



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Tecnologias Emergentes no Processo de Pasteurização da Cerveja: Uma Revisão

Autor: Bárbara Müller de Souza

Orientador: Júlia Sarkins

Wagner Müller

Autor: Bárbara Müller de Souza

Tecnologias Emergentes no Processo de Pasteurização da Cerveja: Uma Revisão

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química

Orientadores: Júlia Sarkis e Wagner Müller

Banca Examinadora:

Doutora, Ligia Damasceno Ferreira Marczak, UFRGS

Doutora, Naira Poerner Rodrigues, UFRGS

Porto Alegre

2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pelo amor e apoio incondicionais sempre. Por sempre me proporcionarem as melhores oportunidades possíveis e viverem cada desafio junto comigo.

Agradeço aos meus orientadores, Júlia e Wagner, por toda paciência e apoio para elaboração deste trabalho.

A todos os professores que tive o privilégio de ser aluna, em especial aos professores do curso de Engenharia Química desta Universidade que e formaram como aluna e pessoa.

Agradeço aos amigos que conheci na Universidade, os quais foram meus companheiros em muitos momentos ao longo dessa jornada e tornaram essa fase muito especial.

Muito Obrigada!

RESUMO

Tecnologias emergentes, tais como Alta Pressão (AP), Campo Elétrico Pulsado (PEF), Ultrassom (US) e Aquecimento Ôhmico (AO), têm surgido para assistir diversos processos na indústria de alimentos. Uma de suas principais aplicações é sua utilização para a inativação microbiana, em processos de pasteurização e esterilização. Convencionalmente, a inativação é feita de forma térmica com aquecimento convencional direto ou indireto do produto. No entanto, o interesse por novas formas de processamento mais brandas tem aumentado com a crescente demanda do consumidor por maior frescor nos alimentos consumidos e por alternativas mais sustentáveis. Esse interesse aparece no mundo cervejeiro, onde a pasteurização tem papel fundamental para assegurar a inocuidade do produto. Ao longo das últimas décadas, os estudos publicados têm mostrado a efetividade das novas tecnologias. Além disso, apresentam-se vantagens quando comparado ao método convencional, como menores tempos de processo e aumento da eficiência energética. Esta monografia consiste em uma revisão da literatura sobre a utilização de tecnologias emergentes para pasteurização da cerveja. Os objetivos do trabalho são discutir os resultados encontrados sobre os mecanismos e a efetividade de cada método, comparar o desempenho entre os novos processos e os convencionais, e, por fim, apresentar o início do estudo que teria sido desenvolvido utilizando o aquecimento ôhmico na inativação da *Saccharomyces cerevisiae*. A maior parte das tecnologias apresentadas demonstraram serem de grande potencial para melhorar os processos de inativação de microrganismos. Entretanto, ainda há muitos pontos a serem aprofundados como o entendimento dos mecanismos e a influência de cada variável.

Palavras-chave: Pasteurização, Ultrassom, Alta Pressão, Campo elétrico pulsado, Aquecimento Ôhmico, Cerveja, *Saccharomyces Cerevisiae*.

ABSTRACT

Emerging technologies, such as High Pressure, Pulsed Electric Field, Ultrasound and Ohmic Heating, have emerged to assist and improve various processes in the food industry. A potential application is the use of these technologies in microbial inactivation, in pasteurization and sterilization processes. Conventionally, the inactivation is done thermally with direct or indirect conventional heating of the product. However, interest in new forms of processing has increased with the consumer demand for greater freshness in consumed foods and for more sustainable alternatives. This interest appears in the brewing world, where pasteurization plays a fundamental role on assuring the product innocuity. Over the last few decades, published studies have shown the effectiveness of new technologies in beer pasteurization. Furthermore, there are some advantages when alternative technologies are compared to the conventional method, such as shorter process times and increased energy efficiency. This present work consists in a literature review on the use of emerging technologies for beer pasteurization. The objectives of the work are to discuss the results found about the mechanisms and effectiveness of each method, compare the performance between new and conventional processes, and, at the end, present the beginning of the study that would have been developed using ohmic heating in inactivation of *Saccharomyces cerevisiae*. Most of the technologies presented showed a great potential to improve the inactivation processes of microorganisms. However, there are still many points to be deepened, such as understanding the mechanisms and the influence of each variable.

Keywords: Pasteurization, Ultrasound, High Pressure, Pulsed Electric Field, Ohmic Heating, Beer, *Saccharomyces Cerevisiae*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Pasteurizador em túnel.....	7
Figura 2: Diagrama esquemático de uma pasteurização <i>flash</i> : zona de aquecimento, zona de regeneração e zona de aquecimento.	8
Figura 3: Esquematização de uma unidade de processamento de alta pressão entre 400 e 800 MPa	10
.....	10
Figura 4: Esquemas da aplicação utilizando sondas de ultrassom e aplicação utilizando banho de água.....	13
Figura 5: Fluxograma dos equipamentos utilizados no processo de aplicação Campo Elétrico pulsado.....	15
Figura 6: Esquematização de um sistema de aquecimento ôhmico. (1) Câmara; (2) Termopar; (3) Eletrodos; (4) Sensor; (5) Computador de dados	17
Figura 7: Comparação da influência do grau alcóolico na inativação através da AP.	20
Figura 8: Gráficos da redução logarítmica pelo tempo de processo em diferentes pressões (A) 200 MPa, (B) 300 MPa, (C) 400 MPa.....	21
Figura 9: Comparação entre as curvas de inativação utilizando aquecimento convencional e alta pressão	22
Figura 10: Comparação da redução logarítmica entre processo de termossonificação de modo contínuo e batelada em diferentes amostras	23
Figura 11: Redução logarítmica vs. tempo de tratamento por aquecimento convencional e por termossonificação. Os pontos representam os dados experimentais e as curvas as tendências de inativação de cada método	24
Figura 12: Redução logarítmica com PEF vs. Aquecimento convencional (60°C).....	26
Figura 13: Aparelhos utilizados no experimento para aquecimento ôhmico de cerveja pilsen	28
Figura 14: Gráfico de comparação entre curvas de aquecimento de 23°C a 80°C com aquecimento convencional e aplicação de 50V, 100V e 140V.	29
Figura 15: Correlação entre condutividade e temperatura com aplicação de 50 V.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valor D e valor z para determinados organismos	4
Tabela 2: O efeito da aplicação por um minuto de diferentes temperaturas na unidade de pasteurização.....	5
Tabela 3: Efeito HPP em determinados microrganismos	9
Tabela 4: Principais diferenças entre o ultrassom de alta e baixa intensidade.....	11
Tabela 5: Diferentes aplicações industriais do Ultrassom	12

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	1
1.2	Metodologia e organização da monografia	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	PASTEURIZAÇÃO DA CERVEJA	3
2.1.1	Conceitos da pasteurização	3
2.1.2	Pasteurizadores em túnel	5
2.1.3	Flash pasteurização	7
2.2	TECNOLOGIAS EMERGENTES	8
2.2.1	Alta Pressão	8
2.2.2	Ultrassom	11
2.2.3	Campo Elétrico Pulsado	13
2.2.4	Aquecimento Ôhmico	15
3	TECNOLOGIAS EMERGENTES APLICADAS AO PROCESSAMENTO DA CERVEJA	18
3.1	Alta Pressão	18
3.2	Ultrassom	22
3.3	Campo Elétrico Pulsado	25
3.4	Aquecimento Ôhmico	27
4	EXPERIMENTOS INICIAIS COM AQUECIMENTO ÔHMICO	27
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias emergentes são técnicas de processamento com potencial aplicação na indústria de alimentos. Entre elas destacam-se a técnica de alta pressão, de ultrassom, de campo elétrico pulsado e de aquecimento ôhmico. Essas tecnologias já vêm sendo empregadas para distintos processos, como extração, secagem e pasteurização de alimentos. Em especial, a aplicação envolvendo a inativação de microrganismos, a qual já é presente na indústria de processamento de sucos, molhos e vegetais, vem chamando a atenção nos últimos anos.

A cerveja é uma bebida na qual a pasteurização tem papel fundamental, tendo impactos na vida de prateleira do produto e em seus aspectos sensoriais. Neste produto, o foco de inativação são as leveduras, em especial a *Saccharomyces Cerevisiae*. De modo geral, a pasteurização é um processo com alto consumo energético na produção de cerveja, o que torna o estudo de tecnologias que possam reduzir esse custo um aspecto de grande relevância econômica.

No desenvolvimento destes métodos a inativação do microrganismo acontece através de diferentes mecanismos, como a eletroporação e o rompimento das subunidades das células por submissão a alta pressão. Todos eles trazem algo de diferente do método convencional de inativação térmica por aquecimento do produto, trazendo uma nova gama de possibilidades dentro da pasteurização.

Embora diversos estudos reportem a aplicação bem sucedida das tecnologias emergentes apresentadas, ainda são necessários estudos para aprimorar o entendimento dos mecanismos e pontos ótimos de processo.

1.1 Objetivo

Neste trabalho, tem-se como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica referente às tecnologias emergentes aplicadas a pasteurização da cerveja para a melhoria desse processo.

Os objetivos específicos são:

- estudar a efetividade e mecanismo das tecnologias emergentes na inativação microbiana na cerveja;

- analisar o impacto no processo e do produto final utilizando um processo alternativo *versus* um convencional;
- elucidar a pesquisa iniciada utilizando aquecimento ôhmico na inativação da *S. cerevisiae*.

1.2 Metodologia e organização da monografia

Neste trabalho foram utilizadas as bases de dados *Scopus* e *ScienceDirect* para coleta de material bibliográfico. Para a seleção dos artigos utilizados foram buscadas as palavras-chave “pasteurização da cerveja” e “alta pressão” ou “ultrassom” ou “campo elétrico pulsado” ou “aquecimento ôhmico” ou “micro-ondas” presentes no título, no resumo ou nas palavras-chave. Foram avaliados artigos publicados a partir 2002 mandatoriamente em inglês. Foram desconsiderados estudos que envolviam as tecnologias em outras etapas do processo de produção de cerveja, dos estudos encontrados foram discutidos apenas dois artigos por tecnologia para maior aprofundamento (foco *Saccharomyces cerevisiae*), mas foram encontrados mais artigos sobre o assunto com focos diferentes e mais amplos. Nas sessões de definição de conceitos e explicações das tecnologias desta monografia foram incluídos artigos, revisões e capítulos de livros sem limitação de data.

