

ULTRASSOM NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: APLICAÇÕES NO PROCESSAMENTO E CONSERVAÇÃO

SILVANI VERRUCK
ELANE SCHWINDEN PRUDENCIO

 **Atena**
Editora
Ano 2018

Silvani Verruck
Elane Schwinden Prudencio

ULTRASSOM NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS: APLICAÇÕES NO PROCESSAMENTO E CONSERVAÇÃO

Atena Editora
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

V559u	Verruck, Silvani. Ultrassom na indústria de alimentos: aplicações no processamento e conservação / Silvani Verruck, Elane Schwinden Prudencio. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-85107-31-4 DOI 10.22533/at.ed.314181009 1. Alimentos – Indústria. I. Prudencio, Elane Schwinden. II. Título. CDD 664.005
-------	--

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

E-mail: contato@atenaeditora.com.br

CONCEITOS APRESENTADOS NESTA REVISÃO

O ultrassom é conhecido por ter um efeito significativo na taxa de vários processos na indústria de alimentos. Acredita-se que os processos alimentares realizados sob a ação do ultrassom sejam afetados em parte por fenômenos de cavitação e aumento de transferência de massa. Diversos processos como congelamento, corte, secagem, revestimento, branqueamento, esterilização e extração foram aplicados eficientemente na indústria alimentícia. As vantagens do uso de ultrassom para processamento de alimentos incluem: mistura mais eficaz, transferência de energia e massa mais rápida, gradientes térmicos e de concentração reduzidos, temperatura reduzida, extração seletiva, tamanho reduzido do equipamento, resposta mais rápida ao controle de extração do processo, fermentação mais rápida, aumento da produção e eliminação de etapas do processo. Este livro apresenta um quadro completo do conhecimento atual sobre a aplicação de ultrassom na tecnologia de alimentos, com foco na sua utilização no processamento e na conservação de alimentos. Com isso, o leitor poderá compreender o que torna o ultrassom uma das áreas de pesquisa mais promissoras no campo da moderna ciência de alimentos.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
PRINCÍPIO DO MÉTODO DE ULTRASSOM	3
ULTRASSOM NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS	5
ULTRASSOM PARA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS	32
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	41
REFERÊNCIAS.....	42
SOBRE AS AUTORAS	50

Tradicionalmente, tratamentos térmicos de pasteurização e esterilização são os métodos utilizados para destruir microrganismos e enzimas nos alimentos. No entanto, sua eficácia depende da temperatura e do tempo de tratamento, o que leva à perda de nutrientes, desenvolvimento de sabores e cores indesejáveis, e deterioração das propriedades organolépticas dos alimentos. Como resultado, novas tecnologias não térmicas estão recebendo grande interesse. O processamento de ultrassom é um desses novos métodos. Embora sua aplicação no processamento de alimentos seja relativamente recente, ficou provado que ondas ultrassônicas de alta intensidade podem romper células e desnaturar enzimas, e que mesmo o ultrassom de baixa intensidade é capaz de modificar o metabolismo das células (CHEMAT et al., 2017). Desta forma, a utilização do ultrassom na tecnologia de alimentos para processamento, preservação e extração é uma abordagem inovadora e adentra os sistemas de tecnologias emergentes. O ultrassom faz uso de fenômenos físicos e químicos que são fundamentalmente diferentes em comparação com aqueles aplicados em técnicas convencionais de extração, processamento ou conservação de alimentos. O ultrassom oferece vantagens em termos de produtividade, rendimento e seletividade, com melhor tempo de processamento, melhor qualidade, riscos químicos e físicos reduzidos, além de ser ecologicamente correto (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). Assim, os seguintes temas serão tratados, ao longo da sua ocorrência no processamento e conservação de alimentos:

- ✓ Desintegração ultrassônica de estruturas celulares: usada para a extração de materiais intracelulares, por ex. amido da matriz celular. A desintegração ultrassônica pode ser facilmente testada em qualquer escala (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).
- ✓ Extração de proteínas e enzimas: extração de enzimas e proteínas que são armazenadas em células e partículas sub-celulares também são processadas por ultrassom. Tem potencial benefício na extração e isolamento de novos componentes potencialmente bioativos (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).
- ✓ Extração de lipídios: os lipídios são extraídos a partir de sementes de plantas, tais como soja ou outras sementes oleaginosas. Neste caso, a destruição de paredes celulares facilita a prensagem (fria ou quente) e reduz o óleo residual ou gordura no bolo de prensagem. Este técnica é aplicável ao óleo cítrico de frutas, óleo extração da mostarda moída, amendoim, óleo de erva, canola, soja e milho etc (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).
- ✓ Inativação microbiana e enzimática: é usada principalmente em a inativação microbiana e enzimática de sucos de frutas, leite e molhos. O tratamento térmico

pode causar alterações indesejáveis dos atributos sensoriais e qualidades nutricionais. Assim, o ultrassom é uma eficiente alternativa de processamento não-térmico (mínimo) (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).

- ✓ Dispersão ultrassônica e desaglomeração: a cavitação ultrassônica gera alto cisalhamento que quebra partícula aglomerados em partículas dispersas individuais (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).
- ✓ Sinergias de ultrassom com temperatura e pressão: a ultrassonicação é frequentemente mais eficaz quando combinada com outros métodos. Recomenda-se usá-lo em conjunto com o tratamento por pressão (manossonicação), tratamento térmico (termossonicação) ou ambos (manotermossonicação) quando o objetivo é a inativação de microrganismos, esporos e enzimas (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).
- ✓ Efeitos químicos e bioquímicos: o ultrassom é usado com a finalidade de apresentar ação bactericida, tratamento de efluentes, modificação de crescimento de células vivas, alteração da atividade enzimática e esterilização de equipamentos (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).

Por fim, o principal objetivo deste artigo é fornecer uma visão geral dos desenvolvimentos atuais de aplicações específicas de ultrassom no processamento e na conservação de alimentos.

PRINCÍPIO DO MÉTODO DE ULTRASSOM

O som é uma oscilação da matéria que se propaga na forma de uma onda mecânica. No estado de equilíbrio, as partículas da matéria oscilam em torno de sua posição de equilíbrio. Quando a onda mecânica passa através da matéria, o deslocamento do estado de equilíbrio ocorre, e tal perturbação se desloca através do meio. Por fim, o sistema retorna ao equilíbrio, para um estado não perturbado. Ondas mecânicas que se propagam em sólidos são chamadas de “elásticas”, enquanto aquelas que se propagam em fluidos são denominadas “acústicas” (ENSMINGER; BOND, 2011). Ondas elásticas podem ser transmitidas tanto como ondas longitudinais (tensão de dilatação por compressão alternada) como ondas transversais (tensão de cisalhamento alternada). As ondas acústicas são apenas de tipo longitudinal (pressão de fluido alternada). A frequência das ondas mecânicas varia de menos de 16 Hz a acima de 1 GHz e permite dividir “sons” em quatro grupos (Figura 1), a saber: infrassom (1 a 16 Hz), acústico (sons audíveis, 16 a 20 kHz), ultrassons (20 kHz - 1 GHz) e hipersons (acima de 1 GHz) (CHEEKE, 2012).

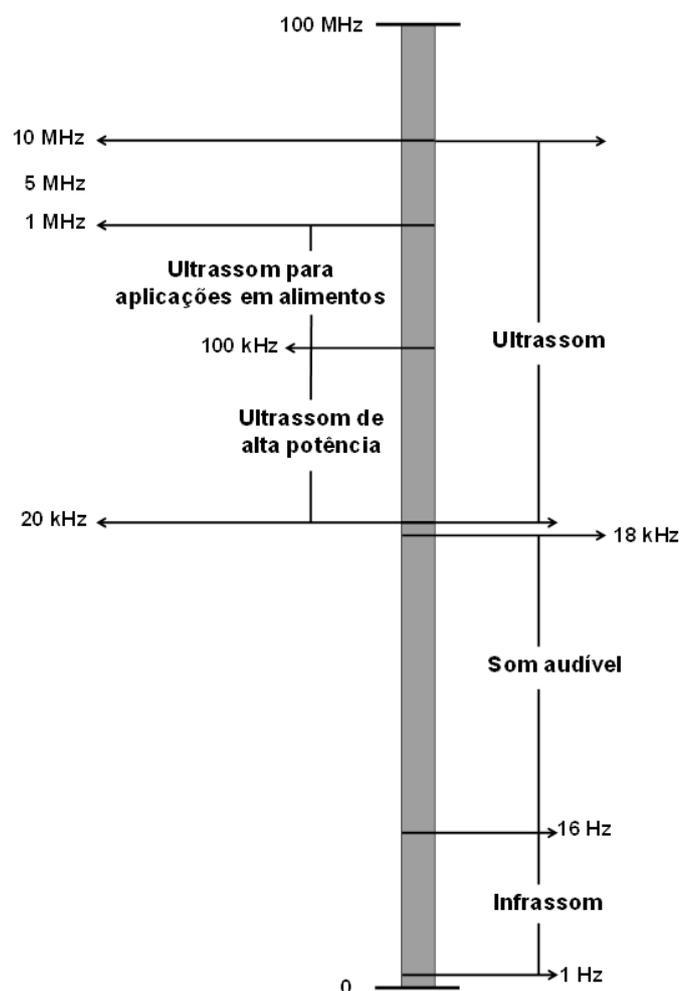


Figura 1: Faixa de frequência das ondas sonoras.

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2015).

Os ultrassons podem ser gerados com o uso de métodos mecânicos (aero e hidrodinâmico), térmicos (descarga elétrica), ópticos (impulso de um laser de alta potência) ou com o uso de métodos elétricos e magnéticos reversíveis (piezoelétrico, eletroestricção, magnetoestricção) (MUSIELAK; MIERZWA; KROEHNKE, 2016). Porém, a divisão mais conhecida de ultrassons, é em baixa e alta intensidade (baixa e alta potência ou energia), e está diretamente relacionado às suas aplicações. A diferença essencial entre esses dois grupos consiste nos resultados da ação das ondas. Para ultrassons de baixa intensidade, a matéria, depois que as ondas passam, retorna ao estado de equilíbrio original, enquanto mudanças permanentes ocorrem para ondas de alta intensidade e a matéria atinge um novo estado de equilíbrio. O objetivo principal das aplicações de baixa intensidade é transmitir energia através de um meio sem causar uma mudança no estado. Aplicações de baixa intensidade usam frequências superiores a 100 kHz em intensidades abaixo de 10 kW/m² (ENSMINGER; BOND, 2011). Enquanto isso, o objetivo da aplicação de ultrassons de alta intensidade é alterar o meio pelo qual as ondas se propagam. As ondas têm frequências entre 18 e 100 kHz em intensidades superiores a 10 kW/m² (CHEEKE, 2012).

ULTRASSOM NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS

A Tabela 1 apresenta os principais processos que utilizam ultrassom na indústria de alimentos. Na indústria de alimentos, as ondas de ultrassom de baixa intensidade são utilizadas principalmente para caracterizar as propriedades dos materiais alimentares (composição, estrutura, estado físico), para o controle do processo e detecção de corpos estranhos (DOLATOWSKI; STADNIK; STASIAK, 2007; KNORR et al., 2004). Enquanto isso, são muitas as aplicações de ultrassons de alta intensidade no processamento de alimentos, como por exemplo: alteração de viscosidade, geração de emulsão, ruptura celular, dispersão de agregados, polimerização, desgaseificação de alimentos líquidos, extração de enzimas e proteínas, inativação de microrganismos, corte, melhora do congelamento e descongelamento, cristalização, filtração, pasteurização e esterilização, etc. (CHANDRAPALA et al., 2012; CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011; DEMIRDÖVEN; BAYSAL, 2008; DOLATOWSKI; STADNIK; STASIAK, 2007; GALLEGO-JUAREZ, 2010; KNORR et al., 2004; PATIST; BATES, 2008; SORIA; VILLAMIEL, 2010). Uma ampla gama de sistemas ultrassônicos e condições de tratamento oferecem uma gama diversificada de oportunidades de aplicação em alimentos (PATIST; BATES, 2008). A seguir as principais aplicações serão descritas.

Aplicações	Métodos convencionais	Princípio do ultrassom	Vantagens	Produtos
Filtração / Separação	Filtros (membranas semi-permeáveis, ...)	Vibrações	Menor tempo, Melhora da filtração	Líquidos (sucos, ...)
Tratamento da formação de espuma	Tratamento térmico, Tratamento químico, Tratamento elétrico, Tratamento mecânico	Fenômeno de cavitação	Menor tempo, Melhora da higiene	Bebidas carbonatadas, Produtos fermentados (cerveja, ...)
Desgaseificação	Tratamento mecânico	Fenômeno compressão-rarefação	Menor tempo, Melhora a higiene	Chocolate Produtos fermentados (cerveja, ...)
Cozimento	Fogão, Frigideira, Banho maria, ...	Transferência uniforme de calor	Menor tempo Melhora a transferência de calor e a qualidade organoléptica	Carne Vegetais
Desmoldagem	Moldes de lubrificação, Moldes de teflon, Moldes de silicone	Vibrações	Menor tempo, Redução da perda de produtos	Produtos assados (bolo, ...)

Corte	Navalhas	Fenômeno de cavitação	Menor tempo, Redução da perda de produtos Corte preciso e repetitivo	Produtos frágeis (bolo, queijos, ...)
Congelamento / cristalização	Congelador, Congelamento por imersão, por contato,...	Transferência uniforme de calor	Menor tempo, Pequenos cristais, Melhora a difusão, Temperatura diminui rapidamente	Carne Vegetais Frutas Derivados de leite
Secagem	Atomização, Fluxo de gás quente, Congelamento, Pulverização	Transferência uniforme de calor	Menor tempo, Melhora a qualidade organoléptica, Melhora a transferência de calor	Produtos desidratados (frutas, vegetais, ...)
Decapagem / marinar	Salmoura	Aumento da transferência de massa	Menor tempo, Melhora a qualidade organoléptica, Estabilidade do produto	Vegetais Carne Peixe Queijo
Emulsificação	Tratamento mecânico	Fenômeno de cavitação	Menor tempo, Estabilidade da emulsão	Emulsões (ketchup, maionese, ...)
Oxidação	Contato com ar	Fenômeno de cavitação	Menor tempo,	Bebidas alcoólicas (vinho, whisky, ...)

Tabela 1: Aplicações de ultrassom no processamento de alimentos.

Fonte: Adaptado de Chemat, Zill-e-Huma, e Khan (2011).

3.1 Filtração/Separação

A deposição de materiais sólidos na superfície da membrana de filtração é um dos principais problemas enfrentados pela indústria de alimentos. A aplicação de energia ultrassônica pode aumentar o fluxo, quebrando a concentração da camada polarizada depositada na superfície da membrana, sem afetar a permeabilidade da membrana (KYLONEN; PIRKONEN; NYSTROM, 2005). Ainda, o ultrassom fornece energia vibracional para manter as partículas em suspensão e em movimento, deixando os canais no filtro abertos e livres para a eluição do solvente. Isso também faz com que o filtro ou tela vibre, criando uma superfície sem atrito, permitindo que o líquido ou partículas menores passem mais facilmente (PATIST; BATES, 2008).

O ultrassom pode ser aplicado na produção de extratos e bebidas de frutas. No caso da extração de suco da polpa de maçã, a filtração convencional a vácuo alcançou uma redução no teor de umidade de um valor inicial de 85% a 50%, enquanto a tecnologia eletroacústica alcançou 38% (MASON; PANIWNKY; LORIMER, 1996). Mais

recentemente, a combinação de ultrassom e filtração por membranas foi investigada. A irradiação ultrassônica em baixos níveis de potência foi empregada para auxiliar a filtração de soluções de soro de leite (Figura 2). Os resultados indicaram um aumento significativo na taxa de fluxo, com o auxílio do ultrassom prevenindo o bloqueio do filtro e fluindo através dele, diminuindo a compressibilidade do depósito proteico inicial e da torta de filtração em crescimento (MUTHUKUMARAN et al., 2005). Quando aplicado durante a ultrafiltração de leite desnatado, o ultrassom (20 kHz, 2 W cm⁻²) levou a um aumento significativo do fluxo de permeado resultante de uma ruptura da camada concentrada. Além disso, não houve alteração na estrutura interna das micelas de caseína e na seletividade da membrana. Os resultados também sugerem que o modo de aplicação de ultrassom preventivo é promissor, uma vez que a formação da camada de incrustação reversível foi fortemente limitada (JIN et al., 2014). Além disso, a combinação de filtros/membranas com ultrassons aumenta a vida útil do material, pois o entupimento e a aglomeração são evitados pela cavitação contínua na superfície do filtro (Figura 3) (GROSSNER; BELOVICH; FEKE, 2005).

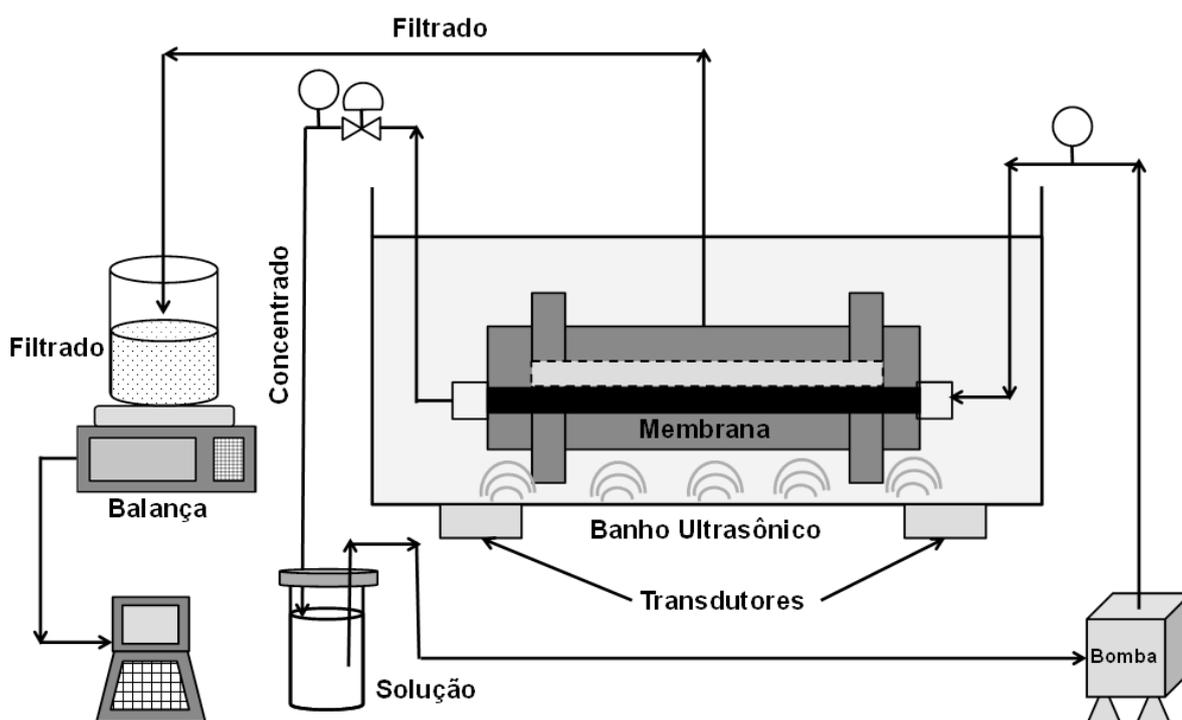


Figura 2: Filtração por membrana de soro de leite assistida por ultrassom.

