



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



INSTITUTO DE INGENIERÍA DE
ALIMENTOS PARA EL DESARROLLO

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS DE INACTIVACIÓN MICROBIANA Y ENZIMÁTICA EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO MEDIANTE APLICACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER UNIVERSITARIO EN GESTION DE LA
SEGURIDAD Y CALIDAD ALIMENTARIA

ALUMNO/A: JOSÉ PRÓSPER ORTEGA

TUTOR/A ACADEMICO: JUAN ANDRÉS CÁRCEL CARRIÓN

Curso Académico:2019/2020

VALENCIA, 24 de Noviembre de 2020

INTENSIFICACIÓN DE PROCESOS DE INACTIVACIÓN MICROBIANA Y ENZIMÁTICA EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO MEDIANTE APLICACIÓN DE CAMPOS ELÉCTRICOS MODERADOS

J. Prosper, J. A. Cárcel

RESUMEN

Los métodos convencionales de inactivación microbiana y enzimática en alimentos se basan principalmente en tratamientos térmicos. Estos métodos son eficaces y garantizan la seguridad microbiológica de los productos. Sin embargo, las temperaturas elevadas que se aplican pueden afectar a la calidad general del producto final generando pérdida de compuestos nutricionales, cambios en el color por la aparición de reacciones de Maillard o pérdidas de sabor. Además, suponen un gasto energético y económico importante para las empresas. Por ello, hay un gran interés en el desarrollo de técnicas alternativas que salven estos inconvenientes. Entre ellas destaca la aplicación de campos eléctricos moderados (calentamiento óhmico). El presente trabajo bibliográfico es un breve resumen de en qué consiste la técnica y los últimos avances publicados sobre la misma. Así, se incluye una introducción a la aplicación de campos eléctricos moderados y los equipos que se utilizan, y se analizan los efectos generales que provocan sobre los alimentos. Los resultados de diferentes estudios demuestran que el calentamiento óhmico puede ser un método eficaz para la inactivación de microorganismos y la inactivación de reacciones enzimáticas con un menor impacto en la calidad de los productos que los procesos térmicos convencionales. Además, la eficacia en el uso de la energía puede reducir los costes relacionados con la misma. Como principales inconvenientes de estas técnicas cabe destacar, el difícil control del proceso por la dependencia de la conductividad de los alimentos de las variables de proceso, como la temperatura, y la falta de una comprensión efectiva de algunos de sus efectos. Estos aspectos muestran la necesidad de profundizar en la investigación.

PALABRAS CLAVE: Calentamiento óhmico, microorganismo, esterilización, pasteurización, calidad.

ABSTRACT

Conventional microbial and enzymatic inactivation methods in food are mainly based on heat treatments. These methods are effective and guarantee the microbiological safety of the products. However, the high temperatures that are applied can affect the general quality of the final product, generating loss of nutritional compounds, changes in color due to the appearance of Maillard

reactions or loss of flavor. Furthermore, they represent a significant energy and economic cost for companies. Therefore, there is great interest in the development of alternative techniques that overcome these drawbacks. Among them, the application of moderate electric fields (ohmic heating) stands out. The present bibliographic work is a brief summary of what the technique consists of and the latest advances published on it. Thus, the work includes an introductory description of the application of moderate electric fields and the equipment, and an analysis of the general effects that can be caused on food. The results of different studies show that ohmic heating can be an effective method for the inactivation of microorganisms and the inactivation of enzymatic reactions with a lower impact on the quality of the products than conventional thermal processes. In addition, energy efficiency can reduce the energy-related costs. The main drawbacks of these techniques include the difficulty of the process control due to the dependence of the conductivity of the food on process variables, such as temperature, and the lack of an effective understanding of some of its effects. These aspects show the need to deepen the investigation.

KEY WORDS: Ohmic heating, microorganism, sterilization, pasteurization, quality.

RESUM

Els mètodes convencionals d'inactivació microbiana i enzimàtica en aliments es basen principalment en tractaments tèrmics. Aquests mètodes són eficaços i garanteixen la seguretat microbiològica dels productes. No obstant això, les temperatures elevades que s'apliquen poden afectar la qualitat general del producte final generant pèrdua de compostos nutricionals, canvis en el color per l'aparició de reaccions de *Maillard o perdudes de sabor. A més, suposen una despesa energètica i econòmica important per a les empreses. Per això, hi ha un gran interès en el desenvolupament de tècniques alternatives que salven aquests inconvenients. Entre elles destaca l'aplicació de camps elèctrics moderats (calfament òhmico). El present treball bibliogràfic és un breu resum d'en què consisteix la tècnica i els últims avanços publicats sobre aquesta. Així, s'inclou una introducció a l'aplicació de camps elèctrics moderats i els equips que s'utilitzen, i s'analitzen els efectes generals que provoquen sobre els aliments. Els resultats de diferents estudis demostren que el calfament òhmico pot ser un mètode eficaç per a la inactivació de microorganismes i la inactivació de reaccions enzimàtiques amb un menor impacte en la qualitat dels productes que els processos tèrmics convencionals. A més, l'eficàcia en l'ús de l'energia pot reduir els costos relacionats amb aquesta. Com a principals inconvenients d'aquestes tècniques cal destacar, el difícil control del procés per la dependència de la conductivitat dels aliments de les variables de procés, com la temperatura, i la

falta d'una comprensió efectiva d'alguns dels seus efectes. Aquests aspectes mostren la necessitat d'aprofundir en la investigació .

PARAULES CLAU: Calfament óhmic, microorganisme, esterilització, pasteurització, calitat.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	2
3. CALENTAMIENTO OHMICO.....	2
3.1. Antecedentes	2
3.2. Ventajas e inconvenientes del calentamiento óhmico	4
4. EQUIPOS	5
5. PARAMETROS IMPORTANTES EN EL CALENTAMIENTO ÓHMICO.	9
5.1. Conductividad eléctrica.	9
5.2. Tamaño de partícula.	10
5.3. Concentración de partículas.....	10
5.4. Concentración iónica.....	11
5.5. Fuerza de campo eléctrico.	11
5.6. Frecuencia corriente eléctrica.	11
6. APLICACIONES DEL CALENTAMIENTO OHMICO.	12
6.1. Procesos de inactivación microbiana	12
6.2. Influencia de las variables de proceso	13
6.2. Procesos de inactivación enzimática.....	15
7. CONCLUSIÓN.....	16
8. BIBLIOGRAFÍA.....	17

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema básico del proceso de calentamiento óhmico.....	5
FIGURA 2. Calentador óhmico ("Producto - KASAG Swiss AG").	7
FIGURA 3. Instalación completa con calentador óhmico para la preparación de fruta ("Producto - KASAG Swiss AG").....	7
FIGURA 4. Calentador óhmico a escala laboratorio. ("The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation", Model C-Joule LAB 150).....	8
FIGURA 5. Calentador óhmico industrial ("The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation", Model C-Joule PRD).....	8

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Parámetros significativos en un proceso de calentamiento óhmico.	9
TABLA 2. Conductividad eléctrica a 25°C de distintos alimentos. (Sakr y Liu, 2014) (Sarang et al 2008)	10
TABLA 3. Algunos estudios sobre la influencia de la fuerza de campo eléctrico en la inactivación microbiana.	13
TABLA 4. Algunos estudios comparativos de la inactivación microbiana mediante calentamiento óhmico y tratamientos convencionales.....	14
TABLA 5. Tiempo necesario para alcanzar una actividad relativa de la PME de 0,0 a las diferentes temperaturas ensayadas (Jakob et al., 2010).....	15

1. INTRODUCCIÓN

De entre los numerosos métodos de conservación de los alimentos que existen en la actualidad, el calor es uno de los más antiguos y extendidos para procesar y preservar alimentos (Kaur y Singh, 2015). Así, los tratamientos térmicos, como la esterilización o la pasteurización, son las técnicas más empleadas para obtener productos seguros ya que permiten obtener alimentos microbiológicamente estables (Cappato et al., 2017; Park et al., 2017). Sin embargo, este tipo de tratamientos también provocan efectos no deseados como, por ejemplo, la pérdida de compuestos nutricionales termosensibles o cambios en los atributos sensoriales (Pires et al., 2020), que limitan su uso como método de inactivación microbiana en diversos productos (Rifna et al., 2019).