A monografia está organizada da seguinte forma: a primeira parte consiste na introdução da pasteurização da cerveja e seu processo convencional e, na sequência, a definição dos conceitos de cada tecnologia emergente a ser mostrada; a segunda seção tem como enfoque a discussão dos resultados encontrados nas bibliografias estudadas. São discutidos efeitos sobre aspectos sensoriais da cerveja, impacto energético; e possibilidade de aplicação, comparando com o método de pasteurização convencional. A capítulo seguinte apresenta experimentos iniciais feitos para o estudo do aquecimento ôhmico na inativação da levedura *Saccharomyces Cerivisae*. Por seguinte, são discutidas oportunidades de estudos dentro da área baseado nas lacunas encontradas nos artigos analisados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PASTEURIZAÇÃO DA CERVEJA

O processo de pasteurização é oriundo da patente criada por Louis Pasteur em 1865 que dita sobre o uso de altas temperaturas (próximas a 50 °C) para inativação de microrganismos e preservação de produtos. Esse processo possuía um forte potencial para assegurar a inocuidade da cerveja, de modo que, em meados de 1870, Pasteur virou a atenção de seus estudos para esse produto. Desde então, o processo de pasteurização da cerveja para sua conservação a partir do aquecimento foi disseminado ao redor do mundo (WRAY, 2015).

Inicialmente o processo era feito em armários utilizando água quente ou vapor d'água, gerando alto custo de energia. Ao longo da história, os dispositivos empregados foram evoluindo e, no início do século vinte, criou-se o método de mover caixotes por diferentes zonas com borrifação de água a diferentes temperaturas (European Brewery Convention, 1995). Atualmente, existem dois principais métodos utilizados na pasteurização da cerveja: pasteurização em túnel e pasteurização *flash*, que serão explicados ao longo deste capítulo (WRAY, 2015).

2.1.1 Conceitos da pasteurização

A pasteurização é um processo que diminui o grau de contaminação microbiológica pela aplicação de calor (em temperaturas inferiores a 100 °C) e seu principal objetivo é a inativação de microrganismos em estado vegetativo. Cabe ressaltar que esse processo térmico não é capaz de matar bactérias e fungos que produzem esporos, para os quais deve ser usado o processo de esterilização, que utiliza temperaturas superiores a 100 °C. O controle desse processo é feito a partir da determinação e acompanhamento de parâmetros de processo como temperatura e tempo.

Para que a inativação microbiana em processos de pasteurização seja quantificada, alguns modelos cinéticos são utilizadas. Nesse contexto o valor D é o tempo necessário para a redução de 90% da população de um microrganismo conhecido em uma determinada temperatura. Este valor depende da temperatura, da espécie e do estado (se vegetativo ou esporulado) do microrganismo e de parâmetros físico-químicos que impactam no crescimento microbiológico. De modo geral altas temperaturas e pHs ácidos diminuem o valor de D. D é expresso em escala de tempo (usualmente minutos ou segundos) (WRAY, 2015).

Outra variável relevante em modelos cinéticos é o valor z, que representa a mudança na temperatura necessária para causar uma mudança de 10 vezes (um ciclo logarítmico) no valor D. O valor z é expresso em escala de temperatura. Na indústria, usualmente assume-se, um valor z por volta de 5 °C. A Tabela 1 mostra os valores D e z para alguns microrganismos relevantes no processamento da cerveja.

Tabela 1: Valor D e valor z para determinados organismos

Organismo	Valor D (min)	Valor z (°C)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	0,01	4,6
<i>Saccharomyces pastorianus</i>	0,004	4,04
<i>Saccharomyces diastaticus</i>	0,06	7,8
<i>Lactobacillus paracasei</i>	0,04	3,7
<i>Aspergillus niger</i>	0,00073	4,0
<i>Pediococcus sp.</i>	0,0039	4,6
<i>Hansenula anomala</i>	0,00025	2,8
<i>Pichia membranaefaciens</i>	0,44	15
	0,091	12

Fonte: Adaptado de Gaze (2006) e Smith (1985)

O valor P é o tempo requerido para alcançar uma redução declarada da população microbiana a uma dada temperatura, sendo uma função dos valores D e z. Seu valor é usado para determinar o tempo de uma redução logarítmica especificada em uma dada espécie microbiana. Por exemplo, quando D é 3 minutos a 60 °C com um valor z de 6 °C, para alcançar uma redução de 6 log são necessários 18 minutos, e isso será escrito como $P_{60}^6 = 18 \text{ min}$ (WRAY, 2015).

Na indústria, os parâmetros cinéticos discutidos foram simplificados utilizando o conceito de Unidade de pasteurização (*PU, do inglês Pasteurization Unit*) para cerveja, baseado na temperatura de 60 °C e valor *z* de 6,94 °C. Uma unidade de pasteurização é equivalente a 1 minuto à 60 °C. Sendo assim, a Equação 2.1 é usada para determinar a quantidade de unidades em função da temperatura de processo, e alguns valores de PU na faixa de 60 a 73,9°C são mostrados na Tabela 2.

$$PU = 1,393^{(T-60)} \quad (2.1)$$

Tabela 2: Efeito da aplicação de calor por um minuto de diferentes temperaturas na unidade de pasteurização

Temperatura	PU
60,0	1
62,1	2
67,0	10
70,0	28
73,9	100

Fonte: Adaptado de Wray (2015)

Além dessa forma de quantificação da pasteurização, o controle é feito usualmente sobre a *Saccharomyces cerevisiae*, porque é uma levedura em abundância e com resistência significativa. Então, em análises microbiológicas para avaliar contaminação sempre se tem em foco esse microorganismo.

2.1.2 *Pasteurizadores em túnel*

Pasteurização em túnel é o principal método utilizado atualmente para processamento de cerveja. Nesse dispositivo, vários compartimentos em diferentes temperaturas são usados para realizar uma curva de aquecimento até chegar na temperatura de pasteurização. Na sequência ocorre uma etapa de resfriamento até a saída do equipamento. O processo gradual de resfriamento é feito para maior aproveitamento energético e para evitar explosões de garrafas e latas. Os produtos passam pelo túnel e são aquecidos através de esguichos de água passando por todos os tanques.

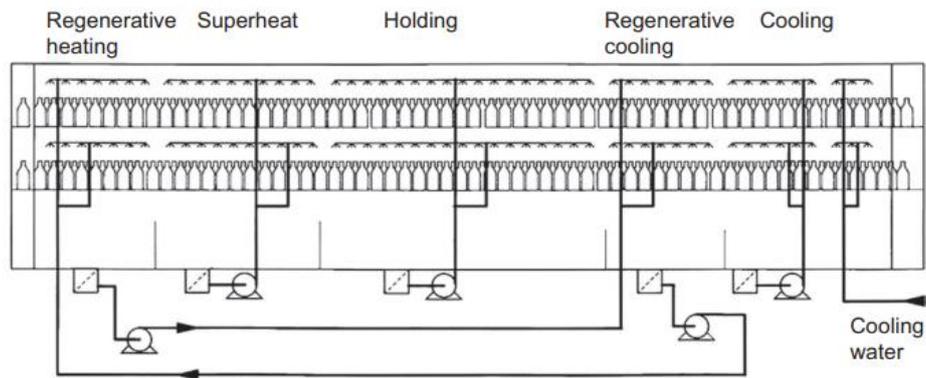
Como mencionado no subcapítulo 2.1.1., a indústria controla a pasteurização através da medida da PU (unidade de pasteurização) e esse cálculo nos pasteurizadores em túnel varia de acordo com o tempo e da temperatura de cada tanque.

Pasteurizadores em túnel são equipamentos robustos e exigem um grande número de válvulas, bombas e outros controladores. Além disso, é requerido grande quantidade de energia tanto para manter os componentes do equipamento quanto para manter a água aquecida. Pensando nisso, surgiu a otimização da interligação dos tanques, no qual o primeiro tanque de aquecimento é interligado com o último tanque de resfriamento e assim por diante. Apenas os tanques de pasteurização não são interligados para garantir que esses estejam sempre na temperatura de pasteurização. Essa abordagem permite uma taxa de 50% de recuperação de calor (WRAY, 2015).

A pasteurização em túnel é eficiente pois permite que o processo seja realizado de forma contínua, com o produto já dentro da embalagem e em larga escala. Apesar disso, algumas desvantagens desse processo são o alto gasto com energia e fluidos, alta demanda de manutenção, possíveis *blind spots* e falta de controle independente. *Blind spots* são pontos internos do equipamento em que o produto não recebe o tratamento térmico adequado devido a falhas, como esguichos, bombas ou válvulas danificadas. Já a falta de controle independente é relativa ao fluxo produção do equipamento: caso haja falta de latas ou garrafas entrando no processo, ocorrerá um esvaziamento parcial do tanque, o que afetará a troca térmica e possibilitará um superaquecimento impactando na unidade de pasteurização. Em adição, em caso de o fluxo de produção para frente trave as latas dentro do pasteurizador, há o risco de um subprocessamento ocorrer (WRAY, 2015). Na Figura 1, é apresentado a esquematização do pasteurizador em túnel.

O mecanismo de espaçamento dos tanques é muito importante, porque a exposição excessiva do produto ao calor impacta em seus atributos sensoriais, de modo que, quanto mais tempo exposto ao aquecimento, maior a degradação térmica desses compostos (WRAY, 2015).