Fonte: Adaptado de Muthukumaran et al. (2005).

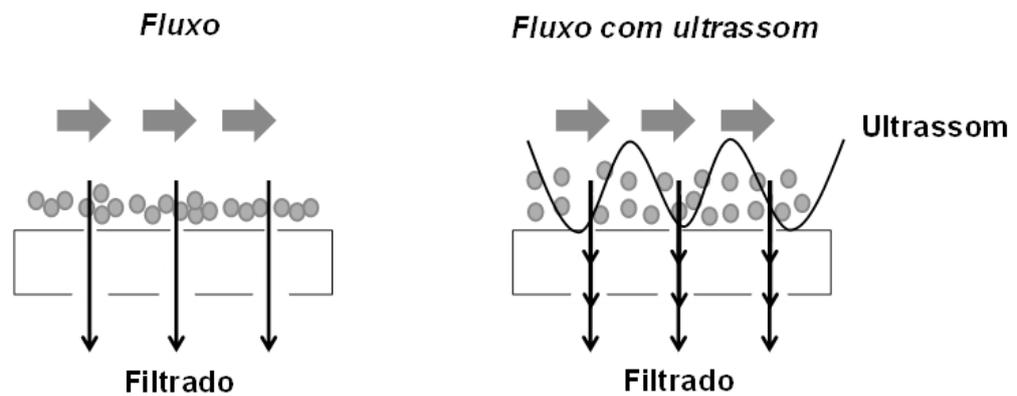


Figura 3: Melhora da permeabilidade usando ultrassom.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

3.2 Tratamento da formação de espuma

Em alguns processos tecnológicos, a formação de espuma apresenta consequências negativas expressando em diminuição do uso de volume útil do equipamento, falha no processo de fabricação, perda de produto e declínio de produtividade do equipamento (MAWSON et al., 2016). Na fabricação de alimentos, a espuma tem sido historicamente controlada pelo uso de disjuntores mecânicos, reduzindo as temperaturas dos recipientes de embalagem abaixo do ambiente ou pela adição de anti-espumantes químicos (GARRETT, 2015). No entanto, métodos mecânicos são eficazes apenas para espumas grossas, ocorre estresse térmico para romper bolhas, diminuição da tensão superficial por agentes anti-espuma e, no caso de corrente elétrica, o mecanismo não é totalmente claro (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

A tecnologia ultrassônica transportada pelo ar está sendo aplicada comercialmente para evitar a formação de espumas em bebidas carbonatadas, sistemas de fermentação e outros processos alimentares onde a formação de espuma afeta negativamente a qualidade do produto ou rendimento (CHAROUX et al., 2017; MAWSON et al., 2016). Um sistema de quebra de espuma ultrassônica foi desenvolvido com base em um novo tipo de gerador ultrassônico focalizado (Figura 4).

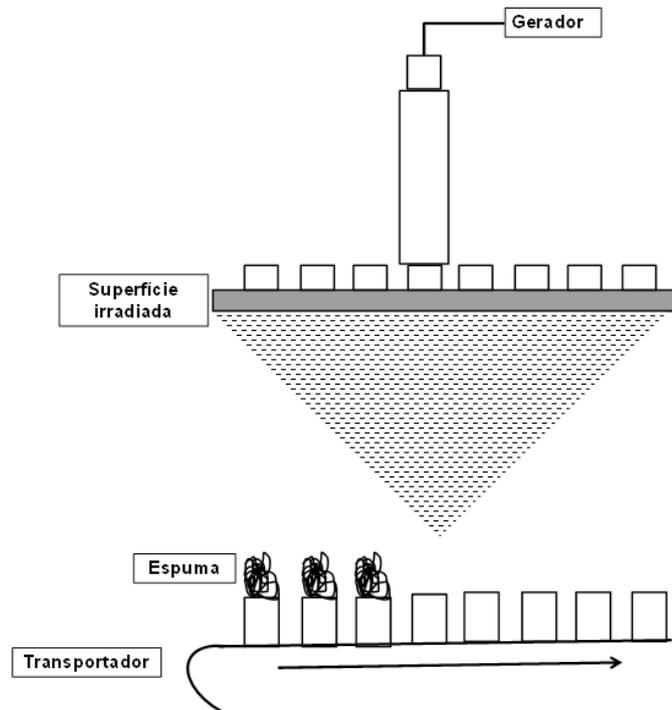


Figura 4: Transdutor ultrassônico para quebra de espuma.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

Este novo sistema foi aplicado com sucesso para controlar o excesso de espuma produzida em engarramentos de alta velocidade e linhas de conservas de bebidas carbônicas (GALLEGO-JUÁREZ et al., 2015). O emissor ultrassônico no ar é montado em um sistema de rotação eletronicamente controlado. O transdutor ultrassônico gira, criando um movimento complexo e cobrindo uma grande área de remoção de espuma em diferentes velocidades de rotação. A maioria das bolhas se rompe quase instantaneamente sob o feixe acústico. Para o efeito de quebra da espuma perfeito, não é apenas importante superar a intensidade acústica, mas também é necessário um tempo mínimo de tratamento (RODRÍGUEZ et al., 2009).

3.3 Desgaseificação/desaeração

Um líquido pode conter gases como oxigênio dissolvido, dióxido de carbono e gás nitrogênio na mistura. Dois métodos comuns usados para a desgaseificação são a fervura e a redução da pressão, porém o ultrassom apresenta a vantagem de haver pouca alteração de temperatura. A desgaseificação num campo ultrassônico ocorre quando a vibração rápida das bolhas de gás as une por ondas acústicas e as bolhas crescem até um tamanho suficientemente grande para permitir que subam através do líquido, contra a gravidade, até atingirem a superfície (Figura 5) (LABORDE et al., 1998; TERVO; METTIN; LAUTERBORN, 2006). Várias estruturas de cavitação acústica geradas em campos de ultrassom de baixa frequência dentro da faixa (20–50 kHz) foram investigadas (METTIN, 2005).

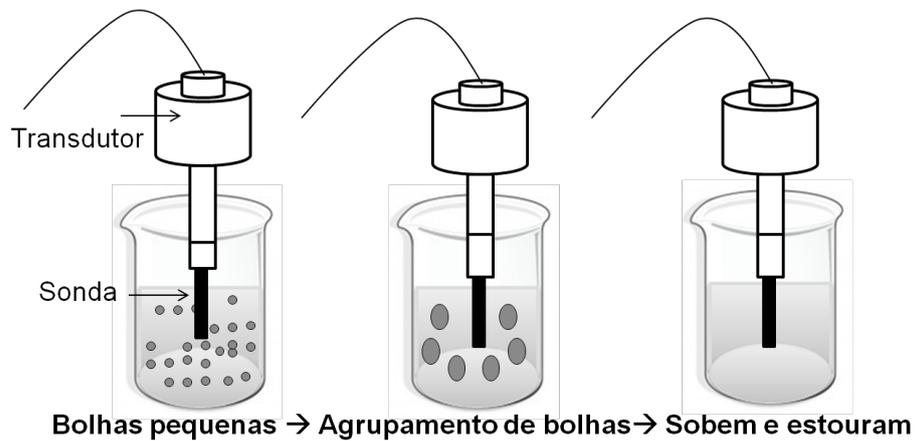


Figura 5: Mecanismo de desgaseificação de bebidas por ultrassom

Fonte: Os autores.

Na indústria alimentícia, essa técnica pode ser usada para desgaseificar bebidas carbonatadas, como cerveja (*defobbing*) antes do engarrafamento (CHEMAT et al., 2017). No processamento de bebidas carbonatadas, o objetivo é deslocar o ar da superfície do líquido para evitar danos organolépticos do produto por bactérias e oxigênio. Este processo envolve o acoplamento de um transdutor para o exterior da garrafa, levando à desgaseificação. Comparado com a agitação mecânica, o método ultrassônico diminui o número de garrafas quebradas e o transbordamento da bebida (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). A aplicação de ultrassom de intensidade relativamente baixa durante a fermentação de saquê, cerveja e vinho resultou em uma redução no tempo de 36 a 50% (MATSUURA et al., 1994). A desgaseificação assistida por ultrassom é particularmente rápida em sistemas aquosos, mas a remoção de gás é muito mais difícil em líquidos muito viscosos, como o chocolate derretido (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

3.4 Despolimerização

A despolimerização é uma das aplicações mais antigas do ultrassom. Esse processo ocorre através dos efeitos da cavitação e pode envolver dois mecanismos possíveis: degradação mecânica do polímero através da bolha colapsada pela cavitação (Figura 6) e degradação química como resultado da reação química entre o polímero e moléculas de alta energia, como radicais hidroxila produzidos a partir de fenômenos de cavitação (GRÖNROOS; PIRKONEN; RUPPERT, 2004).

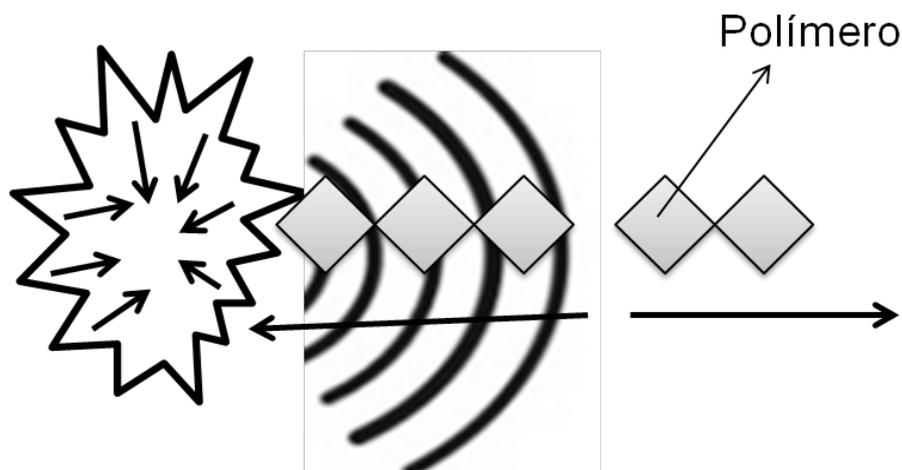


Figura 6: Representação do fenômeno de despolimerização utilizando ultrassom.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

Esta técnica é comumente empregada para despolimerizar amido (ZUO et al., 2009). O uso do ultrassom (20 kHz) geralmente apresenta melhores rendimentos, taxas, regioseletividade, estereoseletividade e quimioseletividade. Por exemplo, esta técnica pode melhorar algumas propriedades de proteínas do soro ou proteínas de soja, como melhor solubilidade e capacidade de formação de espuma (JAMBRAK et al., 2007a, 2009a).

A aplicação de ultrassom de baixa potência geralmente causará uma redução temporária na viscosidade dos líquidos poliméricos; no entanto, altas potências causam despolimerização e resultam em uma mudança permanente em sua reologia. A cavitação causa cisalhamento que, no caso de fluidos tixotrópicos, causa uma diminuição na viscosidade. No entanto, se for aplicada energia suficiente, o peso molecular pode ser diminuído, causando uma redução permanente da viscosidade (IIDA et al., 2008; JAMBRAK et al., 2009b). Em alguns purês vegetais, o ultrassom, permite uma melhor penetração de umidade na rede de fibras, o que causa um aumento na viscosidade do purê de tomate (PATIST; BATES, 2008). Além disso, o estudo comparativo entre o ultrassom e outras tecnologias inovadoras, como a radiação γ e o aquecimento por micro-ondas, provaram que a ultrassonicação é mais conveniente para despolimerizar xiloglucana (VODENIČAROVÁ et al., 2005) e o ácido hialurônico (DŘÍMALOVÁ et al., 2005).

3.5 Cozimento

Num método de cozimento convencional, quando os alimentos são expostos a temperaturas elevadas, o exterior pode ficar cozido demais e o interior cozido insuficientemente, o que levará a uma redução na qualidade do produto. Assim, o ultrassom tem a capacidade de fornecer características de transferência de calor melhoradas (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). O potencial do ultrassom como auxiliar de processamento na produção de caranguejo cozido foi avaliado. O

cozimento assistido por ultrassons permitiu uma redução do tempo de cozimento de até 15%. O ultrassom também aumentou a taxa e a quantidade total de compostos liberados do caranguejo, o que sugere que os caranguejos cozidos na presença de ultrassom seriam mais limpos (CONDÓN-ABANTO et al., 2018). Quando ultrassom de alta potência foi usado para intensificar tratamentos térmicos em presunto curado os resultados obtidos revelaram que este acelerou a transferência de calor, mostrando um aumento na difusividade térmica aparente (até 37%). A melhoria na difusividade térmica aparente produzida pela aplicação de ultrassom de alta potência foi maior em altas temperaturas (50 °C), mas insignificante em altas velocidades do ar (6 m/s) (CONTRERAS et al., 2018).

O efeito do ultrassom na cinética de hidratação e nos tempos de cocção de seis variedades de feijão foi avaliado. Sendo que o tratamento com ultrassom reduziu significativamente os tempos de imersão e de cozimento das variedades de feijão, mas a extensão dessa redução dependeu da variedade do feijoeiro e do tempo de exposição ao ultrassom (ULLOA et al., 2015). Em outro trabalho, tanto a temperatura quanto a tecnologia de ultrassom melhoraram o processo de hidratação, aumentando a taxa de hidratação e reduzindo a fase lag (característica da cinética de hidratação com comportamento sigmoidal). No entanto, percebeu-se que tanto o uso de ultrassom quanto o uso de temperaturas elevadas não afetou o processo de cocção do feijão branco quando a cinética de amolecimento dos grãos durante o cozimento foi avaliada (MIANO; SABADOTI; AUGUSTO, 2018).

3.6 Desmoldagem e extrusão

Atualmente, são utilizados métodos mecânicos como a vibração, ou agentes de revestimento de superfície para remover os produtos de seus moldes. Uma alternativa para esses métodos convencionais é liberar produtos alimentícios acoplado o molde a uma fonte de ultrassom (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). O dispositivo para desmoldagem acopla o molde com a fonte ultrassônica de modo a aumentar a remoção do produto em virtude do movimento relativo de alta frequência entre as superfícies de contato do molde e do produto contido no último. Essa técnica permite que os revestimentos de superfície sejam eliminados e garante que qualquer material residual no molde possa ser limpo automaticamente. A facilidade de remoção faz com que a limpeza e reciclagem do recipiente muito mais fácil (ALTAF et al., 2018). Esta técnica já foi testada com sucesso em produtos cárneos (ALARCÓN-ROJO et al., 2015).

É necessária uma propriedade semelhante de ultrassons para auxiliar a extrusão, isto é, a capacidade de liberar material de uma superfície, reduzindo assim a resistência do alimento no equipamento (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017). A entrada de energia é fornecida pela excitação ultrassônica dos tubos metálicos através dos quais o alimento é extrusado. A fonte ultrassônica é anexada em ângulos retos ao tubo para dar uma vibração radial. Este processo pode melhorar o comportamento do fluxo de

materiais pegajosos ou altamente viscosos através do tubo, diminuindo a resistência ao arrasto e também pode modificar as estruturas do produto (MOUSAVI; FEIZI; MADOLIAT, 2007). Owolabi et al. (2008) investigaram as propriedades físicas de massas extrusadas com diferentes teores de água usando uma técnica de transmissão ultrassônica (50 kHz). Eles relataram que acima de uma determinada entrada de energia mecânica específica, a menor quantidade de fez com que a velocidade da extrusão aumentasse.

3.7 Corte

O uso do ultrassom fornece uma nova e melhorada maneira de cortar ou fatiar alimentos. Esta técnica envolve uma lâmina do tipo faca, que é presa a um eixo ligado a uma fonte ultrassônica (ARNOLD et al., 2011). A ferramenta de corte pode ser considerada como uma sonda acústica, que faz parte do dispositivo de ressonância ultrassônica. Essas ferramentas podem ser de diferentes formas. O corte ultrassônico depende do estado e tipo de alimento, e se está descongelado ou congelado. A aplicação de ultrassom mais amplamente utilizada é no corte de produtos alimentícios frágeis e heterogêneos, como em produtos de panificação, ou em produtos gorduroso, como em queijos e linguiças (ARNOLD et al., 2009, 2011; YILDIZ; RABABAH; FENG, 2016).

O uso do ultrassom também desempenha um grande papel na melhoria da higiene do processamento, porque devido à vibração, a aderência do produto a lâmina é impedida e, portanto, há menos desenvolvimento de microrganismos na superfície. Isto se deve à propriedade do ultrassom de autolimpeza da lâmina. Com isso, há também menos desperdício de produtos alimentícios em comparação ao método convencional. Além disso, os alimentos mantêm uma melhor padronização do peso (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

3.8 Congelamento e cristalização

Ambos os processos de congelamento e de cristalização envolvem uma nucleação inicial seguida de cristalização. O uso de ultrassom realça tanto a taxa de nucleação quanto a taxa de crescimento de cristal em um meio saturado ou super-resfriado, produzindo um grande número de locais de nucleação no meio durante a exposição ultrassônica (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017). Isto se deve a bolhas de cavitação que atuam como núcleos para o crescimento de cristais e/ou pela ruptura de sementes ou cristais já presentes no meio, aumentando assim o número de locais de nucleação (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

O congelamento convencional possui alguns inconvenientes, como o desenvolvimento de cristais não uniformes, a destruição da estrutura dos alimentos e a perda da qualidade sensorial dos alimentos. Desta maneira, sob a influência do ultrassom, o resfriamento convencional proporciona uma sementeira muito mais rápida

e uniforme, o que leva a um tempo mais curto de permanência no congelador. Além disso, como há um número maior de sementes, o tamanho final dos cristais de gelo é menor e, portanto, o dano celular também é reduzido (CHENG et al., 2015). Algumas aplicações do ultrassom no congelamento de alimentos estão descritas na Tabela 2.

