



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO FIN DE GRADO

Aplicación de campos eléctricos moderados (MEF) y pulsos eléctricos de alta intensidad (PEF) en la deshidratación de alimentos

**GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS
CURSO 2019-2020**

Autora

Sara Serrano García

Tutor

Juan Andrés Cárcel Carrión

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del
Medio Natural**

VALENCIA, JULIO 2020

Título: Aplicación de campos eléctricos moderados (MEF) y pulsos eléctricos de alta intensidad (PEF) en la deshidratación de alimentos

Resumen:

La deshidratación constituye una de las operaciones básicas más importantes en la industria alimentaria. Sin embargo, los métodos tradicionales de secado, a pesar de crear alimentos seguros, pueden dar lugar a la pérdida de las características nutricionales, de textura y sabor debido a las altas temperaturas y largos tiempos de exposición. Surge así el interés por encontrar nuevas tecnologías que disminuyan los tiempos y temperaturas de la operación, y que, a su vez, conserven las características del producto fresco.

En los últimos años, el uso de campos eléctricos como técnica para mejorar la transferencia de masa a través de las membranas celulares, ha despertado un gran interés en la industria alimentaria. Los campos eléctricos moderados (MEF) y los pulsos eléctricos de alta intensidad (PEF) son unas de las tecnologías más prometedoras debido al efecto de la electroporación, que genera una permeabilización de las membranas celulares y que se puede relacionar con una reducción de los tiempos de secado y una mayor calidad final del producto. Así, en los tratamientos con MEF, la mayor permeabilidad de las membranas celulares se alcanza con el uso de bajas frecuencias. Esto permite la formación de poros, generalmente reversibles, que facilitan la difusividad del agua durante el secado. En cuanto a la aplicación de PEF como pretratamiento al secado, reduce en gran medida los cambios físicos (textura) y sensoriales (color, aspecto) de los alimentos. Parámetros como la intensidad de campo o el número de pulsos son factores que determinan el nivel de permeabilización celular. Sin embargo, existen otros parámetros que tienen que ver directamente con el alimento, como la conductividad eléctrica, la morfología y la composición del alimento, que es necesario considerar.

Palabras clave: campos eléctricos, cinética de secado, calidad, intensificación, temperatura, tiempo

Autora: Sara Serrano García

Tutor: Juan Andrés Cárcel Carrión

VALENCIA, JULIO 2020

Title: Application of moderate electric fields (MEF) and high intensity electric pulses (PEF) in food dehydration

Abstract:

Dehydration is one of the most important basic operations in the food industry. However, traditional drying methods, despite creating safe foods, can lead to loss of nutritional, texture and taste characteristics due to high temperatures and long exposure times. This fact explains the interest in finding new technologies that reduce the processing time and temperature, and preserve the characteristics of the fresh product.

In recent years, the use of electric fields as a technique to improve mass transfer through cell membranes has sparked great interest in the food industry. Moderate Electric Fields (MEF) and Pulsed Electric Field (PEF) are some of the most promising technologies because of the electroporation. This effect can induce the permeabilization of cell membranes, which can be related with a reduction in drying times and a higher final quality of the product. Thus, in MEF treatments, the highest permeability of cell membranes is achieved with the use of low frequencies. This permits the pores creation, generally reversible, which facilitate the diffusivity of the water during drying. Regarding the application of PEF as a pretreatment to drying, it greatly reduces the physical (texture) and sensory (color, appearance) changes of the food. Parameters such as field strength or the number of pulses are factors that determine the level of cell permeabilization. However, there are other parameters directly related with the product, such as the electrical conductivity, morphology, and composition of the food, which need to be considered.

Key words: electric field, drying kinetics, quality, intensification, temperature, time

Author: Sara Serrano García

Tutor: Juan Andrés Cárcel Carrión

VALENCIA, JULY 2020

Títol: Aplicació de camps elèctrics moderats (MEF) i polsos elèctrics d'alta intensitat (PEF) en la deshidratació d'aliments

Resum:

La deshidratació constitueix una de les operacions bàsiques més importants en la indústria alimentària. No obstant això, els mètodes tradicionals d'assecat, malgrat crear aliments segurs, poden donar lloc a la pèrdua de les característiques nutricionals, de textura i sabor degut a les altes temperatures i llargs temps d'exposició. Sorgeix així l'interès per trobar noves tecnologies que disminuïsquen els temps i temperatures de l'operació, i que, al seu torn, conserven les característiques del producte fresc.

En els últims anys, l'ús de camps elèctrics com a tècnica per a millorar la transferència de massa a través de les membranes cel·lulars, ha despertat un gran interès en la indústria alimentària. Els camps elèctrics moderats (MEF) i els polsos elèctrics d'alta intensitat (PEF) són unes de les tecnologies més prometedores a causa de l'efecte de la electroporació, que genera una permeabilització de les membranes cel·lulars i que es pot relacionar amb una reducció dels temps d'assecat i una major qualitat final del producte. Així, en els tractaments amb MEF, la major permeabilitat de les membranes cel·lulars s'aconsegueix amb l'ús de baixes freqüències. Això permet la formació de porus, generalment reversibles, que faciliten la difusivitat de l'aigua durant l'assecat. Pel que fa a l'aplicació de PEF com a pretractament a l'assecat, redueix en gran mesura els canvis físics (textura) i sensorials (color, aspecte) dels aliments. Paràmetres com la intensitat de camp o el nombre de polsos són factors que determinen el nivell de permeabilització cel·lular. No obstant això, hi ha altres paràmetres que tenen a veure directament amb l'aliment, com la conductivitat elèctrica, la morfologia i la composició de l'aliment, que cal considerar.

Paraules clau: camps elèctrics, cinètica d'assecat, qualitat, intensificació, temperatura, temps

Autora: Sara Serrano García

Tutor: Juan Andrés Cárcel Carrión

VALÈNCIA, JULIOL 2020

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Operación de secado en la Industria Alimentaria	1
1.1.1.	Generalidades	1
1.1.2.	Secado convectivo	1
1.1.3.	Liofilización	2
1.1.4.	Ventajas e inconvenientes del secado	3
1.2.	Campos eléctricos en la Industria Alimentaria	4
1.2.1.	Campos Eléctricos Moderados (MEF)	4
1.2.1.1.	Calentamiento Óhmico	4
1.2.1.2.	Electroporación producida por MEF	4
1.2.2.	Pulsos Eléctricos de Alta Intensidad (PEF)	5
1.2.2.1.	Fenómeno de electroporación en aplicaciones de PEF	5
1.2.3.	Parámetros influyentes en el proceso	6
1.2.3.1.	Factores técnicos del campo eléctrico	6
1.2.3.2.	Factores intrínsecos de los productos tratados	9
1.2.4.	Equipos PEF y MEF	10
2.	APLICACIONES DE MEF EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA....	12
2.1.	Aplicación de MEF como pretratamiento al secado	13
2.1.1.	Influencia en la cinética de secado y la calidad del producto	13
3.	APLICACIONES DE PEF EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA	18
3.1.	Aplicación de PEF como pretratamiento al secado	18
3.1.1.	Influencia en la cinética de secado y la calidad del producto	18
4.	CONCLUSIONES	27
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w	1
Figura 2. Célula en un campo eléctrico (E). E_c : intensidad crítica del campo eléctrico.....	5
Figura 3. Pulso de onda cuadrada (izquierda) y pulso de caída exponencial (derecha).....	7
Figura 4. Onda cuadrada (arriba) y onda de sierra (abajo).....	9
Figura 5. Esquema general de los principales componentes de un equipo de pulsos eléctricos.....	10
Figura 6. Diseños de cámaras de tratamiento: (a) Placas paralelas; (b) coaxial; y (c) colineal	11
Figura 7. Esquema de un equipo de MEF	12
Figura 8. Macroestructura de manzana liofilizada no pretratada (izquierda) y manzana liofilizada pretratada con PEF ($E= 1.07$ kV/cm) (derecha)	20
Figura 9. Microestructura de ciruela deshidratada por aire caliente pretratada a 1, 2 y 3 kV/cm.....	21
Figura 10. Patata liofilizada sin pretratamiento (izquierda) frente a la patata pretratada con PEF y liofilizada (derecha)	21
Figura 11. Microestructura de zanahoria deshidratada por aire caliente: (a) sin pretratamiento; y pretratada a (b) 1.85_50, (c) 5_10, (d) 5_100 (ampliación x100)	22

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Influencia del pretratamiento MEF/óhmico en el secado de alimentos.	16
Tabla 2. Influencia del pretratamiento PEF en el secado de alimentos	23

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Operación de secado en la Industria Alimentaria

1.1.1. Generalidades

La deshidratación de alimentos es uno de los métodos más antiguos y empleados en la conservación de alimentos (Contreras, 2014). Fito *et al.* (2001) la definen como la operación básica en la cual el agua contenida en un sólido, o una disolución concentrada, se transfiere a la fase fluida que lo rodea debido a los gradientes de actividad de agua (a_w) entre ambas fases (**Figura 1**). Así, la reducción del contenido de agua de los alimentos puede realizarse mediante métodos mecánicos, como el prensado o la ósmosis inversa, o mediante métodos físico-químicos que incluyen un cambio de fase en el agua, como el secado por aire caliente, la atomización o la liofilización (García-Pérez, 2007).

El principal objetivo de la deshidratación es aumentar la estabilidad del producto. Esto se consigue deprimiendo la actividad del agua (a_w), lo que implica una reducción de las principales reacciones de deterioro en los alimentos, tanto de las reacciones químicas y enzimáticas como de las reacciones microbiológicas (Fito *et al.*, 2001). La reducción de la actividad del agua, además de alargar la vida útil del alimento, lleva consigo una pérdida del peso y el volumen de los alimentos, permitiendo disminuir los costes de almacenamiento y transporte de los mismos (Ozuna *et al.*, 2011).

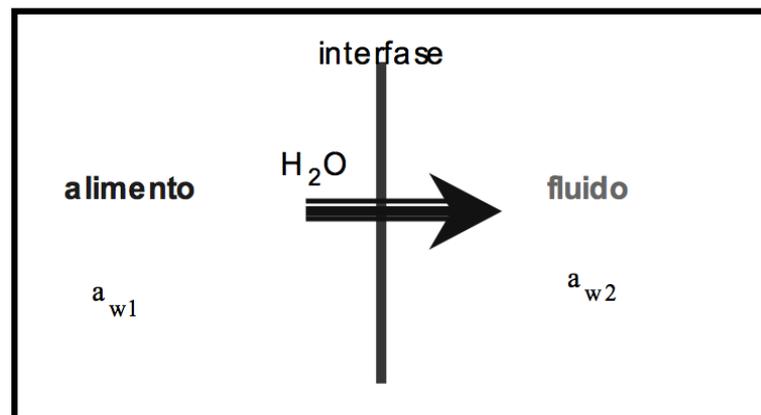


Figura 1. Esquema de las fases alimento-fluido entre las que se produce el transporte de agua durante la deshidratación debido a un gradiente de a_w (Fito *et al.*, 2001).

1.1.2. Secado convectivo

Muchos de los procesos de deshidratación que se aplican a nivel industrial se basan en el secado convectivo o secado por aire caliente (Stojceska *et al.*, 2019). Así, este tipo de secado engloba diferentes metodologías que se fundamentan en la aplicación de una corriente de aire (o de vapor de agua sobrecalentado) sobre el producto que se desea secar. La eliminación del agua se produce porque aparecen dos fenómenos de transporte simultáneos:

1. Transferencia de energía desde el medio de secado hacia el alimento, permitiendo el movimiento y la evaporación del agua del producto.
2. Transferencia de materia que supone el movimiento del agua desde el interior del alimento hasta su superficie para su posterior evaporación.

El transporte de agua desde la superficie del producto hasta el aire de secado depende de las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad de flujo de aire, además de la superficie expuesta del sólido y de la presión. Estas variables definen lo que se conoce como resistencia externa al transporte. Mientras tanto, el movimiento del agua en el interior del sólido viene condicionado por la naturaleza del alimento, así como de la temperatura y su contenido en humedad, variables que condicionan la llamada resistencia interna a la transferencia de agua. Por tanto, la velocidad de secado viene condicionada por ambas resistencias (García-Pérez, 2007).

1.1.3. Liofilización

La liofilización es una operación de secado que tiene lugar a bajas temperaturas y a vacío, concretamente por debajo del punto triple (0.01°C, 0.00603 atm), punto en el que coexisten las tres fases (líquido, sólido y gas) en equilibrio (Baheti *et al.*, 2010).

