

Aplicación industrial de los pulsos eléctricos de alto voltaje para la pasteurización de alimentos: revisión de su viabilidad técnica y comercial

E. Puértolas , I. Álvarez , J. Raso & I. Martínez de Marañón

To cite this article: E. Puértolas , I. Álvarez , J. Raso & I. Martínez de Marañón (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, DOI: [10.1080/19476337.2012.693542](https://doi.org/10.1080/19476337.2012.693542)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.693542>



Copyright Taylor and Francis Group, LLC



Published online: 19 Jun 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 6126



Citing articles: 7 View citing articles [↗](#)

REVIEW

Aplicación industrial de los pulsos eléctricos de alto voltaje para la pasteurización de alimentos: revisión de su viabilidad técnica y comercial

Industrial application of pulsed electric field for food pasteurization: review of its technical and commercial viability

E. Puértolas^{a*}, I. Álvarez^b, J. Raso^b and I. Martínez de Marañón^a

^aUnidad de Investigación Alimentaria, AZTI-Tecnalia, Astondo Bidea, Edificio 609, Parque Tecnológico de Bizkaia, 48160 Derio, Bizkaia, España; ^bTecnología de los Alimentos, Facultad de Veterinaria, Universidad de Zaragoza, c/Miguel Servet, 177, 50013 Zaragoza, Zaragoza, España

(Received 1 February 2012; final version received 7 May 2012)

Novel technologies have received considerable attention for their potential to improve or replace existing processes in the food industry. Particular significance is given to techniques that could maintain or improve the food quality and safety and/or decrease the production costs. One of the most promising technologies that could reach these goals is pulsed electric field (PEF). This article reviews the viability of industrial application of PEF for liquid food pasteurization, considering technical, environmental, economic, and commercial point of view. The major advances and the future challenges for the successful industrial implementation of PEF in the food industry are highlighted.

Keywords: microbial inactivation; PEF; industrial application; consumer acceptance; economic cost; environmental impact

En las últimas décadas, la industria alimentaria ha experimentado un importante avance tecnológico que se refleja en el desarrollo de nuevas técnicas y procesos de elaboración. Especialmente han cobrado particular importancia aquellas tecnologías que permiten obtener alimentos seguros, alterando mínimamente sus características sensoriales y/o disminuyendo los costes de producción. Una de las tecnologías emergentes más prometedoras, que pretende conseguir estos objetivos, son los pulsos eléctricos de alto voltaje (PEAV). El objetivo de este trabajo es revisar la viabilidad de la aplicación industrial de los PEAV para la pasteurización de alimentos líquidos desde un enfoque técnico, ambiental, económico y comercial. Se recogen los principales avances y datos publicados al respecto, así como los desafíos existentes para la implantación de esta tecnología en la industria alimentaria.

Palabras claves: inactivación microbiana; pulsos eléctricos de alto voltaje; aplicación industrial; aceptación de los consumidores; coste económico; impacto ambiental

Introducción

Debido a la continua demanda por parte del consumidor de alimentos sanos, seguros y con unas características sensoriales y nutricionales óptimas, la industria alimentaria es uno de los sectores económicos más dinámicos y exigentes. En un mercado tan competitivo, una de las estrategias esenciales para la subsistencia de las empresas alimentarias es la introducción de nuevas tecnologías de procesado que permitan la mejora de la calidad de los productos existentes o el desarrollo de otros completamente nuevos. Encuadrado en este contexto, uno de los principales retos de la industria alimentaria es la obtención y comercialización de productos seguros y estables, con propiedades nutricionales y sensoriales mejoradas o al menos similares a las del producto fresco sin procesar (da Cruz et al., 2010). Para ello, gran parte del esfuerzo científico y técnico se ha focalizado en el estudio de sistemas no térmicos de conservación, como las altas presiones hidrostáticas, los ultrasonidos o los pulsos de luz (Gómez-López, Ragaert, Debevere, & Devlieghere, 2007; Knorr et al., 2011; Raso, Manas, Pagan, & Sala, 1999). Estas técnicas, capaces de inactivar microorganismos a temperaturas inferiores a las requeridas en el procesado térmico, pretenden evitar

la degradación de los compuestos termosensibles que determinan en gran medida la calidad de los alimentos, manteniendo unos niveles de seguridad similares a los del calor (Rajkovic, Smigic, & Devlieghere, 2010). Una de las tecnologías más estudiadas, y que es considerada a día de hoy como una de las más prometedoras para la pasteurización de alimentos líquidos, es la aplicación de pulsos eléctricos de alto voltaje (PEAV) (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006).