Os equipamentos de congelamento assistidos por ultrassom podem ser divididos em três tipos diferentes: tipo de imersão total, tipo de meia imersão e tipo de não imersão (Figura 7). O equipamento de imersão total consiste em quatro componentes principais: o sistema ultrassônico, o sistema de circulação de refrigerante, o sistema de ciclo de refrigeração e o sistema de ajuste de temperatura (XU; ZHANG; MA, 2017). O dispositivo de imersão total é mais comumente usado no congelamento de amostras sólidas, como batata (LI; SUN, 2002b), morango (CHENG et al., 2014), brócolis (XIN; ZHANG; ADHIKARI, 2014), rabanete vermelho (XU et al., 2014), entre outros. Além disso, o dispositivo de imersão total também pode ser aplicado para o congelamento de amostras líquidas, como água, solução de sacarose (KIANI et al., 2011), e amostras semissólidas, como de ágar (KIANI et al., 2012) e amostras de gelatina (XU et al., 2016). Normalmente, as amostras líquidas e semi-sólidas são colocadas dentro de um tubo de teste antes do ultrassom, enquanto as amostras sólidas são colocadas diretamente no líquido refrigerante. Os refrigerantes mais utilizados para congelamento por imersão assistida por ultrassom são etilenoglicol, cloreto de cálcio, e óleo de silicone, entre outros (XU; ZHANG; MA, 2017).

No equipamento de congelamento assistido por ultrassom por semi-imersão a sonda do transdutor de ultrassom é ligada a uma placa de alumínio e também ligado a um gerador de ultrassom para obter uma frequência de ressonância adequada na placa. As amostras líquidas ou semi-sólidas são colocados dentro de frascos e estes são colocados na placa. Como a energia do ultrassom não pode propagar-se eficazmente no ar, óleo de silicone é colocado no fundo dos frascos para melhorar a eficiência da propagação do ultrassom. Além disso, a ausência de óleo de silicone pode impedir que os frascos escorreguem e capotem por causa da vibração ultrassônica. A meia-imersão é normalmente aplicada para congelar amostras líquidas, como solução aquosa de manitol (JABBARI-HICHRI; PECZALSKI; LAURENT, 2014) ou albumina de soro bovino (NAKAGAWA et al., 2006).

Aplicações	Matriz/Alimento	Resultados
Iniciação da nucleação	Água super refrigerada	A vibração ultrassônica promove fortemente a mudança de fase da água super-resfriada para o gelo.
	Água super refrigerada	A probabilidade de mudança de fase estava intimamente relacionada com o número de núcleos induzidos por vibração ultrassônica.
	Solução de sacarose	A nucleação primária de gelo na solução de sacarose pode ser alcançada em temperaturas de nucleação mais altas quando o ultrassom de potência é aplicado.
	Rabanete	A temperatura de irradiação ultrassônica a $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 7s com intensidade de $0,26\text{ W/cm}^2$, foi uma condição ideal para a aplicação de ultrassom na indução de nucleação de amostras de rabanete.
Controle do tamanho dos cristais de gelo	Gel de Agar	A aplicação do ultrassom pode controlar o processo de cristalização em alimentos sólidos.
	Gel de Agar	A distribuição de tamanho dos cristais de gelo foi afetada pela temperatura de nucleação induzida pelo ultrassom. No entanto, nenhuma relação quantificável entre os parâmetros avaliados e os tamanhos dos cristais foi detectada.
	Solução de manitol	O aumento do super-resfriamento e da potência acústica resultou na diminuição do tamanho médio do cristal e no aumento da circularidade média.
Aceleração da taxa de congelamento	Solução de manitol; albumina de soro bovino; solução de sacarose	Temperaturas de nucleação mais altas induzidas por ultrassom de potência levaram à formação de cristais de gelo relativamente maiores e direcionais.
	Macarrão	Com níveis de potência ultrassônica de 288 ou 360 W, o tempo total de congelamento da massa diminuiu significativamente em mais de 11%.
	Batata	A taxa de congelamento foi melhorada quando a potência de ultrassom de 15,85 W foi aplicada por 2 minutos.
	Maçã	A aplicação de ultrassom melhorou significativamente a taxa de congelamento em até 8%, comparado ao congelamento por imersão sem ultrassom.
Melhoria da qualidade de alimentos congelados	Brócolis	O tempo total de congelamento e os tempos necessários para as fases de pré-resfriamento, mudança de fase e sub-resfriamento do brócolis foram significativamente reduzidos pela aplicação do ultrassom a 150 W (30 kHz) ou 175 W (20 kHz).
	Batata	O tecido da batata exibiu melhor estrutura celular sob potência de ultrassom de 15,85 W.
	Brócolis	A aplicação do congelamento assistido por ultrassom em intensidades acústicas selecionadas dentro de uma faixa de potência de $0,250$ a $0,412\text{ W/cm}^2$ preservou melhor o cálcio ligado à parede celular. Os atributos texturiais, de cor, o teor de ácido ascórbico e da microestrutura dos brócolis congelados foram melhor preservados e a perda por gotejamento foi minimizada pela aplicação do ultrassom.
	Cogumelos	O ultrassom a $0,39\text{ W/cm}^2$ resultou nos maiores valores de firmeza em todas as três variedades de cogumelos.

Tabela 2: Aplicações de ultrassom no processo de congelamento de alimentos.

Fonte: Adaptado de Cheng et al. (2015).

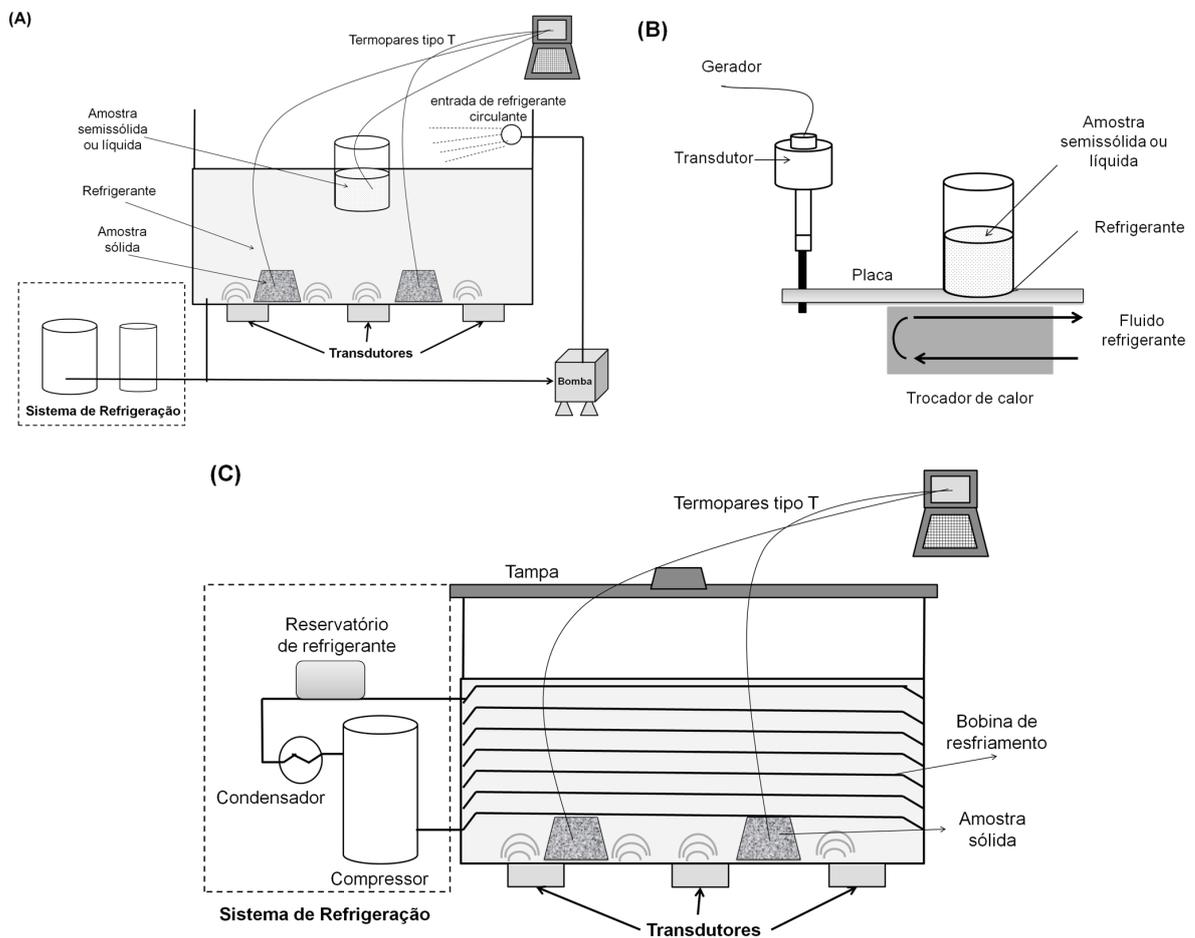


Figura 7: Diagramas esquemáticos de dispositivos de congelamento assistidos por ultrassom. (A) Tipo de imersão total, (B) tipo meia imersão e (C) tipo de não imersão

Fonte: Adaptado de Xu, Zhan e Ma (2017).

O tipo de equipamento de não imersão também é chamado de congelamento assistido por ultrassom por contato direto (ISLAM et al., 2015). Este equipamento é muito semelhante ao dispositivo de imersão total. O sistema ultrassônico é adicionado usando um equipamento de congelamento convencional como base. Vários transdutores ultrassônicos piezoelétricos são conectados de maneira uniforme no fundo do tanque de congelamento de aço inoxidável e conectado a um gerador. A temperatura do congelador e das amostras congeladas é detectada por termopares tipo T. Este tipo de dispositivo pode ser aplicado para congelamento de amostras sólidas. A vantagem deste dispositivo é que as amostras são congeladas diretamente sem refrigerante. Assim, os produtos congelados não são contaminados pela substância refrigerante. No entanto, a desvantagem é que a eficiência de propagação do ultrassom pelo ar é relativamente baixa, resultando em grave perda de energia ultrassônica durante o processo de congelamento. Dos resultados experimentais de Islam et al. (2015), este congelamento assistido por ultrassom de contato direto tem bons efeitos no início da nucleação de gelo e redução do tamanho médio dos cristais, sugerindo que este método pode ser usado industrialmente como uma ferramenta alimentos sólidos congelados. Um benefício adicional da cristalização induzida por ultrassom é o efeito de limpeza contínua através da cavitação, que evita a incrustação

de cristais nos elementos de resfriamento e garante a transferência contínua de calor durante o processo (PATIST; BATES, 2008).

3.9 Descongelamento

A transformação da energia sonora em calor pode ser utilizada para acelerar o descongelamento. Este processo é maior na fase congelada e aumenta à medida que a temperatura abaixo de zero aumenta. Em contraste com as micro-ondas, o ultrassom aquece o gelo a uma taxa maior do que a água descongelada (ALARCÓN-ROJO et al., 2015). O descongelamento por ultrassom é uma tecnologia inovadora na indústria de alimentos, se forem escolhidas as frequências e a potência sonora adequada. No entanto, Miles, Morley e Rendell (1999) observaram que o superaquecimento próximo à superfície era um problema em altas intensidades tanto nas altas quanto nas baixas frequências. Usando frequências e intensidades em torno de 500 kHz e $0,5 \text{ W cm}^{-2}$, respectivamente, o aquecimento da superfície foi minimizado, e as amostras de carne bovina, suína e de bacalhau foram descongeladas a uma profundidade de 7,6 cm em cerca de 2,5 horas. O descongelamento por ultrassom encurta o tempo de descongelamento, reduzindo assim a perda por gotejamento e melhorando a qualidade do produto (Figura 8) (LI; SUN, 2002a). Recentemente, foi realizado um estudo que comparou as características físicas, químicas, microbiológicas e tecnológicas em carne de porco descongelada em baixas intensidades de ultrassom com controle de imersão em água. O descongelamento foi realizado em temperatura constante e frequência de 25 kHz e com intensidades ultrassônicas de $0,2 \text{ W cm}^{-2}$ ou $0,4 \text{ W cm}^{-2}$. Não houve diferenças significativas nas propriedades químicas, microbiológicas ou texturiais entre as carnes descongeladas pelo ultrassom ou pela água (GAMBUTEANU; ALEXE, 2013).

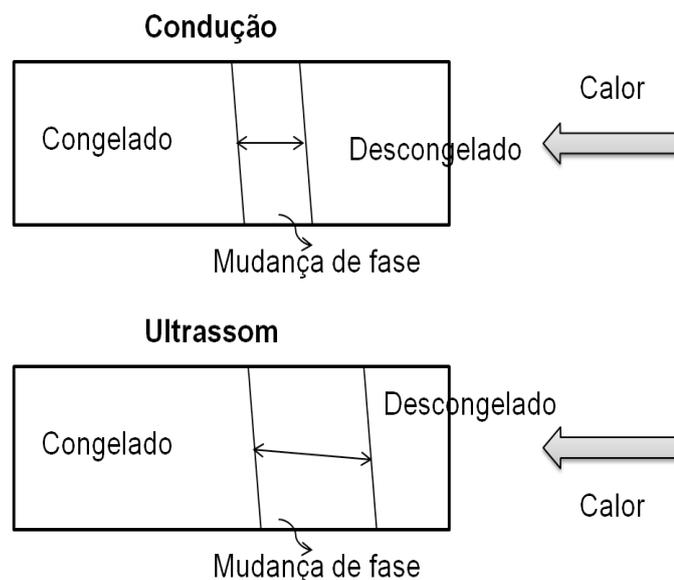


Figura 8: Diferença de mudança de fase no descongelamento por condução e por ultrassom

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

3.10 Secagem

A aplicação de energia ultrassônica para auxiliar na secagem de alimentos tem sido explorada há várias décadas. Diversos estudos relataram as aplicações da tecnologia ultrassônica em combinação com processos convectivos de secagem (Tabela 3). Nesses estudos, a energia ultrassônica foi transmitida para a superfície do alimento (AMAMI et al., 2017; GARCÍA-PÉREZ et al., 2007, 2009, KHMELEV et al., 2008, 2011; KOWALSKI; MIERZWA, 2015; KOWALSKI; PAWŁOWSKI, 2015; OZUNA et al., 2011; SORIA; VILLAMIEL, 2010) ou em contato direto entre o produto e o elemento vibratório (GALLEGO-JUAREZ, 2010; GALLEGO-JUÁREZ et al., 2007; SCHÖSSLER; JÄGER; KNORR, 2012).

Uma abordagem promissora para a aplicação de ultrassom com a finalidade de auxiliar na secagem convectiva de fatias de maçã foi desenvolvida e testada (SABAREZ; GALLEGO-JUAREZ; RIERA, 2012). Os resultados indicam uma redução significativa no tempo de secagem (até 57%) com a aplicação simultânea de ultrassom na secagem convectiva, o que corresponde a uma redução no consumo de energia de até 54%. As variáveis de processamento (temperatura de secagem, espessura do produto, nível de potência ultrassônica) influenciaram substancialmente a magnitude do efeito da energia ultrassônica na melhoria do processo de secagem, indicando a necessidade de estabelecer as condições ideais de secagem para produtos específicos e aplicações do ultrassom.

O ultrassom também tem sido usado como pré-tratamento antes da secagem de vegetais. O tratamento produz redução nos tempos de secagem convencional e por liofilização. Além disso, as propriedades de reidratação das amostras tratadas com ultrassom são maiores que as das amostras não tratadas (JAMBRAK et al., 2007b). A aplicação de ultrassom produz aumento da difusividade efetiva da umidade e do coeficiente de transferência de massa. Além disso, a aplicação de ultrassom também pode preservar melhor a microestrutura de frutas e vegetais em comparação com a secagem convectiva (FAN; ZHANG; MUJUMDAR, 2017).

A aplicação de um dispositivo ultrassônico especialmente projetado para uma transmissão de ultrassom totalmente aérea na secagem convectiva de um sistema alimentar modelo foi investigada (Figura 9) (BECK et al., 2014). Este trabalho envolveu investigações do impacto do ultrassom aerotransportado em vários níveis de potência e diferentes condições de ar de secagem (temperatura, umidade relativa e velocidade). O equipamento de ultrassons aerotransportados melhora o processo de secagem por ar quente convencional reduzindo significativamente o tempo de secagem global em mais de 60%. Por fim, deve-se levar em consideração que os parâmetros do processo (temperatura, umidade do ar, velocidade do ar e nível de potência do ultrassom) e suas interações afetam substancialmente o processo de secagem.

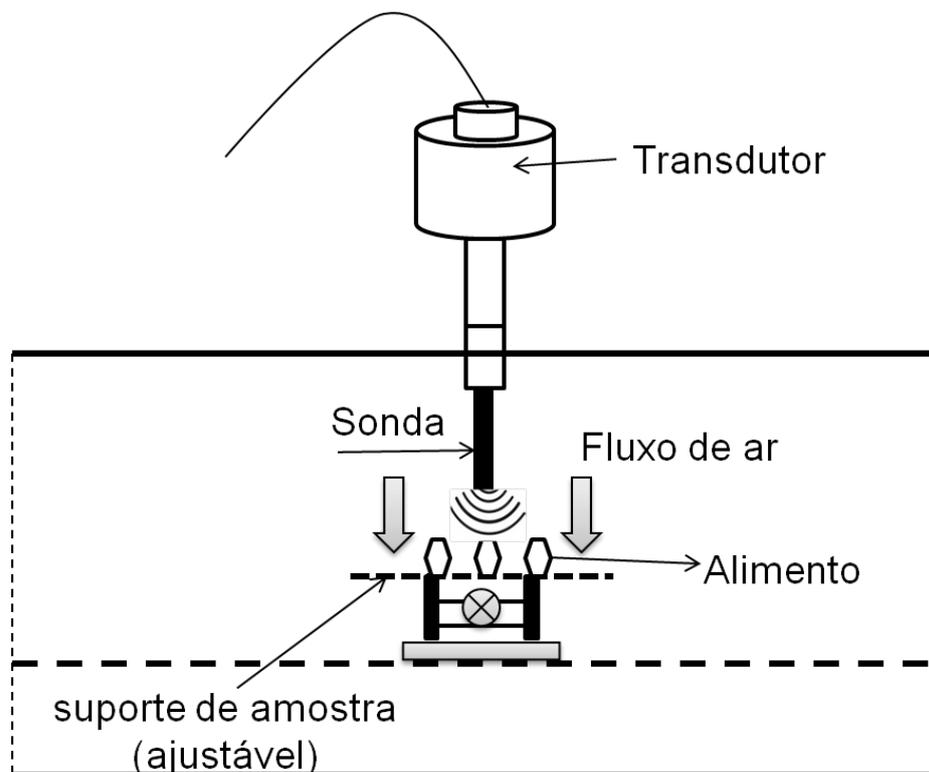


Figura 9: Diagrama esquemático da configuração de secagem assistida por ultrassom.

