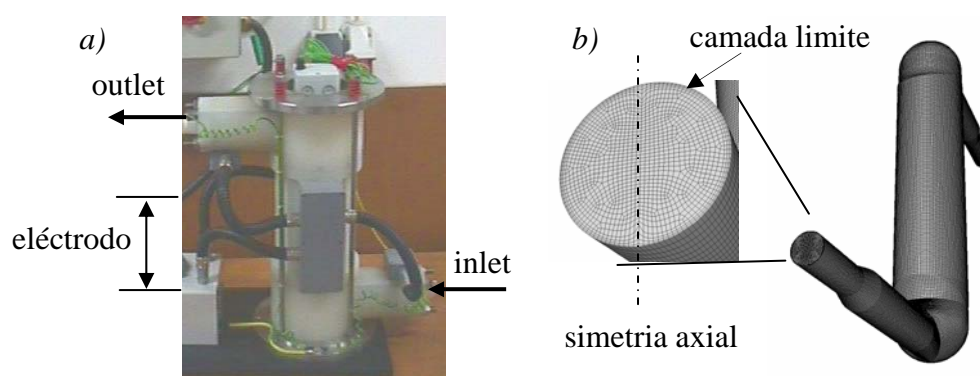


Figura 1 – a) aquecedor óhmico; b) grelha criada para simular padrões de fluxo no aquecedor óhmico por CFD; detalhe da camada limite imposta.

## 2.2. Simulações numéricas dos padrões de fluxo

Os padrões de fluxo em estado estacionário foram numericamente simulados com recurso ao programa Fluent™ (Fluent Inc, New York). A geometria do aquecedor óhmico foi reproduzida com o auxílio do programa Gambit™ (Fluent Inc, New York). Para tal, criou-se uma grelha hexagonal (não estruturada) com uma condição de simetria axial, de modo a minimizar o número total de células (378.348). A precisão dos resultados obtidos foi optimizada por aplicação de uma camada limite, a qual consiste na diminuição do tamanho das células junto às paredes (Figura 1b). Devido às limitações do aquecedor óhmico em termos de fluxos mássicos, apenas se consideraram números de Reynolds ( $Re$ ) inferiores a 2000, pelo que todas as simulações numéricas realizam-se com base no modelo laminar. A velocidade de entrada do fluido foram definidas como condições-fronteira, tendo-se desprezado o perfil radial da velocidade axial, atendendo ao longo comprimento da tubagem no ponto de alimentação.

As soluções consideraram-se convergidas para valores residuais normalizados (entre duas iterações consecutivas) inferiores a  $1 \times 10^{-3}$ . Na maioria dos casos, conseguiu-se convergência para um número de iterações inferior a 5000. Para valores de  $Re$  superiores a 400, encontraram-se problemas de convergência, ultrapassados pela diminuição dos parâmetros de relaxamento.

Os algoritmos de discretização utilizados na resolução do sistema de equações foram o método *standard* para a equação da pressão, o algoritmo SIMPLEC para a equação de pressão-velocidade e um modelo de primeira ordem na equação do momento.

## 2.3. Distribuição dos tempos de residência na zona de aquecimento

Após obtenção dos padrões de fluxo em estado estacionário, definiu-se uma segunda espécie (traçador) que permitiu determinar a distribuição dos tempos de residência (*DTR*). Para tal, definiu-se um escalar (*UDS- user defined scalar*), com difusividade  $1E-12 \text{ m}^2/\text{s}$ , tendo-se monitorizado a concentração (adimensional) do escalar ao longo do tempo por

resolução do modelo laminar em estado não estacionário. O valor do escalar foi inicializado a 1 (entrada em degrau) à entrada ( $y = -0.119$  m) da zona de aquecimento (correspondendo à zona situada entre os dois eléctrodos, colocados em posição diametralmente oposta nas paredes do aquecedor e monitorizada à saída da zona de aquecimento (situada à cota  $y = 0,119$  m).

