



## CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE AQUECIMENTO ÔHMICO PARA TRATAMENTO TÉRMICO DE SUCOS E POLPAS DE FRUTAS

Giovana Domeneghini Mercali, Ligia Damasceno Ferreira Marczak, Isabel Cristina Tessaro

Laboratório de Tecnologia e Processamento de Alimentos

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,

E-MAIL: {gmercali, Ligia, isabel}@enq.ufrgs.br

---

**Resumo:** Neste trabalho são apresentados resultados preliminares obtidos a partir da construção de um aquecedor ôhmico em escala de bancada para pasteurização de alimentos líquidos. O sistema opera em batelada e é composto por um variador de tensão, um sistema de aquisição de dados para monitoramento de temperatura, corrente elétrica e voltagem, e células ôhmicas cilíndricas que possuem eletrodos de platina nas extremidades. Experimentos para a validação do aparato experimental foram conduzidos através da comparação de valores de condutividade elétrica obtidos pelo aquecedor ôhmico e por um condutivímetro. Para tanto, foram utilizadas soluções salinas com concentrações conhecidas e, posteriormente, polpa de acerola. Na comparação entre as medidas dos equipamentos, foram obtidos resultados que validam as células ôhmicas uma vez que as diferenças entre as medidas foram inferiores a 5% para as soluções salinas testadas. Os experimentos realizados com a polpa de acerola mostraram um comportamento quadrático entre a condutividade elétrica e a temperatura, diferente do comportamento linear obtido com o uso do condutivímetro. A condutividade elétrica das polpas aumenta com o aumento da temperatura e da concentração de sólidos totais. O comportamento quadrático pode ser explicado pela formação de bolhas de ar que foram efetivamente observadas durante o aquecimento ôhmico. Essas bolhas ocorrem devido à existência de zonas mais quentes no interior da célula que promovem ebulição da amostra enquanto parte do sistema encontra-se ainda numa temperatura inferior ao ponto de ebulição. Atualmente um novo modelo de célula está sendo desenvolvido. Esta nova célula possui um sistema de agitação que permitirá uma melhor uniformidade de aquecimento.

**Palavras-chave:** condutividade elétrica; aquecimento ôhmico; célula ôhmica; eletrodos.

---

### 1. Introdução

O aquecimento ôhmico (AO) é um processo que consiste na passagem de corrente elétrica alternada através de um alimento com a finalidade principal de aquecimento através da geração interna de energia. Devido à sua resistência inerente, o alimento transforma energia elétrica em térmica, promovendo, assim, um aumento de temperatura em seu interior, não havendo necessidade de transferência de calor através de interfaces sólido-líquido ou no interior de partículas sólidas. O fenômeno de dissipação de energia elétrica em calor nesta forma foi primeiramente elucidado por James Prescott Joule, e, assim, a tecnologia é variadamente conhecida como aquecimento Joule, aquecimento eletrocondutivo, eletroaquecimento, aquecimento por resistência elétrica e aquecimento por resistência elétrica direta (Sastry, 2008). A maior parte dos alimentos que exigem processamento

térmico contém constituintes iônicos, tais como ácidos e sais, conduzindo, portanto, eletricidade.

O aquecimento ôhmico se distingue de outros métodos de aquecimento elétrico pela presença de eletrodos em contato com o alimento (em oposição ao aquecimento por microondas e aquecimento indutivo onde os eletrodos estão ausentes), pela frequência e pela forma da onda (USA-FDA, 2000). As frequências mais utilizadas no processo de aquecimento ôhmico tendem a ser aquelas das fontes de alimentação (50 ou 60 Hz, dependendo do local); porém, elas não precisam ser tão restritas: uma ampla gama potencial de frequências pode ser utilizada, desde que não recaia nas faixas associadas com as frequências de rádio ou microondas, sendo limitada apenas pela natureza da aplicação e por sua economia. Do mesmo modo, não há nenhuma restrição sobre a forma de onda a ser utilizada, apesar de considerações de ordem prática ditarem o uso de formas de onda senoidal ou pulso. O aquecimento ôhmico tem

demonstrado ser extraordinariamente rápido e relativamente uniforme espacialmente em comparação com outros métodos elétricos (Sastry, 2008).

Esta tecnologia foi utilizada no século XIX para a pasteurização de leite e não obteve sucesso por limitações técnicas. Porém, devido aos avanços na tecnologia de materiais e de processos, nos últimos 20 anos este processo tem sido amplamente estudado como uma moderna alternativa para o tratamento térmico de alimentos, pois os produtos obtidos em geral possuem qualidade superior aos produzidos utilizando as tecnologias convencionais (Castro *et al.*, 2004).

A principal vantagem do aquecimento ôhmico é a rapidez e uniformidade do aquecimento, traduzindo-se na minimização de perdas de propriedades estruturais, nutricionais e sensoriais. Além disso, no caso de alimentos de elevada viscosidade ou alimentos contendo partículas suspensas, esta tecnologia de aquecimento é particularmente interessante uma vez que é possível que as fases líquidas e sólidas tenham a mesma taxa de aquecimento, evitando, assim, o sobreaquecimento das partículas maiores em zonas mais externas. Ainda, este processo possui alta eficiência energética, baixo custo de investimento e é considerado tecnicamente simples (Qihua *et al.*, 1993). As potenciais aplicações industriais deste processo são muito vastas e incluem descongelamento, branqueamento, evaporação, desidratação, fermentação, pasteurização, entre outras.

Atualmente, diversos estudos têm sido realizados a fim de aprofundar os conhecimentos em relação a este processo. As pesquisas têm aplicado o aquecimento ôhmico em diferentes alimentos, como frutas e carnes (Icier e Ilicali, 2005b; Sarang *et al.*, 2008), polpas e geléias de fruta (Castro *et al.*, 2003), sucos (Palaniappan e Sastry, 1991b; Lima *et al.*, 1999; Marybeth *et al.*, 1999; Icier e Ilicali, 2004; Icier *et al.*, 2008), purês (Icier e Ilicali, 2005a; Icier *et al.*, 2006), entre outros.

Aquecedores ôhmicos estáticos têm sido utilizados em diversos estudos para medidas de condutividade elétrica e avaliação de seus efeitos no processamento de alimentos. Qihua *et al.* (1993) desenvolveram um aparato de aquecimento ôhmico composto por um sistema de suprimento de energia, um sistema de controle de fluxo, um sistema de aquisição de dados e duas unidades de aquecimento ôhmico. Uma das unidades é composta por uma célula cilíndrica de acrílico de 6,0 cm de diâmetro e 4,8 cm de comprimento para operação em batelada; a outra possui formato similar, com 30,4 cm de comprimento, para fluxo contínuo. Muitos estudos publicados utilizam células de vidro com diferentes tamanhos, sendo em sua maioria de comprimento de até 3,0 cm (Castro *et al.*, 2003; Sarang *et al.*, 2008; Icier, 2009).

