

# **POSSIBILIDADES E DESAFIOS NO USO DE AQUECIMENTO ÔHMICO PARA O PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS**

THIAGO SOARES LEITE<sup>1</sup>  
ALLINE TRIBST<sup>2</sup>  
MARCELO CRISTIANINI<sup>3</sup>

---

Aquecimento ôhmico é uma tecnologia emergente que se baseia na passagem de corrente elétrica por um produto, o qual aquece através da dissipação da energia elétrica em térmica. Por ter um aquecimento mais homogêneo, os alimentos processados por aquecimento ôhmico apresentam uma menor degradação de compostos nutricional ou sensorialmente importantes, e, conseqüentemente, uma qualidade superior em comparação ao mesmo alimento quando submetido a um processo térmico convencional. Seus efeitos são majoritariamente térmicos e alguns estudos apontam que existe um efeito secundário não térmico relacionado ao campo elétrico. Esta revisão tem como objetivo apresentar uma visão geral sobre esta tecnologia; seu histórico; seus parâmetros críticos de processo; tipos de configuração de equipamentos; aplicações e potenciais a serem explorados; os efeitos térmicos e não térmicos desta tecnologia em diversos produtos, assim como comparações com o tratamento térmico convencional. A partir dela, é possível concluir que a tecnologia tem grande potencial para ser utilizada na indústria de alimentos, não só pela qualidade dos produtos obtidos, mas por ser mais ambientalmente adequada (menor consumo de recursos naturais para geração da energia necessária). Entretanto, a consolidação necessária da tecnologia para que ela se torne competitiva no mercado de processamento de alimentos depende da intensificação de estudos para melhor entendimento dos seus efeitos não térmicos e estabelecimento de protocolos que garantam a segurança do produto processado.

*PALAVRAS-CHAVES: AQUECIMENTO ÔHMICO, TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, PROCESSAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS.*

---

- 1 Laboratório de Tecnologias Emergentes, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (email: sleite.thiago@gmail.com)
- 2 Laboratório de Tecnologias Emergentes, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (email: tribst@unicamp.br)
- 3 Laboratório de Tecnologias Emergentes, Departamento de Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas (email: olecram@unicamp.br)

## 1 INTRODUÇÃO

O tratamento térmico convencional, por aquecimento direto ou indireto, é o principal método utilizado para estender a vida de prateleira de alimento. Porém, em muitos produtos, estes processos podem causar perdas nutricionais, principalmente de compostos termo sensíveis, e alterações indesejáveis nas características sensoriais (Cullen et al., 2012).

O processamento térmico convencional é dependente de uma parede quente e do coeficiente de transferência condutiva e/ou convectiva do alimento, o que acaba gerando o chamado ponto frio, ou seja, o ponto de mais lento aquecimento de um alimento durante o processamento térmico (Fellows, 2000). Os tempos de processamento devem ser calculados de forma que o binômio tempo e temperatura no ponto frio do alimento sejam suficientes para garantir a estabilidade desejada. Isso faz com que ocorra um processamento acima do necessário em todos os outros pontos do produto (Cullen et al., 2012), o que pode acarretar em alterações indesejadas no mesmo.

Além disso, a transferência de calor depende, convencionalmente, de um fluido mais quente para aquecer o produto, sendo comumente utilizado vapor, água ou óleo quente. A produção de tais fluidos gera uma grande demanda energética, gastos com tratamento de resíduos e investimentos com todos os equipamentos dedicados para a produção do mesmo (Sakr & Liu, 2014).

Assim, a indústria de alimentos vem tentando desenvolver novas tecnologias ao longo dos anos, térmicas e não térmicas que consigam atingir os mesmos níveis de segurança microbiológica com menor custo e levando a um menor número de transformações indesejadas nos alimentos (Cullen et al., 2012). Estas tecnologias, classificadas como tecnologias emergentes de processamento de alimentos, buscam, de uma maneira geral, obter as seguintes características: respeito às normas e leis de seguridade de alimentos, extensão da vida de prateleira, manutenção dos aspectos sensoriais e nutricionais, desenvolvimento de novas propriedades funcionais e sensoriais de alimentos, melhora na aceitação dos alimentos pelos consumidores e menor impacto ambiental. Nem sempre todas as características podem ser alcançadas, e no que diz respeito à segurança dos alimentos, quando esta não é possível, deve-se utilizar estratégias de combinação de processos, seguindo o princípio das tecnologias de barreira (Cullen et al., 2012).

Neste contexto, existe um potencial para as tecnologias térmicas eletromagnéticas, que compreendem aquecimento ôhmico e por micro-ondas, para substituir, ao menos parcialmente, as tecnologias que já são amplamente estabelecidas na área de processamento térmico de alimentos (Vicente & Castro, 2007).

James Prescott Joule elucidou o fenômeno físico da dissipação da energia elétrica em energia térmica resultando em aquecimento do material quando o mesmo é submetido à passagem de corrente elétrica. Este efeito passou a ser denominado como “efeito Joule” ou “aquecimento Joule”. Quando este processo é usado na indústria de processamento de alimentos, recebe o nome do aquecimento ôhmico, mas também é conhecido por aquecimento elétrico, aquecimento eletrocondutivo ou aquecimento por resistência elétrica (Vicente et al., 2006; Sastry, 2009).

Este processamento pode ser usado em diversas aplicações dentro da indústria de alimentos, seja para processamento térmico (esterilização, pasteurização ou branqueamento) ou como operação unitária visando auxiliar processos de fermentação, desidratação ou extração. Atualmente, porém, ainda existe uma carência na exploração comercial desta tecnologia (Sastry, 2005).

## 2 MATERIAIS E METODOS

### 2.1. CONCEITOS BÁSICOS E DEFINIÇÕES.

O nome desta tecnologia é devido à lei de Ohm de eletricidade, que é conhecida como a correlação entre a corrente elétrica, tensão e resistência elétrica, segundo a equação 1 (Icier, 2012):

$$i = V/R \tag{1}$$

O aquecimento ôhmico utiliza a própria resistência elétrica do alimento para gerar aumento da temperatura interna, quando se submete o produto a uma corrente elétrica alternada, fazendo com que o alimento seja parte do circuito elétrico (Ruan et al., 2001; Sakr & Liu, 2014). O calor é gerado internamente no produto e produzido igualmente por todo o produto (sem gradiente de temperatura). Isto é uma vantagem comparando-se com o tratamento térmico convencional, pois no caso do aquecimento ôhmico, o processamento não é dependente de paredes quentes, ou dos coeficientes de transferência de calor do alimento (Cullen et al., 2012; Sakr & Liu, 2014). Assim, o processamento ôhmico apresenta melhores rendimentos e menores tempos de processo, que acarretam em uma maior retenção de nutrientes entre outros parâmetros de qualidade. Além disso, a conversão de energia elétrica em térmica é de cerca de 90%, uma das maiores da indústria de alimentos (Ruan et al., 2001; Sastry, 2008; Cullen et al., 2012).

Os parâmetros que definem o aquecimento ôhmico são a frequência e a forma das ondas do campo elétrico. As frequências mais utilizadas são as da rede de suprimento de energia elétrica, ou seja, 50 ou 60 Hz, dependendo da região do mundo; já os formatos de onda são diversos, porém as mais utilizadas são a senoidal e a pulsada (Sastry, 2008).

A taxa de aquecimento dependerá de muitos fatores, porém o gradiente do campo elétrico, que pode chegar a 1000 V/cm, e a condutividade do produto são os que mais afetam o processo (Sastry, 2008). Estes e outros aspectos serão melhores explorados nos itens a seguir.