#### 2.4. Reologia da polpa de morango

Neste estudo utilizou-se uma polpa de morango industrial (pH = 4,1; 14,5 °Brix). As características reológicas foram determinadas num reómetro (New TA Instruments AR-2000, New Castle (DE), EUA). Utilizou-se um procedimento com tempo controlado, aplicando ao material tensões de corte sucessivamente mais elevadas. Este procedimento foi repetido oito vezes para diferentes temperaturas (40 a 90 °C).

$$\eta = \frac{\tau_0 + k \left[ \gamma^n - \left( \frac{\tau_0}{\mu_0} \right)^n \right]}{\gamma} \quad (1)$$

Os resultados experimentais obtidos ajustaram-se ( $r^2 > 0,98$ ) ao modelo de Herschel-Bulckley (equação 1). Para tensões de corte baixas ( $\gamma < \tau_0/\mu_0$ ) o material comporta-se como um fluido muito viscoso, com viscosidade  $\mu_0$ . O aumento da tensão de corte provoca o aumento da tensão de corte e o fluido comporta-se segundo uma lei da potência. Os parâmetros da equação 1 são apresentados na tabela 1, para as várias temperaturas de operação.

Temperatura	40 °C	60 °C	90 °C
$k$ (kg.s <sup>n-2</sup> .m <sup>-1</sup> )	0,08	0,42	0,20
$n$ (-)	0,81	0,65	0,76
$\tau_0$ (Pa)	1,48	5,19	9,42
$\mu_0$ (Pa.s)	0,32	1,38	1,01

Tabela 1 – Parâmetros reológicos da polpa de morango.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Caracterização hidrodinâmica global do aquecedor óhmico

Realizaram-se várias simulações numéricas compreendendo dois tipos de fluido (newtoniano – água – ou não newtoniano – polpa de morango) a diversos caudais de alimentação e temperaturas, de modo a verificar qual a influência desses parâmetros no comportamento hidrodinâmico do reactor. Utilizaram-se dois caudais de entrada (0,5 e 2 l/min) e três temperaturas de operação (40, 60 e 90 °C). Os resultados da *DTR* foram

apresentados sob a forma de diagramas- $F$  (concentração adimensional à saída do reactor em função do tempo).

Na análise de diagramas- $F$ , o parâmetro *hold-back* ( $H$ ) mede o desvio de comportamento de um reactor em relação ao comportamento de um reactor pistão ideal ( $RP$ ) (Danckwerts, 1953), variando entre 0 e 1, consoante se trate de um  $RP$  ou de um reactor ocupado integralmente por zonas mortas, respectivamente. Quando se trata de um  $RCPA$  este parâmetro toma o valor de  $1/e$  ( $= 0.368$ ). Por outro lado, a eficiência de mistura pode ser interpretada, em termos de diagramas- $F$ , pela segregação ( $S$ ), que expressa o desvio em relação ao comportamento típico de um  $RCPA$ . Este parâmetro varia entre  $1/e$  e  $-1$ , consoante se trate de um  $RP$  ou um reactor integralmente ocupado por zonas mortas.

Na figura 2 comparam-se os resultados obtidos com os diagramas- $F$  de reactores ideais:  $RP$  (reactor pistão) e  $RCPA$  (reactor contínuo perfeitamente agitado) (Danckwerts, 1952). Os valores de  $H$  e  $S$  determinados apresentam-se na Tabela 2.

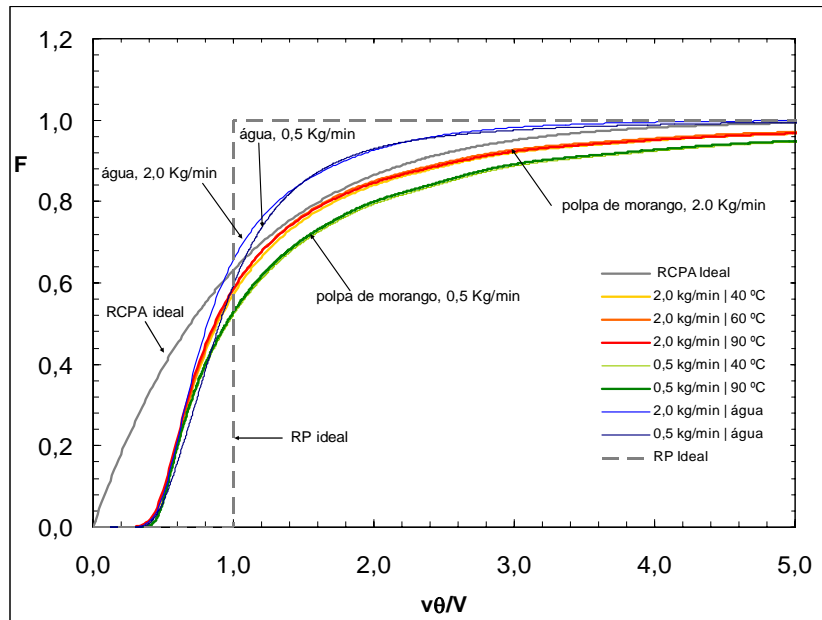


Figura 2 – Diagramas- $F$  obtidos para polpa de morango e água, a vários caudais de alimentação e diferentes temperaturas; comparação com as curvas para reactores ideais ( $RP$  e  $RCPA$ ).