Figura 1: Pasteurizador em túnel



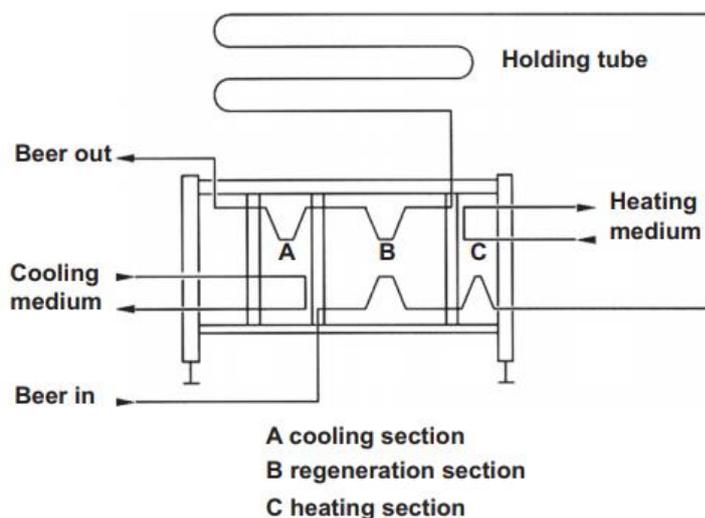
Fonte: Adaptado de Wray (2015)

2.1.3 Pasteurização flash

Na pasteurização *flash* a cerveja é rapidamente aquecida em um trocador de calor de placas e mantida em tubos, nos quais o número de PU necessário é atingido em poucos segundos. O produto circula pelo trocador para pré-aquecimento e, quando atinge a temperatura desejada, é enviado para um tubo de retenção. Usualmente a cerveja é aquecida até 72,5 °C e retida por 20 segundos, tempo no qual são atingidas 20 PU. O regime de escoamento no tubo é altamente turbulento para aumentar as taxas de troca térmica.

Neste método, tem-se uma alta recuperação do calor (que pode chegar a mais de 90%), pois um dos fluidos de aquecimento utilizado é a própria cerveja já pasteurizada. A Figura 2 apresenta um esquema de pasteurizador *flash* (Dunn, 2006). Como esse método de pasteurização não é feito dentro da embalagem, a chance de contaminação microbiológica em etapas posteriores é maior comparada com a pasteurização em túnel. Desse modo, trata-se de um processo que exige um controle de higiene muito maior. Além disso, de acordo com Boulton e Quain (2006) ela leva a uma vida de prateleira de apenas 6 a 8 semanas (WRAY, 2015).

Figura 2: Diagrama esquemático de uma pasteurização *flash*: zona de aquecimento, zona de regeneração e zona de aquecimento.



Fonte: Adaptado de Wray (2015)

2.2 TECNOLOGIAS EMERGENTES

2.2.1 Alta Pressão

O processamento por alta pressão (AP) teve sua primeira aplicação em alimentos por volta de 1988 nos Estados Unidos, onde foi utilizado para conservação de leite, fruta e carne. Foi demonstrado que utilizando pressões de 658 MPa por 10 minutos é possível inativar os microrganismos não esporulados nesses produtos. Apesar disso, por muitos anos esse processo teve dificuldade de ser implementado devido a embalagens inadequadas e limitação dos equipamentos industriais (FELLOWS, 2015).

De modo geral, na aplicação de alta pressão (AP) (também conhecida como HPP (*High Pressure Processing*) ou UHP (*Ultra-High Pressure Processing*)), os alimentos são submetidos a pressões de 100 a 1000 MPa por alguns segundos ou minutos. O processo é capaz de inativar microrganismos não-esporulados e enzimas. O alimento tem uma pasteurização efetiva, com aquecimento mínimo e maior preservação de suas características sensoriais e nutricionais. A AP inativa o microrganismo por vários fenômenos simultâneos, incluindo desnaturação de enzimas, danos a membrana celular e a desintegração de ribossomos em suas subunidades (MILANI et al., 2016).

O processo inicia com os alimentos sendo inseridos em vasos que são submersos em água (meio transmissor de pressão), com posterior compressão hidrostática. A pressão é transmitida pelo meio até o microrganismo, causando a inativação por meio da ruptura de ligações não-covalentes nas proteínas, que são responsáveis pela replicação, integridade e metabolismo das células. A desnaturação das proteínas é irreversível, garantindo a efetividade do processo de inativação. A pressão necessária para inativação varia de acordo com a espécie de microrganismo e com o meio conforme mostrado na Tabela 3 (FELLOWS, 2015).

Tabela 3: Efeito Alta Pressão em determinados microrganismos

Microrganismo	Parâmetros			Inativação (ciclos log)	Meio
	Pressão (MPa)	Temp. (°C)	Tempo (min)		
<i>Aspergillus awamori</i>	300	N/A	5	5	Satsuma, mandarin juice
<i>Escherichia coli</i>	550	20	1	4	Suco de laranja
<i>Listeria innocua</i>	450	20	10	6,63	Músculo de carne
<i>Listeria monocytogenes</i> NCTC 11994	375	20	15	2,0	Solução salina
<i>L. monocytogenes</i> NCTC 2433	375	20	15	6,0	N/A
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	253	25	10	3	Molho de espaguete

Fonte: Adaptado de Fellows (2015)

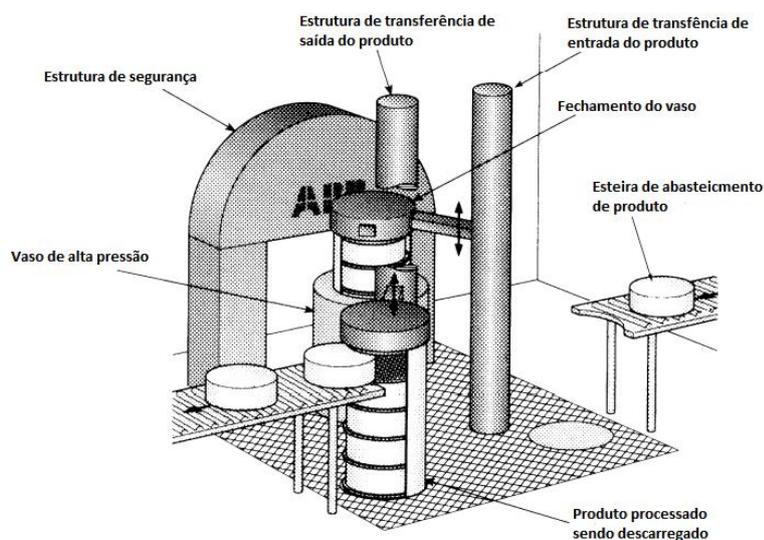
A pressão é aplicada homogeneamente ao longo do alimento, de modo que, todas as partes do produto recebem o mesmo tratamento devido ao princípio hidrostático de transmissão de pressão. Essa é uma vantagem significativa sobre outros métodos, porque o alimento recebe o mesmo tratamento independentemente do tamanho, forma e composição da embalagem. Com isso, ele se sobressai em relação a outras tecnologias com problemas de uniformidade, como aquecimento por condução, micro-ondas e radiofrequência. Além disso,

o processo por AP é considerado não térmico, onde o único incremento de temperatura do alimento ocorre devido ao calor adiabático gerado pelos ciclos de compressão/expansão. A variação de temperatura é de aproximadamente 3°C a cada 100 MPa, podendo ter uma variação significativa de acordo com a quantidade de gordura na composição do alimento. Para tentar manter o processo isotérmico, o vaso de pressão é mantido na mesma temperatura desejada para o alimento.

Além da composição do alimento e de sua temperatura, outros parâmetros tem impacto direto na aplicação do processo de AP, como as propriedades do alimento (pH e forças iônicas), o microrganismo presente (idade e estágio de crescimento), a temperatura inicial do produto, o tempo para atingir a pressão, a temperatura e pressão de operação, o tempo de aplicação da alta pressão, o tipo de pressão aplicada (semi-contínua ou cíclica), o tempo de descompressão e a integridade da embalagem.

Nesse contexto, a AP tem grandes vantagens em relação a uniformidade de processamento e baixo impacto na degradação das características sensoriais do alimento. Uma das principais limitações da técnica diz respeito ao regime produtivo, uma vez que os dispositivos em geral operam em batelada. A Figura 3 mostra o exemplo de um equipamento de AP operando de forma semi-contínua.

Figura 3: Esquemática de uma unidade de processamento de alta pressão



Fonte: Adaptado de Fellows (2015)

2.2.2 Ultrassom

O ultrassom é definido como o espectro de frequências das ondas sonoras que excedem o limiar da audição humana (~20Hz). Esse processo possui diversas aplicações e, nas últimas décadas, vem também sendo utilizado na área de alimentos, principalmente como pré-tratamento para a diminuição do número de etapas e do tempo dos processos (AWAD, 2012). Dentro da aplicação em processos alimentícios, o ultrassom, pode ser usado de duas formas, alta e baixa intensidade, com diferentes aplicações. Na Tabela 4, podemos observar as principais diferenças entre as duas categorias.

Tabela 4: Principais diferenças entre o ultrassom de alta e baixa intensidade.

Ultrassom baixa intensidade	Ultrassom alta intensidade
Não destrutivo	Destrutivo
Auxilia na descoberta das propriedades físico-químicas, composição e estrutura	Auxilia em processos de inativação, rompimento das células; inativação de enzimas
Frequências acima de 100 kHz	Frequências entre 20 e 500 kHz
Não modifica as propriedades do alimento	Modifica a propriedade dos alimentos

Fonte: Adaptado de Natajara (2011)

Na baixa intensidade (ou alta frequência), são utilizadas frequências acima de 100 Hz e intensidades abaixo de 1 W/cm². Ondas nessa frequência podem ser utilizadas para a análise de estruturas através da perda de energia na compressão e descompressão das ondas emitidas. A combinação da absorção e dispersão das ondas pelos materiais é capaz de prever algumas características físico-químicas dos produtos. Essa categoria de ultrassom tem como principal aplicação a análise não invasiva dos alimentos, muito utilizada para controle de qualidade durante o processo e avaliação da vida de prateleira dos produtos.

Na alta intensidade (ou baixa frequência), as ondas de ultrassom são destrutíveis, gerando efeitos consideráveis nas propriedades físicas, bioquímicas e mecânicas dos alimentos. São ondas de 20 a 100 Hz com intensidades de 10 a 100 W/cm²; é nesse intervalo que ocorrem a maioria das operações unitárias aplicadas em processos alimentícios, como secagem, esterilização/pasteurização, congelamento entre outros (BHARGAVA et al., 2021).