Este trabalho tem como objetivo projetar, construir e validar um sistema de aquecimento ôhmico em escala de bancada visando o tratamento térmico de alimentos líquidos. Para avaliar o desempenho do aparato experimental, amostras de polpa de acerola foram aquecidas ôhmicamente, monitorando-se a temperatura e a condutividade elétrica do produto durante o processamento.

## 2. Materiais e métodos

### 2.1 Projeto do sistema de aquecimento ôhmico

O aparato experimental consiste em um sistema para fornecimento de energia, um sistema de aquisição de dados e uma célula ôhmica. O diagrama esquemático desse sistema é visualizado na Figura 1.

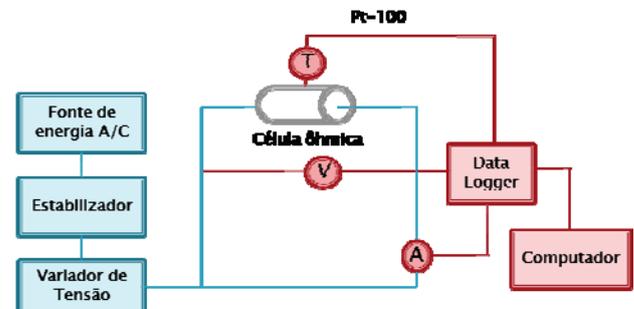


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de aquecimento ôhmico.

**Fonte de energia:** o sistema para fornecimento de energia é composto por um estabilizador (*Forceline*, modelo EV 1000 T/2-2, Brasil), um variador de tensão de 0 a 220 V (*Sociedade Técnica Paulista LTDA*, modelo Varivolt, Brasil) e um disjuntor (*Siemens*, Brasil). O estabilizador foi conectado à rede local, utilizando corrente alternada com frequência de 60 Hz.

**Sistema de aquisição de dados:** o sistema de aquisição de dados é responsável pelo monitoramento e registro de dados relativos à corrente elétrica, voltagem e temperatura em função do tempo. Os dados foram coletados em intervalos de 0,6 s, utilizando um módulo de aquisição e registro (*Novus*, modelo Field logger, Brasil). Uma vista da janela mostrada no computador quando se utiliza o software para aquisição e registro de dados está demonstrada na Figura 2.

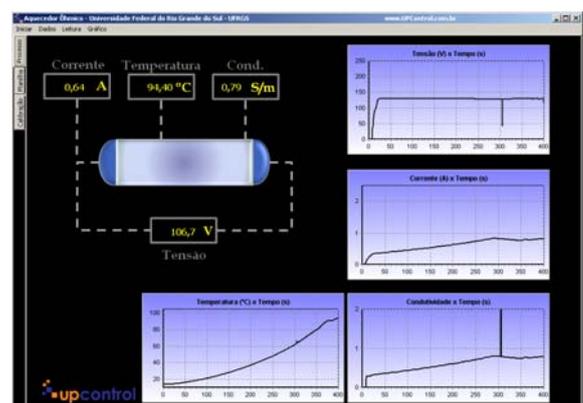


Figura 2. Vista da janela mostrada no computador quando se utiliza o software para aquisição e registro de dados.

Para monitoramento da temperatura, foi utilizado um medidor de temperatura do tipo Pt-100 (*Novus*, Brasil), com haste de aço inoxidável revestida com uma liga de níquel-fósforo a fim de evitar reações de corrosão. Para o monitoramento da voltagem através das amostras, foi utilizado um transdutor de Tensão CA (*Yokogawa*, modelo 2374A-T13-VRX/AN, Taiwan), cujo sinal de entrada varia de 0 a 300 V. A corrente elétrica foi

monitorada através de um transdutor de corrente CA, (Yokogawa, modelo 2374A-T13-ALS/NA, Taiwan) com sinal de entrada de 0 a 5 A. Estes equipamentos foram calibrados através da utilização de um multímetro (Wavetek Meterman, modelo 25XT, Taiwan) e um termômetro de mercúrio.

**Construção das células ôhmicas:** para o desenvolvimento deste trabalho, foram projetadas e construídas duas células ôhmicas, denominadas célula ôhmica #1 e célula ôhmica #2. As peculiaridades e diferenças de cada uma estão descritas a seguir.

**Célula ôhmica #1:** a célula ôhmica foi construída em vidro borossilicatado (Pyrex), resistente a altas temperaturas. Uma fotografia da célula esta mostrada na Figura 3 (a). A célula possui formato cilíndrico com 8,47 cm de comprimento e 3,2 cm de diâmetro, e na sua parte central há uma abertura de 0,8 cm de diâmetro para inserção do medidor de temperatura.

Em suas extremidades, a célula possui eletrodos de platina, que estão conectados a uma fonte de energia. Anéis de vedação envolvem o eletrodo em uma tampa plástica resistente a altas temperaturas, como observado na fotografia da Figura 3 (b).

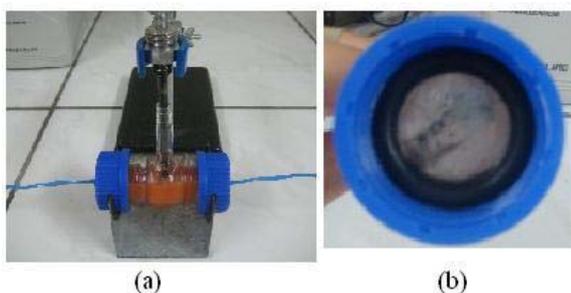


Figura 3. (a) - Fotografia da célula ôhmica; (b) - Fotografia do eletrodo de platina.

**Célula ôhmica #2:** a segunda célula avaliada nesse estudo foi desenvolvida com um menor comprimento e uma mesma área de seção transversal. Construída em vidro borossilicatado (Pyrex), possui 2 cm de comprimento e 3 cm de diâmetro, conferindo uma área de seção transversal de 7,06 cm<sup>2</sup>. Na parte central, há uma abertura de 0,7 cm de diâmetro para inserção do medidor de temperatura e um espaço extra para armazenar o volume de líquido que se expande durante o aquecimento ôhmico, principalmente durante a formação de bolhas de gás.



Figura 4. Fotografia da célula ôhmica #2.

A célula ôhmica #2 foi inicialmente projetada com apenas um orifício na parte central e por isso medidas de temperatura em outros pontos não eram possíveis. Para

medição da temperatura em um ponto alternativo, foi realizada uma modificação na célula, que consistiu em inserir um orifício em uma de suas extremidades. Para tanto, foi necessário aumentar o comprimento da mesma. Assim, a célula ôhmica passou a ter 3 cm de diâmetro e 3,6 cm de comprimento. A Figura 5 mostra a célula ôhmica #2 modificada.



Figura 5. Fotografia da célula ôhmica #2 modificada.