La liofilización a vacío se compone de tres etapas principales:

1. Congelación inicial
2. Secado primario (sublimación)
3. Secado secundario (desorción)

En la primera etapa, el alimento se enfría a una temperatura inferior a la de su punto de congelación (Ferrada, 2018), normalmente entre -45 y -20 °C (Nireesha *et al.*, 2013), con la finalidad de congelar el agua libre del producto. Hay que tener en cuenta que no toda el agua será congelable, pues existen sólidos disueltos que, a medida que disminuye la temperatura, se concentran y forman una suspensión viscosa, la cual dificulta la liofilización. En esta etapa, el factor más importante es la velocidad de congelación, ya que determinará el tamaño de los cristales de hielo, condicionando la calidad final del producto. Cuando la congelación es rápida se forman pequeños cristales que permiten conservar la estructura de los alimentos y facilitar la rehidratación. Sin embargo, si el producto se congela lentamente, se formarán grandes cristales de hielo que destruirán la matriz celular de los alimentos (Nireesha *et al.*, 2013; Gaidhani *et al.*, 2015).

Una vez el producto está congelado, se baja la presión del sistema con el fin de sublimar el agua contenida en el alimento (Ferrada, 2018). Para facilitar la sublimación del hielo es necesario que la presión de la cámara sea menor que la presión de vapor del hielo, pues una presión demasiado alta o baja (<50 mTorr) no conduce a una sublimación rápida (Gaidhani *et al.*, 2015). Este proceso suele realizarse entre 10^{-4} y 10^{-5} atmósferas de presión (Nireesha *et al.*, 2013) a la vez que se aplica calor al producto para favorecer el paso de hielo a vapor de agua (el calor latente del hielo equivale a 2838 kJ/kg) (Ramírez-Navas, 2006).

Una vez ha sublimado todo el hielo, existe todavía aproximadamente un 7-8% de agua ligada en el producto. Por este motivo, es necesario aplicar una temperatura más alta para reducir la humedad residual mientras se mantienen las bajas presiones. Este proceso recibe el nombre de "desorción" (Gaidhani *et al.*, 2015). Finalmente, una vez se ha secado el producto, se restaura la presión del sistema hasta la presión atmosférica (Ferrada, 2018).

Trabajar a bajas temperaturas durante el proceso de deshidratación ofrece numerosas ventajas, entre ellas, un aumento de la estabilidad microbiológica o la ausencia de daño térmico en componentes termolábiles. Además, la sublimación del agua durante el proceso protege la estructura primaria del alimento produciendo insignificantes modificaciones tanto en la forma del producto como en su volumen (Nireesha *et al.*, 2013). De hecho, la liofilización está considerada como el mejor método de secado en relación con la calidad final del producto, pues ésta es mayor en comparación con otros procesos convencionales. No obstante, debido a su alto coste, no es utilizado en la industria alimentaria de forma masiva y se reserva para productos de muy alto valor añadido. En todo caso, debido a la preocupación por obtener alimentos de calidad, podría considerarse una alternativa para la conservación de algunos productos (Ratti, 2001).

1.1.4. Ventajas e inconvenientes del secado

Como se ha comentado, el secado pertenece a las operaciones unitarias más populares en la industria alimentaria, ya que es un procedimiento relativamente barato que permite obtener la estabilidad total del alimento. Sin embargo, la mayoría de los procesos de secado por aire caliente utilizan la combustión de combustibles fósiles como fuente de energía. Esto, unido a la baja eficacia de la mayoría de los procesos, hace que el secado genere un alto consumo energético (Stojceska *et al.*, 2019) y produzca una alta contaminación (Fito *et al.*, 2001). En el caso de la liofilización, el uso de bajas temperaturas y las necesidades de vacío, hacen que el consumo energético sea todavía mayor. El elevado calor latente del agua y la estructura de los alimentos, tanto de origen animal como vegetal, limitan los procesos de transferencia de calor y masa y aumentan las necesidades energéticas del secado. De hecho, en el sector alimentario, el secado supone alrededor del 12% del consumo total de la energía (Wiktor & Witrowa, 2019).

Actualmente, existe una presión por parte de los gobiernos hacia la industria alimentaria con el propósito de maximizar la eficiencia energética, reduciendo el consumo y las emisiones, y proporcionando al mismo tiempo alimentos de máxima calidad y con el mínimo incremento del precio. Una de las formas de mejorar la eficiencia energética en la industria alimentaria es con el uso de tecnologías más eficientes energéticamente (Stojceska *et al.*, 2019).

Por otro lado, la calidad del producto obtenido depende en gran medida de la metodología de secado empleada. El secado por aire caliente, al contrario que la liofilización, requiere tiempos de secado más cortos. Sin embargo, la exposición prolongada de la materia prima a corrientes de aire y temperaturas elevadas (Stojceska *et al.*, 2019) produce cambios físicos y químicos que afectan a la calidad del producto final en términos de textura y de propiedades nutricionales, como el contenido en vitaminas y la actividad antioxidante (do Nascimento *et al.*, 2016).

Por todo ello, la industria alimentaria se enfrenta al desafío de encontrar procesos de secado que reduzcan el tiempo del proceso, que optimicen el consumo energético y que permitan aplicar unas condiciones moderadas que maximicen la calidad del producto final (Llavata *et al.*, 2020).

1.2. Campos eléctricos en la Industria Alimentaria

En las últimas décadas, el uso de campos eléctricos como tratamiento de alimentos está recibiendo especial atención en la industria alimentaria (Basset & Vorobiev, 2002). Estas aplicaciones pueden incluir operaciones tan variadas como métodos rápidos y uniformes de calentamiento o de procesamiento a bajas temperaturas (Fernández-Molina *et al.*, 2001).

Existen principalmente dos técnicas de aplicación, el uso de campos eléctricos moderados (MEF) (Sensoy & Sastry, 2004) y los pulsos eléctricos de alta intensidad (PEF) (Rivas, 2012).

1.2.1. Campos Eléctricos Moderados (MEF)

Aunque no existe una definición formal del concepto de campo eléctrico moderado, Sensoy & Sastry (2004) la definen como un proceso de permeabilización controlada de estructuras celulares, posiblemente reversible, debido a la aplicación de campos eléctricos, generalmente en el rango de 1 a 1000 V/cm (Pereira *et al.*, 2019), y con formas de onda arbitrarias, con o sin efectos de calentamiento óhmico atenuantes. Dependiendo de la exposición eléctrica y el efecto térmico del tratamiento, es posible obtener una amplia variedad de efectos en materiales biológicos.

1.2.1.1. Calentamiento Óhmico

El calentamiento óhmico se define como un proceso térmico donde el paso de una corriente eléctrica de intensidad moderada a través de un alimento produce un calentamiento del mismo debido a su resistencia al paso de corriente (Valderrama, 2018). Así, en función de las propiedades eléctricas de los componentes del alimento se genera una respuesta a la corriente alterna. En comparación con los métodos convencionales de calentamiento, el tratamiento óhmico presenta diferentes ventajas entre las que se incluye la producción de un calentamiento rápido y uniforme de los alimentos, con cambios estructurales, nutricionales y organolépticos mínimos (Moreno *et al.*, 2012).

1.2.1.2. Electroporación producida por MEF

El uso de campos eléctricos moderados para producir calentamiento en diferentes productos es conocido desde hace tiempo. Sin embargo, investigaciones recientes indican que el tratamiento óhmico puede generar un daño celular leve debido a la presencia del campo eléctrico, y no como consecuencia de un proceso térmico (Knirsch *et al.*, 2010). Es decir, durante el tratamiento óhmico, el campo eléctrico puede alterar la permeabilidad de las membranas celulares vegetales por debajo de la temperatura a la cual las membranas se permeabilizarían si fueran tratadas térmicamente. La razón principal de este efecto podría ser la baja frecuencia empleada (entre 50-60 Hz), que permite que las paredes celulares acumulen cargas y formen poros (Moreno *et al.*, 2012), generalmente reversibles (Poojary *et al.*, 2016). Este fenómeno recibe el nombre de electroporación (**Figura 2**), y está recibiendo especial atención, ya que puede emplearse, entre otras aplicaciones, para manipular células y tejidos (Moreno *et al.*, 2012). Así, la influencia del campo eléctrico aumenta la tasa de electroporación, lo que lleva a un exceso de exudación y muerte celular. Como consecuencia, se mejora la permeabilidad de la membrana

y se logra la difusión del material a través de la membrana mediante electroósmosis (Knirsch *et al.*, 2010). Un efecto combinado de la electroporación y la electroósmosis a menudo se relaciona indirectamente con la intensificación de la difusión de masa y los cambios de conductividad eléctrica (Basset & Vorobiev, 2002).

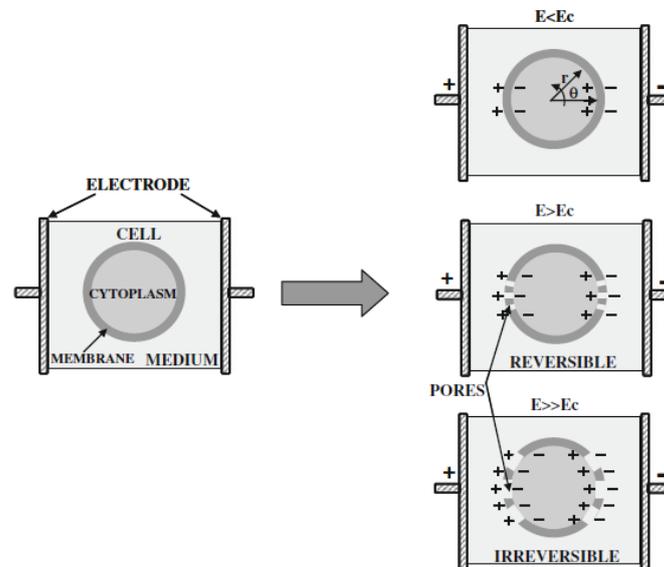


Figura 2. Célula en un campo eléctrico (E). E_c : intensidad crítica del campo eléctrico (Donsi *et al.*, 2010).

1.2.2. Pulsos Eléctricos de Alta Intensidad (PEF)

Otras de las técnicas basadas en la aplicación de energía eléctrica están constituidas por el uso de pulsos eléctricos de alta intensidad (Fernández-Molina *et al.*, 2001). En este caso, se trata de un tratamiento no-térmico (Menor, 2019), que consiste en la aplicación de pulsos eléctricos de corta duración (μs o ms) y de un alto voltaje (0.1-1000 kV/cm (Martín, 2018)) a un producto que se encuentra entre dos electrodos (Rizvi *et al.*, 2018). En este caso, los pulsos emplean una corriente continua y el fenómeno de electroporación sobre la membrana celular puede ser mucho más intenso que en el caso de la aplicación de MEF (Rivas, 2012), facilitando la difusión de la humedad y pudiendo mejorar el proceso de secado (Lebovka *et al.*, 2007).

1.2.2.1. Fenómeno de electroporación en aplicaciones de PEF

Como en el caso de los MEF, en la aplicación de pulsos eléctricos de alto voltaje (PEF) se produce el fenómeno de la electroporación (Joannes *et al.*, 2015). En este caso, dicha electroporación puede ser reversible o irreversible dependiendo de los parámetros empleados (**Figura 2**). Así, cuando el tratamiento se realiza con una intensidad no muy elevada, los poros que se forman en las membranas pueden facilitar el intercambio con el entorno, pero, pasado un tiempo, la célula se recupera y la membrana celular vuelve a su disposición original. Sin embargo, cuando la célula se somete a un campo eléctrico que supera la intensidad crítica del mismo, se forman poros de membrana grandes e irreversibles (Toepfl, 2006), produciendo la inactivación celular (Wiktor *et al.*, 2018). Actualmente, la industria alimentaria está poniendo el foco de la investigación en este tipo de electroporación para su aplicación en el control

microbiológico (Kempkes, 2017). Por este motivo, los parámetros de tratamiento deben seleccionarse previamente para conseguir la eficiencia deseada (Wiktor *et al.*, 2018), pues el grado de electroporación depende de varios factores, como la intensidad del campo eléctrico, el tipo de onda, el tiempo de tratamiento y el número de pulsos, así como del tipo de alimento (Cerón-Carrillo *et al.*, 2010).

Para medir el grado de permeabilidad de la membrana generado por un tratamiento de PEF, se emplea el Índice de Desintegración Celular (IDC), el cual se basa en la mayor o menor facilidad que tiene una corriente eléctrica para pasar a través de un alimento (Crespo, 2015). El IDC se expresa como:

$$Z = \frac{(\sigma_h^i / \sigma_h^t) \sigma_l^t - \sigma_l^i}{\sigma_h^i - \sigma_l^i} \quad (Ec. 1)$$

donde σ_l^t, σ_l^i son la conductividad eléctrica de la muestra tratada y la no tratada, a una baja frecuencia, respectivamente, y donde σ_h^i, σ_h^t son la conductividad eléctrica de las muestras no tratadas y tratadas a alta frecuencia, respectivamente.