Fonte: Adaptado de BECK et al. (2014).

Apesar de todos esses estudos, nenhuma instalação em escala comercial da tecnologia de secagem por ultrassom foi desenvolvida até o momento. Isso se deve a alguns desafios tecnológicos para conseguir uma transmissão eficiente de energia acústica e as dificuldades práticas de adaptação da tecnologia em escala industrial. Portanto, ainda há espaço considerável para melhorias significativas na aproximação da tecnologia de ultrassom às operações de secagem industrial. Juntamente com os avanços futuros nos projetos ultrassônicos, os esforços de pesquisa para entender os mecanismos fundamentais para uma aplicação eficaz de ultrassom fornecerão a base para o desenvolvimento dessa tecnologia para adoção em práticas de secagem industrial (SABAREZ; FOOD, 2016).

Alimento	Método de secagem	Intensidade e frequência do ultrassom	Parâmetros analisados
Maçã	Liofilização atmosférica	25, 50, 75 W (21.8 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade.
	Secagem convectiva	18.5, 24.6, 30.8 kW/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem, propriedades estruturais e antioxidantes.
Banana	Secagem convectiva	45 W (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, encolhimento, teor de polifenóis, capacidade antioxidante.
Mirtilo	Secagem convectiva	200 W (25 kHz)	Cinética de secagem, microestrutura, teor de antocianinas, atividade de água.

	Liofilização atmosférica	45 W; 19.5 kW/m ³ (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade.
Cenoura	Secagem convectiva	100 W, 140 dB (25 kHz)	Cinética de secagem, mudança de cor, atividade de água, retenção de carotenoides, atividade antioxidante, teor de polifenóis.
Aipim	Secagem convectiva	6, 12, 19, 25, 31 kW/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem, microestrutura, teor de antocianina, atividade de água.
Cereja	Secagem convectiva	200 W (25 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, propriedades estruturais, texturais e acústicas.
Tomate cereja	Secagem convectiva	75 W (21 kHz)	Cinética de secagem, microestrutura, teor de antocianina, atividade de água.
Berinjela	Secagem convectiva	6, 12, 19, 25, 31, 37 kW/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade.
Ginseng	Secagem convectiva	150 W; 30–150 dB (24 kHz)	Cinética de secagem, microestrutura.
Bagaço de uva	Secagem convectiva	30.8 kW/m ³ , 154.1 dB (21.8 kHz)	Cinética de secagem, eficiência energética.
Pele de uva	Secagem convectiva	45 W (21.7 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, velocidade do ar.
Caule de uva	Secagem convectiva	45 e 90 W (21.8 kHz)	Cinética de secagem, teor fenólico, capacidade antioxidante.
Green pepper	Secagem convectiva	100, 200 W (26 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, eficiência energética.
Goiaba	Secagem convectiva	45 W (20 kHz)	Cinética de secagem, mudança de cor, atividade de água, teor de vitamina C, reidratação.
Chá	Secagem convectiva	40, 60, 80, 120, 160 W (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, encolhimento, teor de polifenóis, capacidade antioxidante.
Casca de limão	Secagem convectiva	4, 8, 12, 16, 21, 25, 29, 33, 37 kW/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem, distância do transdutor, difusividade da umidade.
	Secagem convectiva	75 W; 154.3 dB (21.8 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade.
Manga	Secagem convectiva	45 W (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade.
Carne	Secagem convectiva	50 W 20.5 kW/m ³	Cinética de secagem, difusividade da umidade, encolhimento, teor de polifenóis, capacidade antioxidante
Folhas de oliveira	Secagem convectiva	8, 16, 25, 33 kW/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem.
Casca de maracujá	Secagem convectiva	30.8 kW/m ³ (21.7 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, propriedades estruturais.
Ervilha	Liofilização atmosférica, Secagem convectiva	67, 68, 69, 70, 73 W (20 kHz)	Cinética de secagem, capacidade antioxidante, compostos fenólicos, microestrutura.
Caqui	Secagem convectiva	75 W; 154.3 dB (21.8 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, cor.
			Cinética de secagem, difusividade da umidade.

Pistache	Secagem convectiva	150, 300 W (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, transferência de massa, velocidade do ar.
Batata	Secagem convectiva	2 and 4 μm (24 kHz)	Cinética de secagem, eficiência de secagem.
Pimentão vermelho	Secagem convectiva	4 μm (24 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, transferência de massa.
	Liofilização	4.9, 6, 6.7 μm (24 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, tempo de sonicação, encolhimento.
Arroz	Secagem convectiva	160 dB (130, 415 Hz)	Cinética de secagem, tempo de sonicação, densidade, cor, teor de ácido ascórbico, características de reidratação.
Peixe	Secagem convectiva	25 W/kg WB (20 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, consumo de energia.
	Secagem a baixa temperatura	155 dB, 20.5 kW/m ³ (21 kHz)	Cinética de secagem, consumo de energia, cinética de reidratação, cor, textura.
Morango	Secagem convectiva	30, 60 W (21.8 kHz)	Cinética de secagem, difusividade da umidade, encolhimento, isoterma de sorção.
	Secagem convectiva	30, 60 W (21.8 kHz)	Análise microbiológica, retenção de vitamina C, reação de Maillard, reidratação.
Tomilho	Secagem convectiva	6.2, 12.3, 18 W/m ³ (21.8 kHz)	Cinética de secagem, transferência de calor e massa.

Tabela 3: Secagem assistida por ultrassom e descrição do material utilizado, tipo de processo e parâmetros de procedimento.

Fonte: Adaptado de Musielak, Mierzwa e Kroehnke (2016).

3.11 Amaciamento da carne

Os métodos tradicionais de amaciamento usados para tornar a carne de baixa qualidade mais palatável incluem abordagens mecânicas, enzimáticas e químicas. Em uma das primeiras publicações nessa área, a pesquisa sobre esterilização de carne usando calor e ultrassom encontrou o amaciamento como um efeito colateral benéfico desse processo de esterilização (PAGÁN et al., 1999). Tecnicamente, o ultrassom pode atuar de duas maneiras no tecido da carne: quebrando a integridade das células musculares ou promovendo reações enzimáticas (ALARCÓN-ROJO et al., 2015). Um estudo mostrou que a sonicação do músculo bovino com uma intensidade de 2 W cm⁻² por 2 horas a uma frequência de 40 kHz afeta o perimísio resultando em textura melhorada (ROBERTS, 1991). Para observar mudanças na maturação, o ultrassom foi aplicado em carne de peito bovino que foi embalado a vácuo e amadurecido por 1, 6 ou 10 dias. A carne que foi tratada por ultrassom apresentou menos perda de peso do que a processada por outros métodos (POHLMAN; DIKEMAN; ZAYAS, 1997).

A aplicação de ultrassom (40 kHz, 1500 W) em carne bovina por 10, 20, 30, 40, 50 e 60 min não teve efeito significativo sobre a cor, mas teve efeitos sobre a estabilidade térmica e propriedades do colágeno, bem como sobre a textura da carne (CHANG et al., 2012). Outro estudo mostrando que o ultrassom pode melhorar a maciez e as propriedades tecnológicas da carne foi realizado (JAYASOORIYA et al., 2007).

Estes autores sonicaram (24 kHz, 12 W cm⁻²) carne bovina por no máximo 4 min e posteriormente a armazenaram. A sonicação resultou em aumento da maciez e do pH sem interação significativa entre o ultrassom e o tempo de maturação. O tratamento com ultrassom não afetou a perda de cor ou de gotejamento, mas as perdas de cozimento e as perdas totais diminuíram. A hipótese de que o ultrassom causa ruptura mecânica e amaciamento muscular também foi confirmada em carne de aves. Estes resultados sugerem que tanto o ultrassom quanto as proteases endógenas (calpaína e catepsinas) contribuem para a degradação muscular (XIONG et al., 2012).

O ultrassom também tem sido utilizado na produção de carnes processadas. Em produtos de carne reestruturada, os pedaços de carne são mantidos juntos por um gel de proteína, formado pelas proteínas miofibrilares liberadas durante o processamento (MCCLEMENTS, 1995). A carne é processada para essas proteínas serem liberadas e a união das peças ocorrer. A força de ligação, a capacidade de retenção de água, a cor do produto e os rendimentos foram examinados após o tratamento com sal e/ou ultrassom. As amostras que receberam tratamento com sal e ultrassom foram superiores em todas as qualidades. Assim, o ultrassom pode levar a propriedades físicas aprimoradas dos produtos cárneos, como capacidade de ligação à água, maciez e coesão (VIMINI; KEMP; FOX, 1983).

3.12 Salga, conserva e marinagem

Conserva em vinagre e marinagem são usados para uma grande variedade de produtos vegetais e de carne. A maioria dos processos atuais de salmoura ou de conserva estão sujeitos a três principais desvantagens: (1) na salga, é necessário um teor muito alto de cloreto de sódio, que pode exigir um processo de “dessalinização” antes da expedição para reduzir o teor de cloreto de sódio do produto; (2) há uma potencial falta de controle na elaboração de conserva devido à ocorrência natural de fermentação “selvagem”; e (3) qualquer processo de imersão pode levar ao amolecimento enzimático, dano estrutural e inchaço (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). O ultrassom permite reduzir consideravelmente o tempo de fabricação da conserva dos produtos, principalmente os alimentos com textura crocante. Também fornece um método para fabricar pickles com baixo nível de cloreto de sódio em comparação com os pickles atualmente no mercado (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

A salmoura é um processo de transferência de massa bidirecional, à medida que a água migra da carne para a salmoura o soluto da salmoura migra para a carne. Fatias de lombo de porco foram imersas em solução saturada de NaCl a 21°C por 45 min e diferentes tipos de agitação da solução e diferentes níveis de intensidade ultrassônica foram aplicados durante a salga. Descobriu-se que os teores de água e NaCl das amostras após tratamento foram maiores nas amostras sonicadas do que nas não sonicadas (CÁRCEL et al., 2007). Além disso, o ultrassom reduz o tempo de salga, a formação de uma crosta e a coloração indesejada da carne crua. O processo

também fornece um produto que é uniformemente salgado (GALLEGO-JUÁREZ; GRAFF, 2014). Além disso, se o ultrassom (1 MHz, 150 W e 25 kHz, 500 W) é aplicado após a injeção de actinidina de kiwi e a carne é armazenada por 2 dias, a marinagem pode ser mais uniforme e eficaz (JØRGENSEN; CHRISTENSEN; ERTBJERG, 2008). Siró et al., (2009) aplicaram três tratamentos de salga (salga estática, rotação a vácuo ou salga ultrassônica) em baixa frequência (20 kHz) e baixa intensidade (2-4 W cm⁻²) em lombos suínos. Eles observaram uma melhora significativa na difusão de sal em comparação com amostras em salmoura sob condições estáticas e o coeficiente de difusão aumentou exponencialmente com o aumento da intensidade ultrassônica.

A aplicação potencial do ultrassom à produção industrial de presunto foi demonstrada por McDonnell et al. (2014b). Em um estudo piloto, esses autores aplicaram tratamentos ultrassônicos em intensidades de 40, 56 ou 72 W cm⁻² por 2, 4 ou 6 h. Em todos estes, o nível desejado de NaCl (2,25%) foi atingido em 2 h, enquanto o controle exigiu 4 h. Aplicações de 40 e 56 W cm⁻² causaram uma maior perda de peso da carne do que o controle, possivelmente devido à perda de proteína. Ozuna et al. (2013) confirmaram que a difusividade efetiva do NaCl e a umidade melhoraram com a aplicação do ultrassom. Recentemente, McDonnell et al. (2014a) estudaram o efeito do tratamento com ultrassom de potência (4, 2, 11 ou 19 W cm⁻² por 10, 25 ou 40 min) na cura da carne suína e os resultados indicaram que salgar com ultrassom pode ser um fenômeno de superfície que pode acelerar a transferência de massa e também extrair proteínas, mas também pode desnaturar a miosina quando o ultrassom de alta potência é aplicado. Desta forma, os benefícios do ultrassom na transferência de massa são muito convincentes e a implementação industrial pode estar muito próxima.

Na indústria queijeira, o efeito do ultrassom na transferência de massa durante a salga do queijo foi investigado (SÁNCHEZ et al., 1999). Muitas variedades de queijo são salgadas por imersão em salmoura. Além disso, a influência de diferentes condições de processo, como o uso de agitação, concentração de salmoura, relação de salmoura e temperatura, podem ser afetadas pela energia do ultrassom. A taxa de remoção de água e o ganho de cloreto de sódio aumentaram quando o ultrassom foi aplicado em comparação com a salga realizada sob condições estáticas ou dinâmicas, sugerindo que o ultrassom melhora a transferência de massa externa e interna.

3.13 Esterilização/pasteurização

A pasteurização e esterilização térmica convencional são as técnicas amplamente utilizadas para a inativação de microrganismos e enzimas nos produtos alimentícios. Mas esses métodos levam muito tempo para o processamento e podem levar à perda de alguns nutrientes, ao desenvolvimento de sabor indesejável e à deterioração da qualidade dos produtos alimentícios (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017). Através do uso de ultrassom, tais processos podem ser melhorados com base nos efeitos da cavitação (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

O uso do ultrassom na pasteurização é de grande interesse para a indústria de laticínios. Ele provou ser eficaz para a destruição de *E. coli*, *Pseudomonas fluorescens* e *Listeria monocytogenes* sem efeito prejudicial sobre o teor total de proteínas ou caseína do leite pasteurizado (CAMERON; MCMASTER; BRITZ, 2009). O mecanismo de morte microbiana é principalmente devido ao afinamento das membranas celulares, aquecimento localizado e produção de radicais livres. A investigação sobre a eficácia do ultrassom também mostrou a inativação de enzimas como pectinametilesterase, polifenoloxidasas e peroxidases, responsáveis pela deterioração do suco de frutas e vegetais e várias enzimas pertinentes à qualidade do leite (O'DONNELL et al., 2010; TEREFE et al., 2009; TIWARI et al., 2009; VERCET et al., 2002). O ultrassom com combinação ao calor tem potencial para acelerar a taxa de esterilização, levando menos tempo e também reduzindo os danos, bem como a intensidade dos tratamentos térmicos (VERCET; BURGOS; LÓPEZ-BUESA, 2001).

Devido à importância que este efeito possui na indústria de alimentos, os mecanismos do ultrassom sobre as bactérias, esporos bacterianos e enzimas serão aprofundados mais adiante no item 4 (ultrassom para preservação de alimentos).

3.14 Emulsificação / homogeneização

O mecanismo pelo qual a emulsificação acústica ocorre não é totalmente compreendido, mas a cavitação é responsável pela maioria dos efeitos sônicos, incluindo a emulsificação acústica de gotículas de óleo (Figura 10). O grau de emulsificação acústica depende de certos parâmetros, especialmente a potência do ultrassom e a composição química do sistema. Além das condições ideais, o ultrassom pode causar efeitos adversos como coagulação e precipitação. As vantagens do uso de ultrassom para emulsificação, em comparação com a emulsão mecânica, incluem menor consumo de energia, uso de menos surfactante e produção de uma emulsão mais homogênea e mais fina (DELGADO-POVEDANO; LUQUE DE CASTRO, 2013). Na indústria, a emulsificação ultrassônica está atraindo interesse na produção de sucos de frutas, maionese e ketchup (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011), na homogeneização do leite (SHANMUGAM; CHANDRAPALA; ASHOKKUMAR, 2012) e no encapsulamento de aromas (MONGENOT; CHARRIER; CHALIER, 2000).

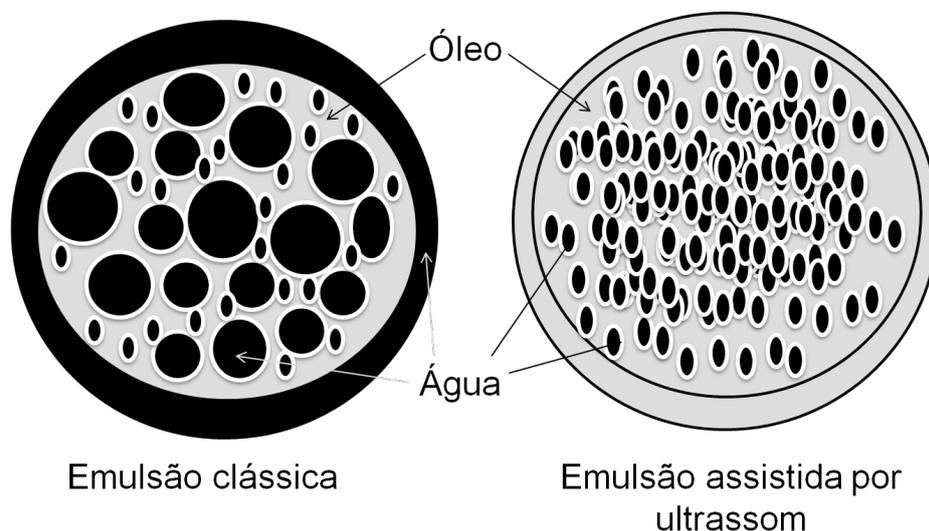


Figura 10: Diferença entre emulsão formada por agitação mecânica daquela assistida por ultrassom.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

3.15 Extração

A extração de compostos orgânicos de plantas ou sementes tem sido classicamente baseada na combinação criteriosa de solvente, calor e/ou agitação. Isso pode ser significativamente melhorado com o uso de ultrassom de alta potência, pois a energia gerada pelas bolhas cavitacionais colapsadas proporciona maior penetração do solvente no material celular e melhora a transferência de massa para as interfaces (PATIST; BATES, 2008). Em intensidades ultrassônicas mais elevadas, os processos de extração podem ser ainda melhorados com o rompimento das paredes celulares e a liberação de materiais celulares (Figura 11). Muita atenção tem sido dada à aplicação de ultrassom para a extração de produtos naturais que normalmente precisavam de horas ou dias para serem completados com métodos convencionais (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

Nas últimas duas décadas, as deficiências nos métodos convencionais levaram à consideração do uso de técnicas de extração aprimoradas e eficientes passíveis de automação, como a extração assistida por ultrassom. Tempos de extração mais curtos, consumo reduzido de solventes orgânicos, economia de energia e custos foram as principais tarefas a serem cumpridas. Impulsionados por essas metas, os avanços na extração assistida por ultrassom resultaram em várias técnicas inovadoras, como extração de Soxhlet assistida por ultrassom, destilação Clevenger assistida por ultrassom, extração assistida por ultrassom contínua e combinação de ultrassom com outras técnicas, como micro-ondas, extrusão e extração com fluido supercrítico (CHEMAT et al., 2017).