En los tratamientos térmicos convencionales, la transferencia de calor se produce por los fenómenos clásicos de conducción, convección y/o radiación (Yildiz-Turp et al., 2013). Así, en el caso de tratamientos de alimentos sólidos, el calor se transfiere desde el entorno hasta la superficie del alimento mediante convección del aire que lo rodea, por conducción, si el alimento está en contacto con una superficie caliente, o por radiación desde, por ejemplo, las paredes calientes de un horno. El transporte de calor desde la superficie del sólido a su interior tiene lugar únicamente por conducción. Este proceso resulta muy lento dada la relativamente baja conductividad térmica de los alimentos, y requiere de un elevado consumo energético.

El transporte de calor se debe a gradientes de temperatura. Por lo tanto, se suelen utilizar temperaturas elevadas de tratamiento para acelerar la transferencia de calor. Sin embargo, dichas temperaturas elevadas provocan importantes cambios físicos y químicos en el alimento (Aboud et al., 2019), especialmente en su superficie, ya que suele ser la parte que alcanza temperaturas más altas y que se mantienen durante más tiempo. Por otro lado, la diferente resistencia interna a la transmisión de calor por conducción de los componentes de un alimento puede dar como resultado tratamientos térmicos heterogéneos, que a su vez, pueden generar pérdidas notables de la calidad textural y nutricional de los alimentos (Yildiz-Turp et al., 2013).

El objetivo de los tratamientos térmicos suele ser conseguir la temperatura mínima durante el tiempo necesario en cualquier punto del alimento que asegure la calidad microbiológica. Como se ha comentado, se requiere mucho tiempo para conducir el calor desde la superficie de los alimentos sólidos hasta el centro de los mismos, que suele ser el punto crítico, para garantizar una esterilización completa. Esto puede generar la sobrecocción y la degradación de la calidad en la capa externa (Tian et al., 2018).

Además, en los tratamientos térmicos se han de considerar otros muchos factores relacionados con la composición y las propiedades fisicoquímicas del alimento como el pH o la cantidad y actividad del agua del producto ya que ejercen un efecto muy importante sobre la resistencia al calor de los microorganismos (Zhang et al., 2018). Estos factores pueden ayudar a que los tratamientos sean más cortos, o por el contrario hacer que deban ser más largos con un mayor impacto en la calidad.

La fuerte demanda del consumidor de productos nutritivos, con elevada calidad organoléptica y vida útil ha hecho que se busquen alternativas al procesado térmico (García-González et al., 2007). Así, se están buscando constantemente métodos alternativos capaces de inactivar enzimas y microorganismos, así como preservar los valores nutricionales y las características físicas y químicas de los alimentos. La tendencia actual es usar procesos en los que se pueda trabajar de manera continua a altas temperaturas pero con tiempos de procesado tan cortos como sea posible (Sakr y Liu, 2014). En este sentido, el calentamiento óhmico puede representar una de estas alternativas (Chemat et al., 2011). Prueba de ello es que se están desarrollando aplicaciones industriales para aplicarlo como nuevo método de inactivación microbiana y enzimática de bajo consumo de energía (Knirsch et al., 2010).

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo bibliográfico fue el análisis del estado de desarrollo en el que se encuentra la tecnología de calentamiento óhmico y de los equipos para aplicarla. En este sentido, como objetivos secundarios se fijaron la identificación de las ventajas y los inconvenientes de esta tecnología respecto a los métodos convencionales, la caracterización de los efectos que provoca sobre la calidad de los alimentos y la evaluación de su efectividad en aplicaciones de inactivación microbiana y enzimática.

3. CALENTAMIENTO OHMICO

3.1. Antecedentes

El concepto de calentamiento óhmico (OH, del inglés ohmic heating), también conocido como efecto Joule, data de principios de siglo XX. Así, cuando una corriente eléctrica atraviesa un cuerpo, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren éstos con los átomos del material por el que circulan, y esto produce una elevación de la temperatura del mismo. Desde el punto de vista práctico, su aplicación consiste en hacer pasar una corriente alterna a través del alimento mediante contacto directo con dos electrodos (Cappato et al., 2017). Los alimentos contienen agua y electrolitos y por lo tanto son conductores de la corriente eléctrica (Kim et al., 2017). La diferencia de potencial impuesta entre los electrodos da lugar al flujo de corriente eléctrica a través del producto produciendo una elevación de la temperatura del mismo por el efecto Joule (Benabderrahmane y Pain, 2000).

La conductividad eléctrica (σ) es la propiedad más crítica que afecta a la velocidad de calentamiento óhmico y depende de la composición del alimento (o

del medio en el que se encuentra) a calentar. En la terminología del calentamiento óhmico, es una medida del contenido iónico (Silva et al., 2017). La conductividad eléctrica de cualquier muestra no es constante y aumenta con el aumento de la temperatura del material (Sakr y Liu, 2014). Esto condiciona mucho la aplicación de esta metodología. De hecho, el diseño de calentadores óhmicos efectivos depende de la conductividad eléctrica del alimento que se debe tratar (Kaur y Singh, 2015).

A lo largo de los años, se han realizado diversos intentos para utilizar el calentamiento ohmico en varias áreas del procesamiento de alimentos. Así, Jones en 1897 (Jones, 1897) solicitó la primera patente que usaba el calentamiento óhmico para calentar líquidos. Más tarde, Beattie (1914) utilizó una técnica de calentamiento por resistencia para la pasteurización de la leche para alimentación infantil. Anglim (1923) propuso un pasteurizador de leche por lotes para uso doméstico. En 1934, Anglim (Anglim 1934) propuso otro aparato para la pasteurización de la leche en el que la pared del pasteurizador funcionaba como un electrodo, y el otro electrodo, hecho de grafito, estaba montado en el centro. Se desarrollaron técnicas comerciales de calentamiento ohmico exitosas en los años 1919 y 1920 (de Alwis y Fryer, 1990) y a finales de la década de 1930, estaban en funcionamiento más de 50 unidades de esterilización eléctrica. Sin embargo, esta tecnología no se generalizó. Getchell (1935) propuso como principal motivo del fracaso de la pasteurización eléctrica a escala comercial, la ausencia de equipos de control lo suficientemente precisos para mantener la temperatura dentro del rango necesario y lo suficientemente robustos para soportar las condiciones de producción comercial. Aun así, Getchell desarrolló otra aplicación basada en calentamiento ohmico en leche. Sin embargo, a las dificultades de control, había que sumar el uso de otras fuentes de energía más baratas como el petróleo y el gas, que hizo que el proceso no resultara económicamente rentable.

A todo esto hay que añadir que en todos los procesos descritos anteriormente, se utilizaban electrodos en contacto directo con el alimento. Si el material del electrodo no es el adecuado, se puede producir la contaminación del alimento, que puede ser un problema de seguridad para el consumidor. Por ejemplo, en todas las aplicaciones anteriores se utilizaban electrodos de grafito. Aunque el grafito es un material abundante y económico, podría contaminar el producto con elementos carcinógenos.

Por lo tanto, la tecnología prácticamente desapareció en los años siguientes, principalmente debido a la dificultad del control del proceso y al no disponer de materiales adecuados para los electrodos que evitasen dejar residuos en los alimentos (de Alwis y Fryer, 1990).