El Índice de Desintegración Celular caracteriza la proporción del daño celular, de manera que las células intactas tendrán un valor de $Z = 0$, a diferencia de las totalmente desintegradas, que tendrán un valor de $Z = 1$ (Donsi *et al.*, 2010).

1.2.3. Parámetros influyentes en el proceso

Durante la aplicación de campos eléctricos existen diferentes parámetros, técnicos del campo eléctrico aplicado y características del propio alimento, que han de considerarse, ya que influyen significativamente en el proceso.

1.2.3.1. Factores técnicos del campo eléctrico

INTENSIDAD DEL CAMPO ELÉCTRICO

La intensidad del campo eléctrico (E) se define como la diferencia de potencial eléctrico que existe entre los dos electrodos dividido por la distancia que hay entre ellos:

$$E = \frac{V}{d} \quad (Ec. 2)$$

donde E es la intensidad del campo eléctrico (V/cm); V , la diferencia de potencial (V) y d , la distancia entre los electrodos (cm).

Sin embargo, la intensidad del campo eléctrico también está determinada por el tipo de cámara de tratamiento. Para cámaras con placas paralelas se emplea la Ec. 2, mientras que para las cámaras de tipo coaxial o colineal, la intensidad de campo se determinará mediante la Ec. 3:

$$E = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{R2}{R1}} \quad (Ec. 3)$$

donde E es la intensidad del campo eléctrico, V es el voltaje aplicado, r es el radio del punto donde se determina el campo eléctrico y $R1$ y $R2$ son los radios de las superficies de los electrodos (Rivas, 2012).

Como ya hemos comentado, en MEF se aplican intensidades inferiores a 1 kV/cm (Pereira *et al.*, 2019), mientras que en PEF el rango de intensidad está aproximadamente entre 0.1 kV/cm y 1000 kV/cm (Martín, 2018).

FORMA DEL PULSO

En PEF la forma del pulso depende de la configuración de los condensadores, las resistencias y el tipo de interruptores. Los tipos de pulsos más empleados son los pulsos de onda cuadrada y los pulsos de caída exponencial. En los pulsos de onda cuadrada (**Figura 3**) se produce un rápido incremento del potencial hasta alcanzar el voltaje de trabajo. Éste se mantiene durante un periodo de tiempo y luego cae hasta volver a alcanzar un potencial cero. Esto ocurre cuando la descarga de los condensadores está programada para mantener el voltaje seleccionado durante la duración del pulso. Por el contrario, en los pulsos de caída exponencial (**Figura 3**) se produce una descarga completa y no regulada de los condensadores, provocando un incremento rápido del voltaje y una disminución progresiva del mismo.

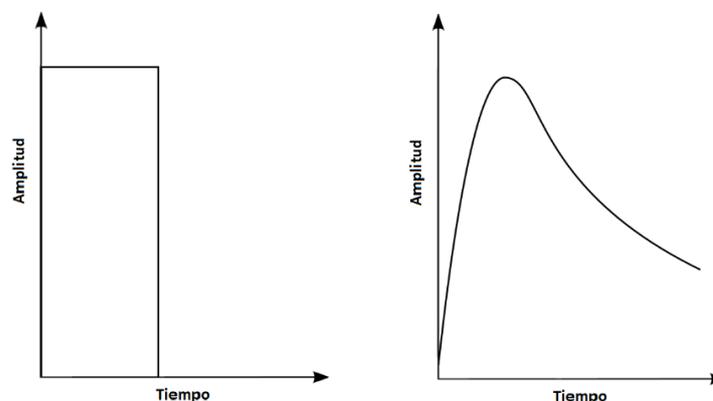


Figura 3. Pulso de onda cuadrada (izquierda) y pulso de caída exponencial (derecha).

Los pulsos de onda cuadrada son los más recomendados, ya que toda la energía se aplica al tratamiento, a diferencia de los pulsos de caída exponencial, donde parte de la energía no será efectiva para producir la electroporación de las células.

Ambos tipos de pulso pueden ser monopolares, que es cuando todos los pulsos tienen el mismo signo, o bipolares, si los pulsos cambian de signo sucesivamente. El cambio de polaridad del pulso provoca que las moléculas cargadas cambien su orientación y se genere un mayor estrés en la membrana plasmática. Esto contribuye a la electroporación de las células y minimiza la acumulación de componentes del medio en los electrodos. Sin embargo, para este tipo de tratamiento se requieren equipos muy costosos (Rivas, 2012; Crespo, 2015).

ANCHURA DEL PULSO

La anchura del pulso (τ) en PEF varía en función del tipo de onda. En los pulsos cuadrados, el ancho de banda corresponde con la duración del pulso, mientras que, en los pulsos de caída exponencial la anchura del pulso se corresponde con el tiempo durante el cual el voltaje es superior al 37% del valor máximo conseguido en la descarga (Raventós, 2005). Además, en estos últimos, la onda está condicionada por la resistencia de la cámara de tratamiento, por lo que, factores como la temperatura y la conductividad de la cámara pueden modificar la anchura del pulso (Martín, 2018).

La aplicación de pulsos con un ancho de banda menor evita que la muestra aumente excesivamente su temperatura, reduce la migración de materiales del electrodo al medio y limita la formación de compuestos tóxicos (Rivas, 2012).

ENERGÍA DEL PULSO

Un parámetro importante que hay que tener en cuenta es la energía consumida durante el proceso. Así, al aplicar una diferencia de potencial entre los electrodos se genera una corriente eléctrica a través del producto. La energía aplicada por pulso (Q) (J) puede calcularse según la forma del pulso:

Onda de caída exponencial:

$$Q = \frac{1}{2} \frac{V^2 \tau}{R} \quad (\text{Ec. 4})$$

Onda cuadrada:

$$Q = \frac{V^2 \tau}{R} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde V es la diferencia de potencial entre los electrodos (V), τ la anchura del pulso (s) y R la resistencia que genera la cámara de tratamiento al paso de la corriente (Ω).

La energía total aplicada en el tratamiento es el producto de multiplicar la energía aplicada en cada pulso por el número de pulsos (Rivas, 2012).

La energía específica (W_s) del pulso es el resultado del cociente entre la energía del pulso y la masa del alimento. Puede hacerse una estimación del coste energético del tratamiento multiplicando la energía específica por el número de pulsos (Crespo, 2015).

TIEMPO DE TRATAMIENTO

El tiempo de tratamiento (t_t) se define como el producto del número de pulsos aplicados (n) por su anchura (τ), y suele expresarse en microsegundos (Crespo, 2015).

FORMA DE LA ONDA

En MEF, a diferencia de PEF, no hablamos de forma de pulso, sino de forma de onda puesto que la corriente que se emplea es corriente alterna. La forma de onda más común es la sinusoidal (Thamkaew & Gómez, 2020), aunque también suelen utilizarse las ondas cuadradas y las de sierra (**Figura 4**). Sin embargo, la onda cuadrada es la que menos favorece el aumento del valor de la conductividad eléctrica (Zareifard *et al.*, 2014).

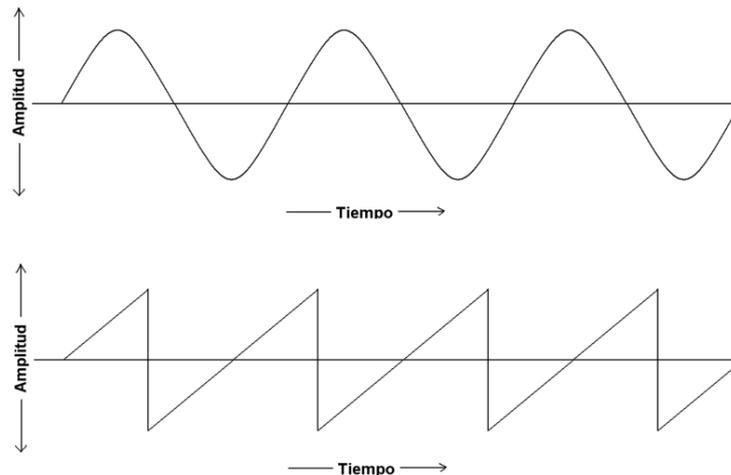


Figura 4. Onda cuadrada (arriba) y onda de sierra (abajo) (Martínez-Zorrilla, 2008).

FRECUENCIA

En PEF la frecuencia (f) es el número de pulsos por unidad de tiempo y se mide en Hz, es decir, pulsos por segundo. Las frecuencias de aplicación varían entre 1 y 500 Hz (Martín, 2018). En MEF las frecuencias utilizadas (ciclos por segundo (Martínez-Zorrilla, 2008)) suelen ser bajas. Las más comunes se encuentran entre 50 y 60 Hz (Shiby *et al.*, 2014).

TEMPERATURA

Ante cualquier tratamiento con pulsos eléctricos se genera un incremento de temperatura en el medio o alimento que puede ser relativamente importante o despreciable. Sin embargo, la temperatura del medio influye en el tratamiento, pues afecta a la estabilidad de las membranas. Así, a medida que la temperatura se incrementa, la membrana pasa de un estado de gel a un estado líquido-cristalino (Martín, 2018). En MEF el aumento de temperatura se produce debido al efecto del calentamiento óhmico. La temperatura tendrá un efecto lineal sobre la conductividad eléctrica del producto (Valderrama, 2018).

1.2.3.2. Factores intrínsecos de los productos tratados

La conductividad eléctrica (σ) del producto es el principal parámetro que define la efectividad de los tratamientos con campos eléctricos (Rivas, 2012). Dicha conductividad eléctrica viene determinada por características de los alimentos, como la composición química, el estado físico y la temperatura (Gavahian *et al.*, 2019). Así, un tratamiento eléctrico será más efectivo en alimentos que contienen la suficiente cantidad de agua y electrolitos como para

dejar pasar esa corriente eléctrica (Knirsch *et al.*, 2010). Por lo contrario, los alimentos de baja conductividad eléctrica deberán combinarse con una disolución de cloruro de sodio para aumentar la conductividad total (Valderrama, 2018).

Según Cerón-Carrillo *et al.* (2010), los alimentos con conductividades eléctricas grandes generan picos de campos eléctricos menores, lo que se traduce en una disminución de la fuerza de campo. Es por ello que para tratar alimentos con conductividades altas, debe aumentarse el voltaje para mantener la fuerza deseada. Por lo tanto, un aumento excesivo de la conductividad eléctrica, por ejemplo, inyectando disoluciones salinas en el producto, implicaría un aumento de la energía administrada, lo que se traduciría en un mayor incremento de la temperatura durante el proceso que, a su vez, podría afectar a la calidad.

1.2.4. Equipos PEF y MEF

El equipo básico para aplicar pulsos eléctricos (**Figura 5**) está constituido por un generador de energía, una cámara de tratamiento y un sistema de control encargado de monitorizar los parámetros del proceso (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009).

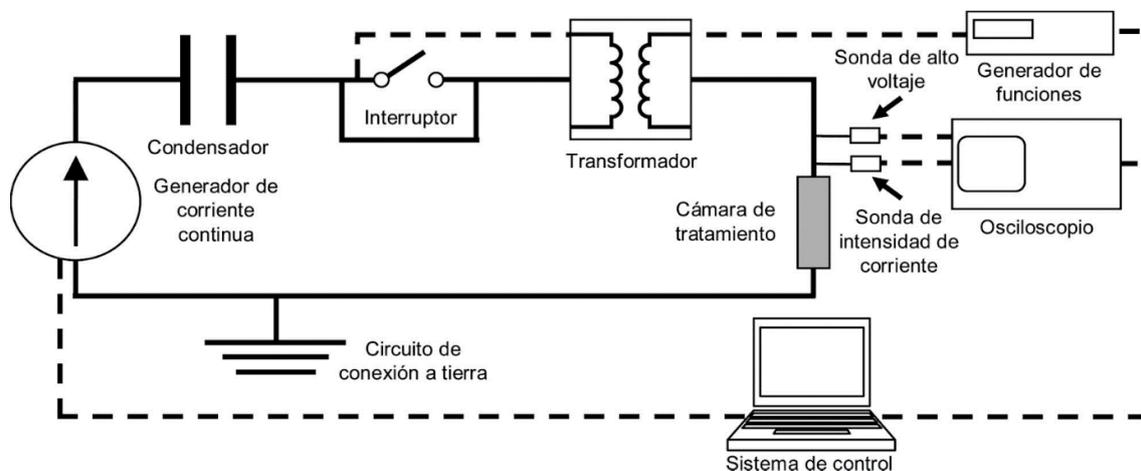


Figura 5. Esquema general de los principales componentes de un equipo de pulsos eléctricos (Puértolas *et al.*, 2013).