O ultrassom apresenta fenômenos físicos e químicos diferentes dos encontrados nos processos de métodos convencionais (CHEMAT, 2011) Devido a compressão e descompressão das ondas, que gera bolhas que colapsam devido ao fenômeno de cavitação, tem-se um meio turbulento que possibilita o aumento das transferências de massa e calor nos processos. Na Tabela 5, pode-se ver o efeito da aplicação do ultrassom em diferentes operações unitárias e o princípio utilizado (BHARGAVA et al., 2021).

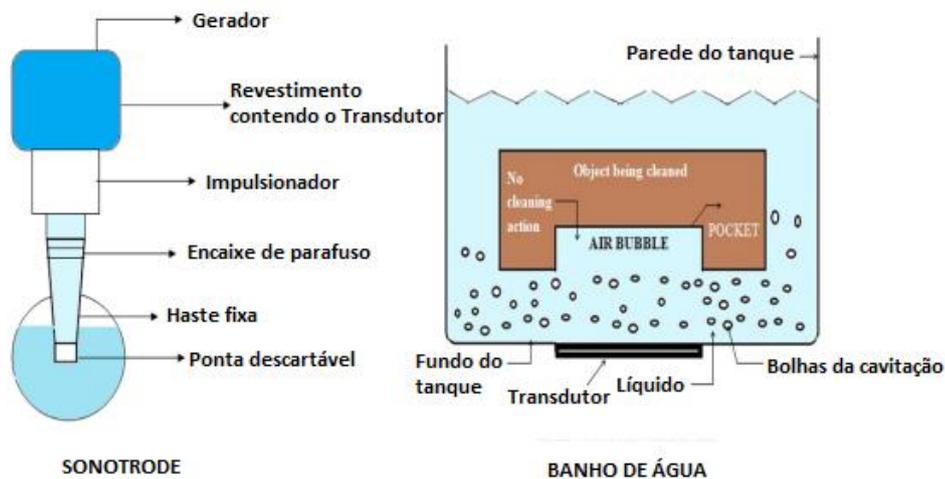
Tabela 5: Diferentes aplicações industriais do Ultrassom

Aplicações	Princípio	Produtos	Vantagens
Filtração	Vibração	Líquidos alimentícios e sucos	Aumento da permeabilidade na membrana Menor tempo de processo
Congelamento	Transferência de calor uniforme	Derivados do leite, frutas e carne	Aumento da qualidade do congelamento por ter uma melhor preservação da microestrutura Menor tempo de processo
Secagem	Transferência de calor uniforme	Alimentos desidratados	Troca de massa intensificada Realça as propriedades organolépticas Menor tempo de processo
Esterilização/ Pasteurização	Transferência de calor uniforme	Leite e Sucos	Redução do tempo de processo Inativação microbiologia eficiente Baixas temperaturas Baixo consumo de energia

Fonte: Adaptado de Bhargava (2021)

Para gerar ondas dentro do espectro do ultrassom são utilizados transdutores, os quais convertem pulsos elétricos em ondas sonoras na intensidade escolhida. Existem duas formas de aplicar o ultrassom: por exposição direta ou usando um instrumento (como as sondas ou banhos de água com ultrassom) e, nos dois casos, são utilizados transdutores que transformam baixa frequência em alta frequência. As sondas de ultrassom têm maior aplicação em processos de cortes, onde o transdutor converte as oscilações elétricas em deslocamento mecânico e um amplificador converte esses deslocamentos em ondas sonoras. Na aplicação com o banho de água, muito utilizado na pasteurização de alimentos, um transdutor piezoelétrico produz ondas sonoras de alta intensidade que criam compressão no meio líquido, criando milhares de cavidades ou bolhas. Essas bolhas colapsam na solução gerando zonas de alta energia e temperatura (BHARGAVA et al., 2021). Na Figura 4, temos a esquematização de um sistema com sonda e um com banho de água.

Figura 4: Esquemas da aplicação utilizando sondas de ultrassom e aplicação utilizando banho de água



Fonte: Adaptado de Bhargava (2021)

2.2.3 Campo Elétrico Pulsado

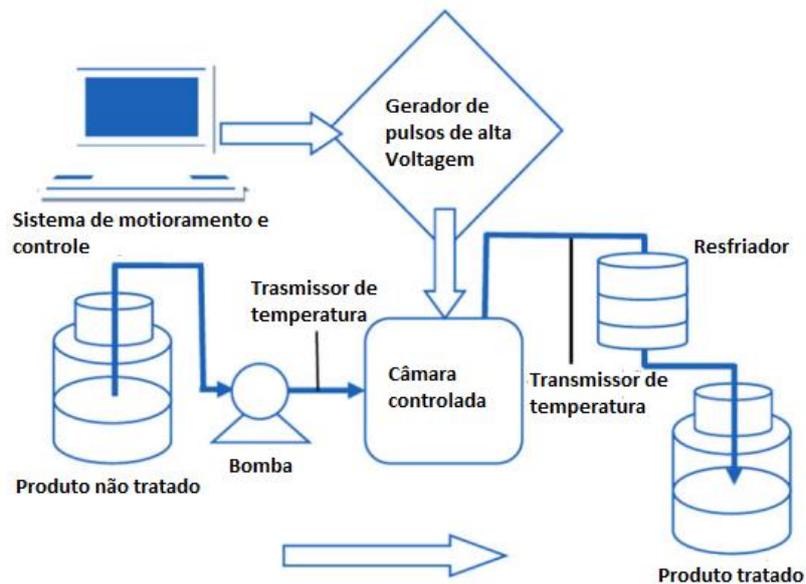
A aplicação do campo elétrico pulsado para conservação de alimentos é amplamente utilizada, porque apresenta um desempenho superior comparado aos processos tradicionais no que diz respeito a preservação da qualidade sensorial e nutricional do alimento (SYED et

al., 2017). O campo elétrico pulsado permite a inativação de microrganismos com mínimas alterações de cor, sabor e textura, por ser um processo que ocorre a temperatura ambiente (MAGED et al., 2012).

O processo consiste na aplicação pulsos curtos (na ordem de micro a milis segundos) de alta tensão, com campos elétricos na ordem de 10-80 kV/cm (SYED et al., 2017). Esses campos passam através do alimento, que é posicionado entre dois eletrodos. O alimento sente a força por unidade de volume, gerando permeabilização nas membranas celulares e, dependendo da intensidade do campo, o rompimento irreversível das mesmas (MAGED et al., 2012). Esse fenômeno é conhecido como eletroporação, onde o campo induz a atração entre as cargas do meio e as cargas internas da membrana celular, gerando a possível inativação da célula (MILANI et al., 2014). Esse processo depende das propriedades do produto e das condições de aplicação. Entre as condições importantes estão: a força do campo elétrico (kV/cm), a frequência dos pulsos, a largura e forma dos pulsos e o tempo de exposição do produto (NOWOSAD et al., 2021).

Para esse processo é necessário um conjunto de equipamentos que consistem em: um gerador de alta voltagem, um sistema de controle e monitoramento e uma câmara de tratamento, na qual o produto é inserido conforme observado na Figura 5. Nessa câmara, há dois eletrodos e o espaço entre eles é denominado como espaço de tratamento. Observa-se também um computador para monitoramento e controle da tensão aplicada e instrumentos de medição para monitoramento da temperatura do produto na entrada e saída da câmara. Para controle da taxa de geração de calor por efeito Joule e garantir que o alimento se mantenha a baixa temperatura, utiliza-se um resfriador após a célula de processo (MAGED et al., 2012).

Figura 5: Fluxograma dos equipamentos utilizados no processo de aplicação Campo Elétrico pulsado



Fonte: Adaptado de Maged (2012)

O campo elétrico pulsado é uma tecnologia emergente com grande potencial pela sua efetividade na inativação de microrganismos, pela sua versatilidade e sistema de processo relativamente simples. Entretanto, ainda há pontos a serem melhor estudados, como a resistência dos esporos ao campo elétrico pulsado (MAGED et al., 2012) e ao mecanismo da ação do dessa tecnologia sobre as células de microrganismos vegetativos, que ainda não é totalmente compreendido (NOWOSAD et al., 2021). Apesar das lacunas, o campo elétrico atualmente está entre as tecnologias emergentes que já começaram a ser utilizadas nos alimentos na indústria (e.g., secagem, congelamento e conservação) (NOWOSAD et al., 2021).

2.2.4 Aquecimento Ôhmico

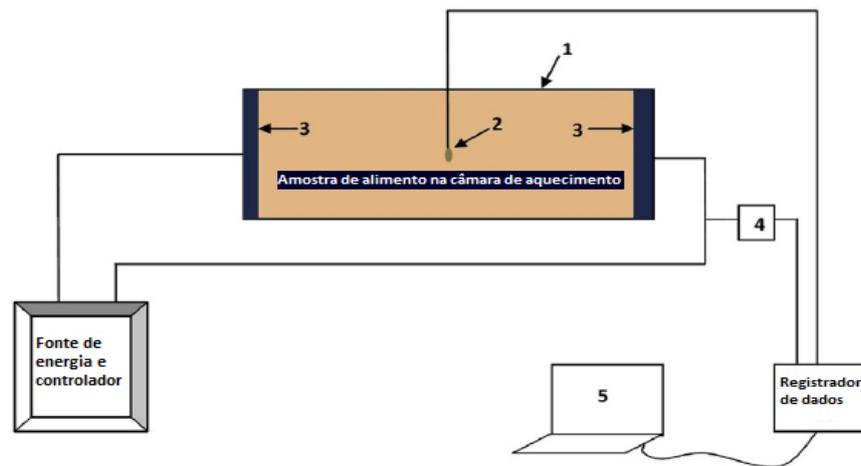
O aquecimento ôhmico (AO), apesar de ser uma tecnologia emergente, já foi utilizado em meados de 1930 para a esterilização de leite, mas passou anos sem aplicações devido ao alto custo elétrico do processo e da falta de estudo de potenciais eletrodos a serem utilizados (KUMAR, 2018). Entretanto, nos dias de hoje, onde a busca pela preservação do sensorial e propriedades nutricionais vem sendo cada vez mais relevante, o aquecimento ôhmico vem sendo amplamente pesquisado (MÜLLER et al., 2020). Junto a isso, o AO surge como um processo mais sustentável, apresentando menor consumo de energia e tempos de processos menores quando comparado aos métodos convencionais (GAVAHIAN et al., 2019).