Sin embargo, esto cambió en 1988, cuando la empresa finlandesa Elecster Oy, desarrolló un proceso que usaba el calentamiento óhmico para líquidos monofásicos destinado especialmente al procesamiento de la leche. (Hallstrom et al., 1988). En 1989, "APV Baker", diseñó un proceso de "calentamiento óhmico" para la esterilización continua de alimentos particulados (de Alwis y Fryer, 1990). El proceso se desarrolló en primer lugar en el centro de investigación del consejo de electricidad del Reino Unido y luego fue autorizado a APV Baker quien desarrolló un equipo comercial (Sakr y Liu, 2014). Este sistema comercial consistía en bombear los alimentos a través de una tubería

que contenía una serie de electrodos cilíndricos conectados a un suministro trifásico de 50 Hz. De este modo, la corriente eléctrica fluye a través de los alimentos en las tuberías que conectaban los electrodos. El material alimenticio se calentaba rápidamente a temperaturas de esterilización. Posteriormente, pasaba a una sección de retención y finalmente a una planta de envasado aséptico. El uso de múltiples electrodos proporcionaba un grado de control mucho mayor del que es posible en otras técnicas (de Alwis y Fryer, 1990).

A partir de ahí, han aparecido una gran cantidad de aplicaciones reales y potenciales del calentamiento ohmico, que se incluyen en operaciones como escaldado, evaporación, deshidratación, fermentación, extracción, esterilización, pasteurización y calentamiento de alimentos (Knirsch et al., 2010). De hecho, en la actualidad ya hay funcionando una serie de plantas de procesado a escala industrial en varios países (Reino Unido, Italia, México) que producen, por ejemplo, salsas de frutas y/o verduras, zumos, como el de naranja, o huevo líquido pasteurizados (Ito et al., 2014).

3.2. Ventajas e inconvenientes del calentamiento óhmico

El calentamiento producido por la aplicación de campos eléctricos moderados presenta diversas ventajas respecto a los métodos convencionales de tratamiento térmico. Así, en este proceso, el calor se genera instantáneamente dentro del alimento, y la cantidad de calor está directamente relacionada con el gradiente de voltaje que se aplique. Esta generación de calor en toda la masa del alimento da como resultado una distribución uniforme de la temperatura. Otra de las ventajas, es que se consiguen tiempos de procesado más cortos ya que el calentamiento es muy rápido. Esto supone también la obtención de mayores rendimientos del proceso, manteniendo mejor las propiedades del alimento como el color o el valor nutricional (Yildiz-Turp et al., 2013). Por otro lado, el funcionamiento de estos sistemas permite un encendido y apagado instantáneo de los equipos. Esto supone un ahorro energético muy importante ya que no son sistemas con una gran inercia, como los sistemas de tratamiento térmico convencional. A esto se une una elevada eficiencia de conversión de energía (Silva et al., 2017) que minimiza las pérdidas energéticas en comparación con las que se producen en muchos de los procesos convencionales que utilizan combustibles fósiles como fuente para generar calor. (Sakr y Liu, 2014). En definitiva, se trata de procesos que permiten la obtención de productos de mejor calidad, la reducción de los tiempos de tratamiento, ya que se consigue alcanzar la temperatura requerida de proceso rápidamente, y el aumento de la eficiencia energética, que implica un menor impacto medioambiental y económico. Además, los equipos de calentamiento óhmico se caracterizan por tener un bajo coste de mantenimiento (Kim y Kang, 2015).

Sin embargo, esta técnica también presenta ciertas desventajas. De entre todas ellas, probablemente la más importante sea la relacionada con la falta de un conocimiento profundo de ciertos aspectos del proceso. Así, el calentamiento óhmico es un proceso difícil de monitorizar y controlar (Sakr y Liu, 2014), y, por lo tanto, de automatizar y estandarizar. Como se ha mencionado anteriormente, la conductividad eléctrica de un producto aumenta a medida que se incrementa

su temperatura. Esto dificulta el control de la energía que se suministra al proceso. A estos se une que, según diversos estudios, la instalación del equipo de calentamiento óhmico puede ser más cara que la de un método más convencional (Kaur y Singh, 2015).

4. EQUIPOS

En la figura 1, puede observarse un esquema básico de un sistema para aplicar el proceso de calentamiento óhmico.

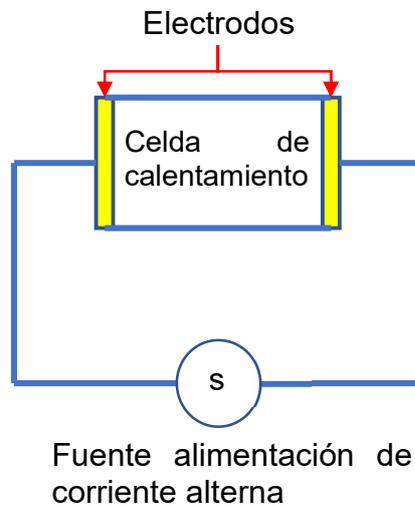


FIGURA 1. Esquema básico del proceso de calentamiento óhmico.

Los elementos necesarios que constituyen el equipo son principalmente, una celda de calentamiento donde se introduce el alimento, dos electrodos, un sistema para registrar los datos, una unidad de control de voltaje, sistemas para registrar la temperatura, como por ejemplo termopares, y una fuente de alimentación de corriente alterna (Kaur y Singh, 2015). El sistema de registro de datos es el encargado de recopilar toda la información del proceso en tiempo real, incluyendo datos de temperatura, potencia, intensidad de corriente y voltaje.

El calentamiento óhmico se distingue de otros métodos de tratamiento térmico basados en aplicaciones de campo eléctrico, como el calentamiento por microondas o el calentamiento inductivo, en que hay unos electrodos que están en contacto directo con los alimentos. Además, la frecuencia aplicada es menor en comparación con el rango de frecuencia de radio o microondas (Kaur y Singh, 2015). El diseño y los materiales de estos electrodos resulta de especial importancia ya que pueden afectar al proceso, por ejemplo, causando pérdidas de calor. Así, se ha detectado que en algunas aplicaciones hay una variación de temperatura importante entre la temperatura del centro de las celdas de tratamiento y la temperatura de los puntos que están cerca de los electrodos. Además, el campo eléctrico generado puede producir la corrosión de los

electrodos y la migración de ciertos compuestos a los alimentos que podrían resultar tóxicos para el ser humano (Yildiz-Turp et al., 2013). Por ello, se está investigando el uso de distintos materiales para los mismos. En el momento actual, los datos de los que se disponen apuntan a que el titanio platinizado puede ser el material de electrodo más adecuado para el tratamiento de alimentos (Misra y Kumar, 2020).

Por otra parte, hacen falta sistemas que permitan registrar la temperatura durante los tratamientos. En este sentido, los sistemas más aplicados son las termoresistencias (Pt100) y los termopares. Ambos sistemas se basan en efectos termoeléctricos. Así una termoresistencia se basa en el cambio de resistencia eléctrica de un material conocido en función de la temperatura. Las más utilizadas son las denominadas Pt100, que se basan en la resistencia eléctrica del platino. Son elementos muy robustos y muy utilizados en la industria alimentaria. Sin embargo, son relativamente caros.

Por otro lado, los termopares se basan en un circuito formado por dos conductores de aleaciones de metal diferentes, unidos en sus extremos. Esta unión genera una diferencia de potencial que es proporcional a la temperatura del punto de unión. Son sistemas económicos, intercambiables, que tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación está en la exactitud de la medida. Los termopares mayormente usados son los de tipo K, formados por la combinación de un conductor de una aleación de níquel y cromo (chromega) y otro de una aleación de níquel y aluminio (alomega), y los de tipo J, con un conductor de hierro y otro de una aleación de cobre y níquel. Todos estos sensores se pueden ubicar en diferentes posiciones de la celda de calentamiento (Silva et al., 2017) y permiten la monitorización del tratamiento.

En cuanto a la celda de calentamiento, se han utilizado diferentes materiales para su construcción (Silva et al., 2017). Cuando el calentamiento óhmico se aplica sobre alimentos líquidos o semisólidos, la celda de calentamiento tiene forma de tubo cilíndrico fabricado de distintos materiales. Así, a nivel de investigación, Jakob et al. (2010) utilizaron una celda cilíndrica de calentamiento de vidrio para analizar la inactivación enzimática en el zumo de manzana mediante calentamiento óhmico. Moreno et al. (2013) utilizaron una celda de calentamiento cilíndrica de acero inoxidable. Por último, Baysal y Icier (2010), usaron una celda de teflón en el estudio de la cinética de inactivación de esporas de *Alicyclobacillus acidoterrestris* en zumo de naranja.