O ultrassom é uma tecnologia-chave para atingir o objetivo da química e extração “verde” sustentável. A extração verde de produtos naturais pode ser um novo conceito para enfrentar os desafios do século XXI, proteger o meio ambiente e os consumidores e, ao mesmo tempo, aumentar a concorrência das indústrias para ser

mais ecológica, econômica e inovadora. A ultrassonografia é bem conhecida por ter um efeito significativo na taxa de vários processos na indústria química e de alimentos (CHEMAT et al., 2017). Utilizando ultrassom, as extrações podem agora ser realizadas em minutos com alta reprodutibilidade, reduzindo o consumo de solvente, simplificando a manipulação e o processamento, conferindo maior pureza ao produto final, eliminando o pós-tratamento das águas residuais e consumindo apenas uma fração da energia fóssil normalmente necessária para um método de extração convencional, como extração de Soxhlet, maceração ou destilação a vapor. Como pode ser visualizado na Tabela 4, várias classes de componentes alimentares, como aromas, pigmentos, antioxidantes e outros compostos orgânicos e minerais foram extraídos e analisados eficientemente a partir de uma variedade de matrizes (principalmente tecidos animais, alimentos e materiais vegetais) (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011).

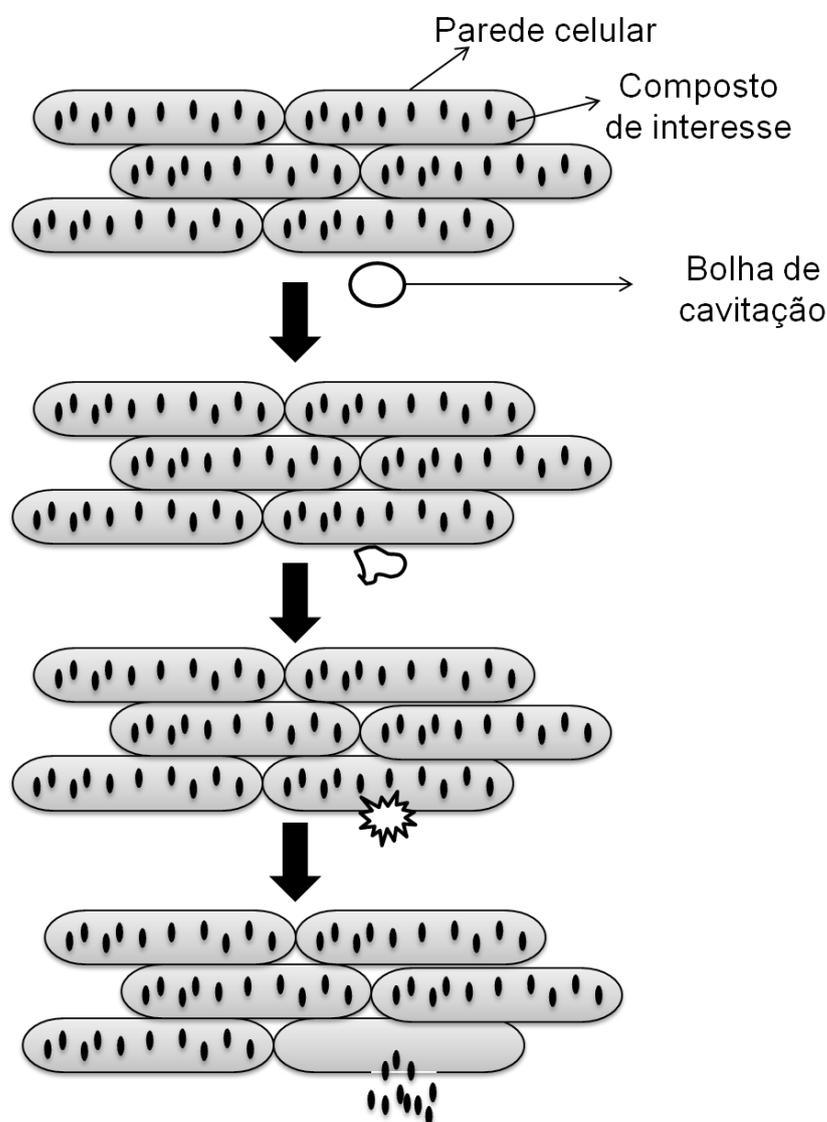


Figura 11: Colapso da bolha de cavitação e liberação do material vegetal da estrutura celular.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

Matriz	Composto extraído	Observações
Aguardente envelhecida	Compostos aromáticos	Banho ultrassom a 20 °C, 3 *10 min em diclorometano (50 mL); Foram extraídos 37 compostos incluindo Linalol (291 µg/L), α-terpineol (248 µg/L), citrionelol (397 µg/L).
Chá	Compostos aromáticos	Banho ultrassom, 40 kHz, 250 W, 3 g/300 mL água, extração 40 min a 60 °C; aumento da eficiência de extração de componentes químicos, compostos voláteis e precursores de aromas pelo ultrassom.
Vinho	Compostos voláteis	Banho ultrassom, 40 kHz, 25 °C, CH ₂ Cl ₂ , 15 min; 12 compostos extraídos com concentrações de 0,422 mg/L a 168 mg/L.
Folhas de hortelã	Mentol	Banho ultrassom, 40 kHz a 22 °C, extração 60 min em hexano; 2% do produto total até 12% do produto total a uma temperatura de 39 °C.
<i>Lavanda</i>	Óleo essencial	Sonda de ultrassom, 20 kHz, abaixo 60 °C, 10 g/100 mL 70% EtOH; aumento de 1,8-cineol, cânfora e acetato de linalila em 2 a 3 vezes em comparação com a hidrodestilação.
Alho	Óleo essencial: compostos organo-sulfurados	Banho ultrassom, 35 kHz, 25 °C, 100 g/20 mL água, extração com 50 mL de éter dietílico (ou hexano ou acetato de etila) por 30 min; Menos degradação térmica com o uso do ultrassom em comparação com a destilação convencional e assistida por micro-ondas.
Flores cítricas e mel	Linalol	Banho ultrassom, 25 °C, 5 g/30 mL n-pentano: dietiléter (1:2), ou 22 mL de água + 15 mL de solvente, tempo de extração 10 min; mais de 80% dos compostos detectados são derivados de linalol; Precursores de aromas de mel encontrados em flores.
Vagens de baunilha	Vanilina	Sonda de ultrassom, 22,4 kHz, 1 h de modo pulsado, 1 g/100 mL de solvente; concentração de vanilina de 140 ppm em 1 h vs. 180 ppm em soxhlet convencional em 8 h.
Sementes de cominho	Carvona e Limoneno	Banho ultrassom, 20 kHz, 20–55 °C, n-hexano, 60 min; Carvona (17 mg/g), limoneno (16 mg/g); maior rendimento do ultrassom em comparação com a extração por soxhlet.
Açafrão grego	Safranal	Banho ultrassom, 35 kHz, 25 °C, 5 g/100 mL água/éter dietílico (1:1), 5 * 10 min; quantidade de safranal de 40,7-647,7 mg/100 g por ultrassom e de 288,1-687,9 mg/100 g por destilação a vapor.
Tomate	Licopeno	Banho ultrassom, 40 kHz, 300 W, 1 g/8 mL de acetato de etila, sonificado durante 29 – 86 min; licopeno total de 90% extraído em 29 min; aumento de rendimento ao acoplar ultrassom com micro-ondas.
Framboesas	Antocianinas	Sonda de ultrassom, 22 kHz, 650 W, abaixo de 40 °C, 60 g/240 mL 1.5 M HCl-95% EtOH (15:85); mesmo rendimento após 3,3 min (200 s) por extração assistida por ultrassom comparado a 53 min com extração convencional.
Pimenta	Capsaicinoides	Banho ultrassom, 360 W, 50 °C, 1 g/25 mL metanol por 10 min; capsaicina 448 µmol/kg, dihidrocapsaicina 265 µmol/kg.
Casca de frutas cítricas	Compostos fenólicos	Banho ultrassom, 60 kHz, 15 °C e 40 °C, 2 g/40 mL 80% metanol por 1 h; maior eficiência de extração por ultrassom em comparação à maceração; baixa temperatura de extração leva a maiores rendimentos.
Casca de coco	Compostos fenólicos	Banho ultrassom, 25 kHz, 150 W, 30 °C, 1,5 g/75 mL etanol-água (1:1) por 15 min (condições ótimas); 22.44 mg/g de fenólicos extraídos da casca de coco.
Farelo de trigo	Compostos fenólicos	Banho ultrassom, 40 kHz, 250 W, 60 °C, 5 g/100 mL de 64% etanol por 25 min; 3.12 mg equivalente de ácido gálico por grama de farelo.

Tabela 4: Aplicações de ultrassom na extração de compostos alimentares.

Fonte: Adaptado de Chemat, Zill-E-Huma e Khan (2011).

A extração assistida por ultrassom não atua apenas com o mecanismo de cavitação sobre a matriz, mas através de mecanismos independentes ou combinados

como fragmentação, erosão, capilaridade, detexturização, sonoporação e tensão de cisalhamento (CHEMAT et al., 2017):

- ✓ Fragmentação: Em alguns casos, durante a aplicação de ultrassom em um meio líquido contendo uma matéria-prima, pode-se notar uma rápida fragmentação do material. A fragmentação pode acontecer devido a colisões entre partículas e as ondas de choque criadas a partir de bolhas de cavitação em colapso no líquido. Uma consequência direta da redução no tamanho das partículas pela ação do ultrassom é o aumento da área de superfície do sólido, resultando em maior transferência de massa e aumento da taxa de extração e produção.
- ✓ Erosão: Alguns autores já documentaram a erosão no material vegetal quando tratados por ultrassom. Um possível mecanismo para o aprimoramento da extração poderia ser que a implosão de bolhas de cavitação na superfície das folhas induz a erosão de estruturas de plantas, sendo estas liberadas no meio de extração
- ✓ Capilaridade: O efeito capilar ultrassônico refere-se ao aumento da profundidade e velocidade de penetração do líquido em canais e poros sob algumas condições de sonicação. Embora o mecanismo do efeito capilar ultrassônico não seja totalmente compreendido, uma relação entre a cavitação e o efeito capilar ultrassônico foi estabelecida. O efeito capilar ultrassônico também pode ser um mecanismo que explica a extração aprimorada quando realizada sob ultrassom.
- ✓ Detexturização: Em alguns casos, após a extração por ultrassom, uma destruição ou detexturação de estruturas de plantas foi observada. A extração convencional deixa as estruturas celulares intactas, mas esvaziadas devido à transferência de conteúdo celular para o solvente. A degradação gradual das paredes das células é obtida após o ultrassom: aos 30 min, as paredes celulares são afetadas em vários graus e aos 60 min de tratamento, as estruturas celulares são totalmente quebradas e convertidas em formas indefinidas. Pode-se supor que tal ruptura celular favorecesse a acessibilidade ao solvente. Tal destruição ou detexturação de estruturas de células é raramente relatada após a extração assistida por ultrassom, mas alguns estudos e revisões indicam efeitos destrutivos sobre células vivas e microrganismos ou enzimas.
- ✓ Sonoporação: O efeito de sonoporação do ultrassom é bem conhecido no campo da biologia e é aplicado quando uma permeabilidade das membranas celulares é desejada. A sonoporação foi utilizada *in vitro* para a absorção celular em moléculas, por exemplo, em medicamentos, genes (sonoporação reversível) ou para destruição celular (sonoporação irreversível). Para isso, altas frequências de ultrassom são aplicadas (acima de 500 kHz). No entanto, alguns estudos enfocam o uso de baixa frequência (20 kHz) para permeabilização da parede celular ou inativação de bactérias. No campo da extração, a sonoporação pode ser usada para sonoporação reversível ou irreversível da membrana celular, o que resultaria na liberação de conteúdo celular no meio extrativo.
- ✓ Tensão de cisalhamento: Durante a aplicação de ultrassom em uma mistura sólido-líquido, algumas forças de cisalhamento são geradas dentro do líquido

e ao redor dos materiais sólidos. Forças de cisalhamento e turbulências resultam da evolução (oscilação e colapso) da bolha de cavitação dentro do fluido. A transmissão resultante e os efeitos de *micro-streaming* acústico são de interesse em aplicações como mistura ou emulsificação.

No geral, vários mecanismos foram identificados como atuando na extração assistida por ultrassom: fragmentação, erosão, efeito de capilarização, sonoporação, tensão de cisalhamento local e destruição-detexturação de estruturas de plantas. No entanto, durante a extração assistida por ultrassom, ocorre uma combinação de efeitos. Além disso, embora não seja detalhado como um mecanismo, o intenso efeito de mistura gerado pela propagação do ultrassom no meio líquido contribui para o aumento da transferência de massa, melhorando consideravelmente a taxa de transferência do soluto. A combinação dos efeitos de mistura aos impactos físicos do ultrassom na matéria-prima pode explicar o desempenho aprimorado observado para exemplos de extrações assistidas por ultrassom (CHEMAT et al., 2017).

Nos métodos convencionais de extração o ultrassom de alta potência pode ser aplicado usando dois tipos de dispositivos: banho ultrassônico ou equipamento de ultrassom tipo sonda. Ambos os sistemas são baseados em um transdutor como fonte de energia de ultrassom. O transdutor piezoelétrico é o tipo mais comum usado na maioria dos reatores ultrassônicos. O banho ultrassônico é o tipo de dispositivo mais conhecido, e consiste geralmente num tanque de aço inoxidável com um ou mais transdutores ultrassônicos (Figura 12a). Banhos ultrassônicos geralmente operam a uma frequência de cerca de 40 kHz e podem ser equipados com controle de temperatura. No entanto, em comparação com os sistemas de sonda, a baixa reprodutibilidade e a baixa potência do ultrassom fornecido diretamente para a amostra são grandes inconvenientes. Sondas ultrassônicas de alta potência são geralmente preferidas para extrações (Figura 12).

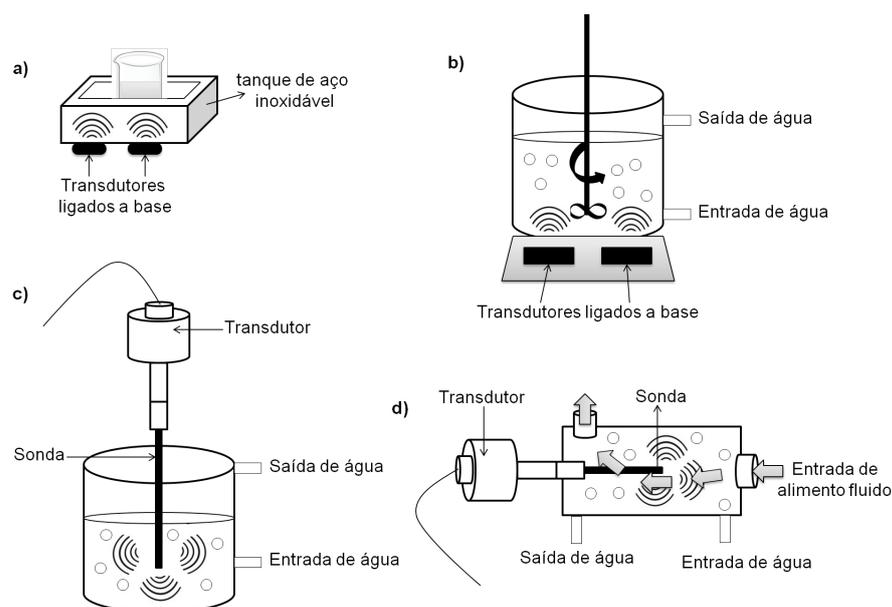


Figura 12: Sistemas ultrassônicos comumente utilizados (a) banho de ultrassom, (b) reator de ultrassom com agitação, (c) sonda de ultrassom, (d) sonicação contínua com sonda.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2017).

O sistema de sonda é mais potente devido a uma intensidade ultrassônica fornecida através de uma superfície menor (apenas a ponta da sonda), quando comparada ao banho ultrassônico. Eles geralmente são operados em torno de 20 kHz e usam transdutor ligado à sonda que é imersa no reator, resultando em uma entrega direta de ultrassom no meio de extração com perda mínima de energia ultrassônica. Existem vários modelos de sondas com diferentes comprimentos, diâmetros e geometrias de ponta. A seleção da sonda é feita de acordo com a aplicação e com o volume de amostra a ser sonicado. A intensidade do ultrassom fornecido pelo sistema de sonda ao meio líquido induz um aumento rápido da temperatura no reator (Figura 12b). O resfriamento do reator por uma camisa dupla é necessário para realizar a extração (Figura 12c). Os fabricantes de equipamentos de ultrassom de alta potência têm se concentrado em projetar dispositivos que incluem recursos operacionais específicos, como o modo de fluxo contínuo (Figura 12d). O equipamento consiste basicamente de um reator de vidro ou aço inoxidável, através do qual a mistura de fluidos é bombeada a pressão atmosférica ou alta pressão para realizar a sonorização. O reator contínuo poderia ser resfriado ou aquecido com um manto duplo para realizar manotermossônica (CHEMAT et al., 2017).