Tendo em vista o potencial do AO, novas pesquisas demonstraram diversas aplicações na indústria, como processos de concentração de soluções, de extração, dessalinização e de conservação de alimentos. Em todos os casos observou-se uma alta eficiência energética, redução na utilização de químicos, redução de tempos de processo e maior confiabilidade. Entre as aplicações citadas, uma das que vem chamando mais atenção é o uso do aquecimento ôhmico para inativação dos microrganismos, a qual abordaremos neste capítulo.

Diferente dos processos convencionais, nessa tecnologia, o aquecimento não é promovido na superfície, e sim internamente por geração de calor por efeito Joule. Nesse contexto, o alimento atua como uma resistência a passagem de corrente elétrica, sendo aquecido no processo. Com essa geração de calor volumétrica dentro do material tem-se um aquecimento mais uniforme e com uma taxa de elevação da temperatura muito maior do que nos métodos convencionais desde que a condutividade elétrica do produto seja favorável (GAVAHIAN et al., 2019). No AO a transferência de calor ocorre devido ao movimento dos íons presentes no meio quando aplicada a corrente elétrica (MÜLLER et al., 2020). Além disso, por se tratar de um processo de conversão de energia elétrica em energia térmica, tem-se uma alta eficiência energética que pode chegar até 90%. Em adição, o rápido aquecimento e a transferência de calor uniforme acarretam na redução do tempo de processo e redução dos danos às propriedades físico-químicas do alimento (KUMAR, 2018).

A esquematização de um processo de AO é apresentada na Figura 6. Nesse sistema, uma fonte de energia aplica corrente elétrica através de dois eletrodos, que estão localizados nas extremidades de uma câmara de aquecimento. No centro é colocada a amostra de alimento junto com sistema monitoramento de temperatura, registro e controle de parâmetros. (MAKROO et al., 2020). Os eletrodos devem ser de materiais condutores, de baixo custo e resistentes a corrosão (KUMAR, 2018).

Figura 6: Esquematização de um sistema de aquecimento ôhmico. (1) Câmara; (2) Termopar; (3) Eletrodos; (4) Sensor; (5) Computador de dados



Fonte: Adaptado de Makroo (2020)

A composição do alimento e alguns parâmetros de processo, como temperatura, frequência e força do campo elétrico influenciam no desempenho do AO (MAKROO et al., 2020). Dentro da composição do alimento, o pH, a gordura, a quantidade de sais e de sólidos dissolvidos são importantes. De modo geral, pH ácidos (2,5) são mais eficientes em processo de inativação em comparação com pH mais altos. A explicação baseia-se na criação de um ambiente pouco favorável para reprodução microbiana, a relação real entre a AO e o pH ainda necessita aprofundamentos (MÜLLER et al., 2020).

Dentre os parâmetros de processo, tanto a frequência quanto o campo elétrico geram impacto nas células microbianas, acarretando na variação do valor D. Estudos observaram a diminuição do tempo de processo com o aumento da frequência (60 para 500 Hz), mas em faixas mais altas que isso pouca variação foi notada. Ainda existem controversas na influência da frequência dependendo do microrganismo em foco e faixas de trabalho (MÜLLER et al., 2020).

Essa redução no valor D com o aumento do campo elétrico se deve ao mecanismo não-térmico de inativação, que se dá através do rompimento da membrana devido da força de atração elétrica entre os íons internos do MO e as cargas do campo elétrico aplicado. Esse é o fenômeno da eletroporação, já explicado na seção de PEF (MAKROO et al., 2020). Baysal e Icier (2010), mostram a variação do tempo de processo comparando a variação do campo elétrico e diferentes perfis de temperaturas. Observou-se que em temperaturas mais altas (90 °C) apenas campos de 50 V/cm surtiam impactos maiores, pois a partir de temperaturas mais

altas o efeito térmico se sobrepõe ao efeito não térmico, ou seja, o impacto da variação do campo elétrico para redução de tempo de processo é significativo em temperaturas mais baixa (MÜLLER et al., 2020).

A taxa de geração de calor no AO pode ser calculada pela (Equação 1), onde o Q é a taxa volumétrica de geração de calor (W/m^3), σ é a condutividade elétrica (S/m) e ∇E é o vetor gradiente de campo elétrico (V/m). Logo, quanto maior a intensidade do campo elétrico, maior a geração de calor e menor o tempo de processo (MÜLLER et al., 2020).

Equação 1: Equação matemática da geração de calor por energia elétrica

$$Q = \delta \cdot \nabla E^2$$

Sendo assim, é visto que o AO é um processo com alta capacidade e eficiência. Seu desempenho tem correlação direta com o campo elétrico, mas a influência disso na redução microbiana e redução no tempo de processo também depende da temperatura de processo aplicada.

3 TECNOLOGIAS EMERGENTES APLICADAS AO PROCESSAMENTO DA CERVEJA

Como visto no capítulo anterior, todas as tecnologias emergentes citadas possuem aplicação em processos de pasteurização. Neste capítulo serão abordados métodos e resultados de estudos de cada uma das tecnologias emergentes com relação a pasteurização da cerveja.

3.1 Alta Pressão

A *Saccharomyces cerevisiae* é um fermento usado na brassagem e normalmente o microrganismo mais abundante detectado na fermentação e antes da pasteurização. Por isso, para comprovar a efetividade da pasteurização da cerveja, utiliza-se esse microrganismo indicador. Estudos realizados por Milani (2016b), tem um foco ainda mais específico nos ascósporos desse MO (uma vez que eles tem a resistência maior, garantindo

a inativação dos mesmos, garantimos a inativação do MO) em cervejas de diferentes graus alcóolicos (MILANI et al., 2016b).

Baseado em estudos para a inativação de ascósporos da *S. cerevisiae* em suco de laranja e maçã foram utilizadas pressões de 300 e 600 MPa, este trabalho utilizou faixas de 300 e 400 MPa. Além disso, o processo de inativação foi estudado comparando modelos cinéticos de primeira ordem e o modelo de Weibull (Equação 2). No estudo de MILANI et al. (2016b), o modelo de Weibull apresentou a melhor descrição dos dados experimentais, quando comparado com modelos lineares de primeira ordem, bifásicos e conversão fracionada.

Equação 2: Equação matemática do Modelo cinético de Weibull

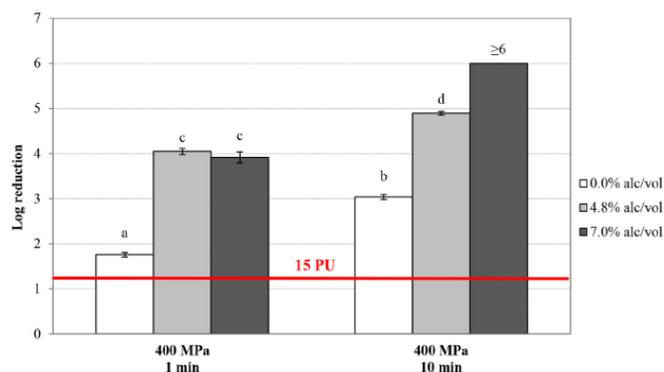
$$\log \frac{N}{N_0} = -bt^n$$

Onde, N é a concentração de ascósporos sobreviventes (CFU/mL) depois de tempo de processamento t (min), N_0 é a concentração inicial de ascósporos, b e n são parâmetros de taxa e forma respectivamente.

O estudo de Milani (2016b) utilizou diferentes pressões combinadas com outras características da cerveja como a carbonatação e o nível alcóolico. Além disso, foi realizada uma análise sensorial da cerveja na inativação dos ascósporos. Nos ensaios para avaliação da influência da carbonatação foram realizados dois experimentos (com cerveja carbonatada e outra descarbonatada) utilizando o mesmo método de inoculação. Ambas foram processadas a 200MPa por 10 minutos e apresentaram reduções de 2,3 log e 2,1 log respectivamente, demonstrando uma pequena variação com a presença da carbonatação no meio (MILANI et al., 2016b).

Como pode-se ver na Figura 7, nos experimentos da influência de grau alcóolico foram testados a 400MPa em diferentes concentrações e tempos de processos. No tempo de 1 minuto, um impacto não significativo foi observado quando o grau alcóolico variou entre 4,8 a 7%. Na aplicação de alta pressão por 10 minutos houve um aumento da redução logarítmica no grau alcóolico superior (MILANI et al., 2016b).

Figura 7: Comparação da influência do grau alcóolico na inativação através da AP.



Fonte: Adaptado de Milani (2016)

Com posse dos dados experimentais, foram feitas regressões do modelo de Weibull para as duas pressões estudadas (200 a 400 MPa), que demonstraram o aumento do parâmetro b com o aumento do grau alcóolico, quando este variou entre 0% a 4,8%; entretanto, não foi observado um aumento significativo quando houve uma variação de grau alcóolico de 4,8% para 7% alc/vol em um minuto.