Caudal (Kg/min)	Segregação ( $S$ )		Hold back ( $H$ )			
	Água		Água	Polpa Morango Temperatura (°C)		
	$S$	$v \cdot t/V$		40	60	90
0.5	0.204	1.091	0.205	0.185	0.188	0.193
2.0	0.164	0.924	0.167	0.162	-	0.170

Tabela 2 –Cálculo dos parâmetros  $H$  e  $S$  para as várias condições experimentais simuladas.

Pela análise da tabela 2 e da figura 2 é possível concluir que, para a polpa de morango, o comportamento hidrodinâmico do aquecedor óhmico não é afectado significativamente pela temperatura de operação. Por outro lado, o caudal de entrada afecta significativamente os padrões de fluxo, observando-se uma diminuição do volume de zonas mortas e de curto-circuitos com o aumento daquele (diminuição do parâmetro  $H$ ).

Na caso de um fluido newtoniano (água), pode-se observar pela figura 2 que a variação do caudal tem, também, uma influencia significativa sobre o comportamento hidrodinâmico do reactor. Quando se trabalha a caudais reduzidos (0,5 kg/min), o parâmetro  $H$  é significativamente superior ao obtido para a polpa de morango. Isto significa um maior afastamento do comportamento pistão no processamento de fluidos newtonianos, como a água (maior dispersão na função  $DTR$ ). Com o aumento do caudal, os padrões de escoamento dos dois fluidos tornam-se semelhantes, tal como se concluiu pelos idênticos valores de  $H$  (Figura 3). O cálculo do parâmetro  $S$  é apenas possível para a água, dado que os diagramas- $F$  de um  $RCPA$  ideal e do aquecedor funcionando com polpa de morango não se intersectam.

Na globalidade, conclui-se que quando o fluido operante é a água, o comportamento do aquecedor óhmico aproxima-se ao de um  $RP$  e que a eficiência de mistura aumenta com o aumento do caudal (diminuição do valor de  $S$ ). Os padrões de fluxo simulados podem ser visualizados na Figura 3.

### 3.2. Determinação da $DTR$ na zona de aquecimento

Através da  $DTR$  exclusivamente na zona de aquecimento (entre os eléctrodos) foi possível prever o tempo de permanência de cada fracção de fluido na zona de aquecimento. Com esta informação e com base na voltagem aplicada e na variação da condutividade eléctrica com a temperatura ( $\sigma = f(T)$ ) foi possível prever a temperatura do fluido à saída da zona de aquecimento ( $T_f$ ), através da equação (4). De facto, a variação da condutividade eléctrica com a temperatura,  $\sigma = f(T)$ , é uma função do tipo:

$$\sigma_T = mT + b \quad (2)$$

A geração de calor no alimento é dada por:

$$\dot{Q} = |\nabla V|^2 \cdot \sigma \quad (3)$$

Substituindo  $\sigma$  pela equação 1, obtém-se:

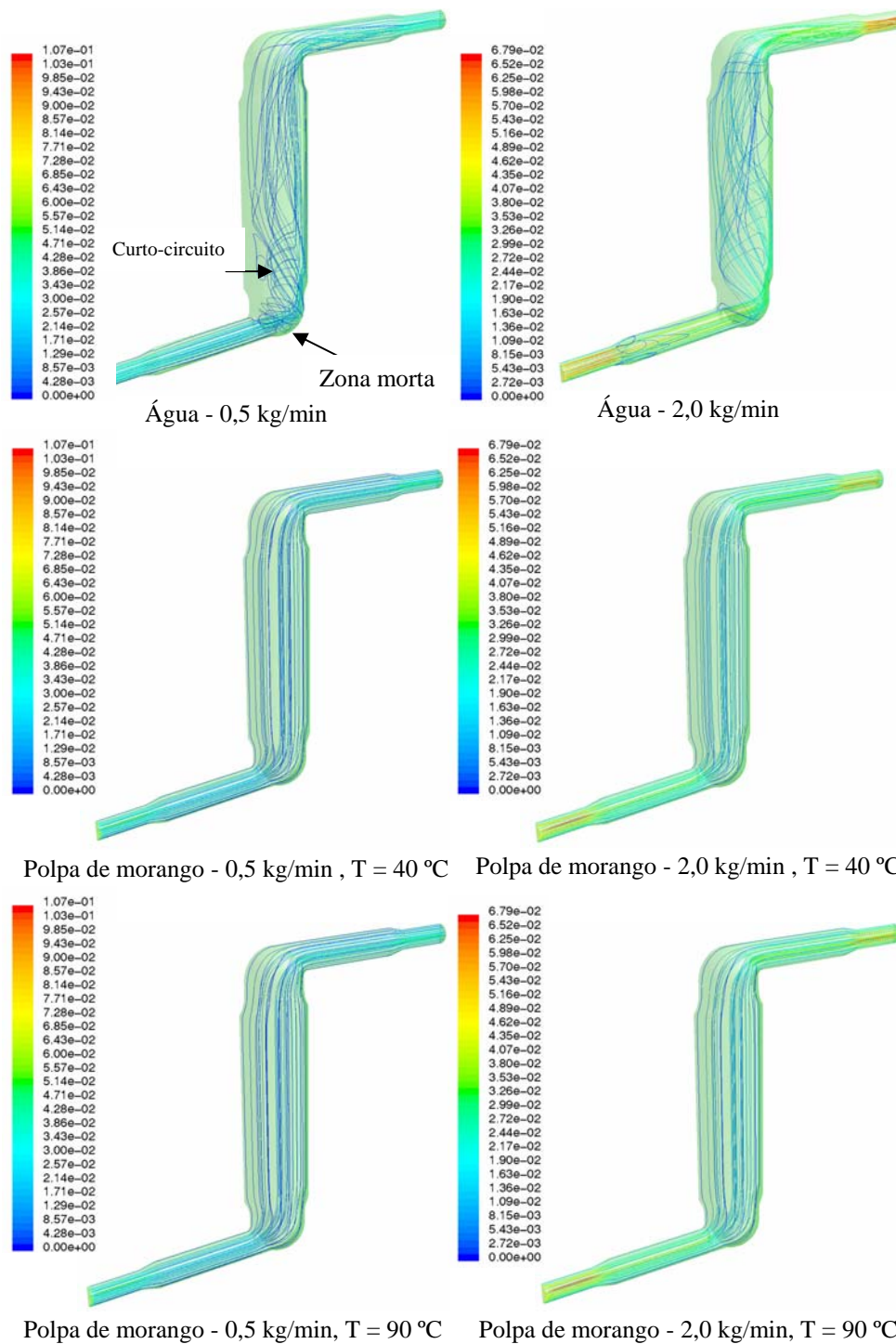


Figura 3 – Linhas de fluxo coloridas segundo a magnitude da velocidade de escoamento axial obtidas por simulação, para água e polpa de morango a vários caudais e temperaturas; podem-se observar as zonas mortas (velocidade próxima de zero) e os curto-circuitos (zonas de velocidade mais elevada).

$$\dot{Q} = |\nabla V|^2 \cdot (mT + b) \quad (3)$$

Ou seja:

$$cp \frac{dT}{d\tau} = |\nabla V|^2 \cdot (mT + b) \quad (4)$$

De onde se obtém, integrando e rearranjando:

$$Tf = \frac{(mTi + b) \exp\left(\frac{m|\Delta V|^2}{m} \tau\right) - b}{m} \quad (5)$$

Através da equação 5, com base na *DTR* simulada para cada caudal e fazendo variar a voltagem utilizada para o aquecimento, foi possível obter as simulações de temperatura de saída das várias fracções de fluido. Estas simulações são apresentadas nas figuras 4 a 6. A temperatura de pasteurização deste tipo de produtos é, normalmente, cerca de 90 °C, temperatura à qual se realiza a fase de *holding*. Assim sendo, foram consideradas sub-processadas as partículas cuja temperatura à saída da zona de aquecimento foi inferior a 90 °C. Com base nestes resultados determinou-se a percentagem de partículas sub-processadas a três caudais e sete voltagens distintas. Na Figura 7 resumem-se estes resultados, que permitiram otimizar as condições operatórias para a polpa de morango. Convém referir que a otimização terá que ser realizada para cada produto que se pretenda processar, uma vez que os padrões de escoamento e taxa de aquecimento variam com as características reológicas do produto e com a sua constituição físico-química (Castro *et al.*, 2003).