GENERADOR DE ENERGÍA

El generador de energía está compuesto por tres elementos: un sistema de carga, un condensador (generador de alto voltaje) y un interruptor. El generador se encarga de transformar la corriente alterna en corriente continua y carga el condensador, que es el lugar en el que se almacena la energía (W) (Martín, 2018).

Los interruptores, además de controlar la frecuencia, la duración y la forma del pulso, son los componentes encargados de comunicar la energía a los electrodos que configuran la cámara de tratamiento.

CÁMARA DE TRATAMIENTO

La cámara de tratamiento consta de dos electrodos, uno conectado al condensador a través del interruptor y el otro conectado a tierra, entre los cuales hay un espacio para colocar las muestras. Existen tres tipos de cámaras de

tratamiento, tal y como se muestra en la **Figura 6**, en función de la disposición de los electrodos: cámaras de placas paralelas, de cilindros coaxiales y de cilindro colineal.

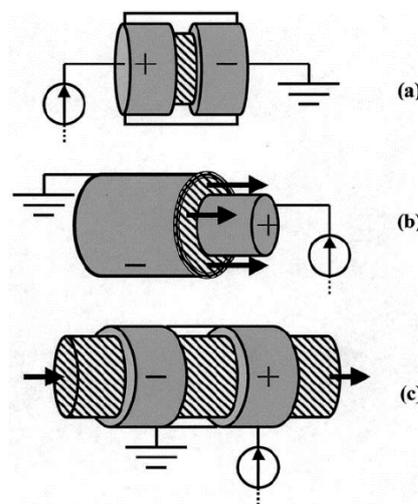


Figura 6. Diseños de cámaras de tratamiento: (a) Placas paralelas; (b) coaxial; y (c) colineal (Rivas, 2012).

La disposición de electrodos en paralelo se utiliza en equipos de funcionamiento en discontinuo donde la diferencia de potencial se genera perpendicularmente al flujo. La principal ventaja de este diseño es que la intensidad del campo eléctrico se distribuye de forma uniforme en toda la cámara. Sin embargo, la superficie de los electrodos, al ser demasiado amplia, implica un gasto energético elevado (Martín, 2018).

En la disposición de cilindros coaxiales, el alimento fluye entre dos electrodos cilíndricos situados concéntricamente (Rivas, 2012). Uno de los electrodos se encuentra en el interior en forma de cilindro, normalmente el generador, y el otro electrodo exterior concéntrico está conectado a tierra. La diferencia de potencial se produce perpendicularmente al flujo de los alimentos. Sin embargo, la intensidad del campo eléctrico no es uniforme en toda la cámara. Su principal inconveniente reside en el alto coste energético que produce debido a la gran superficie de los electrodos. De hecho, para conseguir la energía necesaria para su funcionamiento son necesarios generadores muy potentes (Martín, 2018).

Por último, las cámaras colineales están formadas por dos discos, separados entre piezas aislantes. Se diferencian de las paralelas y las coaxiales en que la diferencia de potencial se genera en el sentido en el que fluye el alimento. Al tratarse de dos discos, la superficie de contacto se reduce y por tanto, las necesidades energéticas son menores. La principal desventaja de este tipo de cámara es que la distribución del campo eléctrico no es uniforme (Martín, 2018).

El producto se dispone entre los electrodos, que están separados por materiales aislantes que no interaccionan con el producto. Normalmente, estos materiales son de tipo cerámico o polímeros plásticos. En cuanto a los materiales para los electrodos, el acero inoxidable, el titanio y el grafito son los más utilizados (Rivas, 2012). Sin embargo, durante el tratamiento con PEF se puede producir una migración de iones de los electrodos hacia el alimento (Evrendilek *et al.*,

2004), sobre todo cuando se emplean soluciones con un pH bajo (Gad & Jayaram, 2011). Esto supone una contaminación que puede comprometer la seguridad del proceso. Actualmente se está investigando el uso de recubrimientos de materiales plásticos o cerámicos para evitar o minimizar este problema (Puértolas *et al.*, 2013).

SISTEMA DE CONTROL Y REGISTRO DE DATOS

Para asegurar que el tratamiento que se aplica se corresponde con lo que se desea, es necesario que el equipo disponga de un sistema en el que se registren parámetros como la forma del pulso, el número de pulsos, el voltaje aplicado y la intensidad de corriente (Rivas, 2012). También es necesario tener un control de la temperatura del proceso, ya que ésta, como se ha visto, puede influir en la conductividad eléctrica del producto y en la intensidad del campo eléctrico aplicado. Para ello se emplearán sondas termopares o de fibra óptica (Martín, 2018).

La principal diferencia que existe entre los equipos de PEF y los equipos de MEF (**Figura 7**) reside en que los últimos tienen una aplicación más directa de corriente eléctrica (no incluyen condensadores ni forman pulsos) al emplear corriente alterna y no corriente continua como lo hacen los equipos de PEF (Thamkaew & Gómez, 2020).

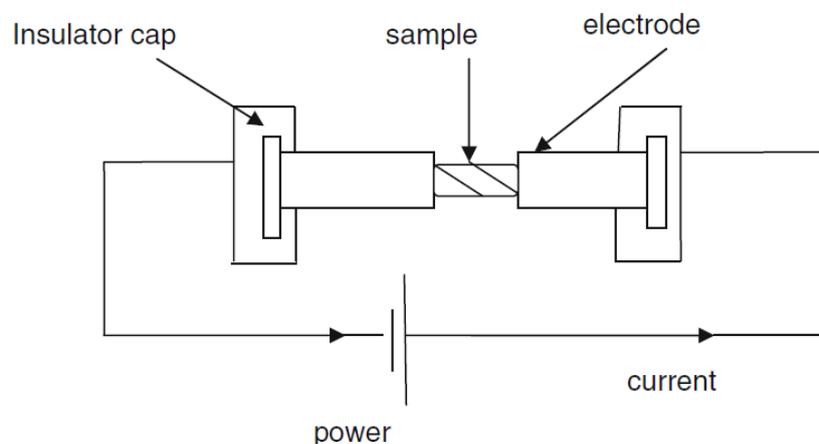


Figura 7. Esquema de un equipo de MEF (Shiby *et al.*, 2014).

2. APLICACIONES DE MEF EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

El calentamiento óhmico está recibiendo especial importancia en la industria alimentaria por considerarse una alternativa a los métodos de calentamiento indirecto (Castro *et al.*, 2004). Las aplicaciones térmicas más comunes incluyen: cocción, escaldado y descongelación (Shiby *et al.*, 2014). Sin embargo, una de las aplicaciones no térmicas más aceptadas a nivel industrial es la pasteurización / esterilización de productos sólidos y líquidos. Aquí, la letalidad microbiana viene dada por un efecto no-térmico (electroporación) que depende de la intensidad del campo eléctrico aplicado, el tiempo de tratamiento, la especie microbiana y el tipo de producto. Sin embargo, la razón principal del efecto podría ser el uso de bajas frecuencias (50-60 Hz) (Goullieux & Pain, 2014).

El incremento de la permeabilidad que se genera a partir de campos eléctricos moderados también favorece otras operaciones, como la extracción de zumos (Sensoy & Sastry, 2004) y de aceites (Pare *et al.*, 2014; Sheshrao *et al.*, 2016; Valderrama, 2018). Además, se cree que la electroporación causada por MEF, a temperaturas subletales, puede asistir a los microorganismos que participan en procesos de fermentación acelerando el proceso. La permeabilidad de la membrana también tiene una aplicación muy interesante en la deshidratación osmótica de frutas y vegetales, ya que la formación de poros facilita la eliminación de agua y favorece la impregnación de una solución saturada de azúcar (Moreno *et al.*, 2012).

Por otra parte, el uso del calentamiento óhmico como método de cocción de alimentos posee numerosas ventajas en comparación con los métodos de calentamiento tradicionales. Los productos tratados mediante calentamiento óhmico presentan tiempos de procesamiento más cortos, mayor rendimiento y menor consumo de energía al presentar un calentamiento más uniforme. La morfología y la composición del alimento juegan un papel muy importante en el tratamiento, ya que afectan directamente a la conductividad eléctrica del producto (Yildiz-Turp *et al.*, 2013).

El escaldado es una de las operaciones más importantes en el procesado de alimentos vegetales al suponer la destrucción enzimática. El blanqueo convencional por agua o vapor de agua conduce a la pérdida de sólidos solubles, lo que obliga a tratar las aguas residuales. Este proceso consume mucho tiempo y energía (Goullieux & Pain, 2014). El escaldado mediante calentamiento óhmico, en comparación con los métodos de escaldado tradicionales, reduce en gran medida la pérdida de sólidos y el tiempo de inactivación enzimática (Icier *et al.*, 2006).

Por último, el calentamiento óhmico también se puede utilizar como método para descongelar alimentos de forma uniforme sin generar aguas residuales. Esto evita que se produzca un crecimiento microbiano en la superficie del producto, cosa que puede ocurrir durante la descongelación convencional, y permite un ahorro de tiempo y energía (Goullieux & Pain, 2014).

2.1. Aplicación de MEF como pretratamiento al secado

La aplicación de campos eléctricos moderados puede ser útil para mejorar la eliminación del agua durante los procesos de secado. Como ya se ha comentado, los procesos de secado, como la liofilización o el secado por aire caliente, consumen mucho tiempo y energía, por lo que se está estudiando el pretratamiento con MEF como una posible alternativa para acelerar dichos procesos (Goullieux & Pain, 2014) (**Tabla 1**).

2.1.1. Influencia en la cinética de secado y la calidad del producto

Generalmente, cuando se aplican campos eléctricos moderados como pretratamiento a un secado por aire caliente existe una relación entre el aumento del gradiente de voltaje y el incremento en la velocidad de transferencia de masa durante el secado. Sin embargo, esto no sólo depende de la intensidad del campo, sino de otros factores como la temperatura o la frecuencia empleada.

En el rango de intensidades bajas, y cuando se alcanzan temperaturas muy altas, aparece un incremento de la velocidad de secado a medida que aumenta la intensidad. Esto lo observaron Hosainpour *et al.* (2012) en muestras de tomate en las que se aplicó un pretratamiento de MEF con un gradiente de intensidades de entre 6 y 16 V/cm (durante 26 y 3.42 min, respectivamente) y una temperatura de secado de 105 °C. En las muestras pretratadas a 16 V/cm se redujo el tiempo de secado un 87% en comparación con las muestras pretratadas a 6 V/cm. Ello se puede deber a que a mayor intensidad de campo se genera un mayor nivel de electroporación, y por tanto, mayor es la energía que se genera en las moléculas de agua, pudiendo escapar más fácilmente. No obstante, Kutlu *et al.* (2018) estudiando el secado de manzana a temperaturas más bajas (60 °C), aplicaron un pretratamiento con MEF a intensidades un poco más altas (20, 30, 40 V/cm) durante 1 minuto a 60 °C, y observaron que la velocidad de secado por aire caliente fue mayor en las muestras pretratadas a una intensidad intermedia de 30 V/cm. A esta intensidad se redujo el tiempo de secado en un 35% en comparación con las muestras tratadas a 20 y 40 V/cm que presentaban una reducción del 24% y 29%, respectivamente, respecto al secado convencional.

Como ya se ha comentado, las variaciones en la cinética de secado no son únicamente fruto de un aumento de la intensidad, pues para una misma intensidad se puede disminuir el tiempo de secado mediante gradientes de temperatura. Esto lo observaron Stojceska *et al.* (2019) en productos cítricos (naranja y pomelo) sometiéndolos a una intensidad de 30 V/cm y variando la temperatura entre 70 y 100 °C. Así, la naranja incrementó su conductividad a 70 °C mientras que el pomelo lo hizo a 100 °C, probablemente debido a las diferencias en la composición de sólidos en ambos productos. Por tanto, la composición de los alimentos es un factor que se debe considerar en la elección del tipo de tratamiento.

Uno de los factores de los tratamientos MEF más influyentes en la velocidad de secado por aire caliente es la frecuencia. Los resultados que hay en la bibliografía parecen indicar que el uso de frecuencias más bajas puede inducir que se alcancen velocidades de secado más altas. Esto se debe a que las frecuencias bajas aumentan la difusión del contenido en humedad debido a la descomposición de la pared celular que se genera tras la electroporación (Wang & Sastry, 2000). Lima & Sastry (1999) estudiaron la influencia de MEF como pretratamiento al secado por aire caliente de ñame (51.7 °C) a partir de dos tratamientos paralelos a 80 °C. En el primer pretratamiento se emplearon intensidades de campo de 40, 60 y 70 V/cm a 60 Hz con un tipo de onda sinusoidal, mientras que el segundo tipo de pretratamiento emplearon una intensidad de 20 y 40 V/cm con una onda de sierra a una frecuencia de 4 Hz. Aquí observaron que la mayor velocidad de secado se obtenía con una onda de 4 Hz (onda de sierra) y una intensidad de 40 V/cm.