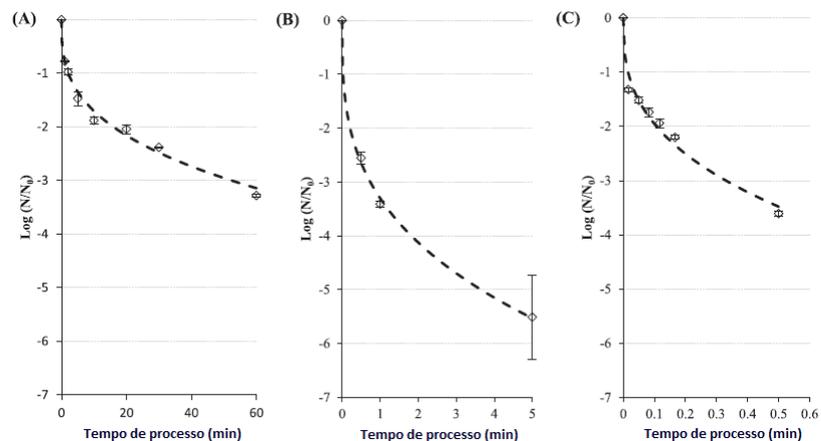
Em relação aos testes sensoriais realizados, não foram percebidas diferenças no sabor da cerveja até mesmo na aplicação de 600 MPa em 30s, que resulta em um grau de pasteurização superior ao mínimo requerido (nessa aplicação, obteve-se a redução de log 7 de ascósporos). Para obter a pasteurização de 15 PU (mínima requerida) é necessária a aplicação de 400 MPa por 7,2 segundos. Desse modo, a alta pressão é uma tecnologia emergente possível de ser aplicada para pasteurização da cerveja tanto em termos de eficiência na inativação como na retenção de atributos sensoriais.

Um segundo estudo por Milani (2016a) objetivou comparar a energia necessária e a efetividade da inativação do processo de AP e convencional. Para isso, foram estudados modelos para melhor descrição, e assim como no estudo anterior de Milani, também foi utilizada o modelo de Weibull (Equação 2).

As pressões aplicadas foram com 200, 300 e 400 MPa, sendo que os tempos de processo obtidos (para redução de 2,5 log) foram 30 minutos, 27 s e 12 s, respectivamente. Como

pode-se observar na Figura 8, na qual temos três gráficos da redução logarítmica ao longo do tempo, as curvas apresentadas são não lineares, o que sugere uma parcela populacional de ascósporos sobreviventes e que o fator n do modelo de Weibull assume valores menores que 1. Em adição, a Figura 8, mostra também a influência do aumento de pressão no tempo de inativação.

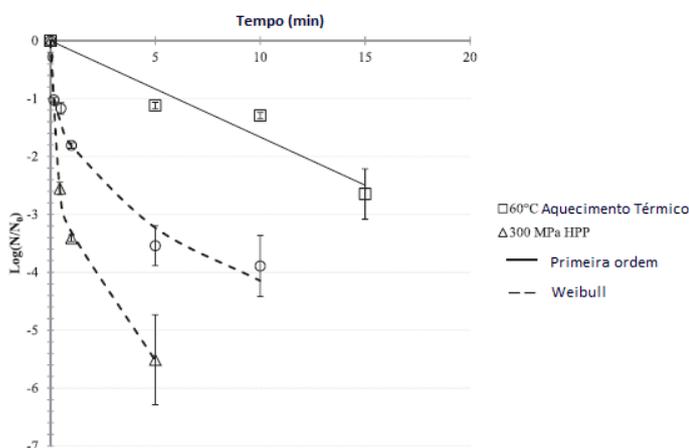
Figura 8: Gráficos da redução logarítmica pelo tempo de processo em diferentes pressões (A) 200 MPa, (B) 300 MPa, (C) 400 MPa.



Fonte: Adaptado de Milani (2016a)

Para a comparação de AP e aquecimento convencional curvas de aquecimento convencional 15 minutos a 60 °C e alta pressão 5 minutos a 300 MPa foram utilizadas (MILANI et al., 2016a). No gráfico da Figura 9, podemos ver a diferença entre os processos, onde um modelo log linear pode descrever com exatidão o aquecimento convencional e o modelo de Weibull ao processamento por AP. Observa-se que o processamento por altas pressões resultou em uma inativação de 2,5 logs muito mais rápida. Em adição, o consumo energético do aquecimento convencional foi de 188,8 kJ/L em comparação com 77kJ/L em AP (MILANI et al., 2016a).

Figura 9: Comparação entre as curvas de inativação utilizando aquecimento convencional e alta pressão



Fonte: Adaptado de Milani (2016)

Com esses dois estudos, pode-se ver a efetividade da AP na inativação da *S. cerevisiae*, que mostra ser uma tecnologia alternativa ao método convencional, com menores tempos de processo e gastos energéticos. Além disso, os estudos apresentaram correlações importantes, como a proporcionalidade entre aumento do grau alcóolico e a redução na contagem de microrganismos após um determinado tempo e a diminuição do tempo de processo com o aumento da pressão.

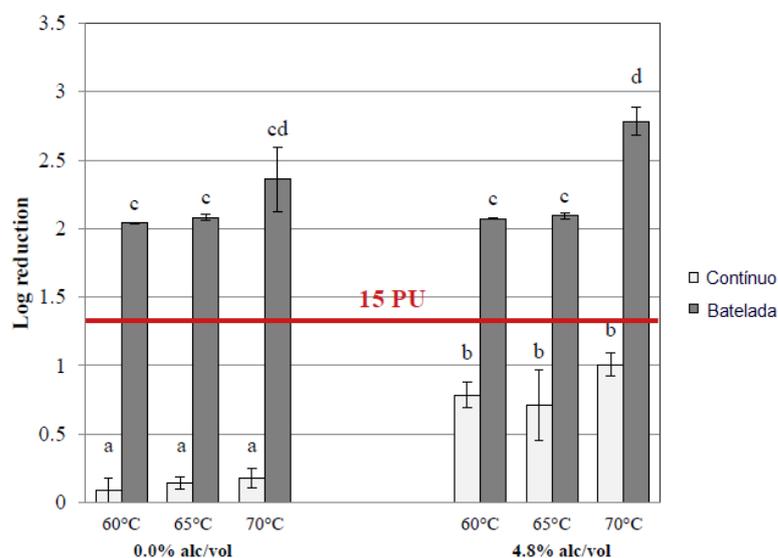
3.2 Ultrassom

O estudo de MILANI et al. (2016c) aplicou a tecnologia de ultrassom ao processo de pasteurização da cerveja. Os pesquisadores aplicaram o método de termossonicação (TS) (que é a combinação entre o aquecimento convencional e o ultrassom) com o objetivo de estudar sua efetividade na inativação de ascósporos de *S. cerevisiae* em cervejas de diferentes graus alcóolicos.

No teste feito com aplicação de ultrassom em banho de água, a temperatura ambiente (23 °C e 16,2 W/mL), as amostras de cerveja de 0% e 7% alc/vol atingiram o nível mínimo de inativação (15 PU) após 30 minutos. Apesar disso, a amostra com grau alcóolico de 4,8% não atingiu a inativação mínima necessária, sugerindo que outros componentes nesses parâmetros trazem uma proteção para o microrganismo.

Na parte do estudo com o método de termossonicação, foram testadas duas células diferentes, uma com funcionamento em batelada e outra com funcionamento contínuo. Na Figura 10, é apresentado o gráfico da redução logarítmica dos ascósporos da *S. cerevisiae* em processamento batelada e contínuo por 30 segundos, com amostras de 0% e 4,8% alc/vol. A inativação no processo em batelada foi superior ao contínuo, tendo obtido a redução logarítmica de 2,3 e 2,7 para cervejas de 0% e 4,8% alc/vol, respectivamente. Desse modo, a termossonicação foi capaz de obter redução mínima requerida para a pasteurização (15 PU ou 2,5 logs) (MILANI et al., 2016c).

Figura 10: Comparação da redução logarítmica entre processo de termossonificação de modo contínuo e batelada em diferentes amostras



Fonte: Adaptado de Milani (2016)

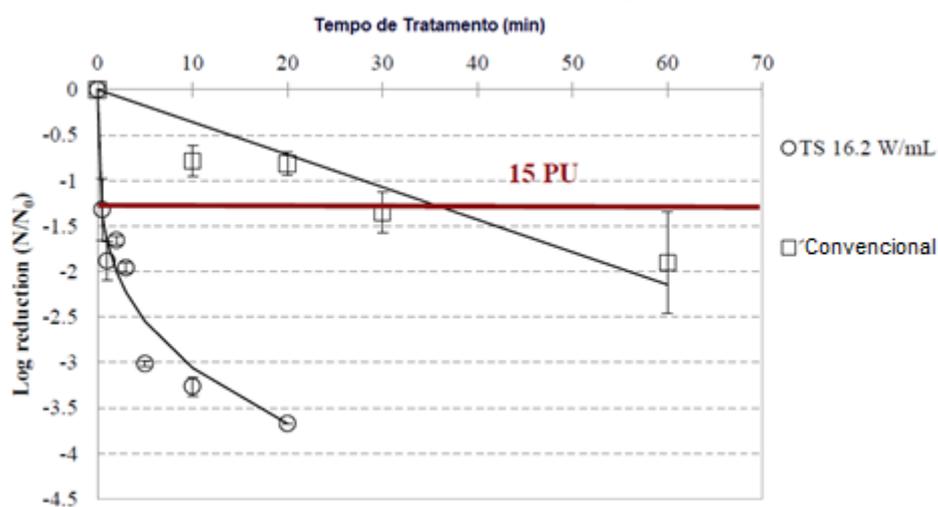
Por outro lado, no processo contínuo, as reduções de contagem microbiana foram inferiores (em torno de 0,2 e 0,8 para as amostras de 0% e 4,8% alc/vol, respectivamente). Sendo assim, não é atingida a unidade de pasteurização mínima em nenhuma das amostras. O fato de o valor da energia específica ser 10,8 W/mL no processo contínuo em comparação com 16,2 W/mL no processo em batelada, pode ser uma das explicações da diferença nos resultados de inativação da *S. cerevisiae*. Outro ponto é a turbulência causada pelo fluxo contínuo, que pode não ter sido benéfica para a inativação.

O aumento da temperatura de 60 para 70 °C na TS não teve efeito significativo no modo contínuo (no tempo avaliado de 30 s), enquanto que o aumento de 60 para 65 °C no modo batelada também não afetou a inativação. Contudo, o aumento de 65 para 70 °C influenciou

na inativação, apenas na amostra de cerveja de 4,8 alc/vol e a magnitude do aumento da redução foi de quase 1 log.

Em comparação com a o aquecimento convencional a TS diminui consideravelmente o tempo de processo. Após 10 minutos de TS foi registrado uma redução de 3,2 logs e o com o mesmo tempo no processo convencional uma redução de apenas 0,6 logs foi observada (ambos na temperatura de 55°C). Em relação à modelagem, o modelo mais apropriado para descrição e estudo do processo na TS é o modelo de Weibull (Equação 2) uma vez que os dados não apresentam comportamento log-linear, conforme apresentado na Figura 11 (MILANI et al., 2016).