## 2.2. HISTÓRICO

Mesmo sendo considerada uma tecnologia emergente, os primeiros ensaios com aquecimento ôhmico para alimentos foram realizados há muitas décadas. A eletro-pasteurização de leite, que era chamada de “eletropure”, teve suas primeiras aplicações no final do século 19, e alguns estudos foram realizados no início do século 20 (Icier, 2012). O processo consistia em passar o leite entre duas placas paralelas que estavam ligadas a uma diferença de tensão. Comercialmente, em outros países, a tecnologia já foi utilizada para pasteurizar leite, cozinhar salsicha e em branqueamento de tomate (Ruan et al., 2001; Sakr & Liu, 2014).

Apesar da implantação destas unidades comerciais, a difusão do aquecimento ôhmico como método de processamento de alimentos encontrou dificuldades principalmente devido aos efeitos relacionados à eletrólise junto aos eletrodos e, também, pelo alto custo da eletricidade na época, pela falta de regulamentação de processos e por uma série de outras limitações técnicas menos relevantes. Desta forma, o desenvolvimento do processo não foi bem sucedido e as pesquisas em aquecimento ôhmico foram descontinuadas entre 1930 e 1960 (Icier, 2012). Durante este período, a tecnologia quase desapareceu pela falta de materiais de eletrodos suficientemente inertes e sistemas de controle eficientes, sendo utilizado apenas para “eletro-descongelamento” (Sakr & Liu, 2014; Ruan et al., 2001).

Com o passar dos anos, novos materiais foram sendo desenvolvidos e na década de 80, o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Eletricidade do Reino Unido, revisou procedimentos e desenhos de sistemas de aquecimento ôhmico contínuo. A patente foi licenciada para utilização comercial para APV Baker Ltd, tornando a tecnologia novamente disponível para o mercado (Ruan et al., 2001; Icier, 2012; Sakr & Liu, 2014). Com o posterior desenvolvimento de novas tecnologias de suprimento de energia, passou a ser possível utilizar o aquecimento ôhmico de forma pulsada, com controle eficiente e econômico dos efeitos da eletrólise no eletrodo, fazendo com que este fenômeno deixasse de ser uma limitação para a aplicação da tecnologia (Icier, 2012).

Atualmente o processo tem grande potencial para a utilização em alimentos particulados, pois o aquecimento é produzido também dentro das partículas, minimizando os impactos de gradiente de aquecimento existente para este tipo de produto. Outra vantagem é a plena integração do processo de aquecimento ôhmico com sistemas de envase assépticos (Ruan et al., 2001; Sakr & Liu, 2014). Os sistemas ôhmicos atualmente estão melhores projetados, mais sofisticados e menos dispendiosos do que os projetos anteriores (Sastry, 2008; Anderson, 2008).

## 2.3. PARÂMETROS CRÍTICOS DE PROCESSO

A transformação de energia elétrica em térmica pode ser descrita pela equação 2 (Gerlach et al., 2008):

$$Q = \zeta \cdot f \cdot \sigma \cdot E^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo Q o calor gerado, o comprimento da onda/pulso, f a frequência,  $\sigma$  é condutividade elétrica do material, e finalmente E a intensidade do campo elétrico. Além dos parâmetros relacionados ao circuito elétrico, outros parâmetros de processamento, como por exemplo, ao escoamento do fluido podem influenciar o processo de aquecimento ôhmico.

### 2.3.1. Campo elétrico

O campo elétrico é o fator que mais tem influência sobre o aquecimento, uma vez que sua dependência é quadrática. O campo elétrico é definido pela potência, corrente e tensão aplicada no sistema, considerando a distância definida entre os eletrodos, ou *gap* (Icier, 2012). Além disso, a área e forma dos eletrodos e as características do alimento também afetam o campo elétrico formado. Em geral, os parâmetros de tensão, potência e corrente são mais facilmente manipuláveis através dos controladores utilizados nesta tecnologia.

A potência final aplicada no sistema é dependente da resistência (R) à passagem de corrente através do alimento (i) e da diferença de potencial em que o mesmo é submetido (U). Em tensões baixas (U), a corrente (i) atinge valores elevados para se obter a potência requerida ( $P=Ui$ ). Logo, o sistema deve possuir um transformador para aumentar a tensão elétrica, permitindo trabalhar com correntes menores (Roberts et al., 1998). Em alguns casos, para alimentos de alta condutividade, também pode ser importante utilizar o transformador para reduzir a tensão, de forma que a potência atingida não seja maior do que a desejada no processo.

Em relação aos eletrodos, os aspectos importantes são: (i) material de que são constituídos (por ex. ferro, inox, titânio, entre outros), (ii) área superficial e (iii) distância entre os eletrodos utilizados, afetando o campo elétrico gerado de forma inversamente proporcional ( $E; V/cm$ ) e, por isso, pode ser facilmente mudada em função do campo desejado (Icier, 2012).

A tensão também altera de forma inversamente proporcional o tempo do aquecimento, conforme a tensão aumenta, a taxa de geração de calor aumenta, diminuindo o tempo para atingir determinada temperatura (Icier, 2012).

### 2.3.2. Condutividade elétrica.

Ao contrário do campo elétrico, a condutividade elétrica é um parâmetro inerente do produto e, portanto, que não pode ser alterado de forma irrestrita (devido a fatores sensoriais, por exemplo). Isso torna a condutividade elétrica a variável mais importante a ser considerada para o desenvolvimento de um processo, uma vez que, como existe uma pequena margem viável para alteração do produto, é necessário que o processo seja desenhado em função das características iniciais do mesmo. A condutividade de um alimento varia principalmente em função de sua composição, mas também pode variar com a temperatura, tensão aplicada e frequência (Sastry & Palaniappan, 1992; Icier, 2012).

A condutividade elétrica depende da composição e da dissociação iônica de seus constituintes, e da microestrutura do alimento, alguns componentes como o teor de açúcares e de lipídeos podem mudar drasticamente a condutividade do produto (Parrott, 1992; Marcotte, et al., 2000; Icier, 2012). Por exemplo, a condutividade elétrica de leite aumenta de forma diretamente proporcional à quantidade de proteína presente, enquanto a concentração de lactose e lipídeos diminui a condutividade elétrica. A concentração de proteínas é importante, sendo que resultados demonstraram que o tempo de aquecimento ôhmico foi maior quanto menor a concentração de solução reconstituída de proteínas do soro de leite. Isso foi atribuído às menores quantidades de carreadores de íons/cargas livres que ocorre em baixas concentrações, reduzindo assim a condutividade elétrica da amostra (Icier, 2009; Icier, 2012)

Para produtos de fruta e vegetais, o aumento do conteúdo de solúveis (principalmente açúcar) e insolúveis promovem uma redução da condutividade do alimento (Palaniappan & Sastry,

1991; Icier & Ilicali, 2005). Com o aumento da concentração, ocorre um aumento do arrasto devido ao movimento de íons, reduzindo a condutividade elétrica de sucos e frutas (Icier, 2012). Caso um produto possua uma concentração acima de 20% de sólidos totais (m/m) e acima de 40 °brix, pode ser necessário um projeto específico de aquecedor ôhmico, devido à baixa condutividade elétrica (Castro et al., 2003). Na prática, a condutividade em produtos de frutas será afetada principalmente pela concentração e tipo de açúcares e de ácidos presentes, sendo que os ácidos apresentam um aumento na condutividade elétrica. Por outro lado, é possível que produtos preparados a partir de frutas diferentes possuam condutividades diferentes, ainda que contenham a mesma quantidade de sólidos e a mesma composição de açúcares e ácidos (Icier, 2012).