Além da extração assistida por ultrassom convencional, outras técnicas de extração têm sido melhoradas com o uso de ultrassom, como:

- ✓ Extração de Soxhlet assistida por ultrassom
- ✓ Destilação de Clevenger assistida por ultrassom
- ✓ Combinação de micro-ondas e ultrassom
- ✓ Combinação de processo de diminuição de pressão controlada instantânea e ultrassom
- ✓ Combinação de ultrassom e extração com fluido supercrítico
- ✓ Combinação de ultrassom e extração com extrusão

Atualmente, a escolha de qual técnica deve ser usada para realizar a extração de um metabólito desejado de uma planta específica tem que ser resultado de uma análise entre a eficiência e a reprodutibilidade da extração, facilidade de processo, juntamente com considerações de custo, tempo, segurança e grau de automação. Além disso, o conceito de extração assistida por ultrassom já se tornou uma questão importante na química de produtos naturais (CHEMAT et al., 2017).

3.16 Fermentação

Vários processos que ocorrem na presença de células ou enzimas são ativados por ondas ultrassônicas. O ultrassom pode ser usado em tais processos para monitorar o progresso da fermentação ou influenciar seu progresso. O ultrassom de alta frequência (> 2 MHz) tem sido extensivamente relatado como uma ferramenta para a medição das mudanças na composição química durante a fermentação, fornecendo informações em tempo real sobre o progresso da reação. Já o ultrassom de baixa frequência (20–50 kHz) pode influenciar o curso da fermentação, melhorando

a transferência de massa e a permeabilidade celular, levando a uma melhor eficiência do processo e taxas de produção (OJHA et al., 2017).

É possível modificar a energia acústica que é aplicada em uma suspensão celular e, assim, reduzir os efeitos da cavitação, alterando a duração da exposição, a potência acústica ou a frequência do ultrassom. Sob tais condições, onde pouco ou nenhum dano por cavitação ocorrerá, os efeitos benéficos são (OJHA et al., 2017):

- ✓ Melhorias nas reações microbianas (por exemplo, fermentação);
- ✓ Ativação de enzimas em reações moduladas enzimaticamente;
- ✓ Aumento da transferência de materiais através da membrana celular.

Matsuura et al. (1994) mostraram um aumento na taxa de fermentação de saquê, cerveja e vinho, quando um ultrassom de intensidade relativamente baixa foi aplicado durante a fermentação. O mecanismo proposto é que o ultrassom (uma ótima ferramenta de desgaseificação) expulsa o CO₂ (produzido durante a fermentação), que normalmente inibe a fermentação. O efeito do ultrassom no metabolismo de consumo de carboidratos pelas bifidobactérias também foi investigado. Os resultados demonstram que o ultrassom pode acelerar a hidrólise da lactose e a trans-galactosilação. Esses achados fazem do ultrassom uma potencial alternativa ao processamento convencional para obter produtos lácteos fermentados de boa qualidade sem adicionar prebióticos e β-galactosidase externos ao processo (NGUYEN; LEE; ZHOU, 2009, 2012).

Além disso, o aumento do volume da massa de pão foi observado. Isso provavelmente ocorreu devido a ativação mais rápida da levedura que leva a uma atividade aumentada durante o estágio de fermentação (FIKRY CHE PA et al., 2014). Uma patente refere-se ao uso do ultrassom para reduzir o período de descanso da massa. De fato, durante o tratamento mecânico da massa, a levedura é submetida a estresse mecânico, o que reduz sua atividade a partir de então. O uso do ultrassom deve possibilitar a redução do estresse e das pressões aplicadas ao fermento e, assim, reduzir o período de repouso da massa (WALTER, 1990).

ULTRASSOM PARA CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

Tradicionalmente, tratamentos térmicos de pasteurização e esterilização são os métodos utilizados para destruir microrganismos e enzimas nos alimentos. No entanto, sua eficácia depende da temperatura e do tempo de tratamento, o que leva à perda de nutrientes, desenvolvimento de sabores e cores indesejáveis, e deterioração das propriedades organolépticas dos alimentos. Como resultado, novas tecnologias não térmicas estão recebendo grande interesse. O desafio atual é combinar simultaneamente técnicas de preservação térmica moderada com novas aplicações para destruição microbiana. As novas tecnologias desenvolvidas asseguram a conservação dos alimentos sem o uso de conservantes, mantendo seu valor nutricional e características organolépticas (textura, cor, sabor) inalteradas, com baixo consumo de energia, custo competitivo, respeito ao meio ambiente e alto grau de segurança (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). O processamento de ultrassom é um desses novos métodos. Embora sua aplicação no processamento de alimentos seja relativamente recente, ficou provado que ondas ultrassônicas de alta intensidade podem romper células e desnaturar enzimas, e que mesmo o ultrassom de baixa intensidade é capaz de modificar o metabolismo das células. Em combinação com o calor, a ultrassonicação pode acelerar a taxa de esterilização dos alimentos, diminuindo assim a duração e a intensidade do tratamento térmico e os danos resultantes. As vantagens do ultrassom em relação à esterilização por calor incluem: a minimização da perda de sabor, maior homogeneidade; e economia de energia significativa (RANA; PARMAR; ANITA RANA, 2017).

A natureza das ondas ultrassônicas, o tempo de exposição com os microrganismos, o tipo de microrganismos, o volume de alimentos processados, a composição do alimento e a temperatura são fatores críticos de processamento. Os efeitos, no entanto, não são suficientemente efetivos para uma destruição suficiente de microrganismos quando se utiliza apenas ultrassons (BUTZ; TAUSCHER, 2002). Isto pode ser conseguido através da combinação de ultrassons com calor ou pressão ou ambos. Aplicações usando ultrassom combinado com outros métodos de preservação são conhecidos como:

- ✓ Manossonicação: combinação de ultrassom e pressão (MS).
- ✓ Termossonicação: combinação de ultrassom e calor (TS).
- ✓ Manotermossonicação: combinação de ultrassom, pressão e calor (MTS).

A combinação de calor e ultrassom é muito mais eficiente em relação ao tempo de tratamento e consumo de energia em comparação com qualquer tratamento usado individualmente (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). Aplicações de ultrassom na conservação de alimentos podem ser divididas em duas categorias principais, dependendo de sua área de utilização: diretamente relacionado ao alimento (inativação

de microrganismos, de esporos e de enzimas) e indiretamente relacionado ao alimento (limpeza de materiais e superfícies).

4.1 Inativação de microrganismos

O ultrassom de alta potência possui a capacidade de romper células biológicas. Quando combinado com tratamento térmico, pode acelerar a taxa de esterilização dos alimentos. Por isso, reduz a duração e a intensidade do tratamento térmico e os danos resultantes. O mecanismo de morte microbiana se deve ao afinamento das membranas celulares, aquecimento localizado e produção de radicais livres (BUTZ; TAUSCHER, 2002). O efeito de inativação do ultrassom também tem sido atribuído à geração de cavitação intracelular e esses choques mecânicos podem romper componentes estruturais e funcionais celulares até o ponto de lise celular (MASON; CHEMAT; ASHOKKUMAR, 2015). A cavitação acústica pode ser dividida em dois tipos: transitória e estável (MASON; PETERS, 2002). O primeiro tipo ocorre quando as bolhas de cavitação, cheias de gás ou vapor, sofrem oscilações irregulares e finalmente implodem. Isso produz altas temperaturas e pressões locais que desintegram as células bacterianas. A bolha de implosão também produz altas forças de cisalhamento e jatos de líquido no solvente usado que pode ter energia suficiente para danificar fisicamente a parede celular ou a membrana celular (Figura 13). Na cavitação estável, por outro lado, as bolhas oscilam de forma regular em muitos ciclos acústicos. As bolhas induzem à micro-filtração do líquido circundante, o que também pode induzir estresse em diferentes espécies de microrganismos (MASON; PETERS, 2002).

Diferentes tipos de microrganismos não reagem da mesma maneira ao tratamento com ultrassom. A amplitude das ondas de ultrassom, a exposição ou tempo de contato, o volume de alimentos processados, a composição dos alimentos, e a temperatura de tratamento são fatores que afetam a eficácia da inativação microbiana (PIYASENA; MOHAREB; MCKELLAR, 2003). O desempenho destes fatores também é afetado pelo tipo, forma ou diâmetro dos microrganismos. Células maiores são mais sensíveis que as pequenas, provavelmente devido à sua maior área de superfície. Além disso, as bactérias gram-positivas são mais resistentes do que as gram-negativas, possivelmente devido à sua parede celular mais espessa, que lhes proporciona uma melhor proteção contra os efeitos do ultrassom (DRAKOPOULOU et al., 2009). Essas diferenças na sensibilidade celular poderiam também ser devidas à camada mais aderente de peptidoglicanas em células gram-positivas. No que diz respeito à forma dos microrganismos, os cocos são mais resistentes que os bacilos devido à relação entre a superfície e o volume da célula (DRAKOPOULOU et al., 2009).

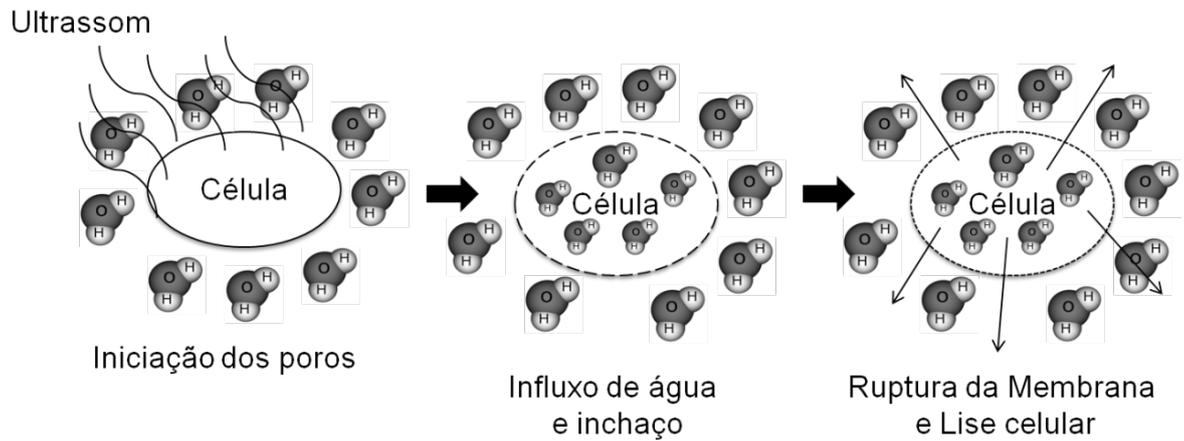


Figura 13: Mecanismo de dano celular induzido por ultrassom.

Fonte: Adaptado de Chemat et al. (2011).

Existem muitos exemplos de microrganismos inativados usando ultrassom. Alguns deles foram estudados em meios de cultura e outros em alimentos, usando ultrassom combinado ou isolado. A Tabela 5 apresenta uma síntese dos parâmetros ultrassônicos utilizados para inativar microrganismos e os efeitos na esterilização de alimentos.

Recentemente, o uso de manossoinicação, termossonicação e manotermossonicação em combinação com algumas tecnologias emergentes foi descrito como eficaz na inativação de microrganismos. O efeito de termossonicação (10 min a 55 °C) em combinação com campo elétrico pulsado (40 kV/cm para 150 μs) na inativação de *S. aureus* em laranja suco e, em seguida, em comparação com a pasteurização convencional (94 °C por 26s) foi investigado. Não foi encontrado efeito significativo no pH, condutividade, °Brix, cor do suco e no índice de escurecimento não enzimático ao usar este tratamento em comparação ao tratamento térmico (WALKLING-RIBEIRO et al., 2009b). Além disso, a combinação de termossonicação e campo elétrico pulsado manteve o tempo de armazenamento do suco de laranja sem afetar a aceitabilidade sensorial pelos consumidores (WALKLING-RIBEIRO et al., 2009a). A combinação de vapor com ultrassom foi utilizada para inativar *Salmonella* e o método apresentou-se mais rentável em comparação com tratamentos de água quente, vapor a vácuo e ácido láctico (LAWSON et al., 2009). Mas o efeito de combinação nem sempre é lucrativo, já que nenhum efeito sinérgico foi observado experimentalmente ao combinar as técnicas de ultrassom e plasma frio com aeração (CHEN et al., 2009).

Amostra	Parâmetros Experimentais	Efeito do ultrassom
Inativação de <i>Listeria innocua</i> e bactérias mesofílicas em leite	24 kHz, 120 µm, 400 W, 63 °C, 30 min	Redução de 5 log foi obtido após 10 min quando a sonicação foi usada em combinação com a temperatura.
<i>Enterobacter aerogenes</i> , em leite desnatado	20 kHz, 850 kHz, até 50 W por 60 min, 30 °C ou menos	O ultrassom de alta frequência não foi capaz de reduzir os níveis bacterianos mesmo em tratamentos prolongados.
<i>Enterobacter aerogenes</i> , <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>S. epidermidis</i> , <i>Staphylococcus pseudintermedius</i>	20 kHz, 13 W, 20 min 30 °C ou menos	Até 4,5 log de redução para <i>E. aerogenes</i> e <i>B. subtilis</i> no entanto <i>Staphylococcus</i> spp. não foi afetado.
Bactérias aeróbias mesófilas totais e coliformes no leite	Sonicação 24 kHz, 400 W até 15 min 65 °C Fotossonicação 100% (120 µm; 240 W) 13.2 W cm ⁻²	A luz UV contribuiu para o efeito letal ultrassônico com maiores reduções de log observadas com fotossonicação do que com apenas sonicação.
Inativação de <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Listeria monocytogenes</i> em leite	20 kHz, até 15 min	A maioria das contagens de células reduziu em 100% em 10 min de sonicação sem perda nas proteínas.
Análise de microscopia eletrônica de microorganismos lácteos	20 kHz, 750 W, a 100%/124 µm de amplitude de onda	Níveis bacterianos reduzidos, dano extensivo foi observado.
Leite em pó e creme de leite	20 kHz, 115 W por 3 min, 104 W (133 µm) e 115 W (152 µm) por 1 e 3 min	Níveis de bactérias aeróbicas reduzidas em 99%.
Inativação de <i>Escherichia coli</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> em suco de romã	20 kHz, níveis de amplitude de 50, 75 e 100%, 0, 3, 6, 9, 12 e 15 min, 25 ± 1 °C	Nível de amplitude de 100% por 15 min, níveis reduzidos de 3,47 e 1,86 log UFC / mL, respectivamente.
<i>Fusarium oxysporum</i> em suco de laranja	20 kHz, 130 W amplitude 40–100%, pulsos (2 e 10 s), 2–10 min	O uso de benzoato e extrato cítrico controlou o crescimento de <i>F. oxysporum</i> em suco de laranja e reduziu 5 log UFC/mL em 14 dias.
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Pichia membranifaciens</i> , <i>Wickerhamomyces anomalus</i> , <i>Zygosaccharomyces bailii</i> , <i>Zygosaccharomyces rouxii</i> , <i>Candida norvegica</i> em suco de morango, laranja, maçã, abacaxi e frutas vermelhas	20 kHz, 130 W amplitude 20–60%, pulsos (2 e 6 s), 2–6 min	Redução de organismos deteriorantes.
<i>Escherichia coli</i> em suco de pitaita	20 kHz, 1500 W (60%, 70%, 80% e 90% de amplitude), 1, 3 e 5 min	A inativação total foi observada em ambos os sucos de frutas após 5 minutos de tratamento com ultrassom, na maioria dos níveis de amplitude, avaliados em 5 dias.
<i>Streptococcus thermophilus</i> e <i>Lactobacillus delbrueckii subsp. bulgaricus</i> em Ayrán, uma bebida láctea ácida	35 kHz, 60, 70 e 80 °C, 1, 3 e 5 min	As contagens diminuíram à medida que a temperatura e o tempo aumentaram. As propriedades sensoriais das amostras termossociadas foram melhores que as amostras tratadas termicamente após o armazenamento.

<i>Escherichia coli</i> ATCC 35218, <i>Salmonella Enteritidis</i> MA44 e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> KE 162 e flora nativa de sucos de maçã comercial e recém-prensado	20 kHz, 600 W e 95.2 μm de amplitude de onda; Luz pulsada de 0.73 J cm^{-2} , 155 mL/min	O ultrassom combinado com a luz pulsada levaram a reduções de 3,7–6,3 log dos microrganismos inoculados. O desenvolvimento do escurecimento não enzimático durante o armazenamento foi impedido.
Inativação de <i>Listeria monocytogenes</i> e <i>Escherichia coli</i> suspensas em sucos de maçã e laranja	35 °C, 110 μm , 200 kPa	Aumento de 116 W aumentou a taxa de inativação em aproximadamente 10 vezes em ambos os sucos.
<i>Escherichia coli</i> O157: H7 e <i>Salmonella Enteritidis</i> em suco de manga	25 kHz, 200 W, 50 e 60 °C por 10 e 7 min, respectivamente	A taxa de inativação foi diferente para ambos os patógenos.
Células de <i>Escherichia coli</i> K12 suspensas em cidra de maçã	20 kHz, 100 kPa, 59 °C, 4 min	Redução de 5 log foi alcançada. Perfil de qualidade da amostra sonicada semelhante à sidra de maçã crua.
<i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>Staphylococcus aureus</i> e <i>Debaryomyces hansenii</i> em leite	24 kHz, amplitude (70 e 100%) e duração (50, 100, 200 e 300 s)	Redução da população, mas causou deterioração do leite.
<i>Escherichia coli</i> e <i>Saccharomyces cerevisiae</i> em suco de romã	20 kHz amplitudes (50, 75, e 100%) e tempos (0, 6, 12, 18, 24, e 30 min)	Mais do que 5 log de inativação de <i>E. coli</i> e 1,36 log de inativação de <i>S. cerevisiae</i> .
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> em suco de laranja	20 kHz, 778.2 W (ultrassom), e 11 min de exposição, 350 W (micro-ondas), 35 °C	Completa inativação.
<i>Candida parapsilosis</i> e <i>Rhodotorula glutinis</i> no suco de maçã turvo	24 kHz, 400 W, amplitude 100%, 35 °C, 360 s/100 mL	Prazo de validade de sucos sonicados em torno de 21 dias com sabor mantido.
Pasteurização e homogeneização simultâneas de leite fresco de vaca	Cavitação hidrodinâmica em um reator de tipo <i>loop</i> que trabalha em 6 bar de pressão em com atmosfera de CO ₂ durante 30 min. Cavitação acústica em reator de fluxo ultrassônico (Sonotube®, potência 370 W)	88% de inativação de microrganismos usando cavitação hidrodinâmica enquanto a cavitação acústica atingiu 95% de redução de microrganismos em 10 minutos.