En la actualidad, hay varias empresas que comercializan equipos que funcionan con calentamiento óhmico. Estas son dos de ellas:

En primer lugar, KASAG, que es hasta ahora la única empresa en el mundo que ha construido una instalación completa con calentamiento óhmico para la producción aséptica de preparados a base de fruta. KASAG es una empresa alemana fundada en 1929 por Louis Lauber, E. Kunz y Werner Gerber. Esta empresa forma parte de la vanguardia global en tecnología de procesos, diseño, ingeniería y producción de instalaciones y aparatos para las empresas industriales. Se dedican a realizar proyectos personalizados a empresas de la industria alimentaria, la industria farmacéutica, química, biotécnica, criogenia, tecnología nuclear y energías renovables. Aunque la empresa no muestra un

esquema del funcionamiento de los equipos que comercializan, las figuras 2 y 3 son imágenes de sus equipos. ("Producto - KASAG Swiss AG").



FIGURA 2. Calentador óhmico ("Producto - KASAG Swiss AG").



FIGURA 3. Instalación completa con calentador óhmico para la preparación de fruta ("Producto - KASAG Swiss AG").

Otra de las empresas con más de 20 años de experiencia en calentamiento óhmico es C-Tech Innovation. Se trata de una empresa ubicada en Reino Unido. Han diseñado, instalado y puesto en marcha equipos de calentamiento óhmico a medida en el Reino Unido, Europa, India y América del Norte. Sus instalaciones se han implementado en industrias de alimentos y bebidas y en la industria química. C-Tech innovation comercializa una gama de equipos de calentamiento óhmico desde escala de laboratorio hasta sistemas de producción capaces de obtener rendimientos superiores a 10 toneladas / hora con velocidades de calentamiento de hasta 10 °C / segundo. El equipo básico consta de una tubería o cámara de calentamiento que está equipada con electrodos y una fuente de alimentación que proporciona energía eléctrica al sistema con eficiencias

superiores al 95% ("The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation"). La empresa tiene en su página web, 4 equipos que comercializan. La figura 4 muestra un calentador óhmico ("C-Joule LAB 150") diseñado por la empresa el cual se comercializa a escala de laboratorio. La figura 5 muestra el modelo "C-Joule PRD". Se trata de un calentador óhmico de flujo continuo a escala de producción diseñado a medida.



FIGURA 4. Calentador óhmico a escala laboratorio. ("The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation", Model C-Joule LAB 150).



FIGURA 5. Calentador óhmico industrial ("The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation", Model C-Joule PRD).

5. PARAMETROS IMPORTANTES EN EL CALENTAMIENTO ÓHMICO.

La efectividad de la aplicación de un tratamiento de calentamiento óhmico sobre un alimento depende del valor de un conjunto de parámetros que han de ser considerados a la hora de diseñar el proceso a escala industrial (Kaur y Singh, 2015). Entre los parámetros (Tabla 1) que se deben considerar en un proceso de calentamiento óhmico se incluyen parámetros propios del proceso, como la fuerza de campo, parámetros relacionados con el producto a tratar, como a conductividad eléctrica, el tamaño de partícula, la concentración de partícula o la concentración iónica, y parámetros relacionados con el equipo, como las propiedades de los electrodos (Aghajanzadeh y Ziaifar, 2018; Cappato et al., 2017; Fryer y Li, 1993).

TABLA 1. Parámetros significativos en un proceso de calentamiento óhmico.

PARÁMETROS		
Producto	Proceso	Equipo
<ul style="list-style-type: none">• Conductividad eléctrica• Tamaño de partícula• Concentración de partícula• Concentración iónica.	<ul style="list-style-type: none">• Fuerza de campo• Tiempo - temperatura• Frecuencia corriente eléctrica	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de electrodos• Célula óhmica

A continuación, se analizan los aspectos más importantes de cada uno de estos parámetros:

5.1. Conductividad eléctrica.

Se trata de un parámetro crucial en los procesos de calentamiento óhmico (Sakr y Liu, 2014). De hecho, el diseño de equipos eficaces debe considerar la conductividad eléctrica de los alimentos a tratar ya que la tasa de calentamiento es directamente proporcional al cuadrado de la fuerza del campo eléctrico y a la conductividad eléctrica (Kaur y Singh, 2015). El problema es que esta conductividad no sólo es diferente para diferentes materiales (Tabla 2) si no que, además, cambia con la temperatura, por lo que varía durante el proceso de calentamiento. Por otro lado, en materiales no homogéneos, como las sopas que contienen trozos de sólidos, la conductividad eléctrica es variable dentro del producto. Así, la conductividad de las partículas sólidas y su relación con la conductividad del fluido se toman como parámetros críticos para entender la velocidad de calentamiento óhmico (Benabderrahmane y Pain, 2000). En muchas experiencias, una parte importante del trabajo es la determinación de la conductividad eléctrica, a pesar de que se pueden encontrar en bibliografía datos de numerosos productos como zumos y purés. En general, se puede establecer que la conductividad eléctrica de los alimentos, se encuentra en el rango de 0.05 a 1.2 S/m (Sakr y Liu, 2014). Sarang et al. (2008) observaron que, entre 25 y 140 °C, la fruta fresca como la manzana, pera, melocotón, fresa o piña son menos conductoras que la carne de pollo, cerdo o ternera. Además, también observaron diferencias entre frutas. Así, el melocotón y la fresa son más conductoras que las manzanas, peras y piña. Por otro lado, los materiales porosos, como la manzana, presentan una conductividad eléctrica más baja, debido a la presencia

de aire dentro de estas (Sarang et al., 2008). En el caso de la carne de pollo y de cerdo, la conductividad es menor en las partes con mayor cantidad de grasa en comparación con la carne magra.

TABLA 2. Conductividad eléctrica a 25°C de distintos alimentos. (Sakr y Liu, 2014) (Sarang et al 2008)

Alimento	Conductividad eléctrica a 25°C (S/m)
Café	0,182
Café con leche	0,357
Zumo de manzana	0,239
Zumo de tomate	1,697
Carne (cerdo)	0,64-0,86
Manzana Golden	0,067
Manzana roja	0,075
Piña	0,037
Fresa	0,186
Chocolate con leche 3% grasa	0,433

5.2. Tamaño de partícula.

El tamaño de partícula a tratar es otro de los parámetros importantes ya que se ha observado que puede influir en el tiempo de calentamiento (Kaur y Singh, 2015). En este aspecto, Zareifard et al. (2003) investigaron la influencia del tamaño de partícula en función del tipo de alimento. Para ello, realizaron experiencias de calentamiento óhmico en sistemas alimentarios de dos fases. Los sistemas alimentarios se componían de una fase líquida formada por una solución de almidón y una fase sólida que contenía puré de zanahoria y cubos de zanahoria de diferentes tamaños (6 y 13 mm) en diferentes concentraciones. Los resultados que obtuvieron indicaron que a medida que aumentó el tamaño de los sólidos, el tiempo necesario para pasar de 20°C a 80°C fue significativamente mayor. Así, observaron que la conductividad eléctrica en la mezcla almidón/zanahoria disminuía a medida que aumentaba el tamaño de los cubos de zanahoria. Sin embargo, cuando aplicaron el calentamiento óhmico solamente sobre la fase sólida (cubos de zanahoria de 6 y 13 mm), no observaron diferencias significativas en el valor de la conductividad entre los cubos de 6 mm y 13 mm. Palaniappan y Sastry (1991) encontraron que reduciendo el tamaño de los sólidos del zumo de zanahoria aumentó la conductividad del mismo. Por lo tanto, todos estos resultados indican que la determinación las conductividades de los diferentes elementos de un sistema y la definición del tamaño de partícula óptimo para cada caso es muy importante para garantizar un calentamiento uniforme (de Alwis y Fryer, 1990).