A microestrutura do alimento também pode afetar a condutividade elétrica do mesmo, a existência de células intactas, amido gelatinizado e presença de bolhas de ar reduzem a condutividade do alimento. Para produtos a base de morango, o aumento da intensidade do campo de elétrico de 12,5 para 50 V/cm levou a um aumento da condutividade elétrica para polpa e recheio (Castro et al., 2004a). Este aumento foi atribuído aos diferentes níveis de destruição da membrana e movimentação de líquido pelos capilares da amostra quando submetidas a elevados campos elétricos. Porém, o mesmo não pode ser observado para a cobertura de morango ou para a calda (combinado com maçã), pois os seus processos de obtenção do produto prévios ao processo ôhmico acarretaram na destruição da membrana, assim o campo elétrico não poderia induzir mudanças estruturais adicionais ou alterações na mobilidade do líquido e/ou dos compostos iônicos (Castro et al., 2003).

Para cortes de carne, a orientação da fibra muscular pode influenciar na condutividade elétrica, apresentando uma menor condutividade quando o campo elétrico é perpendicular às fibras (Sastry & Palaniappan, 1992; Saif et al., 2004).

Alimentos com conteúdo de amido sofrem alteração de condutividade em função do grau de gelatinização que varia ao longo do processo. Quando gelatinizado, o amido reduz a condutividade do meio devido a uma maior resistência ao movimento das partículas no grânulo (Wang & Sastry, 1997; Li et al., 2004). Assim, o monitoramento da condutividade elétrica de alimentos amiláceos pode ser uma forma indireta de avaliar se os grânulos de amido presentes em um alimento estão ou não gelatinizando.

O aquecimento ôhmico de produtos particulados deve ser avaliado com cuidado, pois o tamanho da partícula, sua orientação, densidade e as razões entre as condutividades elétricas e capacidades caloríficas da fase líquida e sólida influenciam o processo como um todo. Estas duas últimas razões irão afetar muito a distribuição de temperatura pelo produto e, em alguns casos pode ocorrer um sobreaquecimento ou um ponto frio, portanto deve-se conhecer ambos os parâmetros no momento da especificação do processamento (Sastry & Li, 1996; Icier, 2012).

### **2.3.3. Formato e frequência de onda**

A frequência e a forma da onda podem ocasionar mudanças na taxa de aquecimento e até mesmo impactar na condutividade do alimento. Em termos de formato, as ondas senoidais ou serrilhadas apresentaram condutividades elétricas maiores do que as ondas quadradas (Lima et al., 2001), sendo, portanto, mais utilizadas.

O aumento da frequência reduz a taxa de aquecimento dos alimentos, contudo, esta redução não é linear. Lima et al. (1999), verificaram que o aumento da frequência de 50 Hz para 10000 Hz, reduziu aproximadamente 6 vezes a taxa de aquecimento de produtos até 80°C. Por outro lado, o uso de frequências maiores aumenta os valores de *D* (tempo de redução decimal, ou seja, tempo necessário para degradação de 90% de um composto a uma temperatura fixa) de nutrientes, como relatado por Mercali et al. (2014) para a degradação de vitamina C em polpa de acerola. Também observaram menores valores de *D* quando a polpa foi processada a 10 Hz do que quando processada a 10<sup>2</sup> a 10<sup>5</sup> Hz, sendo que não houve diferença estatística significativa (*p*<0.05) entre os valores de *D* das amostras processadas na maior frequência.

A escolha do tipo de onda e da frequência deve ser associada, de forma a obter as melhores respostas dentro do objetivo do processo. Lima e Sastry (1999) utilizaram ondas senoidais com 60

Hz de frequência e ondas serrilhadas com 4 Hz de frequência como um pré-tratamento antes do processo de secagem de inhame e extração de suco de maçã. Os resultados mostraram que as ondas serrilhadas apresentaram o maior rendimento da extração de suco de maçã e uma maior taxa de secagem por ar quente das amostras de inhame. Neste caso, o melhor desempenho está relacionado ao tempo de relaxação de moléculas e ao tempo de acúmulo de cargas nas membranas celulares, o que aumenta a possibilidade de formação de poros ou até de destruição da membrana, efeitos importantes para posterior aumento da taxa de secagem ou extração de compostos (Ruan et al., 2001; Böckman et al., 2008; Sun et al., 2008; Knirsch et al., 2010; Mercali et al., 2015).

#### 2.3.4. Temperatura

A condutividade elétrica do produto é afetada pela temperatura. Em geral esta variação se dá na forma linear segundo a equação 3 (Castro et al., 2003; Icier, 2012).

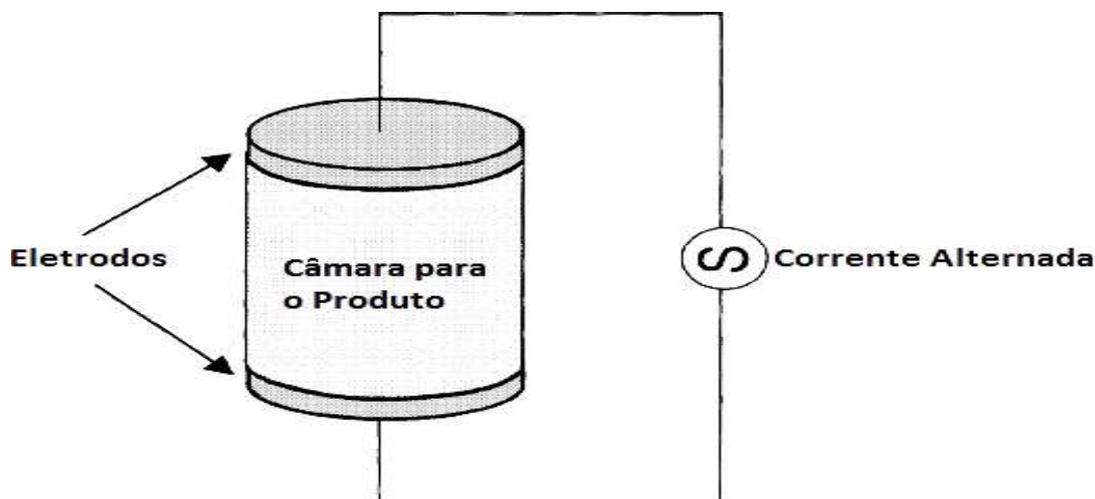
$$\sigma = BT + C \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo  $B$  e  $C$  constantes, que variam de produto para produto.

Dependendo das condições de processo é possível ocorrer um fenômeno conhecido como *runaway heating*, que é o aquecimento repentino e sem controle da amostra em certas regiões enquanto outras porções da mesma não atingiram a temperatura ideal, levando ao sobreaquecimento de algumas regiões do alimento.

### 2.4. EQUIPAMENTOS

Existem diversos equipamentos projetados para realização de processos em batelada ou em processos contínuos. Independentemente disso, todos terão como elementos comuns: um par (ou mais) de eletrodos que entram em contato com o alimento, uma câmara ou tubo por onde o alimento fica ou escoa e uma fonte de energia elétrica alternada que alimenta o sistema através de ambos os eletrodos (Ruan et al., 2001; Icier & Ilcali, 2005; Sakr & Liu, 2014). A figura 1 mostra a representação esquemática de um aquecedor ôhmico genérico:



**FIGURA 1: ESQUEMA GERAL DE AQUECEDOR ÔHMICO**

(Adaptado de Ruan et al., 2001).