Tabela 5: Parâmetros ultrassônicos e efeitos na esterilização de alimentos.

Fonte: Adaptado de Paniwnyk (2017).

4.2 Inativação de esporos

Os esporos são muito difíceis de destruir em comparação com as células vegetativas que estão em fase de crescimento. Os esporos microbianos são resistentes a condições extremas, como altas temperaturas e pressões osmóticas, valores extremos de pHs e choques mecânicos. Os esporos bacterianos que sobrevivem ao tratamento térmico podem restringir severamente o prazo de validade dos alimentos processados termicamente. Os endósporos das espécies de *Bacillus* e *Clostridium* são muito resistentes a condições extremas; por exemplo, os esporos de *Bacillus thermophilus* são destruídos por aquecimento a 100 °C após 4 h de tratamento (CHEMAT; ZILL-E-

HUMA; KHAN, 2011). Sendo assim, o processo de cavitação que ocorre durante a aplicação do ultrassom, e que inativa as células vegetativas, pode não ser tão eficiente para os esporos. Desta forma, quando o ultrassom é usado com essa finalidade, recomenda-se usá-lo em conjunto com o tratamento por pressão (manossonicação), tratamento térmico (termossonicação) ou ambos (manotermossonicação) (PIYASENA; MOHAREB; MCKELLAR, 2003).

A Tabela 6 apresenta os parâmetros ultrassônicos e efeitos sobre a inativação de esporos em vários alimentos e bebidas. Além dos exemplos apresentados, a inativação de esporos bacterianos isolados de carne de caranguejo também foi avaliada. O tratamento térmico convencional foi comparado à manossonicação e à manotermossonicação. As bactérias formadoras de esporos utilizadas neste estudo foram *Bacillus mycoides*, *Bacillus weihenstephanensis* e *Psychrobacillus psychrodurans*. A resistência térmica dessas três espécies foi determinada em diferentes temperaturas variando de 80 a 110 °C e sua resistência a ultrassons sob pressão de 35 a 95 °C. A eficiência da manotermossonicação foi diretamente correlacionada com a resistência térmica dos esporos. Assim, o tratamento com manotermossonicação é capaz de inativar bactérias formadoras de esporos e que a eficiência de inativação da manotermossonicação está correlacionada com a resistência térmica das espécies dos esporos (CONDÓN-ABANTO et al., 2016).

A produção industrial de cerveja termina com um processo de pasteurização. Para otimizar esse processo, a termossonicação foi utilizada com o intuito de inativar ascósporos *Saccharomyces cerevisiae*, a forma mais resistente da levedura. O ultrassom isolado e a operação contínua da termossonicação não foram suficientes para atingir a exigência mínima de pasteurização da cerveja visando à inativação dos esporos de *S. cerevisiae*. Por outro lado, a termossonicação a 50 °C-1,9 min e a termossonicação a 55 °C-26 s foram suficientes para a pasteurização, em oposição ao processo térmico de 55 °C-38 min (MILANI; SILVA, 2017).

Matriz	Cepa esporulada	Condições	Efeitos nos esporos
Solução Ringer	<i>B. cereus</i> e <i>B. licheniformis</i>	Ultrasonicação (20 kHz, 10–12 °C por 12 min) seguida de tratamento térmico a 110 °C para <i>B. cereus</i> e 99 °C para <i>B. licheniformis</i>	87% de redução em D_{110C} e 45.45% de redução em D_{99C} , respectivamente
Solução Ringer	<i>B. subtilis</i> 189	Ultrasonicação (20 kHz, 0 °C por 10 min) seguida de tratamento térmico a 105 °C, 110 °C e 112 °C	Aprox. 20% de redução em D_{105C} , 20% de redução em D_{110C} , 23% de redução em D_{112C} . Sem efeito nos valores de z.
Leite desnatado	<i>B. licheniformis</i> (ATCC) 6634, <i>B. coagulans</i> (ATCC) 12245 e <i>G. stearothermophilus</i> ATCC (15952)	Ultrasonicação (20 kHz, 3.679 W/mL, 91.2 µm, 0 °C–33 °C por 10 min) seguida de tratamento térmico a 63 °C por 30 min	Redução de 0.42 log (<i>B. licheniformis</i>); Redução de 0.56 log (<i>B. coagulans</i>); Redução de 0.73 log (<i>G. stearothermophilus</i>)

Pasta de carne	<i>C. perfringens</i> (NZRM 2621 e NZRM 898)	24 kHz, 0.33 W/g, 75 °C por 60 min, 210 µm	Menos que 1.5 log de redução para ambas as cepas
Leite desnatado	<i>B. cereus</i> NZRM 984	24 kHz, 0.33 W/g ou W/mL, 70 °C por 1.5 min, 210 µm	Redução de 0.3-0.4 log (aprox. 66% de redução em D _{70C})
Pasta de carne	<i>B. cereus</i> NZRM 984	24 kHz, 0.33 W/g ou W/mL, 70 °C por 1.5 min, 210 µm	Redução de mais de 4 log (aprox. 84% de redução em D _{70C})
Pasta de queijo	<i>B. cereus</i> NZRM 984	24 kHz, 0.33 W/g ou W/mL, 70 °C por 1.5 min, 210 µm	Redução de mais de 3 log (aprox. 72% de redução em D _{70C})
Mingau de arroz	<i>B. cereus</i> NZRM 984	24 kHz, 0.33 W/g ou W/mL, 70 °C por 1.5 min, 210 µm	Redução de mais de 4 log (Aprox. 85 de redução em D _{70C})
Leite integral	<i>B. subtilis</i> var. <i>niger</i> -40 e <i>B. subtilis</i> ATCC 6051	Termossonicação a 20 kHz, 100 °C	79% de redução em D _{100C} e 40% de redução em D _{100C} , respectivamente
Glicerol	<i>B. subtilis</i> var. <i>niger</i> -40 e <i>B. subtilis</i> ATCC 6051	Termossonicação a 20 kHz, 100 °C	63% de redução em D _{100C} e 74% de redução em D _{100C} , respectivamente
Água destilada estéril	<i>B. subtilis</i> var. <i>niger</i> ATCC (9372)	20 kHz, 300 kPa, 70 °C por 12 min, 150 µm	3 log de redução
Suco de laranja	<i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	24 kHz, 460 W cm ⁻² , 33 W e 105 W cm ⁻² , 162 W	A termossonicação exigiu pelo menos 8 °C a menos do que os tratamentos térmicos para atingir a mesma inativação de esporos.
Leite em pó desnatado	<i>Geobacillus stearothermophilus</i>	20 kHz, 67.5 °C, e 17.5 s	Redução de 0.45 log

Tabela 6: Parâmetros ultrassônicos e efeitos sobre a inativação de esporos.

Fonte: Adaptado de Ansari, Ismail e Farid (2017) e Paniwnyk (2017).

O processamento de alta pressão e o ultrassom de potência são duas tecnologias que podem ser combinadas com calor para aumentar a taxa de inativação de esporos. Ao comparar essas duas tecnologias. Quando *Clostridium perfringens*, *Bacillus cereus*, *Alicyclobacillus acidoterrestris*, *Bysochlamys nivea*, *Neosartorya fischeri* e *Saccharomyces cerevisiae* foram testadas a tecnologia de alta pressão assistida por calor foi melhor do que a termossonicação e o tratamento térmico para a sua inativação (EVELYN; MILANI; SILVA, 2017). Ao comparar os mesmos métodos, os tratamentos de termossonicação (70-75 ° C) até 60 min quase não tiveram efeito sobre *A. acidoterrestris* e *C. perfringens*, enquanto *B. cereus* em pasta de carne foi prontamente inativada (6 log após 2 min). Ao contrário dos tratamentos térmicos e de alta pressão, o tipo de alimento tem efeito significativo na inativação dos esporos pela termossonicação (EVELYN; SILVA, 2018). Sendo assim, a inativação de esporos por ultrassom continua sendo um grande desafios para a pesquisa e a indústria de alimentos.

4.3 Inativação de enzimas

Para estabilização de alguns materiais alimentares, as enzimas devem ser inativadas ou sua atividade reduzida. A inativação enzimática pode ser facilmente obtida por tratamento térmico. No entanto, em alguns casos, a alta resistência ao calor das enzimas pode ser um problema, pois o calor pode modificar negativamente algumas propriedades dos alimentos, como sabor, cor ou valor nutricional. Esta é a força motriz para o aumento do interesse em um método alternativo de inativação enzimática (CHEMAT et al., 2017). O processo de cavitação que ocorre durante a aplicação do ultrassom também tem efeito sobre as enzimas presentes nos alimentos, desnaturando-as através da alta temperatura e pressão gerada no local da implosão (MASON; PETERS, 2002). No entanto, os efeitos das ondas ultrassônicas sobre as proteínas são muito complexos. As proteínas poliméricas globulares são decompostas em subunidades e, se houver oxigênio, a estrutura quaternária não é recuperável. Uma delipidação parcial de lipoproteínas pode ser obtida e se a irradiação ultrassônica for longa o suficiente, as proteínas podem ser hidrolisadas e as cadeias polipeptídicas podem ser quebradas. A influência do gás na intensidade da inativação enzimática tem sido relacionada à formação de radicais livres por cavitação. A sensibilidade aos ultrassons depende das condições do tratamento (MCCLEMENTS, 1995), bem como da natureza da enzima. Geralmente, a ultrassonicação em combinação com outros tratamentos é mais eficaz na inativação de enzimas alimentares. De fato, o tratamento com termossonicação e termomanossonicação tem eficácia aumentada em comparação com o ultrassom isolado. Os tratamentos associados com calor ou pressão ou ambos inativam várias enzimas a temperaturas mais baixas e/ou em menor tempo que os tratamentos térmicos nas mesmas temperaturas (CHEMAT et al., 2017). Exemplos dessas aplicações para inativação de enzimas podem ser visualizados na Tabela 7.

Enzima	Matriz	Tratamento	Frequência (kHz)	Energia (W)	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Peroxidase	Agrião	Termossonicação	20	125	40–92.5	0–2
Lisozima	Tampão fosfato	Manotermossonicação	20	–	60–80 °C/200 kPa	3.5
Pectinesterase	Limão	Termossonicação	20	–	40–90	63
Pectina metilesterase e poligalacturonase	Suco de tomate	Termossonicação	20	40	50–75	0–40
Polifenol oxidase e peroxidase	Maçã cortada	Sonicação + ácido ascórbico	40	–	–	–

Tabela 7: Inativação de enzimas utilizando ultrassom em associação com outra tecnologia

4.4 Limpeza de superfícies

Ondas de ultrassom de alta potência são capazes de inativar células bacterianas e desagregar aglomerados bacterianos. Devido a essa característica o ultrassom há muito está estabelecido na limpeza de superfícies nas principais aplicações industriais (MAMVURA; IYUKE; PATERSON, 2018). As ondas de ultrassom não podem substituir os sistemas *Clean in Place* na indústria de alimentos e bebidas, porque o processo não é 100% eficiente. No entanto, elas podem ajudar o processo e, ao mesmo tempo, reduzir as quantidades de reagentes químicos e de água necessária, tornando todo o processo mais ecológico e econômico (MASON; JOYCE, 2008; RAJASEKHAR et al., 2012). As ondas de ultrassom estão encontrando aplicação porque podem acessar alguns locais ocultos onde microrganismos podem se esconder do processo de *Clean in Place*, por exemplo, próximo e/ou em soldas onde há descontinuidades geométricas (Mamvura et al., 2011). O fato de haver três processos que ocorrem ao mesmo tempo aumenta a eficiência de desinfecção do processo. Os três processos que ocorrem ao usar o ultrassom na limpeza de superfícies são os fenômenos de cavitação acústica e ruptura associada ao cisalhamento (mecânica), aquecimento localizado (físico) e formação de radicais livres (químicos) (MASON; JOYCE, 2008). Além disso, a eliminação ou o controle eficiente de biofilmes diminui a ocorrência de corrosão induzida por microrganismos e a falha do equipamento ao lidar com a causa raiz do problema na fonte (MEDILANSKI et al., 2002).

O uso de ultrassom permite a destruição de uma variedade de fungos, bactérias e vírus em um tempo de processamento muito reduzido quando comparado ao tratamento térmico a temperaturas similares. A remoção de bactérias de várias superfícies é de grande importância para a indústria alimentícia e pode ser eficientemente realizada com o uso combinado de detergentes biocidas contendo água quente sonicada (CHEMAT; ZILL-E-HUMA; KHAN, 2011). Exemplos típicos de itens que exigem limpeza regular são cestas de plástico, manilhas (os ganchos usados para pendurar aves na linha de produção) e correias transportadoras. Desta forma, a limpeza ultrassônica de uma correia transportadora foi estudada através da construção de um transportador em escala piloto com um banho de limpeza ultrassônico (TOLVANEN et al., 2009). O objetivo era inativar as cepas de *Listeria monocytogenes* usando limpeza ultrassônica contínua. O efeito do ultrassom com um detergente de limpeza à base de hidróxido de potássio foi determinado usando o banho de limpeza a 45 e 50 °C por 30 s com e sem ultrassom. Os resultados indicaram que a limpeza ultrassônica de uma correia transportadora é eficaz mesmo com tempos de tratamento curtos.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Nesta revisão, os potenciais usos da tecnologia ultrassônica no processamento e na conservação de alimentos foram destacados. A aplicação de ultrassom de baixa potência (alta frequência) proporciona uma técnica não invasiva, barata e simples, que não causa mudanças estruturais no alimento. Por outro lado, o ultrassom de alta potência (baixa frequência), modifica as propriedades dos alimentos induzindo mudanças mecânicas, físicas e químicas/bioquímicas através da cavitação, transferência de calor, transferência de massa e vibração. Assim, o tempo de reação é reduzido e o rendimento da reação aumentado em condições brandas em comparação aos métodos convencionais. A simplicidade, a portabilidade e o baixo custo dos dispositivos de ultrassom os tornam elementos essenciais em laboratórios de pesquisa, plantas piloto e grandes fábricas de alimentos. Visto que, a tecnologia ultrassônica oferece um enorme potencial para as indústrias de alimentos, o desenvolvimento de novos equipamentos personalizados é uma questão a ser resolvida pelos profissionais da área. Juntamente com os avanços futuros nos projetos ultrassônicos, os esforços de pesquisa para entender os mecanismos fundamentais para uma aplicação eficaz de ultrassom fornecerão a base para o desenvolvimento dessa tecnologia para adoção em práticas industriais.

- ALARCÓN-ROJO, A. D. et al. Power ultrasound in meat processing. **Meat Science**, v. 107, p. 86–93, 2015.
- ALTAF, U. et al. Ultrasound treatment: A novel processing technique for food preservation. **The Pharma Innovation**, v. 2, n. 7, p. 234–241, 2018.
- AMAMI, E. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 36, p. 286–300, 2017.
- ANSARI, J. A.; ISMAIL, M.; FARID, M. Investigation of the use of ultrasonication followed by heat for spore inactivation. **Food and Bioproducts Processing**, v. 104, p. 32–39, 2017.
- ARNOLD, G. et al. Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. **International Dairy Journal**, v. 19, n. 5, p. 314–320, 2009.
- ARNOLD, G. et al. Ultrasonic cutting of foods with inclined moving blades. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 4, p. 394–400, 2011.
- BECK, S. M. et al. Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – A response surface approach. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 6, p. 2144–2150, 2014.
- BUTZ, P.; TAUSCHER, B. Emerging technologies: chemical aspects. **Food Research International**, v. 35, n. 2–3, p. 279–284, 2002.
- CAMERON, M.; MCMASTER, L. D.; BRITZ, T. J. Impact of ultrasound on dairy spoilage microbes and milk components. **Dairy Science and Technology**, v. 89, n. 1, p. 83–98, 2009.
- CÁRCEL, J. A. et al. High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, v. 76, n. 4, p. 611–619, 2007.
- CHANDRAPALA, J. et al. Ultrasonics in food processing. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 19, n. 5, p. 975–983, 2012.
- CHANG, H.-J. et al. Effects of characteristics changes of collagen on meat physicochemical properties of beef semitendinosus muscle during ultrasonic processing. **Food and Bioprocess Technology**, v. 5, n. 1, p. 285–297, 2012.
- CHAROUX, C. M. G. et al. Applications of airborne ultrasonic technology in the food industry. **Journal of Food Engineering**, v. 208, p. 28–36, 2017.
- CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. 2nd edition. Boca Raton: CRC Press, 2012. 504p.
- CHEMAT, F. et al. Review of green food processing techniques. preservation, transformation, and extraction. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 41, p. 357–377, 2017.
- CHEMAT, F. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 540–560, 2017.

- CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 18, n. 4, p. 813–835, 2011.
- CHEN, C. W. et al. Ultrasound-assisted plasma: a novel technique for inactivation of aquatic microorganisms. **Environmental Science & Technology**, v. 43, n. 12, p. 4493–7, 2009.
- CHENG, X. et al. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries. **International Journal of Refrigeration**, v. 44, p. 49–55, 2014.
- CHENG, X. et al. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 27, p. 576–585, 2015.
- CONDÓN-ABANTO, S. et al. Application of ultrasound in combination with heat and pressure for the inactivation of spore forming bacteria isolated from edible crab (*Cancer pagurus*). **International Journal of Food Microbiology**, v. 223, p. 9–16, 2016.
- CONDÓN-ABANTO, S. et al. An assessment of the application of ultrasound in the processing of ready-to-eat whole brown crab (*Cancer pagurus*). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 40, p. 497–504, 2018.
- CONTRERAS, M. et al. Intensification of heat transfer during mild thermal treatment of dry-cured ham by using airborne ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 41, p. 206–212, 2018.
- DELGADO-POVEDANO, M. M.; LUQUE DE CASTRO, M. D. Ultrasound-assisted analytical emulsification-extraction. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 45, p. 1–13, 2013.
- DEMIRDÖVEN, A.; BAYSAL, T. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. **Food Reviews International**, v. 25, n. 1, p. 1–11, 2008.
- DOLATOWSKI, Z. J.; STADNIK, J.; STASIAK, D. Applications os ultrasound in food technology. **Acta Scientiarum Polonorum - Technologia Alimentaria.**, v. 3, n. 6, p. 88–99, 2007.
- DRAKOPOULOU, S. et al. Ultrasound-induced inactivation of gram-negative and gram-positive bacteria in secondary treated municipal wastewater. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 16, n. 5, p. 629–634, 2009.
- DŘÍMALOVÁ, E. et al. Degradation of hyaluronan by ultrasonication in comparison to microwave and conventional heating. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 4, p. 420–426, 2005.
- ENSMINGER, D.; BOND, L. J. **Ultrasonics : fundamentals, technologies, and applications**. 3rd. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. 723p.
- EVELYN; MILANI, E.; SILVA, F. V. M. Comparing high pressure thermal processing and thermosonication with thermal processing for the inactivation of bacteria, moulds, and yeasts spores in foods. **Journal of Food Engineering**, v. 214, p. 90–96, 2017.
- EVELYN; SILVA, F. V. M. Differences in the resistance of microbial spores to thermosonication, high pressure thermal processing and thermal treatment alone. **Journal of Food Engineering**, v. 222, p. 292–297, 2018.
- FAN, K.; ZHANG, M.; MUJUMDAR, A. S. Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 39, n. March, p. 47–57, 2017.
- FIKRY CHE PA, N. et al. Power ultrasound assisted mixing effects on bread physical properties. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 60–66, 2014.