5.3. Concentración de partículas.

Otra de las variables de proceso que es necesario considerar en alimentos fluidos y heterogéneos es la concentración de partículas. Así, diversos autores han comprobado que a medida que aumenta la concentración de partículas de un alimento, disminuye la conductividad eléctrica del mismo y, por lo tanto, la

tasa de calentamiento. Esto supone que es necesario aplicar un mayor tiempo de tratamiento para elevar la temperatura del producto. Así, Castro et al. (2003) observaron este efecto trabajando con pulpa de fresa, Icier y Illicali (2004) obtuvieron resultados similares utilizando zumo de manzana y zumo de cereza y Zareifard et al. (2003) aplicando el calentamiento óhmico en la zanahoria.

5.4. Concentración iónica.

Este parámetro está directamente ligado a la conductividad ya que una mayor concentración iónica facilita el paso de la corriente. Esto se traduce en que, a mayor concentración iónica del alimento, mayor tasa de calentamiento (Kaur y Singh, 2015). Así, Icier y Icali (2005), realizaron pruebas de calentamiento óhmico sobre puré de albaricoque y de melocotón. Obtuvieron una mayor tasa de calentamiento en el puré de albaricoque ya que éste es más ácido y por lo tanto existe mayor concentración iónica en él. En este sentido, Zell et al. (2009) obtuvieron una mayor tasa de calentamiento en las carnes saladas respecto a las carnes sin salar.

5.5. Fuerza de campo eléctrico.

Un campo eléctrico es un campo de fuerza creado por la atracción y repulsión de cargas eléctricas y es la causa del flujo eléctrico. En el Sistema Internacional de unidades, esta magnitud se mide en V/m. La aplicación de fuerza de campo eléctrico da como resultado un aumento del movimiento iónico dentro del alimento, que es directamente proporcional a la conductividad eléctrica (Halden et al., 2007). Se ha demostrado que, a mayor intensidad del campo eléctrico, mayor es la conductividad eléctrica y más rápido es la tasa de calentamiento (Kaur y Singh, 2015). Al aplicar un campo eléctrico de mayor fuerza, se mejora el calentamiento óhmico y esto, en aplicaciones de inactivación microbiana, produce mayores efectos sobre los microorganismos (Silva et al., 2017). Castro et al. (2004) e Icier y Icali. (2005) estudiaron la influencia de la fuerza del campo eléctrico en la conductividad eléctrica de distintos alimentos. Estos autores observaron que, al aumentar la fuerza de campo eléctrico por encima de cierto nivel, se produce la destrucción de membranas celulares y, por lo tanto, un mayor movimiento iónico dentro del alimento que hace que aumente la conductividad eléctrica. No obstante, en algunos alimentos, como salsas o coberturas, el aumento de la fuerza del campo eléctrico no presenta un efecto significativo. Esto se puede atribuir a que posiblemente el procesado previo podría llevar a la destrucción de membranas y cambios estructurales dentro del alimento que enmascararían los efectos de tratamientos eléctricos posteriores.

5.6. Frecuencia corriente eléctrica.

Numerosos estudios han demostrado que la frecuencia de la corriente eléctrica tiene una influencia significativa en el calentamiento óhmico de alimentos. Lima y Sastry, (1999) compararon los rendimientos de extracción de zumo de manzana aplicando un pretratamiento con calentamiento óhmico a dos frecuencias, 60Hz y 4Hz. El proceso realizado a 4 Hz presentó un mayor

rendimiento en la extracción del zumo de manzana y un proceso más corto en comparación con el proceso a 60 Hz. Esto se podría atribuir a la mayor conductividad eléctrica a 4 Hz que a 60Hz.

6. APLICACIONES DEL CALENTAMIENTO OHMICO.

6.1. Procesos de inactivación microbiana

La influencia de los tratamientos óhmicos sobre la inactivación microbiana se debe principalmente, a que se trata de tratamientos de naturaleza térmica, como los tratamientos convencionales (Cappato et al., 2017) que generan la destrucción de componentes y estructuras celulares por acción del calor (Tian et al., 2018). A medida que aumenta la temperatura, los microorganismos y enzimas son inactivadas por los efectos irreversibles en su estructura (Aghajanzadeh y Ziaifar, 2018). No obstante, además, los tratamientos óhmicos también pueden generar lesiones subletales en las células o efectos adicionales sobre los microorganismos debido al paso de la corriente eléctrica (Kaur y Singh, 2015). Este hecho podría intensificar los efectos térmicos y aumentar la eficiencia del proceso.

En efecto, numerosos estudios indican la existencia de un efecto adicional no térmico causado por el tratamiento óhmico llamado electroporación de las células (Cappato al., 2017). Este fenómeno, considerado como el principal mecanismo no térmico de destrucción de microorganismos, conduce a la formación de poros en la membrana y cambios en la permeabilidad celular (Uemura y Isobe, 2003). Estos daños, debilitan a las células y posibilitan que los microorganismos pueden ser destruidos a una temperatura por debajo de su temperatura convencional de muerte (Tian et al., 2018). La electroporación se ha descrito como el método más efectivo para preservar la calidad de los alimentos y garantizar la seguridad microbiológica. No obstante, se considera uno efectos difíciles de conseguir en las condiciones de campos eléctricos moderados que se utilizan en los tratamientos óhmicos (Mahnič-Kalamiza et al., 2014).

Por otro lado, la aplicación de un tratamiento óhmico sobre un alimento puede causar una inactivación microbiana de tipo químico, es decir, la inactivación de microorganismos causada por la formación de compuestos que actúan como bactericidas. Así durante la aplicación del campo eléctrico, se puede producir la formación de oxígeno libre, hidrógeno, cloruros, hidroxilos y radicales hidroperóxido, e iones metálicos que pueden afectar significativamente a la viabilidad de los microorganismos (Tian et al., 2018). Además, la formación de sustancias tóxicas, como el cloro libre, también podría contribuir a la inactivación microbiana. La concentración de dichas sustancias disminuye, e incluso se anula, después de la aplicación del proceso (Tracy, 1932).

Por último, es de destacar, que el calentamiento óhmico ha demostrado su eficacia en la inactivación tanto de células vegetativas como de esporas (Tian et al., 2018).

6.1.1. Influencia de las variables de proceso

Como se ha comentado, la conductividad eléctrica de los alimentos aumenta con el tiempo de calentamiento y la temperatura, lo que en última instancia conduce a una mayor velocidad de calentamiento e influye en el efecto de inactivación microbiana del tratamiento. Los alimentos difieren en su conductividad eléctrica; por lo tanto, es necesario determinar, para cada tipo específico de alimento, los parámetros más adecuados del tratamiento óhmico con el objetivo de optimizar la inactivación microbiana (Tian et al., 2018).

La fuerza de campo eléctrico aplicada puede tener un efecto significativo sobre la efectividad del tratamiento (Tabla 3). Así, Baysal y Icier (2010), Lee et al. (2012) y Sagong et al. (2011) estudiaron la influencia de la fuerza del campo eléctrico en la inactivación de diferentes microorganismos en zumos. Todos ellos llegaron a la conclusión de que la actividad bactericida del calentamiento óhmico es proporcional a la fuerza del campo eléctrico para una misma temperatura. Uemura y Isobe (2002) estudiaron la inactivación de *Escherichia coli* en una solución de agua salina y obtuvieron un resultado similar al de los autores mencionados anteriormente. Así, observaron un descenso de la cantidad de microorganismos viables a medida que se aumentó la fuerza del campo eléctrico aplicado.