Sin embargo, la influencia de los pretratamientos con MEF en el secado al vacío podría ser distinto que en el secado por aire caliente en función del tipo de alimento. Según Zhong & Lima (2003), el calentamiento óhmico alteró la velocidad de secado por liofilización de batata. En cambio, la temperatura y la intensidad no fueron factores significativos que afectaran a la velocidad de secado. Estos resultados difieren de los estudios previos de Lima & Sastry (1999), donde demostraron que al aumentar la intensidad del campo eléctrico, aumentaba la tasa de secado por aire caliente. No obstante, Zhong & Lima (2003), afirmaron que, aunque la temperatura y la intensidad no fueran parámetros significativos,

las muestras de batata pretratadas tuvieron tiempos de secado más rápidos que las muestras no pretratadas. Icier *et al.* (2017) estudiando la influencia del MEF en la evaporación al vacío de zumo de granada observaron que, a medida que se aumentó el gradiente del voltaje (de 7.5 V/cm a 12.5 V/cm), se generó más calor dentro de la muestra debido al aumento de energía. Como consecuencia, la conductividad eléctrica creció linealmente con la temperatura y disminuyó el tiempo necesario para alcanzar una concentración del 40% del contenido total de materia seca soluble.

Por otro lado, el tratamiento mediante campos eléctricos moderados, además de tener un impacto sobre la cinética de secado, también puede influir sobre la calidad del producto. El hecho de que los productos deshidratados mantengan las propiedades nutricionales del producto original es de especial importancia para el consumidor. La vitamina C, por ejemplo, es uno de los antioxidantes más importantes en la industria alimentaria y normalmente se utiliza como indicador del daño producido por el proceso de secado. Es por ello que, Stojceska *et al.* (2019) estudiaron la influencia del pretratamiento con MEF (30 V/cm; 70-100 °C) en el pH y el contenido de vitamina C en naranja y pomelo. Los resultados que obtuvieron indican que el pretratamiento no afectó significativamente al contenido de ácido ascórbico. Sin embargo, en las muestras de naranja tratadas a 70 °C sí que se observaron variaciones significativas en el pH.

Tabla 1. Influencia del pretratamiento MEF/óhmico en el secado de alimentos.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Kutlu <i>et al.</i> (2018)	Manzana	E= 20, 30 y 40 V/cm T= 60 °C t= 1 min	Aire caliente	T= 60 °C V= 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado 	<ul style="list-style-type: none"> Las muestras pretratadas a 30 V/cm obtuvieron los tiempos de secado más cortos. El pretratamiento óhmico disminuyó el tiempo de secado en un 24%, 35% y 29% para las muestras tratadas a 20, 30 y 40 V/cm, respectivamente.
Zhong & Lima (2003)	Batata	E= 50, 70 y 90 V/cm f= 60 Hz T= 45, 60 y 80 °C	Liofilización	T= -50 °C P= 0.05 bar	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado 	<ul style="list-style-type: none"> El calentamiento óhmico disminuye el tiempo de secado por liofilización, pero la temperatura y la intensidad del campo eléctrico no fueron factores significativos para afectar a la velocidad de secado al vacío. Las combinaciones (E= 90 V/cm, T= 45 °C; E= 70 V/cm, 80 °C; E= 90 V/cm, T= 80°C) aumentaron la velocidad.
Stojceska <i>et al.</i> (2019)	Naranja Pomelo	E= 30 V/cm T= 70 y 100 °C f= 80 Hz t=50-70 s	Aire caliente	T=70 y 100 °C	<ul style="list-style-type: none"> Conductividad eléctrica pH Contenido en vitamina C 	<ul style="list-style-type: none"> Incremento de la conductividad a 70 °C en la naranja y a 100 °C en el pomelo. En la naranja expuesta a un pretratamiento óhmico a 70 °C hay diferencias significativas de pH. No se encuentran diferencias significativas en el contenido de vitamina C.
Wang & Sastry (2000)	Zanahoria Patata Ñame	E= 40 V/cm f= 60 Hz T= 50-80 °C	Aire caliente	T= 51.7 °C HR= 10% t= 6 h	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado Estructura 	<ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento óhmico aumenta la velocidad de secado en todos los alimentos. Las bajas frecuencias aumentan la difusión del contenido en humedad. Se observó un aumento significativo en el contenido de agua intercelular, especialmente en las muestras calentadas a 80 °C, lo que indica una mayor movilidad de la humedad y la descomposición de la pared celular durante el calentamiento óhmico.
Hosainpour <i>et al.</i> (2012)	Tomate	E= 6, 8, 10, 12, 14 y 16 V/cm f= 50 Hz	Aire caliente	T= 105 °C V= 1 m/s	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado 	<ul style="list-style-type: none"> A medida que aumenta la intensidad del pretratamiento, el tiempo de secado disminuye hasta un 87%.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Lima & Sastry (1999)	Ñame	$E_1 = 40, 60 \text{ y } 70 \text{ V/cm}$ $f_1 = 60 \text{ Hz (onda sinusoidal)}$ $E_2 = 20 \text{ y } 40 \text{ V/cm}$ $f_2 = 4 \text{ Hz (onda de sierra)}$ $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$	Aire caliente	$T = 51.7 \text{ }^\circ\text{C}$ $HR = 10\%$ $t = 6.5 \text{ h}$	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado 	<ul style="list-style-type: none"> Con una onda de 4 Hz (onda de sierra) se obtiene mayor velocidad de secado que a 60 Hz (onda sinusoidal). A 4 Hz y 40 V/cm la velocidad es mayor que a 20 V/cm.
Icier <i>et al.</i> (2017)	Zumo de granada	$E = 7.5, 10 \text{ y } 12.5 \text{ V/cm}$ $t = 152, 78 \text{ y } 53 \text{ min}$	Evaporación al vacío	$T_1 = -29 \text{ }^\circ\text{C}$ $P = 180 \text{ mm Hg}$ $T_2 = 10-65 \text{ }^\circ\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado Conductividad 	<ul style="list-style-type: none"> El menor tiempo de secado (7 min) se obtuvo para 12.5 V/cm, mientras que el tiempo más largo (25 min) fue para 7.5 V/cm. La conductividad aumenta linealmente a medida que se incrementa la temperatura.

E= intensidad del campo eléctrico; f= frecuencia; HR= humedad relativa; P= presión; T= temperatura; t= tiempo; V= velocidad del aire

3. APLICACIONES DE PEF EN LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

Al igual que en MEF, los pulsos eléctricos de alta intensidad constituyen una de las tecnologías más prometedoras en la industria alimentaria. Las aplicaciones más destacadas son la pasteurización / esterilización, la inactivación enzimática, la extracción de compuestos y el pelado (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009).

Probablemente, la aplicación más estudiada de los PEF es la pasteurización no-térmica en zumos, leche, sopas, yogur y huevo líquido (Mohammed & Eissa, 2012). Sin embargo, el tratamiento con PEF sólo afecta a células vegetativas y no a esporas. Esto limita su uso a alimentos ácidos, donde el crecimiento de esporas no es una gran preocupación. Otra limitación en la aplicación de PEF se presenta en los productos con alto contenido en proteína, como los huevos líquidos o los productos lácteos, donde puede darse la desnaturalización proteica debido a las altas intensidades de campo (Kempkes, 2017).

La electroporación, al igual que en MEF, también facilita la extracción de compuestos intracelulares, como la extracción de sacarosa en remolacha o la extracción de colorantes (Puértolas *et al.*, 2016). Una de las aplicaciones más recientes y que está recibiendo especial atención en las bodegas es la extracción de compuestos fenólicos de los hollejos de la uva, que permiten intensificar el color de los mostos. En este sentido ya existe alguna aplicación industrial de la tecnología (Martín, 2018).

Finalmente, los pulsos eléctricos pueden emplearse para facilitar el pelado de frutas y vegetales. Diferentes estudios han demostrado que a intensidades de aproximadamente 4 kV/cm se ha reducido la fuerza necesaria para separar la piel de la pulpa de nectarina, tomate y ciruela pasa (Puértolas *et al.*, 2016). Lo que puede ocurrir es que el tratamiento PEF produzca una disminución de la turgencia de las células debido a la permeabilización de las membranas. Esto provoca la salida de sustancias intracelulares al medio exterior, disminuyendo la presión osmótica entre el medio intracelular y extracelular. Consecuentemente, el alimento adquiere mayor flexibilidad y menor resistencia al corte (Martín, 2018).

3.1. Aplicación de PEF como pretratamiento al secado

Los PEF también pueden aplicarse como pretratamiento al secado (**Tabla 2**), ya que la permeabilización que se genera en la membrana podría facilitar el intercambio de agua con el entorno. Además, puesto que no existe un aumento significativo de la temperatura durante el tratamiento con PEF, podría ser un método prometedor en la industria alimentaria para la mejora del secado de alimentos térmicamente sensibles (Lebovka *et al.*, 2007).

3.1.1. Influencia en la cinética de secado y la calidad del producto

En general, se puede establecer, al igual que ocurre en MEF, que cuando se aplica un pretratamiento con pulsos de alta intensidad como pretratamiento, la cinética de secado posterior varía con respecto a las muestras que no han sido pretratadas. El pretratamiento con PEF, como ya se ha mencionado, produce un daño en la membrana celular y acelera el proceso de transferencia de masa sin

apenas cambios indeseables en el producto (Soliva-Fortuny *et al.*, 2009). Así, este aumento de la velocidad de secado se ha observado en el secado al vacío de productos vegetales (Al-Sayed *et al.*, 2018).

La permeabilización de la membrana celular puede lograrse, o bien a partir de la combinación de la aplicación de intensidades no demasiado altas y un número de pulsos elevado, o bien con la aplicación de intensidades altas y un menor número de pulsos. Un ejemplo del primer caso serían los resultados obtenidos por Al-Sayed *et al.* (2018) al aplicar pretratamientos de PEF en fresa (400 V/cm, 240 pulsos, 0.384 s de tiempo total de tratamiento) y en patata (400 V/cm, 240 pulsos, 0.3 s de tiempo total de tratamiento). Estos autores observaron una reducción del 30% y el 35% del tiempo de secado a vacío en fresa y patata, respectivamente. En contraposición, Parniakov *et al.* (2016) observaron que la transferencia de materia durante la liofilización de manzana fue más rápida y la temperatura de sublimación más baja cuando las muestras se pretrataron a una intensidad mayor (800 V/cm) y un número reducido de pulsos ($n=10$). Tylewic *et al.* (2016), también estudiando el secado a vacío de manzana a diferentes intensidades (0.3, 0.6, 0.9, 1.2 kV/cm) y números de pulso aplicados (5, 10, 15), para el mismo producto, observaron que la velocidad de secado aumentó a medida que aumentó la intensidad del campo eléctrico y el número de pulsos.

En operaciones de secado por aire caliente, el pretratamiento con PEF puede reducir el tiempo de secado para ciertas condiciones óptimas de la intensidad de campo y temperatura de secado para cada producto. Rahaman *et al.* (2019) observaron en el caso de ciruela pretratada con intensidades de 1-3 kV/cm (30 pulsos; 70 °C) que a 3 kV/cm se producía la mayor reducción del tiempo de secado. En este sentido, Crespo (2015) ensayó pretratamientos a diferentes intensidades (1-5 kV/cm), número de pulsos (10-50) y temperaturas de secado (30-90 °C) en ciruela. Crespo (2015) obtuvo que el tratamiento de 3 kV/cm, 10 pulsos y 30 °C disminuyó hasta un 64% el tiempo de secado respecto a las muestras no pretratadas. Estos resultados indicarían que a temperaturas altas de secado, el pretratamiento de PEF pierde efectividad y que a frecuencias menores se mejora la transferencia de masa. Rizvi *et al.* (2018) estudiando el pretratamiento de zanahoria con una intensidad de 0.9 kV/cm ($f=50$ Hz) y un rango de temperaturas entre 50-70 °C, encontraron que el tiempo de secado disminuyó un 13% y un 28% a 50 °C y 60 °C, respectivamente. Sin embargo a 70 °C no se redujo el tiempo de secado (menor efectividad a temperaturas altas). No obstante, Gachovska *et al.* (2009) trabajando también con zanahoria (1-1.5 kV/cm; 20 pulsos; 70 °C), observaron que a medida que aumentó la intensidad disminuyó hasta tres horas el tiempo de secado. Por último, en zanahoria pretratada a 1.85-5 kV/cm y diferente número de pulsos (10, 50 y 100), para un secado a 70 °C, Wiktor *et al.* (2016) obtuvieron que el menor tiempo de secado fue el de las muestras tratadas a 5 kV/cm y 10 pulsos y no a 5 kV/cm y 100 pulsos como se podría pensar. Esta reducción del tiempo de secado de un 6.2-8.2% podría deberse al nivel de desintegración celular.