## 2.2 Determinação da condutividade elétrica

Através de medidas de corrente elétrica e voltagem, realizadas pelo equipamento descrito no item 2.1, é possível calcular a condutividade elétrica das amostras aquecidas, de acordo com a Equação:

$$\sigma = \frac{L \cdot I}{A \cdot V}$$

onde:

$\sigma$  = condutividade elétrica (S/m)

$L$  = espaço entre os eletrodos (m)

$A$  = área da seção transversal da amostra (m<sup>2</sup>)

$I$  = corrente através da amostra (A)

$V$  = voltagem através da amostra (V)

## 2.3 Experimentos de validação

A validação do sistema de aquecimento ôhmico foi realizada através da comparação de resultados de condutividade elétrica obtidos utilizando, inicialmente, o aparato de aquecimento ôhmico e, posteriormente, um condutivímetro (*Digimed*, modelo DM-3, Brasil) previamente calibrado com solução padrão. Para tanto, foram utilizadas, inicialmente, soluções salinas de NaCl com concentrações de 0,02 a 0,17 M e soluções de NaPO<sub>4</sub> com concentrações variando entre 0,03 e 0,25 M. Para cada concentração, foram elaboradas duas soluções em balões volumétricos distintos, a fim de minimizar os erros nas diluições dos sais.

Para os testes com a célula ôhmica #1, uma voltagem de 140 V foi aplicada ao sistema. Já para os testes realizados com a célula ôhmica #2, foi utilizada uma voltagem variando entre 20 e 50 V. Os valores de condutividade elétrica de cada solução, em ambos os equipamentos, foram obtidos na temperatura de 25°C para fins comparativos.

Para avaliar a aplicabilidade do processo em alimentos líquidos, polpas de acerola foram aquecidas até 80°C no aparato experimental, utilizando a célula ôhmica #1, com uma voltagem de 140 V. Valores de condutividade elétrica foram obtidos em função da

temperatura. Posteriormente, foram realizadas análises em condutivímetro, em intervalos de 10 °C, para validação das medidas.

## 2.4 Obtenção das polpas

A polpa de acerola foi fornecida congelada pela empresa *Mais Fruta*, embalada em sacos de polietileno de 100 g. As amostras foram descongeladas e utilizadas sem nenhum tratamento na realização dos experimentos. Quando indicado, as amostras foram desaeradas em um sistema de desaeração a vácuo em escala de bancada. O sistema consiste em um frasco kitasato, vedado com uma rolha de silicone, contendo a polpa e ligado a uma bomba de vácuo (*Primatec*, modelo 131, Brasil). A pressão reduzida imposta ao sistema, associada à agitação do frasco, promoveu a retirada das bolhas de ar do produto.

## 2.5 Experimentos utilizando a célula ôhmica #1

### 2.5.1 Investigação das causas de formação de bolhas

#### a) Bolhas oclusas na polpa de acerola

A polpa de acerola possui bolhas oclusas, incorporadas durante as etapas de elaboração da mesma. Para avaliar a influência dessas bolhas sobre o processo de aquecimento ôhmico, as polpas foram desaeradas previamente à realização do aquecimento, conforme descrito no item 2.4. As amostras foram desaeradas em diferentes intervalos de tempo: 20, 30, 45 e 60 minutos. Em seguida, amostras aeradas e desaeradas foram aquecidas até 80°C no aparato experimental com uma voltagem de 140 V. Valores de condutividade elétrica foram obtidos em função da temperatura. Posteriormente, foram realizadas análises em condutivímetro, em intervalos de 10 °C, para comparação.

#### b) Determinação de diferenças de temperatura

Para testar a hipótese da existência de diferenças de temperatura no interior da célula, testes utilizando sensores de temperatura em dois locais distintos foram realizados. Foi utilizado um medidor portátil de temperaturas Penta III (*Full Gauge*, Modelo Penta III, Brasil) com sensores tipo pt-100. Um medidor foi inserido em uma das extremidades da célula e o outro no centro da célula, conforme mostrado na Figura 6.

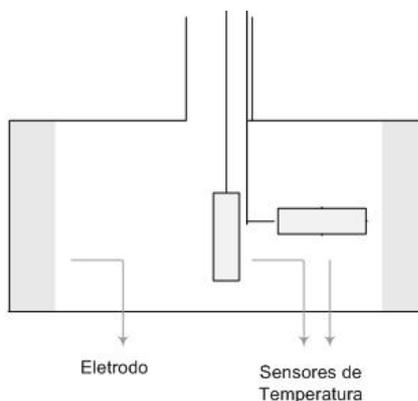


Figura 6. Desenho esquemático que mostra o posicionamento dos sensores de temperatura no interior da célula ôhmica #1.

Inicialmente foram aquecidas soluções de NaCl 0,16M, aplicando um tensão de 80V. Após, medidas com polpa de acerola foram realizadas com uma tensão de 90 V. As medidas foram realizadas monitorando a temperatura no centro da célula. A cada aumento de 5°C, realizava-se a leitura da temperatura correspondente na extremidade da célula. Durante esse procedimento, foi cronometrado o tempo de aquecimento para as amostras serem aquecidas de 20 a 90°C. Os testes foram realizados em triplicata, tanto para a solução salina quanto para a polpa de acerola.

## 2.6 Experimentos utilizando a célula ôhmica #2

### 2.6.1 Investigação das causas de formação de bolhas

#### a) Bolhas oclusas na polpa de acerola

Polpas aeradas e desaeradas foram aquecidas através do AO para avaliação da influência das bolhas presente na solução na queda da condutividade em temperaturas elevadas e na formação de bolhas. As polpas foram desaeradas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7. Inicialmente, as polpas foram desaeradas em ultrassom (*Unique*, USC-1600A, Brasil) por 60 minutos. Após, foram desaeradas em bomba de vácuo (*Primatec*, modelo 131, Brasil) por 45 minutos e por fim foram mantidas em banho-maria a 70°C por 60 minutos para eliminação das bolhas que pudessem ainda estar oclusas na polpa.

O aquecimento ôhmico foi realizado utilizando voltagem de 40 V. O procedimento foi realizado em triplicata.

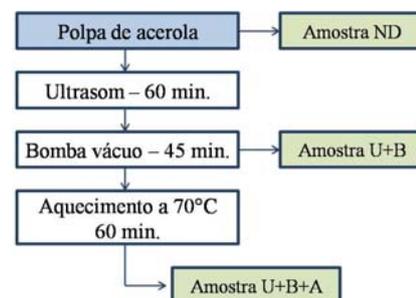


Figura 7. Fluxograma para obtenção de polpa desaerada.

#### b) Determinação de diferenças de temperatura

A célula ôhmica #2 foi projetada com apenas um orifício na parte central e por isso medidas de temperatura em outros pontos não eram possíveis. Assim, uma modificação foi realizada na célula, conforme descrito no item 2.1 da seção de Materiais e Métodos.

Com essa célula modificada, foram realizados testes para avaliar a diferença de temperatura entre a extremidade e o centro. Esses experimentos foram realizados com solução salina 0,16 M e com polpa de acerola 8%. O aquecimento ôhmico foi conduzido, em triplicata, com uma voltagem de 40 V para a solução salina e 60 V para a polpa de acerola.

### 2.6.2 Avaliação da adição de antiespumante na formação de bolhas durante o aquecimento ôhmico

Testes para avaliar a influência da adição de antiespumante na formação de bolhas durante o aquecimento ôhmico de polpa de acerola foram conduzidos. Foi utilizado um antiespumante comercial fabricado pela empresa D'altomare Química (emulsão para altas temperaturas 1520).