Por otro lado, Baysal y Icier (2010) estudiaron el efecto del aumento de la temperatura en la inactivación de esporas de *Alicyclobacillus acidoterrestris* en zumo de naranja a distintas fuerzas de campo eléctrico (30, 40 y 50 V/cm) y temperaturas (70, 80 y 90 °C). Los resultados que obtuvieron indican que los valores de inactivación microbiana se incrementaron al aumentar la fuerza de campo iónico a la menor de las temperaturas ensayadas.

TABLA 3. Algunos estudios sobre la influencia de la fuerza de campo eléctrico en la inactivación microbiana.

AUTOR	MICROORGANISMO ESTUDIADO	PRODUCTO UTILIZADO	CONDICIONES DEL TRATAMIENTO OHMICO
Sagong et al. (2011)	<i>Escherichia coli</i> O157:H7 <i>Salmonella Typhimurium</i> <i>Listeria monocytogenes</i>	Zumo de naranja Zumo de tomate	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de campo eléctrico 10, 15 y 20 V/cm • Frecuencia 60 Hz
Baysal y Icier (2010)	Esporas de <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i>	Zumo de naranja	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de campo eléctrico 30, 40 y 50 V/cm • Frecuencia 50 Hz • Tª 70, 80 y 90 °C
Uemura y Isobe (2002)	<i>Escherichia coli</i>	Agua salina	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de campo eléctrico 14 kV/cm • Frecuencia 20 kHz • Tª 74 °C
Lee et al. (2012)	<i>Escherichia coli</i> O157:H7 <i>Salmonella Typhimurium</i> <i>Listeria monocytogenes</i>	Zumo de naranja Zumo de tomate	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza de campo eléctrico 25-40 V/cm • Frecuencia 60 Hz • Tª 24-140 °C

En cuanto a la influencia de la frecuencia del campo eléctrico, Somavat et al. (2012; 2013), estudiando la aplicación de tratamiento óhmico en zumo de tomate. Somavat et al. (2012) aplicaron una fuerza de campo eléctrico del rango de 0-23,9 V/cm. Somavat et al. (2013) aplicaron una fuerza de campo eléctrico de 13 V/cm. Todos ellos encontraron que la eficacia en la inactivación de las esporas de *Geobacillus stearothermophilus* y esporas de *Bacillus coagulans* respectivamente se incrementó al disminuir la frecuencia utilizada (10 kHz y 60 Hz). En cambio, Murashita et al. (2016), aplicando campos eléctrico de diferente fuerza (5, 10 y 20 V/cm) sobre una suspensión de esporas de *Bacillus subtilis* no obtuvieron diferencias significativas entre las frecuencias probadas (20, 40 y 60 kHz) aunque el tiempo de inactivación completa aparentemente sí que parecía depender de ella.

Kim y Kang (2015), Kim et al. (2017) y Murashita et al. (2016), entre otros, compararon el calentamiento óhmico con el calentamiento convencional, llegando a la conclusión de que los efectos adicionales no térmicos que produce el calentamiento ohmico, ayudan a reducir el tiempo requerido para la inactivación de los microorganismos. En estos estudios, para una temperatura determinada, se consigue una inactivación más rápida y eficaz cuando las muestras son tratadas por calentamiento óhmico. No obstante, Somavat et al. (2012) y Somavat et al. (2013), aunque llegaron a conclusiones similares, observaron que a temperaturas de tratamiento muy elevada, las diferencias entre los valores de inactivación microbiana obtenidos mediante calentamiento óhmico y convencional se redujeron. Las condiciones de los experimentos llevados en todos estos estudios aparecen recopiladas en la Tabla 4. En definitiva, todos estos estudios sugieren el potencial del calentamiento óhmico para lograr tiempos de proceso reducidos para la inactivación de microorganismos y la obtención de productos seguros.

TABLA 4. Algunos estudios comparativos de la inactivación microbiana mediante calentamiento óhmico y tratamientos convencionales.

AUTOR	MICROORGANISMO ESTUDIADO	CONDICIONES DEL TRATAMIENTO	
		OHMICO	CONVENCIONAL
Kim y Kang (2015)	<i>Escherichia coli</i> 0157:H7 <i>Salmonella</i> entérica <i>Serovar Typhimurium</i> <i>Listeria monocytogenes</i>	Fuerza de campo eléctrico 9,6 V/cm Frecuencia 20 kHz T ^a 55-70°C	Temperatura 55-70°C
Kim et al. (2017)	Esporas <i>Alicyclobacillus acidorrestris</i>	Fuerza de campo eléctrico 26,7 V/cm Frecuencia 25 kHz T ^a 85 -100 °C	Temperatura 85-100°C
Murashita et al. (2016)	Esporas <i>Bacillus subtilis</i>	Fuerza de campo eléctrico 5, 10 y 20 V/cm Frecuencia 20, 40 y 60 kHz T ^a 110 °C	Temperatura 110°C
Somavat et al. (2012)	Esporas <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	Fuerza de campo eléctrico 0-23,9 V/cm Frecuencia 0-5 kHz T ^a 24-140 °C	Temperatura 24-140°C

AUTOR	MICROORGANISMO ESTUDIADO	CONDICIONES DEL TRATAMIENTO	
		OHMICO	CONVENCIONAL
Somavat et al. (2013)	<i>Esporas Bacillus coagulans</i>	Fuerza de campo eléctrico 13 V/cm Frecuencia 10 kHz y 60 Hz Tª 95-110 °C	Temperatura 95-110°C

6.2. Procesos de inactivación enzimática

El calentamiento óhmico también puede resultar un proceso eficaz para la inactivación enzimática, permitiendo obtener productos de mayor calidad. Así, Demirdöven y Baysal (2012) y Leizeron y Shimoni (2005) obtuvieron una reducción del 90-98% de la actividad de pectilmetilesterasa (PME) durante el calentamiento óhmico (34–76 °C, 50Hz y 20–60 V/cm; 80-90°C, 50Hz) de zumo de naranja en comparación con su actividad en el producto fresco. Jakob et al. (2010) también obtuvieron la reducción de la actividad de la PME en zumo de manzana mediante calentamiento óhmico (50Hz; 54-66°C), siendo esta inactivación más rápida en las experiencias realizadas a mayor temperatura (Tabla 5). Moreno et al, (2013) observaron una inactivación de la enzima polifenoloxidasas completa y más rápida al comparar calentamiento óhmico (13 V/cm; 60 Hz; 30, 40 y 50 °C) con tratamientos convencionales (30 ,40 y 50 °C). Castro et al., 2006, estudiando el tratamiento (Fuerza de campo eléctrico aplicada entre 50 y 90 V/cm, 50 kHz, 60-75°C) en habas de soja y manzanas (Golden delicious) consiguieron la inactivación de las enzimas lipoxigenasa y polifenoloxidasas respectivamente. Sin embargo, el tratamiento no fue suficiente para inactivar la pectinasa y galactosidasa. Esto último es positivo, ya que estas enzimas tienen funciones importantes en los alimentos como son clarificar zumos y vinos, ya que reducen la viscosidad hidrolizando la pectina, aceleran la tasa de filtración, previenen la formación de gel de pectina y mejoran la extracción del color de la piel de la uva.

TABLA 5. Tiempo necesario para alcanzar una actividad relativa de la PME de 0,0 a las diferentes temperaturas ensayadas (Jakob et al., 2010)

Temperatura	Tiempo
54 °C	>120 min
56 °C	>75 min
60 °C	45 min
64 °C	10 min
66 °C	5 min

Jakob et al. (2010) estudiaron la inactivación de la fosfatasa alcalina en leche de cabra y leche de oveja (52-64°C) y la peroxidasa en distintos vegetales (zanahoria (62-78°C), brócoli y patata) (58-74°C)) aplicando calentamiento óhmico (50Hz) y calentamiento convencional. Para ambas enzimas, la tasa de inactivación fue aproximadamente la misma en el calentamiento óhmico y en el convencional a 52 y 58°C respectivamente, la temperatura más baja ensayada.