Es importante señalar, que los parámetros óptimos para alcanza el mayor rendimiento en el secado son diferentes según el tipo de producto. Para un mismo tratamiento y diferentes tipos de alimento se obtienen resultados distintos. Por ejemplo, Rizvi *et al.* (2018) comparó muestras de zanahoria y chirivía aplicando el mismo tratamiento, pero debido a la mayor fibrosidad de la chirivía, ésta no obtuvo cambios de difusividad en el secado a temperaturas de 50 y 60 °C. Sin

embargo, en las muestras de zanahoria, obtuvieron un aumento de la difusividad de un 39% a 70 °C.

Por otro lado, es importante conocer el impacto que pueden tener los pretratamientos con PEF sobre la calidad final del producto deshidratado (color, textura, etc.). El color es uno de los parámetros más influyentes en la percepción que tiene el consumidor sobre el producto. Lammerskitten *et al.* (2019) observaron que en muestras de manzana pretratadas a 1.07 kV/cm y secadas a vacío aumentó la luminosidad hasta un 1.6-9.3% (**Figura 8**).

El tipo de secado tiene mucha importancia en el color de los productos. Así, el parámetro a^* (color rojo / verde), cuyos cambios pueden estar asociados a reacciones de tipo enzimático y no enzimático, presenta mayores cambios en el secado por aire caliente que durante la liofilización debido a que la baja concentración de oxígeno en este último tipo de proceso no favorece las reacciones de oxidación. Así, Rizvi *et al.* (2018) observaron el incremento de pigmentos oscuros debido a reacciones de Maillard en chirivía pretratada con PEF (0.9 kV/cm) y secada a temperaturas entre 50 y 70 °C. En este sentido, Wiktor *et al.* (2016) observaron un comportamiento similar en zanahoria (1.85-5 kV/cm; 70 °C) que atribuyeron al pequeño incremento de temperatura que se produce durante la permeabilización de la membrana por efecto del tratamiento PEF. Por otro lado, el parámetro b^* (color amarillo / azul) puede disminuir hasta un 36% en manzanas liofilizadas al producirse una disminución del contenido fenólico tras el secado. La actividad antioxidante es uno de los parámetros que más puede verse afectado con el pretratamiento PEF. Así, se ha observado en manzanas liofilizadas (Lammerskitten *et al.*, 2019) una disminución de aproximadamente un 52.7-60%, probablemente causada por la fuga de compuestos bioactivos al medio durante el pretratamiento.

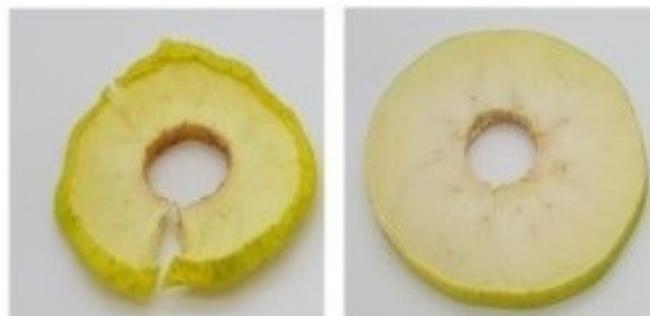


Figura 8. Macroestructura de manzana liofilizada no pretratada (izquierda) y manzana liofilizada pretratada con PEF ($E= 1.07$ kV/cm) (derecha) (Lammerskitten *et al.*, 2019).

En cuanto a la textura, ésta se encuentra relacionada con el nivel de degradación celular. De este modo, cuando el índice de desintegración celular (Z) aumenta, el alimento presenta una mayor flexibilidad y puede verse ligeramente dañado tras el secado por liofilización (Al-Sayed *et al.*, 2018). El valor de Z aumenta normalmente con la intensidad y el número de pulsos aplicados en el tratamiento PEF, tanto en secado por aire caliente (**Figura 9**) como en secado al vacío. Rahaman *et al.* (2019), por ejemplo, observaron que en muestras de ciruela tratadas en un gradiente de intensidades de 1 a 3 kV/cm, los valores de Z aumentaron entre 0.147 y 0.572, respectivamente.

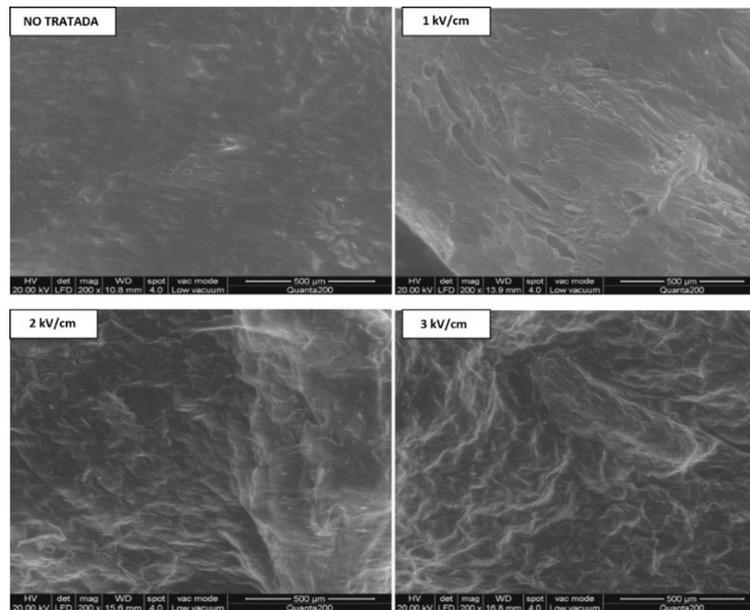


Figura 9. Microestructura de ciruela deshidratada por aire caliente pretratada a 1, 2 y 3 kV/cm (Rahaman *et al.*, 2019).

Además, el mayor efecto tisular podría mejorar la velocidad de liofilización, la calidad final del producto y la rehidratación de las muestras. Esto se debe a que la electroporación crea espacios intracelulares más grandes que aumentan la fracción de pequeños cristales dentro del tejido, permitiendo conservar su macroestructura y, por tanto, presentando una forma más uniforme, una estructura relajada y mejor calidad visual (Jalté *et al.*, 2009; Parniakov *et al.*, 2016) (**Figura 8; Figura 10**).

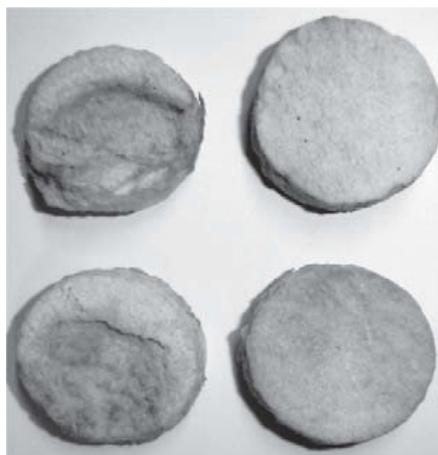


Figura 10. Patata liofilizada sin pretratamiento (izquierda) frente a la patata pretratada con PEF y liofilizada (derecha) (Jalté *et al.*, 2009).

A nivel microscópico, el estrés que se genera como consecuencia de la contracción de las membranas provoca numerosas roturas en las paredes celulares durante el secado por convección. Wiktor *et al.* (2016), en estudios con pretratamiento PEF en zanahoria (1.85-5 kV/cm; 70 °C), observaron que a la menor intensidad de campo aplicado que ensayaron, 1.85 kV/cm, y 50 pulsos se produjo una menor contracción de la microestructura de la zanahoria, presentando una estructura celular alargada. Sin embargo, los tratamientos más intensos

causaron una mayor contracción en comparación con la muestra no tratada y presentaron poros más grandes al fusionarse entre sí (**Figura 11**).

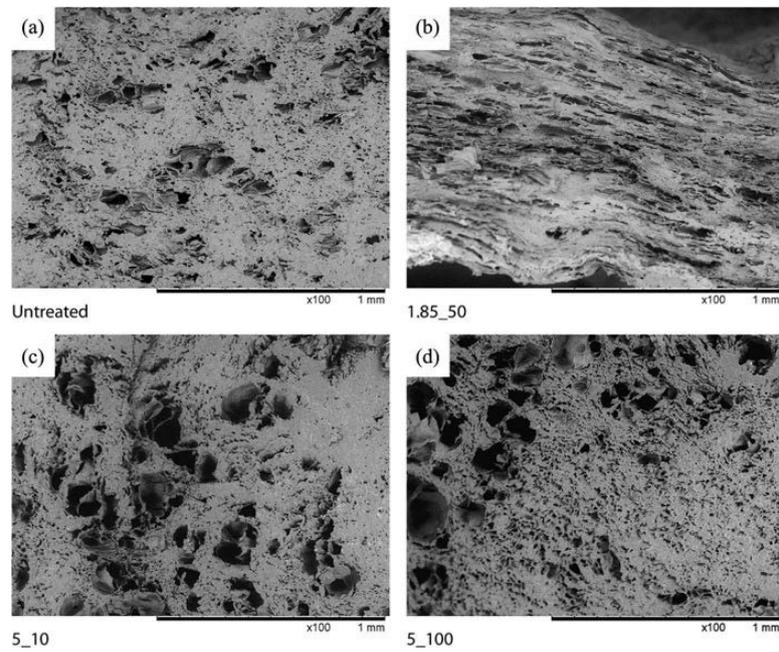


Figura 11. Microestructura de zanahoria deshidratada por aire caliente: (a) sin pretratamiento; y pretratada a (b) 1.85_50, (c) 5_10, (d) 5_100 (ampliación x100) (Wiktor *et al.*, 2016).