El tratamiento por pulsos eléctricos de alto voltaje se puede definir como la aplicación intermitente de campos eléctricos de alta intensidad (1–40 kV/cm) y corta duración (μ s) a un alimento colocado entre dos electrodos (Barbosa-Cánovas, Fernández-Molina, & Swanson, 2001). Estos tratamientos producen el fenómeno denominado electroporación, consistente en la permeabilización transitoria o permanente de las membranas, tanto de células eucariotas como procariotas (Puértolas, Luengo, Álvarez, & Raso, 2012; Teissie, Golzio, & Rols, 2005). La electroporación irreversible de las formas vegetativas de bacterias, levaduras y mohos puede provocar su inactivación a temperaturas inferiores a las que se utilizan en el procesado térmico convencional (Puértolas, López, Condón, Álvarez, & Raso,

*Corresponding author. Email: epuertolas@azti.es

2010; Saulis, 2010). En cambio, las formas esporuladas de bacterias y mohos son resistentes a estos tratamientos, por lo que en consecuencia se ha postulado el uso de los PEAV únicamente como alternativa a la pasteurización térmica (Bendicho, Barbosa-Cánovas, & Martín, 2002; Pagán, Esplugas, Góngora-Nieto, Barbosa-Cánovas, & Swanson, 1998). Además, debido a las altas intensidades de tratamiento necesarias para alcanzar la inactivación microbiana efectiva (>20 kV/cm) y a los problemas técnicos derivados de su aplicación en productos sólidos (elevada potencia eléctrica requerida, dificultad de escalado en continuo, etc.), únicamente es posible su uso a día de hoy en alimentos líquidos.

Uno de los pasos previos a la implantación de cualquier tecnología de conservación en la industria alimentaria es conocer los principales factores que influyen en la resistencia microbiana, identificar los microorganismos patógenos más resistentes y establecer los criterios necesarios para reducir sus poblaciones a un nivel que garantice la seguridad alimentaria. En los últimos 15 años se ha publicado una gran cantidad de trabajos sobre los PEAV en los que estos elementos han sido estudiados en profundidad, originando diversas revisiones y capítulos de libro (Barssoti, Merle, & Cheftel, 1999; Bendicho et al., 2002; Dunn, 2001; Martín-Belloso & Elez-Matínez, 2005; Nafchi, Bhat, & Karim-Alias, 2012; Rastogi, 2003; Saldaña, Álvarez, Condón, & Raso, in press; Toepfl, Heinz, & Knorr, 2006; Wouters, Álvarez, & Raso, 2001). Sin embargo, la gran cantidad de equipos y condiciones utilizados por los distintos grupos de investigación dificulta enormemente la comparación de los datos y, por lo tanto, la definición de los parámetros de tratamiento necesarios para la pasteurización de los alimentos (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006). En general, la descontaminación eficiente requiere intensidades de campo eléctrico de 20 a 40 kV/cm y una energía específica de 100 a 1000 kJ/kg (Toepfl, Mathys, Heinz, & Knorr, 2006). Por todo ello, se ha concluido que, si bien la pasteurización mediante PEAV es posible, debido a la gran cantidad de factores con efecto crítico en la resistencia microbiana, como el pH del alimento, así como a la elevada variabilidad en la resistencia entre cepas de la misma especie patógena, la pasteurización comercial mediante PEAV de un alimento concreto exige realizar un estudio individualizado, donde se demuestre que el tratamiento de PEAV permite obtener unos niveles de seguridad al menos similares a los obtenidos mediante el tratamiento térmico que pretende remplazar (Saldaña et al., in press). Además, se ha observado que la eficacia de los tratamientos aumenta cuando éstos se aplican a células estresadas, especialmente si el estrés afecta a la integridad de las membranas. Por ello, la combinación de los PEAV con otras tecnologías, como el calor o la adición de antimicrobianos, posee grandes potencialidades para establecer tratamientos comerciales (Mosqueda-Melgar, Raybaudi-Massilia, & Martín-Belloso, 2008; Saldaña, Puértolas, Monfort, Raso, & Álvarez, 2011).