O antiespumante é utilizado em concentrações máximas de 10 ppm em massa para produtos alimentícios. Assim, foram testadas 3 concentrações do produto (1, 5 e 10 ppm). O produto foi adicionado na polpa (com 8% de sólidos totais) de acordo com as recomendações do fabricante, ou seja, agitação do produto, adição direta seguida de homogeneização lenta. O aquecimento ôhmico foi realizado em triplicata para cada concentração estudada aplicando uma voltagem de 40 V ao sistema.

### 2.6.3 Avaliação da influência da concentração de sólidos totais na condutividade elétrica

Polpas com diferentes teores de sólidos totais (2,0 2,88 5,0 7,12 e 8%) foram aquecidas ôhmicamente com uma voltagem de 40 V de 30 a 90°C. Os experimentos foram realizados em duplicata para todas as concentrações avaliadas.

## 3. Resultados e discussão

### 3.1 Construção do aquecedor ôhmico

O sistema de aquisição de dados teve um desempenho satisfatório, realizando as medidas de temperatura, voltagem e corrente elétrica, sem apresentar problemas de segurança.

#### 3.1 Célula ôhmica #1

##### 3.1.1 Validação do aparato experimental

A validação do aparato experimental, utilizando a célula ôhmica #1, foi realizada através da comparação de valores de condutividade elétrica de soluções salinas de cloreto de sódio e fosfato de sódio em condutivímetro e no sistema de aquecimento ôhmico. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1 para soluções de NaCl e na Tabela 2 para soluções de Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. Analisando os dados destas tabelas, verifica-se que as diferenças entre as medidas realizadas pelo condutivímetro e durante o aquecimento em célula ôhmica foram inferiores a 4,6 % para ambos os sais testados, indicando precisão satisfatória do sistema de aquecimento ôhmico construído. Palaniappan e Sastry (1991b) também utilizaram sais para validar aquecedores ôhmicos de bancada. Estes pesquisadores encontram diferenças de até 6,3 % quando valores de condutividade elétrica obtidos via AO foram comparados com valores de literatura e com valores obtidos a partir de análise em condutivímetro. Sarang *et al.* (2008) validaram um sistema de aquecimento ôhmico utilizando três soluções salinas de calibração com condutividades elétricas de 8974  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , 12.880  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e 15.000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . A máxima diferença entre os valores medidos no aparato experimental e os valores de referência foi de 9%.

Tabela 1. Valores de condutividade elétrica para as soluções de NaCl.

NaCl			
Conc. (M)	$\sigma$ Condutivímetro ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$\sigma$ AO ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Diferença cond./AO (%)
0,02	0,23	0,22	4,58
0,05	0,56	0,55	1,51
0,08	0,87	0,88	0,46
0,14	1,50	1,55	2,16
0,16	1,75	1,72	1,43
0,17	1,81	1,92	3,73

Tabela 2. Valores de condutividade elétrica para as soluções Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>			
Conc. (M)	$\sigma$ Condutivímetro ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$\sigma$ AO ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Diferença cond./AO (%)
0,03	0,22	0,21	3,11
0,05	0,35	0,34	3,38
0,1	0,66	0,65	0,71
0,15	0,93	0,94	0,39
0,2	1,21	1,22	0,55
0,25	1,47	1,48	0,62

Os resultados dos testes realizados com polpa de acerola estão apresentados na Figura 8. Nesta figura, a condutividade elétrica, obtida a partir do aquecimento ôhmico e a partir do condutivímetro, foi plotada em função da temperatura. Verifica-se um comportamento linear da condutividade elétrica com a temperatura para as medidas realizadas em condutivímetro, e um comportamento quadrático para as medidas realizadas no aquecedor ôhmico. Em alguns estudos realizados envolvendo aquecimento ôhmico de sucos (Palaniappan e Sastry, 1991b) e legumes em salmoura (Palaniappan e Sastry, 1991a) foi observado um comportamento linear semelhante ao reproduzido pelo condutivímetro. No entanto, outras pesquisas encontraram comportamento quadrático em temperaturas próximas a 70 °C para alimentos como frutas e carnes (Castro *et al.*, 2003; Sarang *et al.*, 2008), legumes (Tulsian *et al.*, 2008), geleias e polpas (Castro *et al.*, 2003), e sucos (Icier e Ilcali, 2004; İcier *et al.*, 2008).

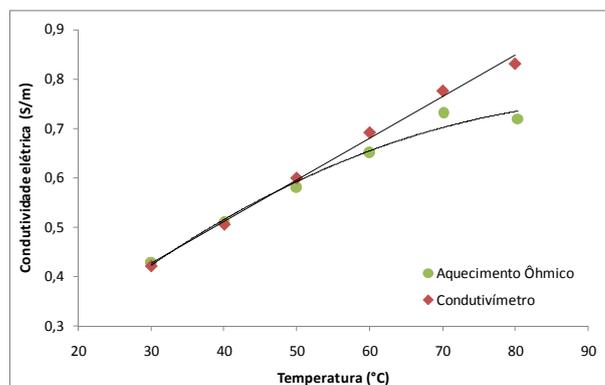


Figura 8. Condutividade elétrica em função da temperatura para polpa de acerola.

O comportamento quadrático pode ser explicado pela formação de bolhas de ar, que foram efetivamente observadas durante o aquecimento ôhmico. Estas bolhas não conduzem corrente elétrica e podem ser originárias de três fenômenos distintos: bolhas presentes na polpa incorporadas durante o processamento, já que as mesmas não foram desaeradas; bolhas de hidrogênio decorrentes da dissociação iônica que ocorre na superfície dos eletrodos; e bolhas de ar formadas pela ebulição da água contida nas polpas, devido a uma diferença de temperatura entre o centro e as extremidades da célula.

Qihua *et al.* (1993) também observaram a formação de bolhas durante o aquecimento ôhmico de suco de laranja em temperatura próximas a 50°C. A razão para isso poderia ser a liberação do gás do líquido, devido a algumas reações eletroquímicas. As bolhas se formaram mais rapidamente quando altos gradientes de tensão foram utilizados. De acordo com estes autores, a liberação de bolhas é uma variável que deve ser seriamente considerada na concepção estática de sistemas de aquecimento ôhmico.

Nos itens a seguir, são descritos resultados de testes realizados para avaliar a influência desses três fenômenos no processo de formação de bolhas durante o aquecimento ôhmico de polpa de acerola.

### 3.1.2 Investigação das causas de formação de bolhas

#### a) Bolhas oclusas na polpa

As bolhas de ar presentes na polpa, incorporadas durante o processamento, tendem a aumentar com o aumento da temperatura. Para avaliar a influência das mesmas durante o aquecimento, foram realizados experimentos similares com polpas desaeradas. O tempo de desaeração variou de 20 a 60 minutos de acordo com o procedimento descrito no item 4.2 da seção de Materiais e Métodos. Na Figura 9 estão apresentados os resultados obtidos. Observou-se que as curvas mantêm um comportamento quadrático em temperaturas entre 70 e 80°C, evidenciando que as bolhas presentes no produto não são as principais responsáveis pelas variações de condutividade elétrica em temperaturas mais elevadas. Visualmente, as bolhas continuaram a se formar com a mesma intensidade que nos testes realizados sem a desaeração do produto.