Tabla 2. Influencia del pretratamiento PEF en el secado de alimentos.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Al-Sayed <i>et al.</i> (2018)	Patata Fresa	Pulso monopolar, onda cuadrada E= 400 V/cm $\Delta t_t = 5$ min Patata: n= 240 $t_i = 100 \mu s$ $t_t = 0.3$ s N= 12.5 Fresa: n= 240 $t_i = 100 \mu s$ $t_t = 0.384$ s N= 16	Liofilización	T= -17 °C P _{patata} = 18.4 Pa P _{fresa} = 18.4 Pa	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado Textura de la fresa 	<ul style="list-style-type: none"> La fresa es más sensible al pretratamiento con PEF (mayor permeabilización en la mitad del tiempo: $t_{fresa} = 0.024s$; $t_{patata} = 0.05s$) para alcanzar Z=0.5. El pretratamiento con PEF acelera el proceso de liofilización ($t_{pretratamiento} = 18h$; $t_{sinpretratamiento} = 46h$). Reduce el tiempo de secado de la fresa un 30%. Reduce el tiempo de secado de la patata un 35%. Tras el pretratamiento las fresas presentan mayor elasticidad. Visualmente, las fresas pretratadas están ligeramente dañadas tras el secado.
Jalté <i>et al.</i> (2009)	Patata	Pulso bipolar, onda cuadrada E= 400 V/cm n= 2 $t_i = 100 \mu s$ $\Delta t = 200 \mu s$ $\Delta t_t = 10$ s f= 0.5 kHz	Liofilización	T ₁ = -35 °C V= 2 m/s $t_1 = 20$ min T ₂ = 0°C $t_2 = 26$ h P= 0.04 mbar	<ul style="list-style-type: none"> Microestructura Rehidratación 	<ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento con PEF produce daño tisular → espacios intracelulares más grandes (electroporación). A mayor daño tisular, menor tiempo de congelación de las muestras. El pretratamiento con PEF mejoró la tasa de congelación y mejoró la calidad y la rehidratación de las muestras debido a la fracción mejorada de pequeños cristales dentro del tejido. Aumenta índice de desintegración celular (Z=0-0.98).
Parniakov <i>et al.</i> (2016)	Manzana	Pulso monopolar, onda cuadrada E= 800 V/cm n= 10 $t_i = 1000 \mu s$ $t_t = 0.1$ s $\Delta t = 100$ ms $\Delta t_t = 10$ s N=10	Liofilización	T= 40 °C P= 10 mbar t= 300 min (5 h)	<ul style="list-style-type: none"> Transferencia de masa Microestructura Rehidratación 	<ul style="list-style-type: none"> En las muestras pretratadas con PEF la transferencia de materia se producía más rápido y la temperatura de sublimación resultó más baja que en las muestras no tratadas. En las muestras pretratadas se observó inhibición de la contracción y desarrollo de poros grandes. Tasa rápida de impregnación de humedad y gran capacidad de rehidratación del tejido electroporado. Las muestras pretratadas tienen un Z=0.96.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Tylewic <i>et al.</i> (2016)	Manzana	Pulso monopolar, caída exponencial E= 0.3; 0.6; 0.9; 1.2 kV/cm n= 5; 10; 15 t _i = 60 μs f= 3 Hz	Liofilización	No se especifica	<ul style="list-style-type: none"> Distribución del agua 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento del índice de desintegración celular a medida que aumenta la intensidad de campo eléctrico, el número de pulsos y la energía aplicada a las muestras. El agua puede difundirse en grandes volúmenes antes de relajarse la estructura, aumentando los tiempos de relajación. El pretratamiento con PEF promovió la reducción de la temperatura de congelación inicial.
Lammerskitten <i>et al.</i> (2019)	Manzana	Pulso monopolar, caída exponencial E= 1.07 kV/cm t _i = 40 ms Δt _i = 0.5 s f= 2 Hz	Liofilización	T ₁ = -55 °C t ₁ = 20 min T ₂ = 40 y 60 °C P= 0.1, 0.25 y 1 mbar t ₂ = 10 min	<ul style="list-style-type: none"> Micro y macroestructura Color Contenido fenólico Actividad antioxidante Textura 	<ul style="list-style-type: none"> Las muestras no tratadas se caracterizan por una notable deformación y contracción, mientras que las muestras tratadas con PEF muestran una forma más uniforme, una inhibición de la contracción y mejor calidad visual, ya que los cristales de hielo protegen la estructura inicial y la forma del producto. El índice de desintegración celular aumenta con la energía específica. La luminosidad (L*) de las muestras pretratadas con PEF a 40 °C incrementaron del 1.6 al 9.3% con respecto a las no tratadas. No se observaron diferencias en el valor de a* debido a la baja concentración de oxígeno en la cámara de tratamiento. El parámetro b* disminuyó un 36% debido al aumento del contenido fenólico (47%). La actividad antioxidante disminuyó un 52.7-60% posiblemente por la fuga de compuestos bioactivos al medio durante el tratamiento. Las muestras pretratadas tienen menor dureza, ya que el pretratamiento redujo el trabajo de penetración un 43.3-50.1% en comparación con las muestras de manzana no tratadas.
Rahaman <i>et al.</i> (2019)	Ciruela	Pulso monopolar, onda cuadrada E= 1-3 kV/cm n= 30	Aire caliente	T= 70 °C t= 270 min	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado Desintegración de la célula Cambio de color y estructura 	<ul style="list-style-type: none"> A 3 kV/cm se requiere menor tiempo de secado. A 3 kV/cm hay una mayor desintegración de la membrana (3 kV/cm > 2 kV/cm > 1 kV/cm). A medida que aumentamos la intensidad la muestra pierde luminosidad. Los pigmentos rojos disminuyen (oxidación de carotenos) y aparecen pigmentos oscuros debido a reacciones de Maillard. De 1 a 3 kV/cm el índice de desintegración (Z) aumenta entre 0.147 y 0.572.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Crespo (2015)	Ciruela	E= 1-5 kV/cm n= 10-50 t _i = 3 μs	Aire caliente	T= 30, 50, 70 y 90 °C V= 0.2-1 m/s	<ul style="list-style-type: none"> Efecto de la electroporación con PEF en la deshidratación 	<ul style="list-style-type: none"> La permeabilización de la membrana aumentó la velocidad de deshidratación, reduciendo el tiempo y la temperatura necesarios para completar la deshidratación. Un tratamiento de 3 kV/cm y 10 pulsos a 30 °C permitió reducir el tiempo de deshidratación hasta un 64% en comparación con las muestras no tratadas. El valor de Z aumenta con la intensidad y el número de pulsos.
Rizvi <i>et al.</i> 2018	Zanahoria Chirivía	Pulso bipolar, onda cuadrada E= 0.9 kV/cm t _i = 20 μs f= 50 Hz	Aire caliente	T= 50, 60 y 70 °C V= 1 m/s	<ul style="list-style-type: none"> Cinética de secado Difusión de la humedad Color Textura Índice de desintegración celular 	<p>Zanahoria:</p> <ul style="list-style-type: none"> A 50 y 60 °C disminuye el tiempo de secado un 13% y un 28%, respectivamente. A 70 °C no se reduce el tiempo de secado (menor efectividad de PEF a temperaturas altas). Aumento de la difusividad a 50 y 60 °C del 23% y el 39%, respectivamente. A 70 °C menor difusividad (-3%) que las no tratadas. Menor valor de L* en las muestras secas pretratadas. ΔE debido a la oxidación de carotenos por un mayor tiempo de exposición al aire. Para electroporar la zanahoria se necesitan 1000 pulsos durante 20 ms. <p>Chirivía:</p> <ul style="list-style-type: none"> A 50 °C el pretratamiento no reduce el tiempo de secado. A 60 y 70 °C, reduce el tiempo un 5% y 28%, respectivamente. A 50 y 60 °C no hay cambios en la difusividad. A 70 °C la difusividad fue un 38% mayor que las no tratadas. Aumento del valor de a* debido a reacciones de Maillard. Aumento de la fuerza requerida para cortar las rodajas a 70 °C debido al mayor contenido de almidón. Para electroporar la chirivía se necesitan 10000 pulsos durante 200 ms. Menor índice de desintegración celular debido al mayor contenido en fibra.
Gachovska <i>et al.</i> (2009)	Zanahoria	Pulso monopolar, caída exponencial E= 1 y 1.5 kV/cm n= 20 f= 1 Hz	Aire caliente	T= 70°C t= hasta peso constante	<ul style="list-style-type: none"> Cinética Color Firmeza Actividad peroxidasa 	<ul style="list-style-type: none"> El pretratamiento con PEF aumenta la velocidad de secado (t_{PEF}= 11 h; t_{control}= 14 h). Se observa un descenso del valor de luminosidad (L*) tras el pretratamiento con PEF. Las zanahorias pretratadas con PEF tienen mayor firmeza. Las muestras pretratadas a 1 y 1.5 kV/cm retienen un 50% y un 30% de actividad enzimática, respectivamente. Por tanto, a mayor intensidad de campo, mayor inactivación enzimática.

Autor	Producto	Condiciones del pretratamiento	Tipo de secado	Condiciones del secado	Objeto de estudio	Observaciones
Wiktor <i>et al.</i> (2016)	Zanahoria	Pulso monopolar, caída exponencial E= 1.85 y 5 kV/cm n= 10, 50 y 100 t _i = 7 μs Δt _t = 2 s f= 0.5 Hz	Aire caliente	T= 70 °C V= 2 m/s	<ul style="list-style-type: none"> • Cinética de secado • Color • Microestructura 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del tiempo de secado en un 6.2-8.2% para un tratamiento de 5 kV/cm y 10 pulsos con respecto a las muestras no tratadas. • A altas intensidades de PEF se producen colores oscuros. • Disminuye hasta un 25.3% la luminosidad (L*) tras el pretratamiento con PEF. • Se producen diferencias de color después del tratamiento con PEF (ΔE=5.4-6.8) y después del secado (ΔE=10.7-13.4), en comparación con las materia prima intacta. • Tras el secado, tanto las muestras pretratadas como las no-tratadas, tenían un valor similar de luminosidad. • A 1.85 kV/cm y 50 pulsos, se obtuvo el mayor valor de luminosidad y una estructura celular alargada. • A mayor intensidad de campo se forman cavidades más grandes. Tras el secado se observan cavidades más grandes.

E= intensidad del pulso; f= frecuencia; HR= humedad relativa; n= n° de pulsos; N= series de pulsos; P= presión; T= temperatura; t_i= duración del pulso; t_t= tiempo total del tratamiento; Δt= tiempo de repetición del pulso; Δt_t=tiempo entre dos series consecutivas; V= velocidad del aire; ΔE= diferencia de color

4. CONCLUSIONES

Los campos eléctricos moderados (MEF) y los pulsos eléctricos de alta intensidad (PEF) son dos tecnologías prometedoras en la industria alimentaria que se están aplicando en diferentes áreas como la cocción, esterilización, etc. En este sentido, se está estudiando su uso como pretratamiento en las operaciones de secado más habituales, como el secado por aire caliente o la liofilización. Los resultados que han obtenido diferentes autores indican que el uso de PEF y MEF como pretratamiento aumenta significativamente la velocidad del secado. Esto supone una reducción del tiempo y de la temperatura del proceso, que puede contribuir a la reducción de oxidaciones indeseadas o pérdidas de nutrientes termosensibles.

Los tratamientos con MEF son capaces de reducir el tiempo de secado. En este caso, la mayor permeabilidad de las membranas celulares se alcanza con el uso de bajas frecuencias. Esto permite que se acumulen cargas y se formen poros, generalmente reversibles, que facilitan la difusividad del agua durante el secado. En cuanto a la aplicación de PEF como pretratamiento al secado reduce en gran medida los cambios físicos (textura) y sensoriales (color, aspecto) de los alimentos. Parámetros como la intensidad de campo o el número de pulsos son factores que determinan el nivel de permeabilización celular. Sin embargo, existen otros parámetros que tienen que ver directamente con el alimento, como la conductividad eléctrica, la morfología y la composición del alimento, que es necesario considerar. Los alimentos más fibrosos o con mayor contenido en grasas tendrán una menor conductividad eléctrica y, por tanto necesitarán combinarse con disoluciones salinas o someterse a tratamientos más intensos.

Con todo lo expuesto, es necesario seguir estudiando la influencia de los campos eléctricos para cada tipo de alimento con el objetivo de tener un control sobre los parámetros del proceso (temperatura, voltaje, tiempo, etc.) y optimizar el consumo energético.

5. BIBLIOGRAFÍA

- AL-SAYED, L., BOY, V., MADIETA, E., MEHINAGIC, E., & LANOISELLÉ, J.-L. (2018). Pulsed Electric Fields (PEF) as pre-treatment for freeze-drying of plant tissues. *Proceedings of 21st International Drying Symposium*, 1575-1582.
- BAHETI, A., KUMAR, L., & BANSAL, A. K. (2010). Excipients used in lyophilization of small molecules. *Journal of Excipients and Food Chemicals*, 1(1), 41-54.
- BASSET JEMAI, A., & VOROBIEV, E. (2002). Effect of moderate electric field pulses on the diffusion coefficient of soluble substances from apple slices. *International Journal of Food Science & Technology*, 37, 73-86.
- CASTRO, I., TEIXEIRA, J., SALENGKE, S., SASTRY, S., & VICENTE, A. (2004). Ohmic heating of strawberry products: electrical conductivity measurements and ascorbic acid degradation kinetics. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 5, 27-36.
- CERÓN-CARRILLO, T. G., PALOU, E., & LÓPEZ-MALO, A. (2010). Pulsos eléctricos: fundamentos y aplicaciones en alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 4(1), 9-26.
- CONTRERAS RUIZ, M. (2014). Estudio de parámetros de calidad de manzana deshidratada mediante secado a baja temperatura asistido con ultrasonidos. *Universitat Politècnica de València*.
- CRESPO CASADO, I. (2015). Deshidratación de ciruelas asistida por Pulsos Eléctricos de Alto Voltaje (PEAV). *Universidad de Zaragoza*.
- DO NASCIMENTO, E. M., MULET PONS, A., RAMIREZ ASCHERI, J. L., PILER DE CARVALHO, C. W., & CÁRCEL CARRIÓN, J. A. (2016). Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant. *Journal of Food Engineering*, 170, 108-118.
- DONSI, F., FERRARI, G., & PATARO, G. (2010). Applications of Pulsed Electric Field Treatments for the Enhancement of Mass Transfer from Vegetable Tissue. *Food Engineering Reviews*, 2, 109-130.
- EVRENDILEK, G., LI, S., DANTZER, W., & ZHANG, Q. H. (2004). Pulsed Electric Field Processing of Beer: Microbial, Sensory, and Quality Analyses. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, 69(8), 228-232.
- FERNÁNDEZ-MOLINA, J. J., BARBOSA-CÁNOVAS, G. V., & SWANSON, B. G. (2001). Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos sin calor. *Arbor*, 168(661), 155-170.
- FERRADA KUSCH, G. A. (2018). Desarrollo de un snack de manzana enriquecido con jugo de granada mediante la impregnación al vacío acoplado con campo eléctrico moderado. *Universidad Técnica Federico Santa María*.
- FITO MAUPOEY, P., GRAU, A., MARÍA, A., BARAT BAVIERA, J. M., & ALBORS SOROLLA, A. M. (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA*.
- GACHOVSKA, T. K., SIMPSON, M. V., NGADI, M. O., & RAGHAVAN, G. S. (2009). Pulsed electric field treatment of carrots before drying and rehydration. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89, 2372-2376.