No obstante, a medida que aumentó la temperatura de tratamiento (58°C en la leche de cabra y leche de oveja y 66°C en los vegetales), la inactivación de las enzimas con calentamiento óhmico fue significativamente mayor respecto al calentamiento convencional. Li et al. (2015) estudiaron la inactivación de la ureasa en habas de soja y leche de soja aplicando calentamiento óhmico (90°C; 50 Hz, 500 Hz, 5000 Hz y 10 kHz) y calentamiento convencional (90°C). Con los resultados obtenidos llegaron a la conclusión de que el campo eléctrico que aplica el calentamiento óhmico ejerció un efecto positivo sobre la inactivación de la fracción de ureasa termolábil, pero no afectó significativamente a la inactivación de la fracción de ureasa termoestable en comparación con el calentamiento convencional.

A pesar de ser necesario seguir investigando, los resultados obtenidos hasta el momento, sugieren que el calentamiento óhmico puede ser un método para obtener productos de mayor calidad.

7. CONCLUSIÓN

El calentamiento óhmico es una metodología eficaz en la inactivación microbiana que permite obtener productos inocuos y seguros en tiempo de procesado más cortos en comparación con los métodos convencionales. Por lo tanto, el uso de calentamiento óhmico en la industria alimentaria podría disminuir los efectos térmicos negativos de la pasteurización y otros tratamientos térmicos convencionales.

Además, el calentamiento óhmico resulta un método eficaz para la inactivación enzimática que permite obtener productos de mayor calidad, lo cual será un punto a favor para el consumidor. Los productos obtenidos presentan mejores características de calidad ya que el calentamiento que sufren es homogéneo y menos agresivo que los tratamientos térmicos convencionales.

No obstante, es necesario seguir investigando tanto para mejorar el control del proceso como para comprender mejor los efectos que pueden generar, especialmente en aplicaciones de inactivación enzimática, con el objetivo de que las empresas puedan apostar por el calentamiento óhmico para obtener productos seguros y de mejor calidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

- About, S., Altemimi, A., R. S. Al-Hilphy, A., Yi-Chen, L., y Cacciola, F. (2019). A Comprehensive Review on Infrared Heating Applications in Food Processing. *Molecules*, 24(22), 4125. <https://doi.org/10.3390/molecules24224125>
- Aghajanzadeh, S., y Ziaifar, A. (2018). A review of pectin methylesterase inactivation in citrus juice during pasteurization. *Trends In Food Science y Technology*, 71, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.10.013>
- Anglim, T. H. (1923). Method and apparatus for pasteurizing milk. US Patent 1 468 871.
- Anglim, T. II. (1934). Apparatus for pasteurizing milk. US Patent 1 984 956.
- Baysal, A., y Icier, F. (2010). Inactivation Kinetics of Alicyclobacillus acidoterrestris Spores in Orange Juice by Ohmic Heating: Effects of Voltage Gradient and Temperature on Inactivation. *Journal Of Food Protection*, 73(2), 299-304. <https://doi.org/10.4315/0362-028x-73.2.299>
- Beattie, J. M. (1914). Electrical treatment of milk for infant feeding. *The British Journal of State Medicine*, 24 (4), 97- 113.
- Benabderrahmane, Y., y Pain, J. (2000). Thermal behaviour of a solid/liquid mixture in an ohmic heating sterilizer - slip phase model. *Chemical Engineering Science*, 55(8), 1371-1384. [https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(99\)00421-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(99)00421-2)
- Cappato, L., Ferreira, M., Guimaraes, J., Portela, J., Costa, A., y Freitas, M. et al. (2017). Ohmic heating in dairy processing: Relevant aspects for safety and quality. *Trends In Food Science y Technology*, 62, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.010>
- Casaca Lage de Castro, I. (2007). Ohmic Heating as an alternative to conventional thermal treatment. University of Minho.
- Castro, I., Macedo, B., Teixeira, J., & Vicente, A. (2006). The Effect of Electric Field on Important Food-processing Enzymes: Comparison of Inactivation Kinetics under Conventional and Ohmic Heating. *Journal Of Food Science*, 69(9), C696-C701. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09918.x>
- Castro, I., Teixeira, J., Salengke, S., Sastry, S., y Vicente, A. (2003). The influence of field strength, sugar and solid content of strawberry products. *Journal Of Food Process Engineering*, 26(1), 17-29. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2003.tb00587.x>
- Castro, I., Teixeira, J., Salengke, S., Sastry, S., y Vicente, A. (2004). Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science y Emerging Technologies*, 5(1), 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2003.11.001>
- Chemat, F., Zill-e-Huma, y Khan, M. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813-835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- de Alwis, A., y Fryer, P. (1990). The use of direct resistance heating in the food industry. *Journal Of Food Engineering*, 11(1), 3-27. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90036-8)
- Demirdöven, A., y Baysal, T. (2012). Optimization of ohmic heating applications for pectin methylesterase inactivation in orange juice. *Journal Of Food Science And Technology*, 51(9), 1817-1826. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0700-5>

- Fryer, P., y Li, Z. (1993). Electrical resistance heating of foods. *Trends In Food Science y Technology*, 4(11), 364-369. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(93\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0924-2244(93)90018-6)
- Garcia-Gonzalez, L., Geeraerd, A., Spilimbergo, S., Elst, K., Van Ginneken, L., y Debevere, J. et al. (2007). High pressure carbon dioxide inactivation of microorganisms in foods: The past, the present and the future. *International Journal Of Food Microbiology*, 117(1), 1-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.02.018>
- Getchell, B. E. (1935). Electric pasteurization of milk. *Nature*, 136(3427), 1-3. <https://doi.org/10.1038/136001a0>
- Halden, K., De Alwis, A., y Fryer, P. (2007). Changes in the electrical conductivity of foods during ohmic heating. *International Journal Of Food Science y Technology*, 25(1), 9-25. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01055.x>
- Hallstriim, B., Skjolbrand, C. & Tragardh, C. (1988). *Heat Transfer and Food Processing*. Elsevier, London
- Icier, F., y Ilicali, C. (2004). ELECTRICAL CONDUCTIVITY of APPLE and SOURCHERRY JUICE CONCENTRATES DURING OHMIC HEATING. *Journal Of Food Process Engineering*, 27(3), 159-180. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2004.tb00628.x>
- Icier, F., y Ilicali, C. (2005). Temperature dependent electrical conductivities of fruit purees during ohmic heating. *Food Research International*, 38(10), 1135-1142. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.04.003>
- Ito, R., Fukuoka, M., y Hamada-Sato, N. (2014). Innovative food processing technology using ohmic heating and aseptic packaging for meat. *Meat Science*, 96(2), 675-681. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2013.10.012>
- Jakób, A., Bryjak, J., Wójtowicz, H., Illeová, V., Annus, J., y Polakovič, M. (2010). Inactivation kinetics of food enzymes during ohmic heating. *Food Chemistry*, 123(2), 369-376. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.04.047>
- Kaur, N., y Singh, A. (2015). Ohmic Heating: Concept and Applications—A Review. *Critical Reviews In Food Science And Nutrition*, 56(14), 2338-2351. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.835303>
- Kim, S., y Kang, D. (2015). Comparative Effects of Ohmic and Conventional Heating for Inactivation of Escherichia coli O157:H7, Salmonella enterica Serovar Typhimurium, and Listeria monocytogenes in Skim Milk and Cream. *Journal Of Food Protection*, 78(6), 1208-1214. <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-14-544>
- Kim, N., Ryang, J., Lee, B., Kim, C., y Rhee, M. (2017). Continuous ohmic heating of commercially processed apple juice using five sequential electric fields results in rapid inactivation of Alicyclobacillus acidoterrestris spores. *International Journal Of Food Microbiology*, 246, 80-84. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.01.002>
- Knirsch, M., Alves dos Santos, C., Martins de Oliveira Soares Vicent, A., y Vessoni Penna, T. (2010). Ohmic heating – a review. *Trends In Food Science y Technology*, 21(9), 436-441. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.06.003>
- Lee, J., Kim, S., y Kang, D. (2015). Effect of pH for inactivation of Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in orange juice by ohmic heating. *LWT - Food Science And Technology*, 62(1), 83-88. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.020>
- Lee, S., Sagong, H., Ryu, S., y Kang, D. (2012). Effect of continuous ohmic heating to inactivate Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium and Listeria monocytogenes in orange