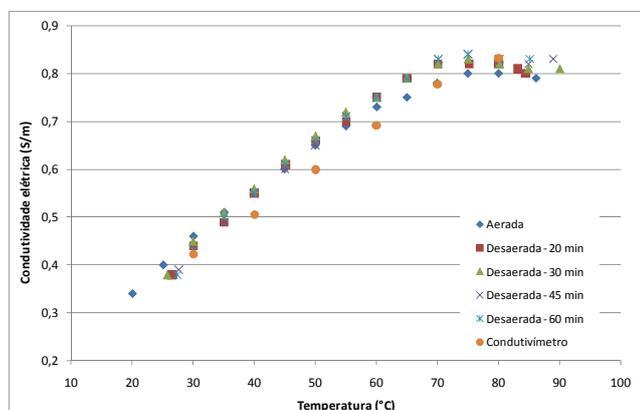


Figura 9. Condutividade elétrica de polpas aeradas e desaeradas.

#### b) Reações de eletrólise

Durante o aquecimento ôhmico, reações de eletrólise podem ocorrer, decompondo substâncias presentes no alimento e formando novos compostos. Quando campos elétricos elevados são aplicados, essas reações são aceleradas. Bolhas de hidrogênio, formadas a partir da dissociação de ácidos fracos, foram observadas em pequenas quantidades próximas aos eletrodos a partir de 45°C. Estas bolhas possuem diâmetro menor do que as bolhas responsáveis pela queda de condutividade elétrica em temperaturas próximas a 70 °C. Assim, a ocorrência de reações de eletrólise não é a explicação para o comportamento quadrático observado.

#### c) Bolhas devido a diferenças de temperaturas existentes entre as extremidades e o centro da célula ôhmica

As bolhas observadas durante os experimentos de aquecimento das polpas iniciaram em temperaturas próximas a 70 °C e possuíam aspecto similar a bolhas geradas em processos de ebulição. Uma hipótese para explicação de tais bolhas seria a ocorrência de zonas mais quentes no interior da célula que promovem ebulição da amostra enquanto parte do sistema encontra-se ainda numa temperatura inferior ao ponto de ebulição. De acordo com Fryer *et al.* (1993), essas diferenças de temperatura no interior da célula ôhmica podem ocorrer devido a taxa de geração de calor desuniforme ocasionada por uma distorção do campo elétrico local. Em alimentos com partículas em suspensão, a alta ou baixa condutividade elétrica das partículas, em relação à condutividade do fluido, pode provocar distorções do campo elétrico. Dependendo da viscosidade do fluido e da fração de sólidos, essa distorção pode causar variações locais de temperatura no líquido ao redor da partícula que podem afetar tanto as taxas de aquecimento, como o tempo de processamento dos alimentos.

Para confirmar essa hipótese, testes para avaliar diferenças de temperatura no interior da célula foram conduzidos. Os experimentos foram realizados de acordo com metodologia apresentada no item 2.5.1 da seção de Materiais e Métodos. Na Figura 10 está apresentada uma das curvas de aquecimento obtida para a solução de NaCl 0,16 M. Como pode ser observado nesta figura, próximo a 65°C ocorre a máxima diferença de temperatura no interior da célula que é de aproximadamente 21°C. Para elevar a temperatura da amostra de 20 para 80°C, foi necessário um tempo médio de aquecimento de aproximadamente 4 minutos e 34 segundos.

A mesma metodologia foi empregada para avaliar diferenças de temperatura durante o aquecimento ôhmico de polpa de acerola; os resultados obtidos são demonstrados na Figura 11. Diferenças de temperatura entre o centro e a extremidade da célula foram de até 27°C em temperaturas próximas a 50°C. Esse valor é um pouco superior que o encontrado para a solução de NaCl, pois a polpa de acerola ser mais viscosa, característica que impede uma maior difusão de calor no interior da célula. De acordo com Fryer *et al.* (1993), localmente, soluções mais viscosas aquecem mais rapidamente do que a água. Isto ocorre provavelmente devido à falta de convecção natural nas soluções de alta viscosidade, o que resulta em

altas temperaturas na região de densidade de corrente máxima. Estas altas temperaturas resultam em condutividade elétrica elevada e, portanto, uma menor resistência ao sistema. Dessa forma, a convecção natural age de forma eficaz na redução da diferença de temperatura quando a viscosidade da solução é baixa, mas é geralmente menos eficaz no caso da solução viscosa.

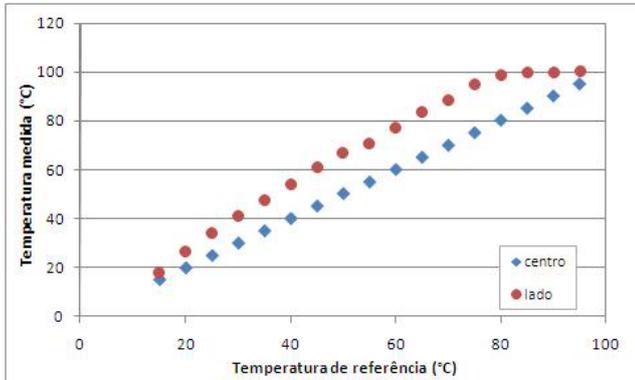


Figura 10. Diferença de temperatura entre dois pontos da célula ôhmica #1 durante aquecimento ôhmico de solução salina 0,16M.

O tempo de aquecimento para elevar a temperatura da polpa de acerola de 20 para 80°C foi de 6 minutos e 30 segundos. Esse tempo é superior ao tempo de aquecimento da solução salina porque a condutividade elétrica da mesma é superior à condutividade elétrica da polpa de acerola.

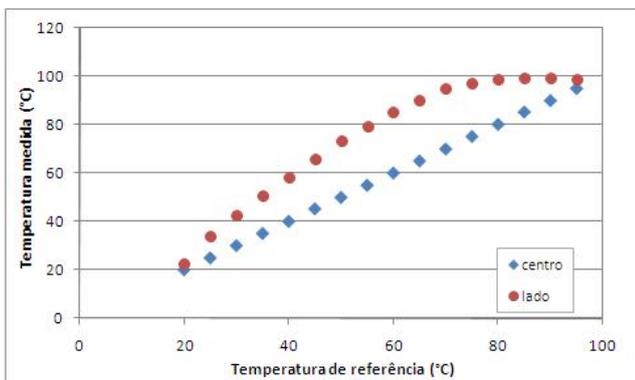


Figura 11. Diferença de temperatura entre dois pontos da célula ôhmica #1 durante aquecimento ôhmico de polpa de acerola.