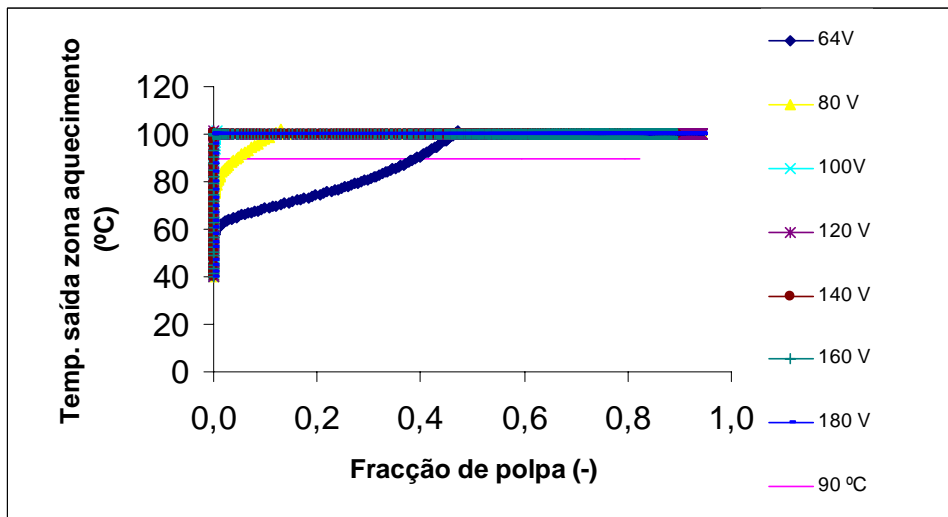


Figura 4 - Temperaturas calculadas à saída da zona de aquecimento, para cada fracção de polpa, em função da voltagem, para um caudal de 0,5 kg/min (os valores experimentais estão sobrepostos para voltagens de 100 V e superiores). Os 90 °C correspondem à temperatura de pasteurização.



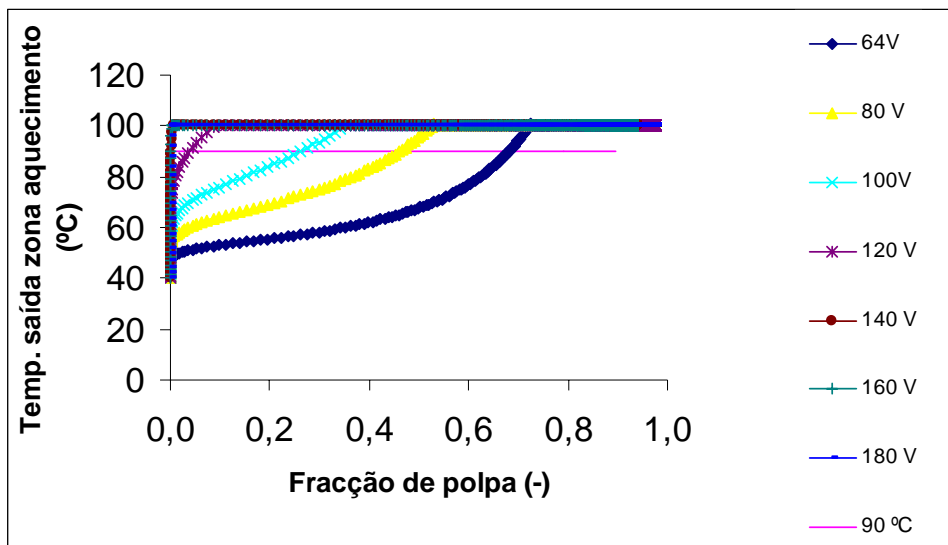


Figura 5 - Temperaturas calculadas à saída da zona de aquecimento, para cada fracção de polpa, em função da voltagem, para um caudal de 1,0 kg/min (os valores experimentais estão sobrepostos para voltagens de 140 V e superiores). Os 90 °C correspondem à temperatura de pasteurização.