Em linhas gerais existem quatro modelos de aquecedores ôhmicos no que dizem respeito à posição dos eletrodos: (i) Placas paralelas, que é mais adequada para fluidos de baixa condutividade, além de sistemas com partículas grandes, pois provoca uma menor taxa de cisalhamento; (ii) Hastes paralelas, que é mais utilizado em tratamento de resíduos, por ter um custo menor, porém apresenta menor taxa de aquecimento se comparada com os demais; (iii) Hastes escalonadas, outra opção de baixo custo e com uma taxa maior que a de hastes paralelas; (iv) Modelo colinear: melhor opção para produtos de alta condutividade e em geral necessita de uma maior tensão que o modelo de placas paralelas (Sakr & Liu, 2014).

Um aspecto importante, independente do modelo do aquecedor é o isolamento elétrico dos sistemas de controle de temperatura, para que desta forma não ocorram interferências que resultem em erros ou atrasos na leitura da temperatura do processo. Especialmente para produtos muito ácidos, o aquecimento ôhmico é bastante rápido e necessita-se de controladores com sensibilidade suficiente para que o tempo de resposta seja o menor possível e compatível com esta velocidade de aquecimento, evitando assim a ocorrência de um processamento mais intenso que o necessário (Icier, 2012). Em equipamentos em batelada os sensores devem ficar dispostos em diversas posições dos equipamentos e, para sistemas contínuos, a história térmica deve considerar, além da temperatura, o fluxo de massa e as mudanças na capacidade calorífica do produto ao longo do aquecimento (Icier, 2012).

Além disso, é importante que o fluxo de massa seja conhecido e controlado em um processo de aquecimento ôhmico contínuo, especialmente para produtos ricos em proteínas de forma a evitar depósito de material devido à desnaturação de proteínas (Icier, 2012). O uso de agitadores é importante, especialmente em sistemas em batelada, para diminuir a ocorrência de incrustação do produto, e auxiliar no resfriamento do alimento.

#### **2.4.1. Tipos de eletrodos**

A maior fonte de contaminação química de um sistema de aquecimento ôhmico são os eletrodos, uma vez que as reações eletroquímicas liberam íons metálicos, que acabam por migrar para o alimento. Esta contaminação pode gerar efeitos indesejáveis no sabor ou coloração do alimento, e, principalmente, pode apresentar efeitos tóxicos, dependendo da natureza do eletrodo utilizado (Amatore et al., 1998). Portanto deve-se minimizar a migração de componentes através do uso de materiais com menor tendência à corrosão, como titânio ou ouro, ou utilizando revestimentos adequados (Zhao & Kolbe, 1999; Sastry 2008; Ibrahim, 1999; Samaranayake & Sastry, 2005a; Samaranayake & Sastry, 2005b; Sakr & Liu, 2014). Além disso, a aplicação de ondas com frequências maiores reduz a ocorrência de eletrólise.

Um problema que pode acontecer em função das reações eletroquímicas é a formação de bolhas nos alimentos, especialmente nos produtos ácidos que potencializam a ocorrência destas reações (Palanapian & Sastry, 1991). Tais reações levam à formação de gás oxigênio ou gás hidrogênio. Além delas, quando a densidade da corrente e a tensão são elevadas, a água pode entrar em ebulição em temperaturas menores do que 100°C, levando também à formação de bolhas (Zhao & Kolbe, 1999; Jun et al., 2007). Devido a este fenômeno, aquecimentos ôhmicos com gradiente de 70 V/cm em purê de damasco e purê de pêsego não apresentaram temperaturas acima de 60 e 65°C, respectivamente (Palanapian & Sastry, 1991). Além das bolhas de oxigênio, hidrogênio e vapor de água, outro fator que pode levar ao aparecimento de bolhas é o ar que pode estar na amostra e expande-se por causa do aumento da temperatura, tornando-se perceptível, caso o sistema não seja pressurizado (Castro et al., 2004a).

### **2.5 MECANISMOS DE AÇÃO EM MICRORGANISMOS**

Inicialmente, acreditava-se que os efeitos desta tecnologia eram apenas térmicos, sendo esperados os mesmos binômios de tempo e temperatura aplicados no processamento térmico convencional. Porém, com o avanço dos estudos, muitos autores demonstraram que a tecnologia apresentava um efeito não térmico adicional, explicitado pelas diferenças nas taxas de morte observadas para microrganismos submetidos ao processo térmico convencional e aquecimento ôhmico (Cho et al., 1999; Pereira et al., 2007; Sun et al., 2008; Icier, 2012; Sakr & Liu, 2014).

A Tabela 1 apresenta os valores D e z (variação de temperatura necessária para reduzir/aumentar 10 vezes o valor de D) de inativação de alguns microrganismos em processos térmicos convencionais e ôhmicos com a mesma história térmica, ou seja, processos que utilizaram a mesma taxa de aumento de temperatura e, portanto, são passíveis de comparação.

Os dados da Tabela 1 corroboram a tese de que existe um efeito não-térmico adicional.

Entretanto, Palaniappan et al., (1992) não encontraram diferença significativa no efeito letal de ambas tecnologias para *Zygosaccharomyces sp.*, e *E. coli*, devido a características específicas do estudo e dos próprios microrganismos.

Deste modo, os resultados dos efeitos não térmicos não foram totalmente conclusivos, pois há uma grande dificuldade em se manter a mesma história térmica para o processo térmico convencional e para o processo ôhmico, devido a diferente natureza do perfil de aquecimento de ambas as tecnologias, porém é evidente o potencial destes efeitos não térmicos.

Os mecanismos exatos de como o campo elétrico afeta os microrganismos não foram completamente elucidados, porém sabe-se que baixa frequência utilizada no aquecimento ôhmico (50-60 Hz) permite que ocorra um acúmulo de carga elétrica na parede das células, o que pode induzir a formação de poros (Bhale, 2004). Outros possíveis efeitos são: (i) Rompimento da membrana celular e comprometimento de sua integridade; (ii) Eletrólise de compostos da superfície da membrana; (iii) Ruptura dielétrica, que seria causada pela atração das superfícies internas e externas da membrana, reduzindo sua espessura, aumentando sua permeabilidade e induzindo a formação de poros irreversíveis (Liu et al., 1997; Zimmerman et al., 1974).

Entre todos esses, o mecanismo mais aceito é o da eletroporação, uma formação de poros devido à pressão iônica, que causa mudança da permeabilidade da membrana celular, devido à variação do campo elétrico. Quando a intensidade do campo elétrico supera um valor crítico, ocorre a formação de poros na membrana. Esta formação de poros pode ser reversível ou não, dependendo da intensidade do campo elétrico, do tempo de processo, do meio no qual o microrganismo se encontra e das características inerentes do próprio microrganismo (Weaver & Chizmadzhav, 1996; Lojewski et al., 1989).

Em relação aos esporos bacterianos, o campo elétrico, especialmente quando aplicado em altas frequências, pode levar à liberação de ácido dipicolínico (DPA) juntamente com proteínas de cobertura do mesmo, o que auxilia no efeito do processo térmico, facilitando a inativação do esporo (Somawat et al., 2009).