Fryer *et al.* (1993) realizaram experimentos para investigar as formas pelas quais o ôhmico aquecimento de líquidos difere do aquecimento convencional e para avaliar o efeito da viscosidade do líquido sobre a distribuição de temperatura. Esse estudo demonstrou que existe variações de temperatura em alimentos líquidos contendo partículas sólidas em algumas situações devido a diferentes taxas de aquecimento das fases sólidas e líquidas. Esses pesquisadores realizaram o aquecimento ôhmico de soluções de carboximetilcelulose de alta viscosidade com pedaços retangulares de batata onde (a) a condutividade elétrica da fase líquida é muito maior que a condutividade elétrica dos pedaços de batata e (b) a condutividade elétrica da fase líquida é semelhante a condutividade elétrica dos pedaços de batata. Para a situação (a), foram observadas grandes diferenças de temperatura, valores de aproximadamente 30°C, entre dois pontos da célula ôhmica. Já para a situação (b), a diferença de temperatura

entre os dois pontos foi na ordem de 10°C. Este mesmo experimento foi conduzido utilizando uma solução de carboximetilcelulose de baixa viscosidade. Os resultados demonstraram que quando a condutividade elétrica das partículas é bastante diferente continua existindo uma grande diferença de temperatura no interior da célula. Porém, se as condutividades elétricas são iguais, essa diferença de temperatura diminui, havendo uniformidade de temperatura em todo o sistema acima de 60°C. Com esses experimentos, os pesquisadores concluíram que uma variação da condutividade elétrica de cerca de 5% resulta em uma taxa de aquecimento de sólidos e líquidos aceitável e uniforme, produzindo diferenças de temperatura de até 10°C em algumas partes da solução.

Em sistemas de aquecimento ôhmico contínuo, o sobreaquecimento em determinadas regiões não ocorre, pois a solução está em constante movimento, promovendo uma homogeneização da temperatura no interior da tubulação. Estas diferenças de temperatura encontradas nos testes realizados neste estudo devem-se, primeiramente, ao sistema operar em modo batelada e não permitir agitação da solução; outro fato que contribui para esse comportamento é o grande comprimento da célula, que permite que haja uma difusão de calor não homogênea ao longo do eixo. Assim, novos estudos foram realizados a partir da construção de uma célula ôhmica de menor comprimento (célula ôhmica #2), de forma a diminuir o espaçamento entre os eletrodos para que a solução no interior da célula aqueça mais uniformemente.

### 3.2 Célula ôhmica #2

#### 3.2.1 Validação da célula ôhmica

A validação da célula ôhmica #2, que possui 3 cm de diâmetro e 2,1 cm de comprimento, foi realizada seguindo o mesmo procedimento utilizado para a validação da célula #1. Os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 3 para a solução de NaCl, e na Tabela 4 para a solução de Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. A diferença entre as medidas realizadas pelo condutivímetro e durante o aquecimento ôhmico foi inferior a 5% para ambos os sais testados, indicando precisão satisfatória da célula ôhmica desenvolvida.

Tabela 3. Valores de condutividade elétrica de soluções de NaCl obtidos no AO e pelo condutivímetro.

Conc. (M)	Célula (S·m <sup>-1</sup> )	Condutivímetro (S·m <sup>-1</sup> )	Erro (%)
0,02	0,23	0,23	4,12
0,02	0,23	0,23	3,83
0,05	0,54	0,53	4,43
0,05	0,54	0,54	2,34
0,08	0,83	0,83	4,94
0,08	0,84	0,84	4,44
0,14	1,44	1,4	4,45
0,14	1,44	1,43	3,47
0,16	1,64	1,64	4,38
0,16	1,67	1,66	3,99
0,17	1,76	1,76	4,45
0,17	1,74	1,74	4,05

Tabela 4. Valores de condutividade elétrica de soluções de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  obtidos no AO e pelo condutivímetro.

Conc. (M)	Solução $\text{NaPO}_4$	Célula ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Condutivímetro ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	Erro (%)
0,03	A	0,22	0,21	3,21
0,03	B	0,22	0,21	3,37
0,05	A	0,35	0,34	3,03
0,05	B	0,35	0,34	2,73
0,10	A	0,67	0,63	4,54
0,10	B	0,65	0,63	2,12
0,15	A	0,94	0,90	3,39
0,15	B	0,92	0,89	2,38
0,20	A	1,23	1,15	4,46
0,20	B	1,22	1,16	3,59
0,25	A	1,51	1,41	4,47
0,25	B	1,48	1,41	3,25

### 3.2.2 Novos estudos para investigação das causas de formação de bolhas

#### a) Bolhas oclusas na polpa de acerola

Polpas aeradas e desaeradas foram aquecidas através do AO (utilizando voltagem de 40 V) para avaliação da influência das bolhas presente na solução na queda da condutividade em temperaturas elevadas e na formação de bolhas na célula ôhmica #2. As polpas foram desaeradas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7.

Os resultados obtidos para o aquecimento ôhmico das amostras ND (não desaeradas), amostras U+B (amostras que passaram pelo ultrassom e bomba de vácuo) e as amostras U+B+A (amostras que passaram pelo ultrassom, bomba de vácuo e aquecimento) são apresentados na Figura 12. A análise destes resultados mostra que não houve mudança no comportamento da curva de condutividade elétrica em função da temperatura quando o processo de desaeração foi realizado. Visualmente, também não houve diferença perceptível nas bolhas formadas. Esse resultado é similar ao obtido nos testes de desaeração e aquecimento com a célula ôhmica #1. No aquecimento da polpa aerada, as bolhas iniciaram em temperaturas próximas a 40°C, a 80°C as bolhas começam a ganhar volume e ocorrem mais rapidamente, e a 93°C ocorreu transbordamento da solução para fora da célula. No aquecimento da amostra U+B, as bolhas iniciaram em temperaturas próximas a 50°C, a 75°C as bolhas começam a ganhar volume e ocorrem mais rapidamente e a 93°C ocorreu transbordamento da solução para fora da célula. A mostra U+B+A, por sua vez, apresentou bolhas próximo a 50°C, bolhas um pouco mais fortes a 83°C e transbordamento a 95°C.

Resultados similares foram obtidos por Palaniappan e Sastry (1991c) em estudos de aquecimento ôhmico de suco de tomate e suco de laranja. As amostras foram aquecidas, resfriadas e reaquecidas novamente para expulsar as bolhas dissolvidas nos sucos. Durante o reaquecimento, poucas mudanças no comportamento foram observadas. Com isso, os pesquisadores concluíram que a presença de gases dissolvidos na amostra não foram as principais responsáveis pelo comportamento quadrático da condutividade elétrica em altas temperaturas.