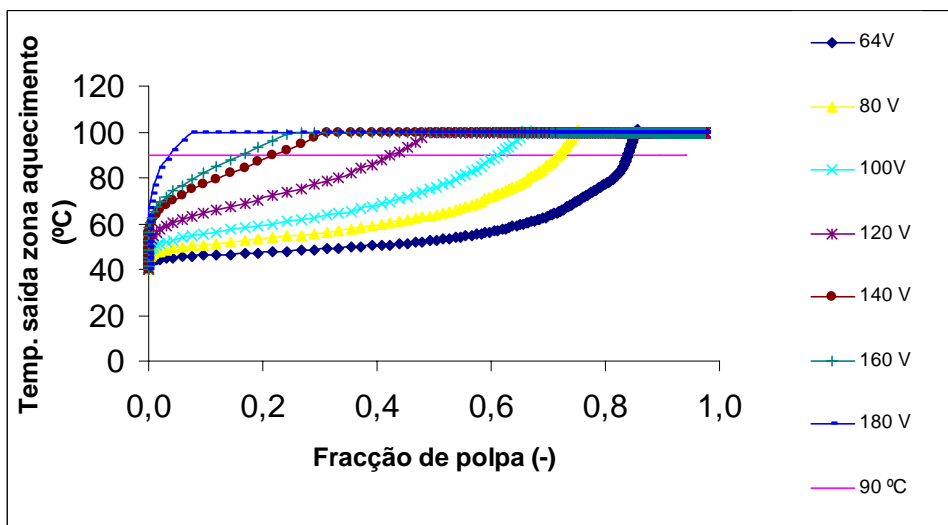


Figura 6 - Temperaturas calculadas à saída da zona de aquecimento, para cada fracção de polpa, em função da voltagem, para um caudal de 2,0 kg/min. Os 90 °C correspondem à temperatura de pasteurização.

De modo a garantir a segurança dos produtos processados, admitiu-se uma percentagem de apenas 1 % de partículas cuja temperatura final fosse inferior a 90 °C uma vez que a transferência de calor realizada durante a fase de *holding* (posterior ao aquecimento e não considerada no presente estudo) permitirá o correcto processamento desta fracção sem colocar em causa o processamento das restantes fracções de fluido.

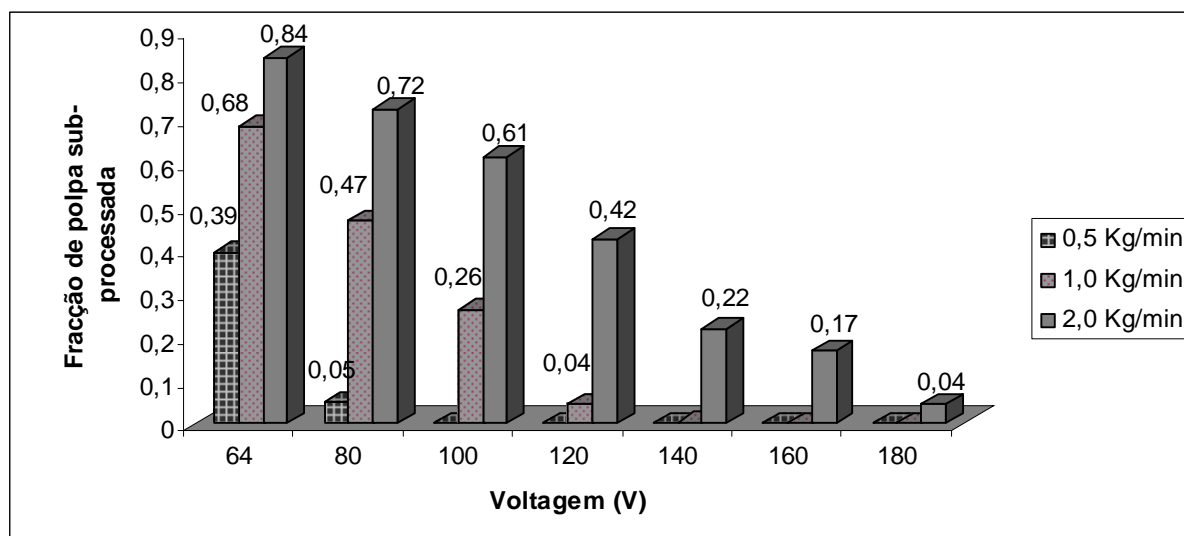


Figura 7 - Fracção de polpa sub-processada a diferentes voltagens e caudais de operação.