Figura 11: Redução logarítmica vs. tempo de tratamento por aquecimento convencional e por termostatização a 55°C. Os pontos representam os dados experimentais e as curvas as tendências de inativação de cada método



Fonte: Adaptado de Milani (2016)

Deng (2018) estudou a influência da aplicação de TS nas propriedades físico-químicas e sensoriais da cerveja. Para isso, foi analisada a performance da TS em temperaturas de 40, 50 e 60 °C com uma aplicação de 2,7 W/mL durante 2 minutos. O processo foi em batelada e com temperatura controlada por um banho de água. A inativação mínima necessária não foi atingida no experimento com temperatura de aquecimento de 40 °C, mas sim com as temperaturas de 50 e 60 °C (DENG et al., 2018). Além disso, foram analisados diversos parâmetros sensoriais da cerveja após o processo de inativação. A TS a 50 °C mostrou-se mais

favorável para a qualidade da cerveja, com mais estabilidade a oxidação e uma qualidade sensorial similar a da cerveja fresca (DENG et al., 2018).

A termossonicação se mostrou uma técnica em potencial para a pasteurização da cerveja, sendo eficaz na forma batelada e em temperaturas acima de 40°C. Entretanto, é um método o aquecimento convencional deve ser aplicado conjuntamente, e existem ainda poucos dados para comprovar uma diferença significativa nos aspectos sensoriais da cerveja quando em comparação ao processo convencional.

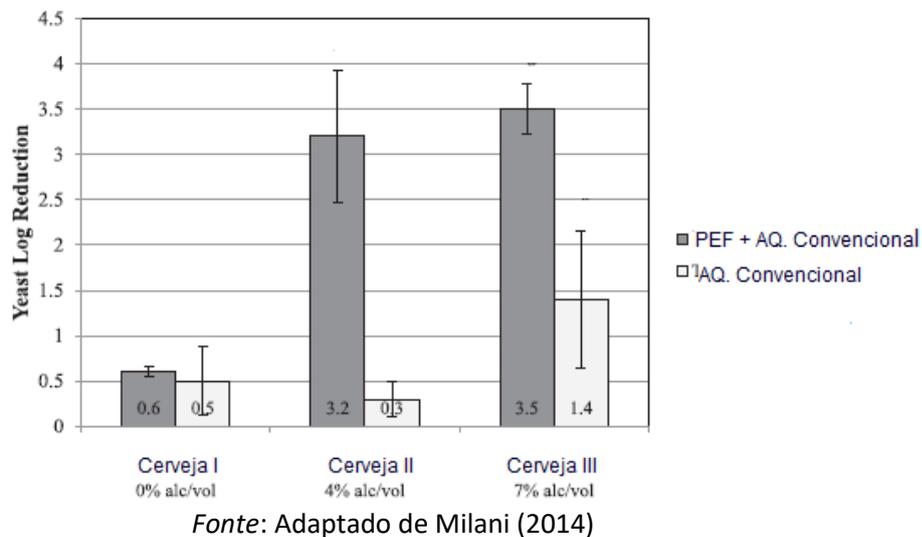
3.3 Campo Elétrico Pulsado

Em um estudo conduzido por Milani (2014) avaliando a *Saccharomyces cerevisiae*, foi avaliado o desempenho do campo elétrico pulsado (PEF) na pasteurização de 9 tipos de cervejas (uma delas com grau alcoólico 0%, outra de 7% e as demais em uma faixa média de 5,2% alc/vol) (MILANI et al., 2014). Em um primeiro experimento, as amostras foram processadas com um PEF a 45 kV/cm, com 46,3 pulsos de 70 ms. Nesse experimento, houve redução logarítmica de 2,2 na cerveja de 7% alc/vol, 0,7 nas de 5,2% alc/vol e de 0,2 nas de 0% alc/vol, indicando uma tendência de uma maior inativação com o aumento o grau alcoólico.

Experimentos adicionais combinando PEF com o aquecimento convencional foram realizados nos três casos (0, 5,2 e 7% alc/vol); os resultados são apresentados na Figura 12. A figura apresenta a redução logarítmica para três cervejas, nos dois processos. No caso do 0% alc/vol não houve diferença significativa quando foi aplicado o PEF em relação ao aquecimento convencional. Já nos casos de 5,2 e 7 % alc/vol temos uma redução microbiana com o uso de PEF de 2,1 e 1,8 log respectivamente. A presença do álcool sensibiliza os ascósporos em relação a sua resistência ao calor, com isso, facilitando a inativação (SPLITTSTOESSER et al., 1986).

Outro fator que importante é o tempo de processo para atingir 15 PU, com um tempo de 1200 ms no PEF, em contraste, de 20 minutos no aquecimento convencional (MILANI et al., 2014).

Figura 12: Redução logarítmica com PEF vs. Aquecimento convencional (60°C)



Na análise do sensorial da cerveja não foram encontradas diferenças significativas entre as cervejas tratadas com o método convencional e PEF. Pode-se ressaltar que nesse estudo as amostras, foram descarbonatadas, o que traz uma adição no custo e no tempo total de processo da cerveja (MILANI et al., 2014).

O estudo de Ribeiro et al. (2011) avalia a efetividade da inativação com PEF em diferentes temperaturas e níveis de carbonatação. Nos experimentos é trazida uma abordagem diferente, o resfriamento prévio do líquido antes do PEF. Foram obtidas reduções logarítmicas de 3,2 log com pré-resfriamento a 4 °C (35kV/cm), 3,6 log com pré-resfriamento de 4 °C (40kV/cm) e 13,7 log com pré-resfriamento a 12 °C (35kV/cm). Com isso, surge a tendência de quanto mais intensa a força do campo maior a inativação, e ao se utilizar a mesma força de campo, a temperatura também assume impacto no aumento da redução logarítmica (RIBEIRO et al., 2011).

Além disso, diferente do estudo de Milani et al. (2014), Ribeiro et al (2011) compararam o PEF em amostras carbonatadas e descarbonatadas e demonstraram que as amostras carbonatadas, nos três casos mencionados acima, apresentam uma maior redução da carga

microbiana em relação as amostras nas mesmas condições não carbonatadas (RIBEIRO et al., 2011).

A tecnologia de PEF se mostra como uma alternativa em potencial na pasteurização da cerveja, com experimentos já mostrando eficiência e distintas vantagens, mas com aplicação em certa faixa de trabalho, levando em consideração temperaturas de processo e grau alcólico da cerveja.

3.4 Aquecimento Ôhmico

Quando se busca na literatura o aquecimento ôhmico aplicado à *Saccharomyces cerevisiae* ou à pasteurização da cerveja, não foi encontrado nenhum estudo com esse enfoque ou que aponte experimentos relacionados. Apesar disso existem muitos artigos e pesquisas sobre a influência do AO em muitas enzimas e microrganismos. Alguns trabalhos com o enfoque do impacto do AO em processos de pasteurização e seus parâmetros de interesse, como a influência do pH no aumento da inativação, já foram realizados. Entretanto, como já mencionado, não foram encontrados estudos referentes ao foco dessa sessão (MAKROO et al., 2020).

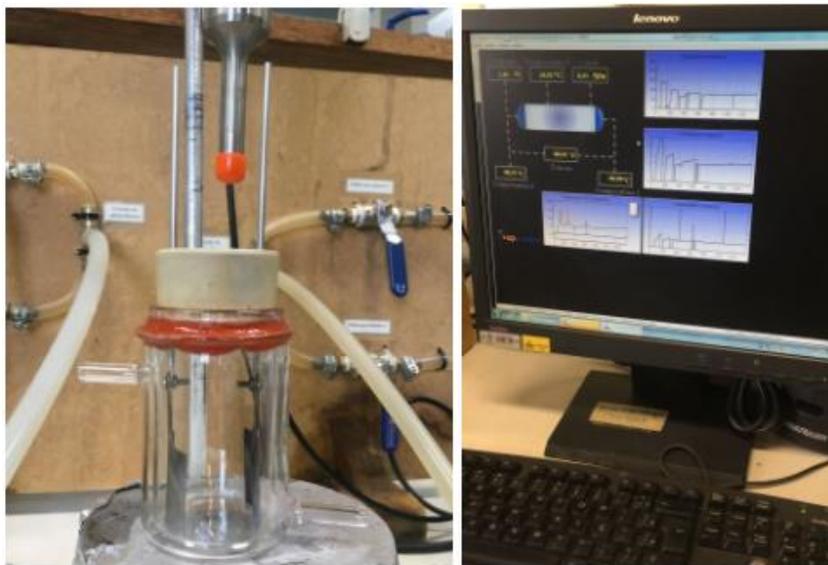
Sendo assim, existe um grande potencial de pesquisas futuras, principalmente em razão do que foi observado nos estudos usando a tecnologia de PEF, pois os mesmos fenômenos de eletroporação podem ocorrer durante o aquecimento ôhmico.

4 EXPERIMENTOS INICIAIS COM AQUECIMENTO ÔHMICO

Inicialmente, o trabalho a ser desenvolvido seria a aplicação de aquecimento ôhmico e convencional na cerveja, para inativação de *Saccharomyces cerevisiae*. O estudo teria como objetivo testar a hipótese de maior eficiência do aquecimento ôhmico sobre o convencional. Em decorrência da Covid-19, os laboratórios foram fechados e foi necessária a alteração do trabalho a ser desenvolvido. Antes do trabalho ser redirecionado foram possíveis alguns testes de curvas de aquecimento com cerveja Pilsen, variando a diferença de potencial aplicada. A temperatura testada foi 60 °C, baseado nas temperaturas de processo aplicadas pela indústria em dados encontrados na literatura (REVERON, 2003).