Devido à existência de todos estes mecanismos não térmicos de inativação microbiana, alguns pesquisadores desenvolveram uma nova tecnologia chamada de campo elétrico moderado, na qual se refrigera externamente a célula de campo elétrico durante o processamento, de forma a explorar apenas os efeitos não térmicos do campo elétrico (Sastry, 2008; Knirsh et al., 2010), que será melhor explorado na sessão 3 deste trabalho.

Segundo o Food and Drug Administration (FDA), não foram encontradas nenhuma linhagem ou espécie de microrganismo que sejam especialmente resistentes a este processo, sendo assim, os patógenos mais resistentes aos processos térmicos convencionais possivelmente são aqueles que apresentam maiores resistências ao aquecimento ôhmico.

## 2.6. EFEITOS NOS COMPONENTES DOS ALIMENTOS E NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE.

Tanto quanto o processo térmico convencional, o aquecimento ôhmico pode levar a alterações na estrutura de alimentos como promover transformações em alguns constituintes, como proteínas, enzimas e vitaminas. A presença de campo elétrico no processo tem efeito adicional nas modificações provocadas pelo aquecimento ôhmico em alimentos. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as alterações provocadas pelo processo de aquecimento ôhmico e convencional sobre alguns constituintes de alimentos. A seguir, as principais alterações observadas são descritas.

O aquecimento ôhmico, em alimentos líquidos, não acarreta em alteração na acidez ou nos sólidos solúveis dos produtos (Icier & Ilicali, 2005; Icier, 2009). Entretanto, em produtos que contém células com algum grau de integridade, o processamento ôhmico pode causar difusão de compostos e outros nutrientes para o meio extracelular, devido ao efeito de eletroporação, com consequente alteração no pH ou no conteúdo de sólidos solúveis do alimento (Yoon et al., 2002; Kulshrestha & Sastry, 2006).

Produtos ricos em proteínas podem sofrer processos de coagulação, devido à desnaturação e agregação das proteínas, causados pelo aumento da temperatura. A proteína coagulada pode depositar-se nos eletrodos, aumentando a corrosão dos mesmos e a resistência elétrica do produto tratado (Bansal & Chen, 2006; Ayadi et al., 2003).

O aquecimento ôhmico pode desnaturar enzimas no produto, sendo o efeito majoritariamente térmico, uma vez que o campo elétrico não tem energia suficiente para causar uma separação das proteínas em subunidades (Castro et al., 2004a). Em estudo comparando a taxa de degradação de diversas enzimas utilizando método convencional e aquecimento ôhmico, Castro et al. (2004b) verificaram que o aquecimento ôhmico foi semelhante ao processo convencional na inativação de pectinase, fosfatase e  $\beta$ -galactosidase. Similarmente, resultados obtidos por Leizeron & Shimoni (2005) destacaram taxas similares de inativação de pectinametilsterase, entre 90 e 98%, para processos de aquecimento ôhmico e convencional. Entretanto, as enzimas lipoxigenase e polifenoloxidase apresentaram um menor tempo de inativação em aquecimento ôhmico quando comparado ao processo térmico convencional (Castro et al., 2004b). A presença do campo elétrico, segundo os autores, pode influenciar reações bioquímicas, aumentando as interações entre cadeia e promovendo alterações no grupo metálico, causando redução na atividade da enzima.

As vitaminas também são afetadas pelo processo e uma comparação entre a taxa de degradação de vitamina C induzidas pelos processos térmico convencional e ôhmico é mostrado na Tabela 2. Neste caso, os resultados obtidos por diferentes autores foram divergentes, sendo que, segundo Lima et al., (1999) a variação não foi significativamente diferente, enquanto que, para Vikram et al. (2005) o aquecimento ôhmico promoveu uma retenção maior deste nutriente, se comparado com outros métodos (incluindo micro-ondas, infravermelho e tratamento térmico convencional). No mesmo estudo, o valor de Energia de Ativação ( $E_a$ ) para a destruição de ácido ascórbico e o valor  $Z$  foram, respectivamente de 47,27 kJ/mK e 20,70°C para o aquecimento ôhmico e 39,84 kJ/mK e 24,39°C para o aquecimento convencional. Segundo Assiry et al. (2006) a degradação da vitamina C pelo aquecimento ôhmico é afetada principalmente pelo pH do meio e também pela concentração de sal, efeitos tamponantes e potência elétrica utilizada no processo. Assim, é possível que tais fatores expliquem a divergência entre os resultados obtidos por Lima et al. (1999) e Vikram et al. (2005). Para  $\beta$ -caroteno, resultados obtidos após aplicação de aquecimento ôhmico (no intervalo de 10 a 40 V/cm) em espinafre demonstraram maior retenção do que o observado no aquecimento convencional (Yildiz et al., 2010).

Na avaliação da degradação de compostos relacionados ao sabor, Leizeron & Shimoni (2005b) demonstraram que o processo ôhmico promoveu maior retenção de limoneno, mirceno, octanal e decanal em suco de laranja, quando comparado ao suco pasteurizado por aquecimento convencional. Os autores relacionaram esta maior retenção à junção de dois principais fatores; o primeiro, atribuído ao fato da alta temperatura liberar estes compostos que estavam ligados a outros compostos do alimento, e o segundo, relacionado ao fato do processo ôhmico requerer um tempo de residência total de processo menor que o convencional, dada sua alta taxa de aquecimento. Assim os compostos ficam menos tempo susceptíveis à degradação pela temperatura em um processo ôhmico se comparado com o convencional.

Leizeron & Shimoni (2005a) verificaram o efeito da pasteurização ôhmica de suco de laranja nas características sensoriais do suco. O suco processado ôhmicamente não foi diferenciado do suco não processado, e ambos foram diferenciados do suco pasteurizado de forma convencional. Em relação à vida-de-prateleira, o suco ôhmicamente processado apresentou 79 dias de estabilidade antes de rejeição de pelo menos 50% dos provadores, contra 50 dias do suco processado convencionalmente. Não há muitos estudos que reportam os efeitos da tecnologia de aquecimento ôhmico nos aspectos sensoriais, apesar de ser um dos fatores de qualidade mais importantes para produtos da indústria de alimentos.

Vários estudos presentes na literatura sobre a tecnologia de aquecimento ôhmico ressaltam a importância da viscosidade como um fator crítico ao processo (Fryer et al., 1993; Ruan et al., 2001;

Tsai et al., 2009; Shynkaryk & Sastry, 2012; Sakr & Liu, 2014; Shiby Varghese et al., 2014). Há alguns trabalhos como os publicados por Khalaf & Sastry (1996), Ruan et al. (2001), Legrand et al. (2007) e Shiby Varghese et al. (2014) que afirmam que em sistemas de partículas sólidas suspensas em uma fase líquida, a viscosidade desta fase líquida também é um fator relevante e deve ser considerada durante o planejamento das condições de processo e formulação do produto.

Outros trabalhos indicam que a tecnologia de aquecimento ôhmico tem maior potencial e maiores vantagens em sistemas com fluídos de alta viscosidade (Fryer et al., 1993; Ghnimi et al., 2008; Knirsch et al., 2010; Sakr & Liu, 2014), devido à dificuldade de aquecimento por métodos convencionais.