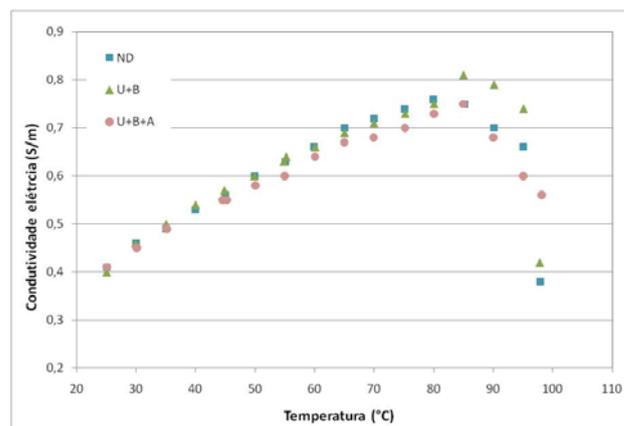
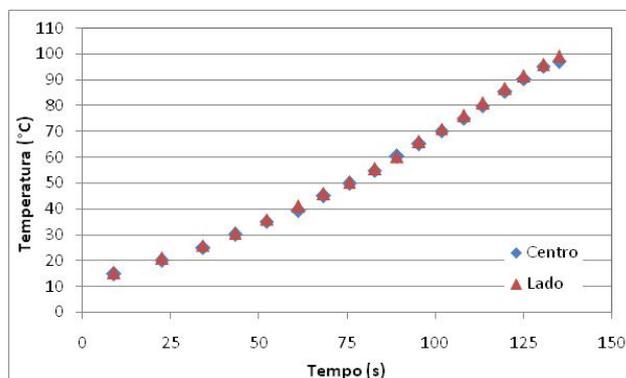


Figura 12. Aquecimento ôhmico de polpas aeradas e desaeradas por diferentes processos.

#### b) Diferenças de temperatura no interior da célula ôhmica #2

Medidas de temperatura na extremidade e no centro da célula #2 foram realizadas durante o aquecimento de solução  $\text{NaCl}$  0,16M (Figura 13) e polpa de acerola (Figura 14). Os resultados demonstram que uma diferença máxima de temperatura de 2,2 °C foi obtida durante o aquecimento da solução salina. Para a polpa de acerola a máxima diferença de temperatura foi de 5,6 °C em temperaturas próximas a 60 °C. Esses valores são menores do que os encontrados para a célula ôhmica #1. Isso indica que a diminuição do tamanho da célula contribuiu para uma maior uniformidade de aquecimento, sendo uma alternativa para processos de bancada que operam em batelada.

Figura 13. Diferença de temperatura entre dois pontos da célula ôhmica #2 durante aquecimento ôhmico de solução  $\text{NaCl}$  0,16M.

Lima *et al.* (1999) determinaram o histórico de tempo e temperatura durante os aquecimentos ôhmico e convencional. Foram realizados estudos com uma solução salina 0,22% para determinar a extensão dos gradientes térmicos existentes dentro do aquecedor, em cada caso. Os resultados demonstraram que durante o aquecimento ôhmico a temperatura média do aquecedor afastou-se da temperatura no centro em aproximadamente 2 a 3 °C. No caso convencional, a temperatura média foi superior a do centro em 3 a 5 °C. De acordo com esses pesquisadores, estes fenômenos ocorrem devido ao aquecimento de dentro para a fora no caso do aquecimento ôhmico,

(aquecimento gerado internamente) e do aquecimento de fora para dentro no caso do aquecimento convencional.

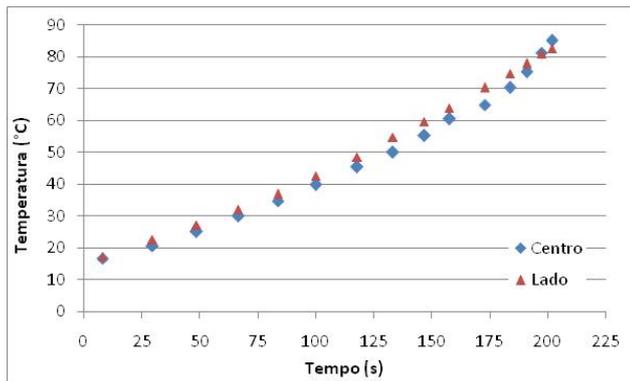


Figura 14. Diferença de temperatura entre dois pontos da célula ôhmica #2 durante aquecimento ôhmico de polpa de acerola.

Qihua *et al.* (1993) avaliaram a temperatura em 5 diferentes pontos de duas células de diferentes tamanhos durante o aquecimento ôhmico de suco de laranja. Em testes utilizando uma célula menor (6 cm de diâmetro e 4,8 cm de comprimento), a diferença de temperatura variou entre 1 e 2 °C. No entanto, uma unidade maior (6 cm de diâmetro e 30,4 cm de comprimento) apresentou diferenças consideráveis de temperatura ao longo do seu eixo para diferentes gradientes de tensão. As diferenças de temperatura máximas, quando o suco de laranja atingiu uma temperatura de 80°C, foram de aproximadamente 2,6, 3,0 e 5,8 °C para gradientes de tensão de 3,6, 4,8 e 6,8 V·cm<sup>-1</sup>, respectivamente. Gradientes de tensão mais elevados geralmente geram maiores diferenças de temperaturas. De acordo com estes autores, além da dissipação de calor, um fator que contribui para o gradiente de temperatura no interior da célula é a formação de um campo elétrico não uniforme devido à presença de termopares.

### 3.2.5 Avaliação da influência da adição de antiespumante na formação de bolhas durante o aquecimento ôhmico

Testes para avaliar a influência da adição de antiespumante na diminuição das bolhas formadas durante o aquecimento ôhmico de polpa de acerola foram realizados de acordo com a metodologia descrita no item 2.6.2 da seção de Materiais e Métodos. Os resultados obtidos estão demonstrados na Figura 15.

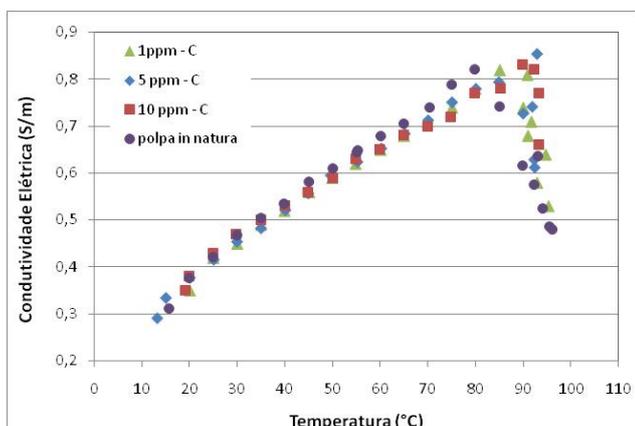


Figura 15. Condutividade elétrica em função da temperatura para o aquecimento ôhmico de polpa de acerola com adição de antiespumante em diferentes concentrações.

Os resultados obtidos demonstram que a adição do antiespumante não evitou a diminuição da condutividade elétrica em temperaturas mais elevadas. Porém, a adição do antiespumante resultou em uma leve diminuição da intensidade de formação de bolhas, principalmente, na concentração de 10 ppm quando comparada a polpa *in natura*. Ainda, verifica-se que houve um aumento da faixa de linearidade da condutividade elétrica na faixa de temperatura entre 80 e 90°C.