- juice and tomato juice. *Journal Of Applied Microbiology*, 112(4), 723-731. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2012.05247.x>
- Leizeron, S., y Shimoni, E. (2005). Stability and Sensory Shelf Life of Orange Juice Pasteurized by Continuous Ohmic Heating. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*, 53(10), 4012-4018. <https://doi.org/10.1021/jf047857q>
- Li, F., Chen, C., Ren, J., Wang, R., & Wu, P. (2015). Effect of Ohmic Heating of Soymilk on Urease Inactivation and Kinetic Analysis in Holding Time. *Journal Of Food Science*, 80(2), E307-E315. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12738>
- Lima, M., y Sastry, S. (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *Journal Of Food Engineering*, 41(2), 115-119. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(99\)00080-1](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(99)00080-1)
- Mahnič-Kalamiza, S., Vorobiev, E., y Miklavčič, D. (2014). Electroporation in Food Processing and Biorefinery. *The Journal Of Membrane Biology*, 247(12), 1279-1304. <https://doi.org/10.1007/s00232-014-9737-x>
- Misra, S., y Kumar, S. (2020). Ohmic Heating as an Alternative to Conventional Heating for Shelf Life Enhancement of Fruit Juices. *International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences*, 9(3), 1-9. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.903.001>
- Moreno, J., Simpson, R., Pizarro, N., Pavez, C., Dorvil, F., Petzold, G., y Bugueño, G. (2013). Influence of ohmic heating/osmotic dehydration treatments on polyphenoloxidase inactivation, physical properties and microbial stability of apples (cv. Granny Smith). *Innovative Food Science y Emerging Technologies*, 20, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.06.006>
- Murashita, S., Kawamura, S., y Koseki, S. (2016). Effects of Ohmic Heating, Including Electric Field Intensity and Frequency, on Thermal Inactivation of *Bacillus subtilis* Spores. *Journal Of Food Protection*, 80(1), 164-168. <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-16-300>
- Palaniappan, S., y Sastry, S. (1991). Electrical conductivity of selected juices: influence of temperature, solids content, applied voltage and particle size. *Journal Of Food Process Engineering*, 14(4), 247-260. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1991.tb00135.x>
- Park, I., Ha, J., y Kang, D. (2017). Investigation of optimum ohmic heating conditions for inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* serovar Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* in apple juice. *BMC Microbiology*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12866-017-1029-z>
- Parmar, P., Singh, A., Meena, G., Borad, S., y Raju, P. (2018). Application of ohmic heating for concentration of milk. *Journal Of Food Science And Technology*, 55(12), 4956-4963. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3431-4>
- Pereira, R., Martins, J., Mateus, C., Teixeira, J., y Vicente, A. (2007). Death kinetics of *Escherichia coli* in goat milk and *Bacillus licheniformis* in cloudberry jam treated by ohmic heating. *Chemical Papers*, 61(2). <https://doi.org/10.2478/s11696-007-0008-5>
- Pires, R., Cappato, L., Guimarães, J., Rocha, R., Silva, R., y Balthazar, C. et al. (2020). Ohmic heating for infant formula processing: Evaluating the effect of different voltage gradient. *Journal Of Food Engineering*, 280, 109989. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109989>
- Producto - KASAG Swiss AG. Kasag.com. Retrieved 5 November 2020, from <https://www.kasag.com/es/producto/producto-instalaciones-de-coccion-por-lotes-componentes-de-la-instalacion-calentamiento-ohmico/>.
- Richardson, G. H. & Cornwell, E. H. (1968). Continuous production of cheese curd. US Patent 3 394 0 11.

- Rifna, E., Singh, S., Chakraborty, S., y Dwivedi, M. (2019). Effect of thermal and non-thermal techniques for microbial safety in food powder: Recent advances. *Food Research International*, 126, 108654.
- Sagong, H., Park, S., Choi, Y., Ryu, S., y Kang, D. (2011). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella Typhimurium*, and *Listeria monocytogenes* in Orange and Tomato Juice Using Ohmic Heating. *Journal Of Food Protection*, 74(6), 899-904. <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-10-552>
- Sakr, M., y Liu, S. (2014). A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH). *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 39, 262-269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.061>
- Sarang, S., Sastry, S., y Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal Of Food Engineering*, 87(3), 351-356. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.12.012>
- Sengun, I., Yildiz Turp, G., Icier, F., Kendirci, P., y Kor, G. (2014). Effects of ohmic heating for pre-cooking of meatballs on some quality and safety attributes. *LWT - Food Science And Technology*, 55(1), 232-239. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.08.005>
- Silva, V., Santos, L., y Silva, A. (2017). Ohmic Heating: An Emerging Concept in Organic Synthesis. *Chemistry - A European Journal*, 23(33), 7853-7865. <https://doi.org/10.1002/chem.201700307>
- Somavat, R., Mohamed, H., y Sastry, S. (2013). Inactivation kinetics of *Bacillus coagulans* spores under ohmic and conventional heating. *LWT - Food Science And Technology*, 54(1), 194-198. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.04.004>
- Somavat, R., Mohamed, H., Chung, Y., Yousef, A., y Sastry, S. (2012). Accelerated inactivation of *Geobacillus stearothermophilus* spores by ohmic heating. *Journal Of Food Engineering*, 108(1), 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.028>
- The C-Joule Ohmic Heater Range by C-Tech Innovation. C-Tech Innovation. Retrieved 12 November 2020, from <https://www.ctechinnovation.com/our-products/c-tech-innovation-c-joule-ohmic-range/>.
- TIAN, X., YU, Q., WU, W., y DAI, R. (2018). Inactivation of Microorganisms in Foods by Ohmic Heating: A Review. *Journal Of Food Protection*, 81(7), 1093-1107. <https://doi.org/10.4315/0362-028x.jfp-17-343>
- Torkian Boldaji, M., Borghei, A., Beheshti, B., y Hosseini, S. (2014). The process of producing tomato paste by ohmic heating method. *Journal Of Food Science And Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1424-5>
- Tracy, R. (1932). Lethal Effect of Alternating Current on Yeast Cells 1. *Journal Of Bacteriology*, 24(6), 423-438. <https://doi.org/10.1128/jb.24.6.423-438.1932>
- Uemura, K., y Isobe, S. (2002). Developing a new apparatus for inactivating *Escherichia coli* in saline water with high electric field AC. *Journal Of Food Engineering*, 53(3), 203-207. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(01\)00158-3](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(01)00158-3)
- Uemura, K., y Isobe, S. (2003). Developing a new apparatus for inactivating *Bacillus subtilis* spore in orange juice with a high electric field AC under pressurized conditions. *Journal Of Food Engineering*, 56(4), 325-329. [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(02\)00157-7](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(02)00157-7)
- Yildiz-Turp, G., Sengun, I., Kendirci, P., y Icier, F. (2013). Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: A review. *Meat Science*, 93(3), 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.10.013>

Zareifard, M., Ramaswamy, H., Trigui, M., y Marcotte, M. (2003). Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems. *Innovative Food Science y Emerging Technologies*, 4(1), 45-55. [https://doi.org/10.1016/s1466-8564\(02\)00088-7](https://doi.org/10.1016/s1466-8564(02)00088-7)

Zell, M., Lyng, J., Cronin, D., & Morgan, D. (2009). Ohmic heating of meats: Electrical conductivities of whole meats and processed meat ingredients. *Meat Science*, 83(3), 563-570. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.07.005>

Zhang, S., Zhang, L., Lan, R., Zhou, X., Kou, X., y Wang, S. (2018). Thermal inactivation of *Aspergillus flavus* in peanut kernels as influenced by temperature, water activity and heating rate. *Food Microbiology*, 76, 237-244. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.05.015>