Que una tecnología permita la pasteurización de un producto no significa que su aplicación industrial sea posible. Así, otro de los pilares fundamentales en los que se asienta la implantación de cualquier tecnología es el estudio de su viabilidad técnica, económica y comercial, sin olvidar su posible impacto ambiental (Pereira & Vicente, 2010; Siegrist, 2008). Sin embargo, debido a que la mayoría de estudios existentes sobre los PEAV se han realizado en laboratorio, apenas existen trabajos específicos que consideren alguno de estos factores, y mucho menos estudios que los analicen de manera global.

El objetivo de esta revisión es recoger los principales avances y datos publicados sobre estas materias, resaltando los desafíos existentes para la implantación de esta tecnología en la industria con garantías de éxito comercial.

Aspectos técnicos de los PEAV

Los parámetros de procesado más importantes que determinan la eficacia de los tratamientos de PEAV son el campo eléctrico (kV/cm), el tiempo de tratamiento (número de pulsos multiplicado por su duración) (μ s), la energía específica (kJ/kg) y la frecuencia (número de pulsos por segundo) (Hz) (Barssoti et al., 1999). Los valores máximos que pueden alcanzar estos parámetros dependen de la configuración y características del sistema de PEAV utilizado. Todo equipo posee un diseño básico similar: un generador de PEAV, una cámara de tratamiento y un sistema de control y toma de datos del proceso (Min, Evrendilek, & Zhang, 2007) (Figura 1).

El generador de PEAV está constituido esencialmente por un generador de corriente eléctrica continua, un condensador o condensadores, un interruptor y un transformador del voltaje del pulso (Figure 1). El generador de corriente eléctrica transforma la corriente alterna de la red eléctrica en corriente continua. El condensador, o conjunto de condensadores, almacena dicha energía eléctrica cuya descarga en la cámara de tratamiento se regula a través del interruptor. En algunas ocasiones, el condensador no es capaz de almacenar toda la energía eléctrica requerida. En estos casos, un transformador del pulso situado tras el interruptor aumenta la señal pulsante al voltaje seleccionado.

El interruptor define la forma de los pulsos eléctricos generados. En los tratamientos de PEAV se utilizan básicamente dos tipos de pulsos: los de caída exponencial y los de onda cuadrada (de Haan, 2007). Los pulsos de caída exponencial se basan en la descarga completa y no regulada de los condensadores, lo que provoca un rápido incremento del voltaje y su posterior disminución exponencial a lo largo del tiempo. Por su parte, los pulsos de onda cuadrada se caracterizan porque tras el rápido incremento de voltaje, éste se mantiene constante durante un determinado periodo de tiempo y, finalmente, cae de nuevo rápidamente. Por lo tanto, esta clase de pulsos permite controlar mucho mejor la duración, la intensidad del campo eléctrico y la energía de los tratamientos (de Haan & Willcock, 2002).

La cámara de tratamiento es el lugar donde se sitúa el producto para su procesado (Figura 1). Esencialmente consta de dos electrodos, uno de ellos conectado al generador de PEAV y el otro a tierra, separados por un material aislante (Huang & Wang, 2009).

Desarrollo industrial: principales hitos técnicos y estado actual

Aunque los primeros estudios sobre la aplicación de los PEAV para inactivar microorganismos son de los años 60, el paso de la tecnología del laboratorio a la industria se ha revelado como una ardua tarea. De hecho, el tratamiento en flujo continuo, un aspecto clave en el escalado de la tecnología, no fue posible hasta finales de la década de los años 80 (Huang & Wang, 2009). A partir de ese momento, la historia de la aplicación industrial de los PEAV está colmada de altibajos asentados, fundamentalmente, en la falta del