Muitos trabalhos verificaram as alterações reológicas após o aquecimento ôhmico em produtos como soluções reconstituídas de proteínas do soro de leite (Icier, 2009), suco de romã (Yildiz et al., 2009), néctar de marmelo (Bozkurt & Icier, 2009) e ovo líquido (Bozkurt & Icier, 2012). Em todos os trabalhos ocorreu um aumento da consistência do produto atribuída a fenômenos como desnaturação de proteína ou gelificação de pectinas.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 CAMPO ELÉTRICO MODERADO

Como dito anteriormente, o aquecimento ôhmico possui efeitos térmicos e não térmicos. Este efeito não térmico pode ser verificado comparando processos de natureza diferentes com a mesma história térmica (térmico convencional e ôhmico), porém é possível a utilização apenas do efeito não térmico, controlando-se a temperatura do alimento processado abaixo daquelas capazes de promover efeitos térmicos sobre os componentes do alimento enquanto é submetida à corrente elétrica. A este tipo de processo é dado o nome de Campo Elétrico Moderado, ou simplesmente MEF (*Moderated Electric Field*).

Apesar de não possuir uma definição oficial, MEF, é aplicação de campo elétrico de intensidade não superior a 1000 V/cm, sem o uso de aquecimento, ou com aquecimento brando, para obtenção de objetivos específicos (Sastry, 2008).

O processo de MEF é capaz de permeabilizar membranas de células eucarióticas, como descrito anteriormente através do fenômeno chamado eletroporação, resultando, desta forma, em maiores taxas de rendimento de extração de sucos, e de secagem e extração de compostos como betaninas de beterraba quando comparadas com técnicas convencionais (Lima & Sasty, 1999; Kulshrestha & Sastry, 2006; Sastry, 2008). Pode auxiliar no descascamento de frutas e vegetais, diminuindo o consumo de reagentes como NaOH, além de potencialmente diminuir a quantidade de água durante o branqueamento (Sensoy & Sastry, 2004; Sastry, 2008).

MEF não tem por objetivo a morte celular, por outro lado, a permeabilização da membrana pode alterar o metabolismo de microrganismos, acelerando seu desenvolvimento pela diminuição da fase lag durante fermentação em condições de MEF (Cho et al., 1999). Segundo os autores, o campo elétrico consegue dissociar os antimicrobianos polares (presentes no caldo MRS) e as macromoléculas que o *L acidophilus* produz que estão aderidos à parede da célula. Desta forma o processo auxilia na absorção inicial de nutrientes, e minimiza o efeito antimicrobiano presente no caldo, ocasionando na redução da fase lag. A Tabela 3 também apresenta algumas comparações entre dados de fermentação e extração de suco utilizando MEF e processos tradicionais.

#### 3.2 TENDÊNCIAS FUTURAS DAS TECNOLOGIAS ÔHMICAS

No aspecto acadêmico, as pesquisas devem ser focadas no entendimento dos mecanismos de morte celular, degradação de compostos importantes para os aspectos nutricionais e sensoriais, além de um melhor entendimento do mecanismo de eletroporação. Um maior conhecimento e,

consequentemente, manipulação dos efeitos não térmicos pode auxiliar na redução do tempo de processo, causando um menor impacto nos compostos termo sensíveis.

Pesquisas também são necessárias para desenvolvimento de métodos mais detalhados para identificação, verificação e avaliação de pontos frios em sistemas particulados, incluindo modelamento e métodos de validação. Outro campo de pesquisa relevante é o contínuo estudo sobre os mecanismos de corrosão do eletrodo, bem como o desenvolvimento de matérias mais resistentes às ondas de baixas frequências (Sastrý, 2008).

Novos modelos de equipamento podem ser desenvolvidos especificamente para algum produto, tendo em vista suas características e requerimentos. Os equipamentos podem passar a utilizar fontes de energias “limpas” para a geração de energia elétrica, à medida que o processo se torne mais eficiente e usual (Anderson, 2008; Icier, 2012).

Em termos de aplicação industrial, para que esta tecnologia se torne mais abrangente, deve-se criar protocolos que garantam a segurança alimentar. Tais protocolos devem ser criados em conjunto pela indústria, órgãos governamentais e academia.

## **5 CONCLUSÃO**

A tecnologia de aquecimento ôhmico tem um grande potencial para ser utilizada na indústria de alimentos, devido a sua maior taxa de aquecimento, menor tempo de processo, distribuição de temperatura uniforme e potencial retenção de compostos de interesse. A não utilização de meio secundário de troca de calor também é um fator que favorece aplicação do aquecimento ôhmico por questões ambientais. Apesar disso, a tecnologia não pode ser considerada de pronta aplicação, especialmente pela falta de protocolos que garantam a segurança do produto processado. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de tais protocolos e também do melhor entendimento dos efeitos não térmicos sobre os alimentos processados.

Tais avanços farão com que o aquecimento ôhmico se torne uma tecnologia bastante interessante e competitiva para o processamento de alimentos, permitindo a obtenção de produtos processados com características mais próximas aos alimentos *in natura*, o que atende a uma demanda crescente do mercado consumidor.

## **ABSTRACT**

### **POSSIBILITIES AND CHALLENGES IN THE USE OF OHMIC HEATING IN FOOD PROCESSING**

Ohmic heating (OH) is an emerging food technology based on the electric current passage through a product, which is heated as it dissipates the electrical energy into heat. Due to a uniform heating, processed food by OH presents a minor degradation of important nutritional compounds and sensory characteristics, leading to a better product quality compared with a conventional heat process. Its effects on microbial inactivation are mainly thermal, however, some studies showed that a secondary non-thermal effect exists and is related to the electrical field. Many factors can influence the ohmic heating process, for instance the electrical conductivity, the current intensity and the equipment design. The objective of this review is to present general aspects about this technology; its history; its critical factors; equipment design; potential and current applications; the thermal and non-thermal effect of this technology on several products, as well comparison with thermal treatment conventional. Therefore, is possible to conclude that this technology present great potential to be used on food industry, due to the obtained product quality, and to eco-friendly (minor consumption of natural resources to generate the required energy). However, the necessary consolidation of technology to become competitive in the food processing market depends on the intensification of

studies to improve the understanding of its non-thermal effects and the establishment of protocols that guarantee the safety of the processed product.