### 3.2.4 Avaliação da influência da concentração de sólidos totais na condutividade elétrica

Para avaliar a influência da concentração de sólidos totais na condutividade elétrica da polpa de acerola, amostras com diferentes concentrações de sólidos foram aquecidas no sistema de aquecimento ôhmico. O teor de sólidos da polpa foi ajustado na faixa de concentração de 2 a 8% através da adição de água deionizada.

O aquecimento ôhmico foi realizado em duplicata para cada concentração numa voltagem de 40 V. Os resultados são apresentados na Figura 16. Como pode ser observado nesta figura, a condutividade elétrica aumenta com o aumento do teor de sólidos totais. Isso ocorre porque, quanto maior a concentração de sólidos, maior o número de espécies iônicas no produto. A diluição com água faz com que a concentração desses compostos com carga seja menor. Icier e Ilcali (2004) avaliaram a condutividade de suco de maçã e suco de tomate durante o aquecimento ôhmico e concluíram que a condutividade elétrica dos sucos depende da temperatura, do gradiente de voltagem aplicado e da concentração de sólidos totais.

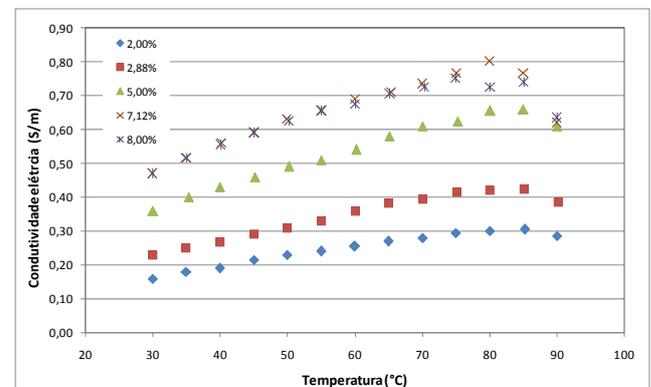


Figura 16. Condutividade elétrica em função da temperatura durante o aquecimento ôhmico da polpa de acerola com diferentes concentrações sólidos totais.

## 4. Conclusões

Este trabalho teve como objetivo projetar, construir e validar um sistema de aquecimento ôhmico em escala de bancada. O equipamento desenvolvido apresentou desempenho satisfatório com relação à aquisição de dados e ao aquecimento das substâncias testadas.

Os testes com as soluções salinas validaram o aparato experimental visto que diferenças em relação às medidas em condutivímetro foram inferiores a 5% para diferentes concentrações de soluções salinas. Os experimentos realizados com a polpa de acerola mostraram um comportamento quadrático entre a

condutividade elétrica e a temperatura, diferente do comportamento linear obtido com o uso do condutivímetro. A utilização de polpas desaeradas, que se especulava fornecer melhores resultados comparativos, mostrou-se insuficiente para explicar esta diferença, evidenciando que outros fenômenos estão envolvidos no processo.

Testes de monitoramento de temperatura em diferentes pontos da célula ôhmica #1 demonstraram que o comportamento quadrático pode ser explicado pela formação de bolhas decorrente do processo de ebulição da polpa que ocorre devido à existência de zonas mais quentes no interior da célula. Diferenças de temperatura entre o centro e a extremidade da célula foram de até 27°C em temperaturas próximas a 50°C. Nessas zonas mais quentes ocorre ebulição da amostra, enquanto parte do sistema encontra-se ainda numa temperatura inferior ao ponto de ebulição.

Na tentativa de minimizar gradientes de temperatura, uma célula ôhmica menor foi construída. Esta célula apresentou melhores resultados, com diferenças de temperatura de aproximadamente 6 °C entre o centro e o lado para o aquecimento de polpa de acerola.

Atualmente um novo modelo de célula está sendo desenvolvido. Esta nova célula possui um sistema de agitação que permitirá uma melhor uniformidade de aquecimento.

A adição do estieespumante resultou em uma leve diminuição da intensidade de formação de bolhas, principalmente, na concentração de 10 ppm. A condutividade elétrica da polpa de acerola aumenta com o aumento da temperatura e do teor de sólidos totais.

## 5. Referências

Castro, I.; Teixeira, J.A.; Salengke, S.; Sastry, S.K.; Vicente, A.A. The influence of field strength, sugar and solid content on electrical conductivity of strawberry products. *Journal of Food Process Engineering*, v.26, n.1, p.17-29, 2003.

Castro, I.; Teixeira, J.A.; Salengke, S.; Sastry, S.K.; Vicente, A.A. Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v.5, n.1, p.27-36, 2004.

Fryer, P.J.; De Alwis, A.A.P.; Koury, E.; Stapley, A.G.F.; Zhang, L. Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat Generation and Convection Effects. *Journal of Food Engineering*, v.18, p.101-125, 1993.

Icier, F. Influence of ohmic heating on rheological and electrical properties of reconstituted whey solutions. *Food and Bioproducts Processing*, v.87, n.4, p.308-316, 2009.

Icier, F.; Ilicali, C. Electrical conductivity of apple and sourcherry juice concentrates during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, v.27, n.3, p.159-180, 2004.

Icier, F.; Ilicali, C. Temperature dependent electrical

conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, v.38, n.10, p.1135-1142, 2005a.

Icier, F.; Ilicali, C. The use of tylose as a food analog in ohmic heating studies. *Journal of Food Engineering*, v.69, n.1, p.67-77, 2005b.

Icier, F.; Yildiz, H.; Baysal, T. Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering*, v.74, n.3, p.424-429, 2006.

Icier, F.; Yildiz, H.; Baysal, T. Polyphenoloxidase deactivation kinetics during ohmic heating of grape juice. *Journal of Food Engineering*, v.85, n.3, p.410-417, 2008.

Lima, M.; Heskitt, B.F.; Burianek, L.L.; Nokes, S.E.; Sastry, S.K. Ascorbic acid degradation kinetics during conventional and ohmic heating. *Journal of Food Processing and Preservation*, v.23, n.5, p.421-443, 1999.

Palaniappan, S.; Sastry, S.K. Electrical conductivities of selected solid foods during ohmic heating. *Journal of Food Process Engineering*, v.14, n.3, p.221-236, 1991a.

Palaniappan, S.; Sastry, S.K. Electrical conductivity of selected juices: influences of temperature, solids content, applied voltage, and particle size. *Journal of Food Process Engineering*, v.14, n.4, p.247-260, 1991b.

Qihua, T.; Jindal, V.K.; Van Winden, J. Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for liquid foods. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.9, n.3, p.243-253, 1993.

Sarang, S.; Sastry, S.K.; Knipe, L. Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, v.87, n.3, p.351-356, 2008.

Sastry, S. Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing. *Food Science and Technology International*, v.14, p.419-422, 2008.

Tulsiyan, P.; Sarang, S.; Sastry, S.K. Electrical Conductivity of Multicomponent Systems During Ohmic Heating. *International Journal of Food Properties*, v.11, n.1, p.233-241, 2008.

USA-FDA, F.A.D.A. Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies: Ohmic and inductive heating. United States. Disponível em: <<http://www.cfsan.fda.gov/~comm/ift-ohm.html>>. Acesso em: 01 de junho de 2010.