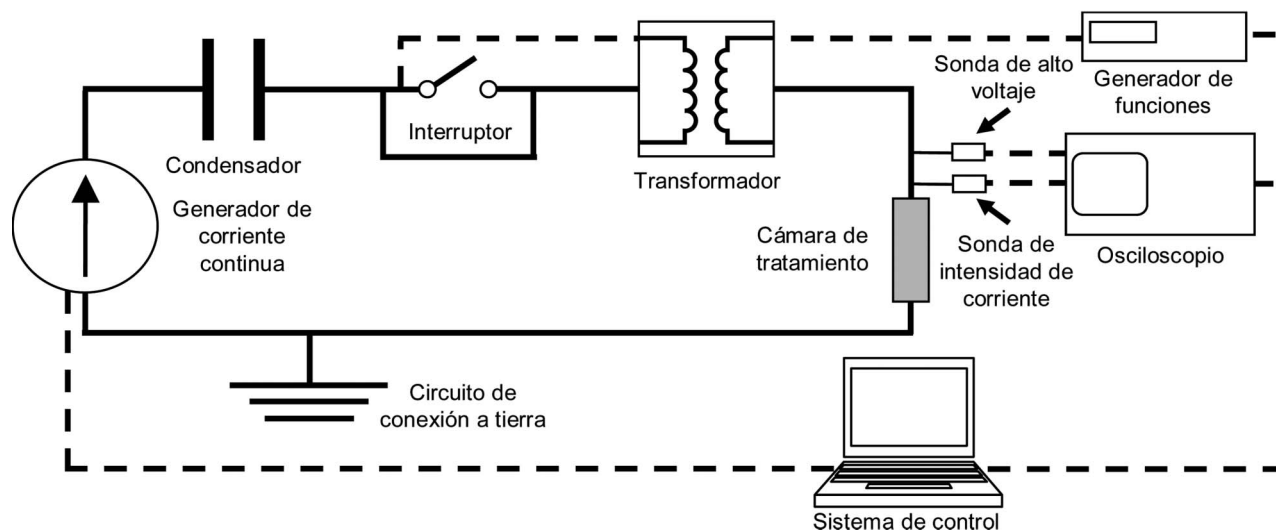


Figura 1. Esquema general de los principales componentes de un equipo de PEAV.

Figure 1. General scheme of the principal components of standard PEF equipment.

desarrollo técnico necesario para la aplicación de los tratamientos a escala comercial a costes asumibles.

Las características técnicas más importantes de un equipo de PEAV, como el máximo voltaje y la intensidad de la corriente, la duración y la forma del pulso y la frecuencia máxima de trabajo, están determinadas principalmente por el interruptor y sus características (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006). Estos han sido perfeccionados conforme ha evolucionado la tecnología y la ingeniería eléctrica, permitiendo el desarrollo de equipos cada vez más potentes. La primera generación de sistemas utilizaba interruptores de tipo spark-gap o similares (tiratrón, ignitrón, etc.), los cuales originan pulsos de caída exponencial. Estos constan de dos electrodos separados por un gas, generalmente aire. Si la corriente posee suficiente intensidad, ioniza el gas presente transmitiéndose la energía eléctrica entre los electrodos a través de un arco eléctrico, lo que permite la descarga de pulsos de alto voltaje e intensidad a frecuencias elevadas. Sin embargo, pueden aplicar un máximo de alrededor de 10^6 pulsos, lo que se traduce en una vida útil muy corta si se utilizan frecuencias elevadas.

Más tarde comenzaron a utilizarse los tiristores, como el rectificador controlado de Silicio (SCR), el diodo para corriente alterna (DIAC), el triodo para corriente alterna (TRIAC) o el interruptor unidireccional de apagado por puerta (GTO). Estos están constituidos por un material semiconductor que funciona como conductor o como aislante en función de la temperatura, lo que les confiere una mayor durabilidad y un mejor control de la descarga de la corriente eléctrica. Algunos de ellos, como los interruptores GTO, no sólo permiten la descarga de la corriente sino también interrumpirla, lo que genera pulsos de onda cuadrada (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006). Sin embargo, esta clase de interruptores no permiten usar frecuencias, intensidades y voltajes tan elevados como los anteriores, por lo que se utilizaron primordialmente en equipos de laboratorio para el tratamiento en condiciones estáticas.

Debido a las limitaciones de ambos tipos de interruptores, spark-gap y tiristor, la tecnología no se desarrolló a nivel comercial durante el siglo XX, aunque hubo dos intentos reseñables durante sus últimas décadas. Los primeros equipos para la descontaminación de alimentos líquidos comerciales (Elsteril[®]) fueron desarrollados por la empresa Krupp Maschinentechnik (Essen, Alemania) en 1985, en base a los trabajos iniciales de Doeverspeck (Sitzmann & Münch, 1988). Sin embargo, los altos costes del proceso y el aumento de temperatura de los productos debidos a la alta intensidad de los pulsos generados impidieron su éxito industrial (Toepfl, Heinz, & Knorr, 2007).