**KEYWORDS:** OHMIC HEATER, FOOD TECHNOLOGY, FOOD THERMAL PROCESSING

## REFERÊNCIAS

- 1 AMATORE, C., BERTHOU, M., HEBERT, S. (1998). Fundamental principles of electrochemical ohmic heating of solutions. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 457, 191-203.
- 2 ANDERSON, D. R. (2008). **Ohmic Heating as an Alternative Food Processing Technology**. Msc Thesis. Kansas States University, Food Science Institute College of Agriculture, Manhattam, 45p.
- 3 ASSIRY, A. M., SASTRY, S. K., SAMARANAYAKE, C. (2006). Influence of temperature, electrical conductivity, power and pH on ascorbic acid degradation kinetics during heating using stainless steel electrodes. **Bioelectrochemistry**, 68, 7-13.
- 4 AYADI, M. A., BOUVIER, L., CHOPARD, F., CHOUPARD, F., BERTHOU, M., LEULIET, J. C. (2003). Heat treatment improvement of dairy products via ohmic heating process: thermal and hydrodynamic effect on fouling. In: WATKINSON, P. MULLER-STEINHAGEN, H., REZA MALAYERI, M. (Eds.), **ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-Fundamentals an Applications**, vol. RPI, Article 19, 136-144, New Mexico, Santa Fe, USA
- 5 BANSAL, B., CHEN, X. D. (2006). A critical review of milk fouling in heat exchangers. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 5, 27-33
- 6 BHALE, S. D. (2004). **Effect of Ohmic Heating on Color, Rehydration ad Textural, Characteristics of Fresh Carrot Cubes**. Msc Thesis. Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 56p.
- 7 BÖCKMANN, R. A., DE GROOT, B. L., KAKORIN, S., NEUMANN, E., GRUBMÜLLER, H., (2008) Kinetics, Statistics, and Energetics of Lipid Membrane Electroporation Studied by Molecular Dynamics Simulations. **Biophysical Journal**, 95, 1837–1850
- 8 BOZKURT, H., ICIER, F. (2009). Rheological Characteristics of Quince Nectar During Ohmic Heating, **International Journal of Food Properties**, 12(4), 844-859
- 9 BOZKURT, H., ICIER, F. (2012). The Change Of Apparent Viscosity Of Liquid Whole Egg During Ohmic And Conventional Heating. **Journal of Food Processing and Engineering**, 35, 120–133
- 10 CASTRO, I., TEIXEIRA, J. A., SALENGKE, S., SASTRY, S. K., VICENTE, A. A. (2003). The Influence of Field Strength, Sugar, and Solid Content on Electrical Conductivity of strawberry products. **Journal of Food Processing and Engineering**, 26(1), 17-30.
- 11 CASTRO, I., TEIXEIRA, J. A., SALENGKE, S., SASTRY, S. K., VICENTE, A. A. (2004a). Ohmic Heating of Strawberry Products: Electrical Conductivity Measurement and Ascorbic Acid Degradation Kinetics. **Innovative Food Science and Technology**, 5, 27-36.
- 12 CASTRO, I., MACEDO, B., TEIXEIRA, J. A., VICENTE, A. A. (2004b). The Effect of Electric Field on Important Food-processing Enzymes: Comparison of Inactivation Kinetics under Conventional and Ohmic Heating. **Journal of Food Science**, 69(9), C696-701.
- 13 CHO, H. Y., YOUSEF, A. E., & SASTRY, S. K. (1999). Kinetics of inactivation of Bacillus subtilis spores by continuous or intermittent ohmic and conventional heating. **Biotechnology and Bioengineer**, 62(3), 368-372.
- 14 CULLEN, P. J., TIWARI, B. K., VALDRAMIDIS, V. P. (2012). Status and Trends of Novel Thermal and Non-Thermal Technologies For Fluid Foods Rheological Properties of Fluid Foods. In: CULLEN, P. J., TIWARI, B. K., VALDRAMIDIS, V. P. **Novel Thermal and Non-Thermal Technologies For Fluid Foods**. London: Academic Press, 1st ed.
- 15 FELLOWS, P. **Food Processing Technology**. (2nd ed.) Boca Raton: CRC Press. 575 p, 2000.
- 16 FRYER, P. J., DE ALWIS, A. A. P., KOURY, E., STAPLEY A. G. F., ZHANG, L. (1993). Ohmic Processing of Solid-Liquid Mixtures: Heat Generation and Convection Effects. **Journal of Food Engineering**, 18, 101-125.
- 17 GERLACH, D., ALLEBORN, N., BAARS, A., DELGADO, A. MORITZ, J., KNORR, D., (2008). Numerical Simulations of Pulsed Electric Fields of Food preservation: a review. **Innovative Food Science Emergent Technology**, 9, 408-417
- 18 GHNIMI, S., FLACH-MALASPINA, N., DRESCH, M., DELAPLACE, G., MAINGONNAT, J. F. (2008). Design and performance evaluation of an ohmic heating unit for thermal processing of highly viscous liquids. **Chemical Engineering Research And Design**, 86, 626–632.
- 19 IBRAHIM, E.S. (1999). Corrosion control in electric power systems. **Electric Power Systems Research**, 52(1), 9-17.
- 20 ICIER, F. (2009). Influence of ohmic heating on rheological and electrical properties of reconstituted whey solutions. **Food and Bioproducts Processing**, 87, 308–316.

- 21 ICIER, I. (2012). Ohmic Heating of Fluid Foods. In: CULLEN, P. J., TIWARI, B. K., VALDRAMIDIS, V. P. **Novel Thermal and Non-Thermal Technologies For Fluid Foods**. London: Academic Press, 1st ed.
- 22 ICIER, F; ILICALI, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. **Food Research International**, 38, 1135–1142.
- 23 JUN, S., SASTRY, S., SAMARANAYAKE, C. (2007). Migration of electrode components during ohmic heating of foods in retort pouches. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 8(2), 237-243.
- 24 KHALAF, W. G., SASTRY, S. K. (1996). Effect of fluid viscosity on the ohmic heating rate of solid-liquid mixtures. **Journal of Food Engineering**, 27, 145-158.
- 25 KNIRSCH, M. C., DOS SANTOS, C. A., VICENTE, A. M. O. S., PENNA, T, C, V. (2006). **Trends in Food Science & Technology**, 21, 436-441.
- 26 KULSHRESTHA, S. A., SASTRY, S. K. (2006). Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: Effect of end point temperature. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, 7, 257–262.
- 27 LEIZERSON, S., SHIMONI, E. (2005a). Effect of ultrahigh-temperature continuous ohmic heating treatment on fresh orange juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 53(9), 3519-3524.
- 28 LEIZERSON, S., SHIMONI, E. (2005b). Stability and sensory shelf life of orange juice pasteurized by continuous ohmic heating. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 53(10), 4012-4018.
- 29 LEGRAND, A., LEULIET, J.-C., DUQUESNE, S., KESTELOOT, R., WINTERTON, P., FILLAUDEAU, L. (2007). Physical, mechanical, thermal and electrical properties of cooked red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for continuous ohmic heating process. **Journal of Food Engineering**, 81, 447–458.
- 30 LI, F. D., LI, L. T., LI, Z., TATSUMI, E., (2004). Determination of Starch Gelatinization Temperature by Ohmic Heating. **Journal of Food Engineering**, 62, 113-120.
- 31 LIMA, M., HESKITT, B. F., SASTRY, S. K. (1999). The Effect of Frequency and Wave Form on the Electrical Conductivity-Temperature Profiles of Turnip Tissue. **Journal of Food Processing and Engineering**, 22, 41-54.
- 32 LIMA, M., SASTRY, S. K., (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. **Journal of Food Engineering**, 41, 115-119.
- 33 LIMA, M., HESKITT, B. F., SASTRY, S. K. (2001). Diffusion of beet dye during electrical and conventional heating at steady-state temperature. **Journal of Food Process Engineering**, 24, 331-340.
- 34 Liu, W. K., Brown, M. R. W., Elliot, T. S. J. (1997). Mechanisms of the bactericidal activity of low amperage electric current (DC). **Journal of Antimicrobial Chemotherapy**, 39(6) 687-695.
- 35 LOJEWSKA, Z., FARKAS, D. I., EHRENBERG, B., LOEW., L. M. (1989). Analysis of the effect of medium and membrane conductance on the amplitude and kinetics of membrane potentials induced by externally applied electric fields. **Biophysics Journal**, 56, 121-128.
- 36 MARCOTTE, M., TRIGUI, M., RAMASWAMY, H. A., (2000). Effect of salt and citric acid on electrical conductivities and ohmic heating of viscous liquids. **Journal of Food Processing and Preservation**, 24, 389-406.
- 37 MERCALI, G. D., SCHWARTZ, S., MARCZAK, L. D. F., TESSARO, I. C., SASTRY, S. (2014) Ascorbic acid degradation and color changes in acerola pulp during ohmic heating: Effect of electric field frequency. **Journal of Food Engineering**, 123, 1–7.
- 38 MERCALI, G. D., GURAK, P. D., SCHMITZ, F., MARCZAK, L. D. F. (2015). Evaluation of non-thermal effects of electricity on anthocyanin degradation during ohmic heating of jacobitcaba (*Myrciaria cauliflora*) juice. **Food Chemistry**, 171, 200–205.
- 39 PALANIAPPAN, S., SASTRY, S. K. (1991). Electrical Conductivity of Selected Juices: Influences of Temperature, Solids Content, Applied Voltage, and Particle Size. **Journal of Food Processing and Engineering**, 14, 247-260.
- 40 PALANIAPPAN, S., SASTRY, S. K., RICHTER E. R., (1992). Effects of electroconductive heat treatment and electrical pretreatment on thermal death kinetics of selected microorganisms. **Biotechnology and bio engineering**, 39(2), 225-232.
- 41 PARROT, D. L. (1992). Use of Ohmic Heating for Aseptic Processing of Food Particulates. **Food Technology**, (December), 68-72.
- 42 PEREIRA, R., MARTINS, J., MATEUS, C., TEIXEIRA, J. A., & VICENTE, A. A. (2007). Death kinetics of *Escherichia coli* in goat milk and *Bacillus licheniformis* in cloudberry jam treated by ohmic heating. **Chemical Papers**, 61(2), 121-126.
- 43 ROBERTS, J. S., BALABAN, M. O., ZIMMERMAN, R., LUZURIAGA, D., (1998). Design and testing of a prototype ohmic thawing unit. **Computers and Electronics in Agriculture**, 19, 211-222.
- 44 RUAN, R., YE, X., CHEN, P., DOONA, C. J., TAUB, I. (2001) Ohmic Heating. In: Richardson, P. (ed) **Thermal Technologies in Food Processing**, 1st edn. CRC Press, Boca Raton.