- GAD, A., & JAYARAM, S. H. (2011). Electrode Material Migration During Pulsed Electric Field (PEF) Treatment. Dept. of Electrical and Computer Engineering. University of Waterloo.
- GAIDHANI, K. A., HARWALKAR, M., BHAMBERE, D., & NIRGUDE, P. S. (2015). Lyophilization/Freeze Drying - A Review. *World Journal of Pharmaceutical Research*, 4(8), 516-543.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. Universitat Politècnica de València, Departamento de Tecnología de Alimentos.
- GAVAHIAN, M., TIWARI, B. K., CHU, Y.-H., TING, Y., & FARAHNAKY, A. (2019). Food texture as affected by ohmic heating: Mechanisms involved, recent findings, benefits, and limitations. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 328-339.
- GOULLIEUX, A., & PAIN, J.-P. (2014). Chapter 22 - Ohmic Heating. In *Emerging Technologies for Food Processing (Second Edition)* (pp. 399-426).
- HOSAINPOUR, A., DARVISHI, H., NARGESI, F., & FADAVI, A. (2012). Ohmic pre-drying of tomato paste. *Food Science and Technology International*, 20(3), 193-204.
- ICIER, F., YILDIZ, H., & BAYSAL, T. (2006). Peroxidase inactivation and colour changes during ohmic blanching of pea puree. *Journal of Food Engineering*, 74, 424-429.
- ICIER, F., YILDIZ, H., SABANCI, S., CEVIK, M., & FARUK COKGEZME, O. (2017). Ohmic heating assisted vacuum evaporation of pomegranate juice: Electrical conductivity changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 39, 241-246.
- JALTÉ, M., LANOISELLÉ, J.-L., LBOVKA, N. I., & VOROBIEV, E. (2009). Freezing of potato tissue pre-treated by pulsed electric fields. *LWT - Food Science and Technology*, 42, 576-580.
- JOANNES, C., SIPAUT, C. S., DAYOU, J., YASIR, S. M., & MANSA, R. F. (2015). Review Paper on Cell Membrane Electroporation of Microalgae using Electric Field Treatment Method for Microalgae Lipid Extraction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 78.
- KEMPKES, M. A. (2017). Industrial Pulsed Electric Field System. In D. Miklavcic, *Handbook of Electroporation* (pp. 1-21).
- KNIRSCH, M. C., ALVES DOS SANTOS, C., MARTINS DE OLIVEIRA SOARES VICENTE, A. A., & VESSONI PENNA, T. C. (2010). Ohmic heating - a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21, 436-441.
- KUTLU, N., YILMAZ, M. S., ARSLAN, H., ISCI, A., & SAKIYAN, O. (2018). The Effect of Ohmic Heating Pretreatment on Drying of Apple. 21st International Drying Symposium. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.
- LAMMERSKITTEN, A., WIKTOR, A., SIEMER, C., TOEPFL, S., MYKHAILYK, V., GONDEK, E., . . . PARNIAKOV, O. (2019). The effects of pulsed electric fields on the quality parameters of freeze-dried apples. *Journal of Food Engineering*, 252, 36-43.

- LEBOVKA, N. I., SHYNKARYK, N. V., & VOROBIEV, E. (2007). Pulsed electric field enhanced drying of potato tissue. *Journal of Food Engineering*, 78, 606-613.
- LIMA, M., & SASTRY, S. K. (1999). The effects of ohmic heating frequency on hot-air drying rate and juice yield. *Journal of Food Engineering*, 41, 115-119.
- LLAVATA, B., GARCÍA-PÉREZ, J. V., SIMAL, S., & CÁRCEL, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying a current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20-26.
- MALGORZATA NOWACKA, A. W., ANUSZEWSKA, A., DADAN, M., RYBAK, K., & WITROWA-RAJCHERT, D. (2019). The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks. *Ultrasonics - Sonochemistry*, 56, 1-13.
- MARTÍN MUNICIO, E. (2018). Aplicaciones de los pulsos eléctricos de alto voltaje para el procesado y conservación de alimentos. Universidad de Zaragoza.
- MARTÍNEZ-ZORRILLA, D. (2008). Los sintetizadores. Una breve introducción. Universitat Oberta de Catalunya.
- MAYOR, L., & SERENO, A. M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373-386.
- MENOR GARCÍA, L. (2019). Intensificación de la extracción de betanina en remolacha roja mediante ultrasonidos y pulsos eléctricos. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- MOHAMMED, M. E., & EISSA, A. H. (2012). Pulsed Electric Fields for Food Processing Technology. In *Structure and Function of Food Engineering* (pp. 275-306).
- MORENO, J., ESPINOZA, C., SIMPSON, R., PETZOLD, G., NUÑEZ, H., & GIANELLI, M. (2016). Application of ohmic heating/vacuum impregnation treatments and air drying to develop an apple snack enriched in folic acid. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 36, 381-386.
- MORENO, J., SIMPSON, R., BAEZA, A., MORALES, J., MUÑOZ, C., SASTRY, S., & ALMONACID, S. (2012). Effect of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmodehydration kinetics and microstructure of strawberries (cv. Camarosa). *Food Science and Technology*, 45, 148-154.
- NIREESHA, G. R., DIVYA, L., SOWMYA, C., VENKATESHAN, N., NIRANJAN BABU, M., & LAVAKUMAR, V. (2013). Lyophilization/Freeze Drying - An Review. *International Journal of Novel Trends in Pharmaceutical Sciences*, 3(4), 87-98.
- OZUNA, C., CÁRCEL, J. A., GARCÍA-PÉREZ, J. V., & MULET, A. (2011). Improvement of water transport mechanisms during potato drying by applying ultrasound. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 2511-2517.
- PARE, A., NEMA, A., & SINGH, V. (2014). Combined effect of ohmic heating and enzyme assisted aqueous extraction process on soy oil recovery. *Journal of Food Science and Technology*, 51(8), 1606-1611.

- PARNIAKOV, O., BALS, O., LBOVKA, N., & VOROBIEV, E. (2016). Pulsed electric field assisted vacuum freeze-drying of apple tissue. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 35, 52-57.
- PEREIRA, R. N., VICENTE, A. A., & TEIXEIRA, J. A. (2019). Food Structure Development/Production Through Flexible Processes: The Use of Electric Fields to Enable Food Manufacturing. In *Handbook of Food Structure Development* (pp. 422-435). Royal Society of Chemistry.
- POOJARY, M. M., J. BARBA, F., ALIAKBARIAN, B., DONSI, F., PATARO, G., DIAS, D. A., & JULIANO, P. (2016). Innovative Alternative Technologies to Extract Carotenoids from Microalgae and Seaweeds. *Marine drugs*, 14(11).
- PUÉRTOLAS, E., ÁLVAREZ, I., RASO, J., & MARTÍNEZ DE MARAÑÓN, I. (2013). Aplicación industrial de los pulsos eléctricos de alto voltaje para la pasteurización de alimentos: revisión de su viabilidad técnica y comercial. *CyTA - Journal of Food*, 11(1), 81-88.
- PUÉRTOLAS, E., SALDAÑA, G., & RASO, J. (2016). Pulsed Electric Field Treatment for Fruit and Vegetable Processing. In *Handbook of Electroporation* (pp. 2495-2515).
- RAHAMAN, A., SIDDEEG, A., FAISAL MANZOOR, M., ZENG, X.-A., ALI, S., BALOCH, Z., . . . WEN, Q.-H. (2019). Impact of pulsed electric field treatment on drying kinetics, mass transfer, colour parameters and microstructure of plum. *Journal of Food Science and Technology*, 56(5), 2670-2678.
- RAMÍREZ-NAVAS, J. S. (2007). Liofilización de alimentos. *Revista ReCiTeIA*, 6(2), 1-39.
- RATTI, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. *Journal of Food Engineering*, 49, 311-319.
- RAVENTÓS SANTAMARIA, M. (2005). *Industria alimentaria. Tecnologías emergentes*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- RIVAS SOLER, A. (2012). Aplicación de Pulsos Eléctricos de Alta Intensidad en una bebida mezcla de zumo de naranja y leche: Efectos sobre *Escherichia coli*, *Saccharomyces cerevisiae*, componentes nutricionales y calidad. Universitat Politècnica de València.
- RIZVI ALAM, M. D., LYNG, J. G., FRONTUTO, D., MARRA, F., & CINQUANTA, L. (2018). Effect of Pulsed Electric Field Pretreatment on Drying Kinetics, Color, and Texture of Parsnip and Carrot. *Journal of Food Science*, 83, 2159-2166.
- SENSOY, I., & SASTRY, S. (2004). Extraction Using Moderate Electric Fields. *Food Engineering and Physical Properties*, 69(1), 7-13.
- SHESHRAO SAKHARAM, K., PRAKASH PANDEY, J., SINGH, A., KUMAR, A., & KUMAR SHUKLA, A. (2016). Development of Ohmic Heating Apparatus for Extraction of Rapeseed Oil. *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2(11), 211-215.

- SHIBY VARGHESE, K., PANDEY, M. C., RADHAKRISHNA, K., & BAWA, A. S. (2014). Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(10), 2304–2317.
- SOLIVA-FORTUNY, R., BALASA, A., KNORR, D., & MARTIN-BELLOSO, O. (2009). Effects of pulsed electric fields on bioactive compounds in foods: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 20, 544-556.
- STOJCESKA, V., ATUONWU, J., & TASSOU, S. A. (2019). Ohmic and conventional drying of citrus products: energy efficiency, greenhouse gas emissions and nutritional properties. *Energy Procedia*, 161, 165-173.
- THAMKAEW, G., & GÓMEZ GALINDO, F. (2020). Influence of pulsed and moderate electric field protocols on the reversible permeabilization and drying of Thai basil leaves. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102430>
- TOEPFL, S. (2006). *Pulsed Electric Fields (PEF) for Permeabilization of Cell Membranes in Food- and Bioprocessing – Applications, Process and Equipment Design and Cost Analysis*. Berlín.
- TYLEWICZ, U., AGANOVIC, K., VANNINI, M., TOEPFL, S., BORTOLOTTI, V., DALLA ROSA, M., . . . HEINZ, V. (2016). Effect of pulsed electric field treatment on water distribution of freeze-dried apple tissue evaluated with DSC and TD-NMR techniques. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 37, 352-358.
- VALDERRAMA GUTIÉRREZ, F. F. (2018). Calentador óhmico para extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas. *Scientia et Technica*, 23(2), 160-167.
- WANG, W.-C., & SASTRY, S. K. (2000). Effects of thermal and electrothermal pretreatments on hot air drying rate of vegetable tissue. *Journal of Food Process Engineering*, 23, 299-319.
- WIKTOR, A., & WITROWA-RAJCHERT, D. (2019). Drying kinetics and quality of carrots subjected to microwave-assisted drying preceded by combined pulsed electric field and ultrasound treatment. *Drying Technology*, 38, 176-188.
- WIKTOR, A., GONDEK, E., JAKUBCZYK, E., DADAN, M., NOWACKA, M., RYBAK, K., & WITROWA-RAJCHERT, D. (2018). Acoustic and mechanical properties of carrot tissue treated by pulsed electric field, ultrasound and combination of both. *Journal of Food Engineering*, 238, 12-21.
- WIKTOR, A., NOWACKA, M., ANUSZEWSKA, A., RYBAK, K., DADAN, M., & WITROWA-RAJCHERT, D. (2019). Drying Kinetics and Quality of Dehydrated Cranberries Pretreated by Traditional and Innovative Techniques. *Journal of Food Science*, 84, 1820-1829.
- WIKTOR, A., NOWACKA, M., DADAN, M., RYBAK, K., LOJKOWSKI, W., CHUDOBA, T., & WITROWA-RAJCHERT, D. (2016). The Effect of Pulsed Electric Field (PEF) on Drying Kinetics, Color and Microstructure of Carrot. *Drying Technology*, 34(11), 1286-1296.

- YILDIZ-TURP, G., SENGUN, I. Y., KENDIRCI, P., & ICIER, F. (2013). Effect of ohmic treatment on quality characteristic of meat: A review. *Meat Science*, 93(3), 441-448.
- ZAREIFARD, R. M., RAMASWAMY, H. S., MARCOTTE, M., & KARIMI, Y. (2014). Factors Influencing Electrical Conductivity. In *Ohmic Heating in Food Processing* (p. 61).
- ZHONG, T., & LIMA, M. (2003). The effect of ohmic heating on vacuum drying rate of sweet potato tissue. *Bioresource Technology*, 87, 215-220.