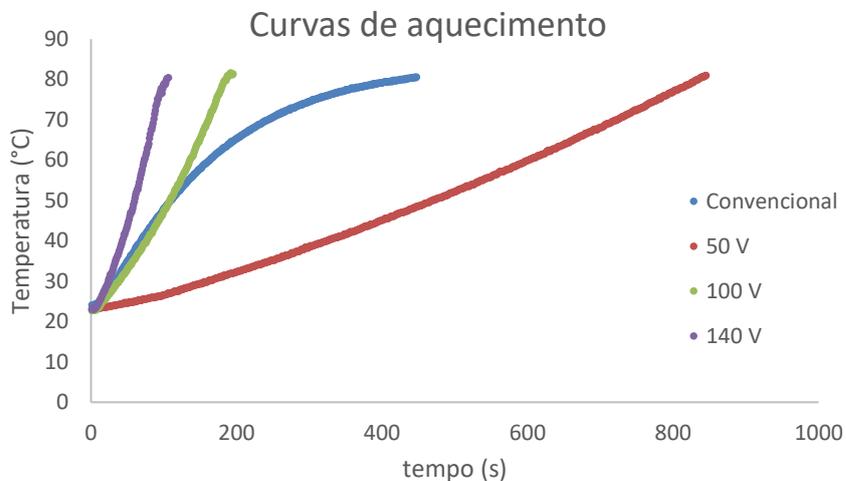
A célula utilizada para o trabalho consistiu em uma câmara com sistema para camisa térmica, dois eletrodos, um termopar, uma fonte de geração de energia e um computador com o software para controle. A célula e a interface do software para controle de dados são apresentados na Figura 13.

Figura 13: Aparelhos utilizados no experimento para aquecimento ôhmico de cerveja pilsen



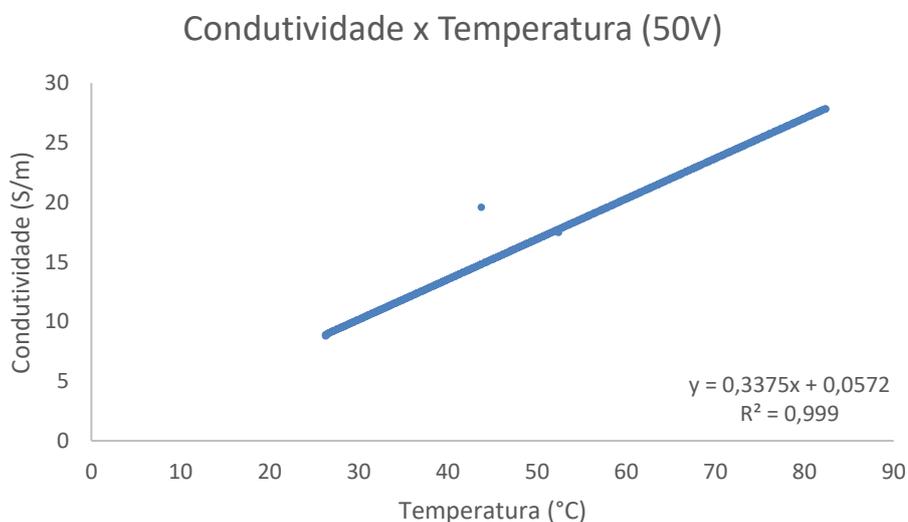
Os experimentos foram realizados em triplicatas, foram feitos aquecimentos com aplicação de 50, 100 e 140 V para analisar qual a melhor tensão a ser aplicada em termos de tempo e estabilidade do produto. Quando o aquecimento é realizado de forma muito rápida (em altas tensões) pode haver a formação de espuma, o que dificulta a análise do processo. O gráfico na Figura 14 mostra a comparação entre as curvas de aquecimento de cada caso. A curva de aquecimento com aplicação de 50V não mostra vantagem comparada com o tempo de aquecimento convencional. Por sua vez, as curvas de 100 e 140 V demonstram uma redução no tempo de aquecimento. A temperatura de 80 °C foi atingida após 13,3 min para o aquecimento convencional e 12,8, 2,8 e 1,4 min para o aquecimento ôhmico com 50,100 e 140 V, respectivamente. Esses resultados sugerem uma redução de 10,6% no tempo se compararmos o aquecimento ôhmico a 140 V com o processo convencional.

Figura 14: Gráfico de comparação entre curvas de aquecimento de 23°C a 80°C com aquecimento convencional e aplicação de 50V, 100V e 140V.



Uma segunda avaliação foi feita para analisar o comportamento da condutividade elétrica com o aumento da temperatura, pois ambas são importantes parâmetros de processo no aquecimento ôhmico. Para esse estudo, foi usada a tensão de 50 V e os experimentos foram realizados em triplicata entre 26 °C e 80°C. A tensão aplicada e a corrente foram monitoradas pelo software e a condutividade foi calculada com base na Equação 3, considerando uma distância entre os eletrodos de 5 cm e uma área de eletrodo de 16 cm². Os resultados podem ser observados na Figura 15. A relação da condutividade com a temperatura é descrita em uma função linear como podemos observar pelo valor de R² obtido.

Figura 15: Condutividade elétrica em função da temperatura com aplicação de 50 V de tensão



Os resultados sugerem que o aquecimento ôhmico seria uma tecnologia em potencial para a inativação da *S. cerevisiae* na cerveja Pilsen. Tendo uma vantagem no tempo de aplicação para atingir a faixa temperatura de pasteurização e uma condutividade adequada para realização do processo. Além disso, o fenômeno de eletroporação, caso seja observado para o microrganismo em estudo, pode reduzir ainda mais o tempo de processo.

5 CONCLUSÃO

A revisão da literatura mostra que algumas tecnologias emergentes tem potencial para aplicação na pasteurização da cerveja. As aplicações de alta pressão e campo elétrico pulsado se mostram eficientes na inativação de ascósporos da *S. cerevisiae*. Já no ultrassom com assistência térmica obteve-se efetividade na inativação mas, até o momento, não foram encontrados resultados que fossem vantajosos em termos de aplicação. Por último, no aquecimento ôhmico, ainda não foram encontrados estudo que abordam a tecnologia focada na pasteurização da cerveja ou na inativação de ascósporos da *S. cerevisiae*.

Quando comparado os métodos que se mostraram eficazes em relação ao aquecimento convencional, são notórias as vantagens de processo. Uma delas é a redução no tempo de pasteurização, devido a uma inativação mais rápida da *S. cerevisiae* quando aplicados os processos de alta pressão e campo elétrico pulsado. Esse comportamento pode levar, o produto a um menor tempo de exposição e, por consequência, a menores danos aos compostos químicos. Apesar da redução do tempo, e por consequência, a degradação da cerveja, sensorialmente não foram constatadas diferenças significativas entre os métodos.

O estudo do desempenho do processo de acordo com a variação da composição do produto, como variação do grau alcóolico e a carbonatação, mostrou mudanças significativas. Com o aumento do grau alcóolico, sensibilidade da célula ao calor aumentava, e por consequência uma inativação mais rápida. Já na carbonatação foram vistos uma influência não tão significativa nos processos.

REFERÊNCIAS

AWAD, T.S. ***Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review***, Food Research International, 2012 [2]

BHARGAVA, N. ***Advances in application of ultrassound in food processing: A review***. Ultrasonics Sonochemistry, 2021 [4]

CHEMAT, F., ***Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction***. Ultrasonics Sonochemistry, 2011 [3]

DENG, Y., ***Influence of ultrasound assisted thermal processing on the physicochemical and sensorial properties of beer***. Ultrasonics – Sonochemistry, 2018. [19]

GAVAHIAN, M. ***Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recente findings, benefits, and limitations***. Trends in Food Science & Technology, 2019. [12]

MAGED E.A., M. ***Pulsed Eletric Fields for Food Processing Technology (Chapter 11)***. Mohamed and Eissa, 2012 [8]

MAKROO, H.A., ***Ohmic heating assisted inactivation of enzymes and microorganisms in foods: A review***. Trends in Food Science & Technology, 2020. [13]

MILANI, E. A., ***High Pressure processing and thermosonication of beer: Comparing the energy requirements and *Saccharomyces cerevisiae* ascospores inactivation with termal processing and modeling***. Journal of Food Engineering, 2016b. [16]

MILANI, E. A., ***Nonthermal pasteurization of beer by high pressure processing: modelling the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* ascospores in different alcohol beers***. High Pressure Research Journal, 2016a. [17]

MILANI, E. A., ***Ultrasound assisted thermal pasteurization of beers with different alcohol levels: Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* ascospores***. Journal of Food Engineering, 2016c. [18]

MILANI, E. A., ***Pulsed Electric Field continuous pasteurization of different types of beers***. Food Control, 2014. [20]

MÜLLER, W., ***Microbial inactivation by ohmic heating: Literature review and influence of diferent process variables***. Trends in Food Science & Technology, 2020. [11]

NATARAJAN, S. ***A review on the applications of ultrasound in food processing***. Materials Today: Proceedings, 2011 [6]

NOWOSAD, K. ***The application of PEF technology in food processing and human nutrition.*** J Food Sci Technol, 2021 [7]

KUMAR, T., **A Review on Ohmic Heating Technology: Principle, Applications and Scope.** International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology, 2018. [10]

REVERON, I.M., **Thermal Resistance os *Saccharomyces cerevisiae* in Pilsen Beer.** Journal of the Institute of Brewing, 2003. [15]

RIBEIRO. M. W., **Processing temperature, alcohol and carbonation levels and their impact on pulsed electric fields (PEF) mitigation of selected characteristic microorganisms in beer.** Food Research International, 2010. [21]

SILVA, E. ***Ultrasound assisted termal inactivation of spores in foods: Pathogenic and spoilage bactéria, molds and yeasts.*** Trends in Food Science & Technology, 2020 [5]

SPLITTSTOESSER D.F., **Effect of Food Composition on the Heat Resistance of Yeast Ascospores.** Journal of Food Science, 1986. [22]

SYED, Q. ***Pulsed Eletric Field Technology in Food Preservation: A review.*** Journal of Nutritional Health & Food Engineering, 2017 [9]

WRAY, E. ***Reducing microbial spoilage of beer using pasteurisation.*** *Brewing Microbiology*, Woodhead Publishing Editora Ltda, 2015. [1]