- 45 SAIF, S.M.H., LAN, Y., WANG, S., GARCIA, S., 2004. Electrical resistivity of goat meat. **International Journal of Food Properties**, 7 (3), 463–471.
- 46 SAKR, M., LIU, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 39, 262–269.
- 47 SAMARANAYAKE, P., SASTRY, S. K. (2005a). Electrode and pH effects on electrochemical reactions during ohmic heating. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, 577, 125-135.
- 48 SAMARANAYAKE, P., SASTRY, S. K. (2005b). Pulsed Ohmic heating – A novel technique for minimization of electrochemical reactions during processing. **Journal of Food Science**, 15, 263-278.
- 49 SASTRY, S. K. (2005). Advances in ohmic heating and moderate electric field (MEF) processing. In G. V. BARBOSA-CÁNOVAS, M. S. TAPIA, & M. P. CANO (Eds.), **Novel food processing technologies**. Boca Raton, FL: CRC Press.
- 50 SASTRY, S. (2008). Ohmic Heating and Moderate Electric Field Processing. **Food Science and Technology International**, 14, 419 - 422.
- 51 SASTRY, S. K. (2009). Ohmic Heating and moderate electric field Technologies: Present and future. In: VOROBIEV, E., LEOVKA, N., HECKE, E. V., LANOISELLE, J. L. (Eds.), **Proceedings of the International Conference on Bio and Food Electro technologies**, 22-23 October 2009, BFE2009. CD proceedings, Compiègne, France, 234-238.
- 52 SASTRY, S. K., LI, Q. (1996). Modelling the Ohmic Heating of Foods. **Food Technology**, 50(5), 246-248.
- 53 SASTRY, S.K., PALANIAPPAN, S., 1992. Ohmic heating of liquid-particle mixtures. **Food Technology**, 46, (12), 64–67.
- 54 SHIBY VARGHESE, K., PANDEY M. C., RADHAKRISHNA, K., BAWA, A. S. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. **Journal of Food Science and Technology**, 51(10), 2304–2317.
- 55 SHYNKARYK, M. V., SASTRY, S. K., (2012). Simulation and optimization of the ohmic processing of highly viscous food product in chambers with sidewise parallel electrodes. **Journal of Food Engineering**, 110, 448–456.
- 56 SENSOY, I., SASTRY, S. K. (2004). Extraction Using Moderate Electric Fields. **Journal of Food Science**, 69(1), FEP7-FEP13.
- 57 SOMAWAT, R., YOUSEF, A., CHUNG, Y. K., SASTRY, S. K. (2009). Effect of electricity on thermophilic bacterial spores: inactivation kinetics of *Geobacillus stearothermophilus* spores under the effect of pulsed ohmic heating. In: VOROBIEV, E., LEOVKA, N., HECKE, E. V., LANOISELLE, J. L., (Eds.), **Proceedings of the International Conference on Bio and Food Electrotechnologies**, 22-23 October 2009, BFE2009. CD proceedings, Compiègne, France, pp. 250-254.
- 58 SUN, H. X., KAWAMURA, S., HIMOTO, J. I., ITOH, K., WADA, T., & KIMURA, T. (2008). Effects of ohmic heating on microbial counts and denaturation of proteins in milk. **Food Science and Technology Research**, 14, 117-123.
- 59 TSAI, R., HUANG, K. H., HUANG, J. S. (2009). The effects of variable viscosity and thermal conductivity on heat transfer for hydromagnetic flow over a continuous moving porous plate with Ohmic heating. **Applied Thermal Engineering**, 29, 1921–1926.
- 60 VICENTE, A. A., CASTRO, I., TEIXEIRA, J. A. (2006). Innovations in thermal food processes. In Da-Wen Sun (Ed.), **Thermal food processing: New technologies and quality issues** (pp. 424e468). Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- 61 VICENTE, A., CASTRO, I. (2007). Novel Thermal Processing Technologies. In: TEWARI, G., JUNEJA, V., (Eds) **Advances in Thermal and Non-Thermal Food Preservation**. Oxford: Blackwell Publishing.
- 62 VIKRAM, V. B., RAMESH, M. N., PRAPULLA, S. G. (2005). Thermal degradation kinetics of nutrients in orange juice heated by electromagnetic and conventional methods. **Journal Food Engineering**, 69, 31-40.
- 63 WANG, W., SASTRY S. K. (1997). Starch Gelatinization in Ohmic Heating. **Journal of Food Engineering**, 34, 225-242.
- 64 WEAVER, J. C., CHIZMADHAV, Y. A., (1996). Theory of Electroporation: a review. **Bioelectrochemistry**, 41(1), 135-160.
- 65 YILDIZ, H., BOZKURT H., ICIER, F. (2009). Ohmic and Conventional Heating of Pomegranate Juice: Effects on Rheology, Color, and Total Phenolics. **Food Science and Technology International**, 15, 503-512.
- 66 YILDIZ, H., ICIER, F., BAYSAL, T. (2010). Changes In  $\beta$ -Carotene, Chlorophyll And Color Of Spinach Puree During Ohmic Heating. **Journal of Food Process Engineering**, 33, 763–779.
- 67 YOON, S. W., LEE, C. Y. J., KIM, K. M., & LEE, C. H. (2002). Leakage of cellular material from *Saccharomyces cerevisiae* by ohmic heating. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, 12, 183-188.
- 68 ZHAO, Y., KOLBE, E., (1999). A method to characterize electrode corrosion during ohmic heating. **Journal of Food Processing and Engineering**, 22, 79-88.
- 69 ZIMMERMAN, U., PILWAT, G., RIEMANN, F. (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. **Biophysics Journal**, 14, 881-899.