Pela análise da figura 7 pode-se concluir que para a polpa de morango a voltagem mínima de operação é de 100 V, operando ao caudal de 0,5 kg/min; 140 V para o caudal de 1,0 kg/min e que não é possível trabalhar a 2 kg/min considerando 180 V como a voltagem máxima admissível neste aquecedor óhmico. Genericamente, a operação a voltagens inferiores reduz os gastos energéticos bem como a quantidade de partículas sobreprocessadas; a voltagens superiores a taxa de aquecimento das partículas (relacionada com  $\sigma = f(T)$ ) é também superior, o que se traduz num aumento bastante significativo da temperatura das partículas, causando o seu sobreprocessamento com a conseqüente perda de propriedades organolépticas e nutricionais do produto. Por outro lado, e segundo o estudo hidrodinâmico realizado previamente, a operação a caudais mais elevados diminui a existência de zonas mortas e de curto-circuitos aproximando o comportamento do reactor a um *RP*; neste caso a função *DTR* apresenta uma menor dispersão em torno do valor de tempo de residência médio, o que conduzirá a uma minimização (desejável) da dispersão dos perfis térmicos, já que esta dispersão está normalmente associada à variação do tempo de residência das partículas na zona de aquecimento.

#### 4. CONCLUSÃO

A simulação dos padrões de fluxo num aquecedor óhmico contínuo permitiu concluir que a temperatura de entrada dos fluidos a processar não afecta significativamente a distribuição de tempos de residência dos elementos do fluido. Pelo contrário, o aumento do caudal de alimentação minimiza a existência de zonas mortas e de curto-circuitos, quer para fluidos newtonianos (e.g. água) quer para fluidos não newtonianos (e.g. polpa de morango).

A aplicação deste aquecedor óhmico à polpa de morango terá que efectuar-se a caudais inferiores a 2 kg/min e voltagens superiores a 100 V, sob pena de existir uma percentagem

inaceitável de partículas sub-processadas, o que coloca em risco a segurança do produto. Para ser possível a operação a caudais mais elevados, seria necessário aumentar a condutividade eléctrica da polpa de morango, o que poderá ser conseguido através da adição de sais ou outros constituintes iónicos (Castro *et al*, 2003).

## 5. NOMENCLATURA

$H$  – hold-back [-]

$k$  – coeficiente de consistência [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{\text{n-2}}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$m, b$  – coeficientes da variação linear da condutividade eléctrica com a temperatura [ $\text{S}; \text{S}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$n$  – coeficiente da lei de potência [-]

$S$  – segregação [-]

$T_f$  – temperatura final atingida pela polpa de morango [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_i$  – temperatura inicial atingida pela polpa de morango [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$v$  – velocidade de escoamento [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$V$  – volume do aquecedor [ $\text{m}^3$ ]

$\gamma$  – tensão de corte [ $\text{s}^{-1}$ ]

$\Delta V$  – diferença de potencial [ $\text{V}$ ]

$\eta$  – viscosidade [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

$\mu_0$  – viscosidade referente à tensão de inércia (para um fluido de Herschel-Bulckley) [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

$\theta$  – tempo [ $\text{s}$ ]

$\tau$  – tempo de residência [ $\text{s}$ ]

$\tau_0$  – tensão de inércia [ $\text{Pa}$ ]

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] Castro, I., Teixeira, J. A. e Vicente, A. A. The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering* 26, 17-29 (2003).
- [2] De Alwis, A.A. e Fryer, P.J. A finite-element analysis of heat generation and transfer during ohmic heating of food. *Chemical Engineering Science* 1547-155 (1990).
- [3] Danckwerts, P.V. Continuous flow systems- distribution of residence times. *Chemical Engineering Science* 2, 1-13 (1952).
- [4] Lima, M. e Sastry, S.K. The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *Journal of Food Science* 41, 115-119 (1999).
- [5] Sastry, S.K. e Palaniappan, S. Mathematical modeling and experimental studies on ohmic heating of liquid-particle mixtures in a static heater. *Journal of Food Process Engineering* 15, 241-261 (1992).
- [6] Sastry, S.K. A model for heating of liquid-particle mixtures in a continuous flow ohmic heater. *Journal of Food Process Engineering* 15, 263-278 (1992).
- [7] Sastry, S.K. e Salengke, S. Ohmic heating of solid-liquid mixtures: a comparison of mathematical models under worst-case heating conditions. *Journal of Food Science* 21, 441-458 (1998).

- [8] Zhang, L. e Fryer, P.J. Models for the electrical heating of solid-liquid food mixtures. Chem. Eng. Sci. 48, 633-642 (1993).