- GALLEGO-JUAREZ, J. A. High-power ultrasonic processing: Recent developments and prospective advances. **Physics Procedia**, v. 3, n. 1, p. 35–47, 2010.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A. et al. Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: processes and devices. **Drying Technology**, v. 25, n. 11, p. 1893–1901, 2007.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A. et al. Ultrasonic defoaming and debubbling in food processing and other applications. In: GALLEGO-JUÁREZ, J.; GRAFF, K.F. (Eds). **Power Ultrasonics**. Cambridge:Elsevier, 2015. p. 793–814.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A.; GRAFF, K. F. **Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound**. Ultrasonic defoaming and debubbling in food processing and other applications. In: GALLEGO-JUÁREZ, J.; GRAFF, K.F. (Eds). **Power Ultrasonics**. Cambridge:Elsevier, 2015. p. 235–242.
- GAMBUTEANU, C.; ALEXE, P. Effects of ultrasound assisted thawing on microbiological, chemical and technological properties of unpackaged pork Longissimus dorsi. **Annals of the University “Dunarea de Jos” of Galati - Fascicle VI: Food Technology**, v. 37, n. 1, p. 98–107, 2013.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V. et al. Power ultrasound mass transfer enhancement in food drying. **Food and Bioproducts Processing**, v. 85, n. 3, p. 247–254, 2007.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V. et al. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. **Drying Technology**, v. 27, n. 2, p. 281–287, 2009.
- GARRETT, P. R. Defoaming: Antifoams and mechanical methods. **Current Opinion in Colloid & Interface Science**, v. 20, n. 2, p. 81–91, 2015.
- GRÖNROOS, A.; PIRKONEN, P.; RUPPERT, O. Ultrasonic depolymerization of aqueous carboxymethylcellulose. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 11, n. 1, p. 9–12, 2004.
- GROSSNER, M. T.; BELOVICH, J. M.; FEKE, D. L. Transport analysis and model for the performance of an ultrasonically enhanced filtration process. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 12, p. 3233–3238, 2005.
- IIDA, Y. et al. Control of viscosity in starch and polysaccharide solutions with ultrasound after gelatinization. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 2, p. 140–146, 2008.
- ISLAM, M. N. et al. Direct contact ultrasound assisted freezing of mushroom (*Agaricus bisporus*): Growth and size distribution of ice crystals. **International Journal of Refrigeration**, v. 57, p. 46–53, 2015.
- JABBARI-HICHRI, A.; PECZALSKI, R.; LAURENT, P. Ultrasonically triggered freezing of aqueous solutions: Influence of initial oxygen content on ice crystals size distribution. **Journal of Crystal Growth**, v. 402, p. 78–82, 2014.
- JAMBRAK, A. R. et al. Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 2, p. 281–287, 2007a.
- JAMBRAK, A. R. et al. Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 1, p. 88–97, 2007b.
- JAMBRAK, A. R. et al. Physical properties of ultrasound treated soy proteins. **Journal of Food Engineering**, v. 93, p. 386–393, 2009a.

- JAMBRAK, A. R. et al. Ultrasound effect on physical properties of corn starch. **Carbohydrate Polymers**, v. 79, n. 1, p. 91–100, 2009b.
- JAYASOORIYA, S. D. et al. Effect of high power ultrasound and ageing on the physical properties of bovine *Semitenidosus* and *Longissimus* muscles. **Meat Science**, v. 75, n. 4, p. 628–639, 2007.
- JIN, Y. et al. Effects of ultrasound on cross-flow ultrafiltration of skim milk: characterization from macro-scale to nano-scale. **Journal of Membrane Science**, v. 470, p. 205–218, 2014.
- JØRGENSEN, A. S.; CHRISTENSEN, M. ; ERTBJERG, P. Marination with kiwifruit powder followed by power ultrasound tenderizes porcine *M. biceps femoris*. **International Conference of Meat Science and Technology 2008**, 2008.
- KHMELEV, V. N. et al. Research and development of ultrasonic device prototype for intensification of drying process. 9th International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials. **Anais... IEEE**, 2008.
- KHMELEV, V. N. et al. Studies of ultrasonic dehydration efficiency. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 12, n. 4, p. 247–254, 2011.
- KIANI, H. et al. Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. **Food Research International**, v. 44, n. 9, p. 2915–2921, 2011.
- KIANI, H. et al. Investigation of the effect of power ultrasound on the nucleation of water during freezing of agar gel samples in tubing vials. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 19, n. 3, p. 576–581, 2012.
- KNORR, D. et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 5, p. 261–266, 2004.
- KOWALSKI, S. J.; MIERZWA, D. US-Assisted convective drying of biological materials. **Drying Technology**, v. 33, n. 13, p. 1601–1613, 2015.
- KOWALSKI, S. J.; PAWŁOWSKI, A. Intensification of apple drying due to ultrasound enhancement. **Journal of Food Engineering**, v. 156, p. 1–9, 2015.
- KYLLONEN, H.; PIRKONEN, P.; NYSTROM, M. Membrane filtration enhanced by ultrasound: a review. **Desalination**, v. 181, p. 319–335, 2005.
- LABORDE, J.-L. et al. Acoustic bubble cavitation at low frequencies. **Ultrasonics**, v. 36, n. 1–5, p. 589–594, 1998.
- LAWSON, L. G. et al. Cost-effectiveness of *Salmonella* reduction in Danish abattoirs. **International Journal of Food Microbiology**, v. 134, n. 1–2, p. 126–132, 2009.
- LI, B.; SUN, D.-W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods – a review. **Journal of Food Engineering**, v. 54, n. 3, p. 175–182, 2002a.
- LI, B.; SUN, D.-W. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 3, p. 277–282, 2002b.
- MAMVURA, T. A.; IYUKE, S. E.; PATERSON, A. E. Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces. **South African Journal of Chemical Engineering**, v. 25, p. 62–73, 2018.
- MASON, T. J.; CHEMAT, F.; ASHOKKUMAR, M. Power ultrasonics for food processing. In: **Power**

Ultrasonics. BocaRaton: Elsevier, 2015. p. 815–843.

MASON, T. J.; JOYCE, E. Sonication used as a biocide. A review: Ultrasound a greener alternative to chemical biocides? **Chemistry Today**, v. 26, n. 6, 2008.

MASON, T. J.; PANIWNYK, L.; LORIMER, J. P. The uses of ultrasound in food technology. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 3, p. 253–260, 1996.

MASON, T.; PETERS, D. **Practical sonochemistry**. 2nd edition. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2002. 555p

MATSUURA, K. et al. Acceleration of cell growth and ester formation by ultrasonic wave irradiation. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 77, n. 1, p. 36–40, 1994.

MAWSON, R. et al. Airborne ultrasound for enhanced defoaming applications. In: KNOERZER, K.; JULIANO, P.; SMITHERS, G. (Eds.). **Innovative Food Processing Technologies**. Amsterdam:Elsevier, 2016. p. 347–359.

MCCLEMENTS, D. J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. **Trends in Food Science & Technology**, v. 6, n. 9, p. 293–299, 1995.

MCDONNELL, C. K. et al. The effect of ultrasonic salting on protein and water–protein interactions in meat. **Food Chemistry**, v. 147, p. 245–251, 2014a.

MCDONNELL, C. K. et al. The acceleration of pork curing by power ultrasound: A pilot-scale production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 26, n. 26, p. 191–198, 2014b.

MEDILANSKI, E. et al. Influence of the surface topography of stainless steel on bacterial adhesion. **Biofouling**, v. 18, n. 3, p. 193–203, 2002.

METTIN, R. Bubble structures in acoustic cavitation. In: DOINIKOV, A. A. (Ed.). **Bubble and particle dynamics in acoustic fields: Modern trends and applications**. Kerala: Research Signpost, 2005. p. 1–36.

MIANO, A. C.; SABADOTI, V. D.; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. **Journal of Food Engineering**, v. 225, p. 53–61, 2018.

MILANI, E. A.; SILVA, F. V. M. Ultrasound assisted thermal pasteurization of beers with different alcohol levels: Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* ascospores. **Journal of Food Engineering**, v. 198, p. 45–53, 2017.

MILES, C. A.; MORLEY, M. J.; RENDELL, M. High power ultrasonic thawing of frozen foods. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 2, p. 151–159, 1999.

MONGENOT, N.; CHARRIER, S.; CHALIER, P. Effect of ultrasound emulsification on cheese aroma encapsulation by carbohydrates. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 48, n. 3, p. 861–7, 2000.

MOUSAVI, S. A. A. A.; FEIZI, H.; MADOLIAT, R. Investigations on the effects of ultrasonic vibrations in the extrusion process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187, p. 657–661, 2007.

MUSIELAK, G.; MIERZWA, D.; KROEHNKE, J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 56, p. 126–141, 2016.

MUTHUKUMARAN, S. et al. Mechanisms for the ultrasonic enhancement of dairy whey ultrafiltration.

Journal of Membrane Science, v. 258, n. 1–2, p. 106–114, 2005.

NAKAGAWA, K. et al. Influence of controlled nucleation by ultrasounds on ice morphology of frozen formulations for pharmaceutical proteins freeze-drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 45, n. 9, p. 783–791, 2006.

NGUYEN, T. M. P.; LEE, Y. K.; ZHOU, W. Stimulating fermentative activities of bifidobacteria in milk by highintensity ultrasound. **International Dairy Journal**, v. 19, n. 6–7, p. 410–416, 2009.

NGUYEN, T. M. P.; LEE, Y. K.; ZHOU, W. Effect of high intensity ultrasound on carbohydrate metabolism of bifidobacteria in milk fermentation. **Food Chemistry**, v. 130, n. 4, p. 866–874, 2012.

O'DONNELL, C. P. et al. Effect of ultrasonic processing on food enzymes of industrial importance. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 7, p. 358–367, 2010.

OJHA, K. S. et al. Ultrasound technology for food fermentation applications. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 410–417, 2017.

OWOLABI, G. M. et al. The influence of specific mechanical energy on the ultrasonic characteristics of extruded dough. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 2, p. 202–206, 2008.

OZUNA, C. et al. Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 91, n. 14, p. 2511–2517, 2011.

OZUNA, C. et al. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. **Journal of Food Engineering**, v. 119, n. 1, p. 84–93, 2013.

PAGÁN, R. et al. Bacterial resistance to ultrasonic waves under pressure at nonlethal (manosonication) and lethal (manothermosonication) temperatures. **Applied and environmental microbiology**, v. 65, n. 1, p. 297–300, 1999.

PANIWNYK, L. Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 38, p. 794–806, 2017.

PATIST, A.; BATES, D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 2, p. 147–154, 2008.

PIYASENA, P.; MOHAREB, E.; MCKELLAR, R. . Inactivation of microbes using ultrasound: a review. **International Journal of Food Microbiology**, v. 87, n. 3, p. 207–216, 2003.

POHLMAN, F. W.; DIKEMAN, M. E.; ZAYAS, J. F. The effect of low-intensity ultrasound treatment on shear properties, color stability and shelf-life of vacuum-packaged beef semitendinosus and biceps femoris muscles. **Meat science**, v. 45, n. 3, p. 329–37, 1997.

RAJASEKHAR, P. et al. Impact of sonication at 20 kHz on *Microcystis aeruginosa*, *Anabaena circinalis* and *Chlorella* sp. **Water Research**, v. 46, n. 5, p. 1473–1481, 2012.

RANA, A.; PARMAR, M. Y.; ANITA RANA, C. Ultrasonic processing and its use in food industry: A review. **International Journal of Chemical Studies IJCS**, v. 5, n. 56, p. 1961–1968, 2017.

ROBERTS, R. T. Sound for processing food. **Nutrition & Food Science**, v. 91, n. 3, p. 17–18, 1991.

RODRÍGUEZ, G. et al. Experimental study of defoaming by air-borne power ultrasonic technology. **Physics Procedia**, v. 3, p. 135–139, 2009.

- SABAREZ, H.; FOOD, C. Drying of Food Materials. **Reference Module in Food Science**, p. 1–10, 2016.
- SABAREZ, H. T.; GALLEGUO-JUAREZ, J. A.; RIERA, E. Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. **Drying Technology**, v. 30, n. 9, p. 989–997, 2012.
- SÁNCHEZ, E. S. et al. Influence of ultrasound on mass transport during cheese brining. **European Food Research and Technology**, v. 209, n. 3–4, p. 215–219, 1999.
- SCHÖSSLER, K.; JÄGER, H.; KNORR, D. Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. **Journal of Food Engineering**, v. 108, n. 1, p. 103–110, 2012.
- SHANMUGAM, A.; CHANDRAPALA, J.; ASHOKKUMAR, M. The effect of ultrasound on the physical and functional properties of skim milk. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 16, p. 251–258, 2012.
- SIRÓ, I. et al. Application of an ultrasonic assisted curing technique for improving the diffusion of sodium chloride in porcine meat. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 2, p. 353–362, 2009.
- SORIA, A. C.; VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, n. 7, p. 323–331, 2010.
- TEREFE, N. S. et al. The kinetics of inactivation of pectin methylesterase and polygalacturonase in tomato juice by thermosonication. **Food Chemistry**, v. 117, n. 1, p. 20–27, 2009.
- TERVO, J. T.; METTIN, R.; LAUTERBORN, W. Bubble cluster dynamics in acoustic cavitation. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 92, n. 1, p. 178–180, 2006.
- TIWARI, B. K. et al. Inactivation kinetics of pectin methylesterase and cloud retention in sonicated orange juice. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 10, n. 2, p. 166–171, 2009.
- TOLVANEN, R. et al. Pilot-scale continuous ultrasonic cleaning equipment reduces *Listeria monocytogenes* levels on conveyor belts. **Journal of food protection**, v. 72, n. 2, p. 408–411, 2009.
- ULLOA, J. A. et al. Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). **CyTA - Journal of Food**, p. 1–9, 2015.
- VERCET, A. et al. The effects of manothermosonication on tomato pectic enzymes and tomato paste rheological properties. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 3, p. 273–278, 2002.
- VERCET, A.; BURGOS, J.; LÓPEZ-BUESA, P. Manothermosonication of foods and food-resembling systems: effect on nutrient content and nonenzymatic browning. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 1, p. 483–9, 2001.
- VIMINI, R. J.; KEMP, J. D.; FOX, J. D. Effects of low frequency ultrasound on properties of restructured beef rolls. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 5, p. 1572–1573, 1983.
- VODENIČAROVÁ, M. et al. Xyloglucan degradation using different radiation sources: A comparative study. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 13, n. 2, p. 157–164, 2005.
- WALKLING-RIBEIRO, M. et al. Shelf life and sensory evaluation of orange juice after exposure to thermosonication and pulsed electric fields. **Food and Bioproducts Processing**, v. 87, n. 2, p. 102–107, 2009a.
- WALKLING-RIBEIRO, M. et al. The impact of thermosonication and pulsed electric fields on staphylococcus aureus inactivation and selected quality parameters in orange juice. **Food and**

Bioprocess Technology, v. 2, n. 4, p. 422–430, 2009b.

WALTER, A. A. **Ultrasonic treatment of dough products**. Patente, 1990. Disponível em: <<https://encrypted.google.com/patents/EP0470970B1?cl=it>>. Acesso em: 31 mar. 2018

XIN, Y.; ZHANG, M.; ADHIKARI, B. Ultrasound assisted immersion freezing of broccoli (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 5, p. 1728–1735, 2014.

XIONG, G.-Y. et al. Influence of ultrasound and proteolytic enzyme inhibitors on muscle degradation, tenderness, and cooking loss of hens during aging. **Czech Journal of Food Science**, v. 30, n. 3, p. 195–205, 2012.

XU, B. et al. Influence of power ultrasound on ice nucleation of radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing. **International Journal of Refrigeration**, v. 46, p. 1–8, 2014.

XU, B. et al. Infusion of CO₂ in a solid food: A novel method to enhance the low-frequency ultrasound effect on immersion freezing process. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 35, p. 194–203, 2016.

XU, B.; ZHANG, M.; MA, H. Food freezing assisted with ultrasound. In: **Ultrasound: Advances for Food Processing and Preservation**. London: Elsevier, 2017. p. 293–321.

YILDIZ, G.; RABABAH, T. M.; FENG, H. Ultrasound-assisted cutting of cheddar, mozzarella and Swiss cheeses – Effects on quality attributes during storage. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 37, p. 1–9, 2016.

ZUO, J. Y. et al. The pasting properties of sonicated waxy rice starch suspensions. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 16, n. 4, p. 462–468, 2009.

SOBRE AS AUTORAS

ELANE SCHWINDEN PRUDENCIO Professor da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Membro do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Membro do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Mestrado em Ciência dos Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Doutorado em Ciência dos Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Pós Doutorado em Engenharia Química pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST); Grupo de pesquisa: Bioativos em alimentos: inovação, desenvolvimento e caracterização (UFSC); Química e Bioquímica de alimentos (UFSC); Tecnologia Limpa no Processamento de Alimentos (UFSC); Bolsista Produtividade em Pesquisa do CNPq.

SILVANI VERRUCK Graduação em Tecnologia de Alimentos pela Instituto Federal Catarinense (IFC); Mestrado em Ciência dos Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Doutoranda em Ciência dos Alimentos pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Grupo de pesquisa: Bioativos em alimentos: inovação, desenvolvimento e caracterização (UFSC); Química e Bioquímica de alimentos (UFSC); Embalagens, Conservação e Ciência dos Alimentos (IFC). E-mail: Silvani.verruck@gmail.com

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-85107-31-4



9 788585 107314