Posteriormente, a mediados de los años 90 la empresa PurePulse Technologies (San Diego, EE.UU.), subsidiaria de la multinacional Maxwell Technologies (San Diego, EE.UU.), decidió invertir sus recursos en el desarrollo de un equipo de PEAV (CoolPure[®]). Éste permitía teóricamente tratar alimentos líquidos utilizando velocidades de flujo de hasta 2000 L/h. Sin embargo, debido a los decepcionantes resultados obtenidos a escala de planta piloto y la complejidad del proceso, el desarrollo de equipos se acabó estancando y en el año 2002 Maxwell decidió cerrar la compañía (Toepfl et al., 2007).

Prácticamente al mismo tiempo que desaparecía PurePulse Technologies, comenzó a extenderse una nueva tecnología de interruptores de estado sólido, evolución de los tiristores, los transistores bipolares de puerta aislada (IGBT, del inglés “insulated gate bipolar transistor”). Estos transistores pueden conectarse en serie (hasta 20) permitiendo el uso de frecuencias, intensidades y voltajes mucho más elevados que los tiristores, manteniendo un control óptimo de la descarga (pulsos de onda cuadrada) (de Haan, 2007). Además, los IGBT permiten aplicar hasta 10^{12} pulsos, por lo que su vida útil es mucho mayor que la de los spark-gap. Debido a estas ventajas, estos transistores han acabado imponiéndose al resto de configuraciones, dando lugar a desarrollos que no eran posibles hasta ahora. Así, en los

últimos diez años el Instituto Alemán de Tecnología Alimentaria (DIL, Quakenbrück, Alemania) y las empresas Diversified Technologies Inc. (DTI, Bedford, EE.UU.) y ScandiNova Systems (Upsala, Suecia) han construido y comercializado equipos de PEAV de hasta 50 kW de potencia y hasta 2000 L/h de capacidad. Fruto de ello, en el año 2005 se lanzó la primera aplicación comercial de los PEAV (Clark, 2006). La empresa Genesis Juice Corp. (Eugene, EE.UU.) comenzó a comercializar zumos de frutas de alta calidad pasteurizados por PEAV mediante un equipo comercializado por Diversified Technologies y diseñado por Universidad Estatal de Ohio (EE.UU.), el llamado sistema OSU-5 (200 L/h). Estos zumos poseían mejores características sensoriales y nutricionales que los zumos elaborados mediante pasteurización térmica y una vida útil en refrigeración de cuatro semanas. Sin embargo, por diversos problemas económicos Genesis Juice Corp. dejó de producir zumos a mediados del año 2007 y acabó cerrando definitivamente a principios del año 2008.

Ante la necesidad de aumentar los flujos de producto para dar respuesta a las exigencias del sector industrial, en los últimos cinco años están surgiendo nuevos equipos basados en el llamado generador de Marx. Estos se fundamentan en la carga en paralelo de varios condensadores de alta capacidad, y su posterior descarga en serie a través de un sistema de interruptores, lo que permite construir equipos eléctricos de alta potencia a costes asumibles. El Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT, Karlsruhe, Alemania) fue uno de los primeros en implementar este tipo de generadores entre los años 2005 y 2008 en equipos de PEAV destinados a mejorar los procesos de transferencia de masa en la industria alimentaria, como la extracción de azúcar a partir de remolacha azucarera o la elaboración de vino (Sack et al., 2010).

Además del aumento de la potencia de los generadores de PEAV, otro de los instrumentos utilizados para maximizar la intensidad y homogeneidad de los tratamientos, y aumentar los flujos de producto, ha sido la optimización del diseño y geometría de la cámara de tratamiento (Meneses, Jaeger, Moritz, & Knorr, 2011). Mientras que los primeros equipos únicamente podían tratar pequeñas cantidades de producto en cámaras estáticas, la evolución tecnológica de los generadores de PEAV ha permitido que sea posible tratar alimentos líquidos utilizando cámaras de flujo continuo. De manera simplificada, es posible agrupar los principales diseños de cámaras de flujo continuo en tres categorías diferentes: electrodos paralelos, diseño coaxial y diseño colineal (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006) (Figura 2). El diseño colineal es el más generalizado ya que reduce considerablemente la superficie de los electrodos y, en consecuencia, las necesidades de intensidad de corriente (Dunn, 2001). Además, su sección circular permite un fácil acoplamiento de la cámara a las conducciones industriales. Sin embargo, su principal desventaja es que la distribución del campo eléctrico en la zona de tratamiento no es uniforme. Esto ha de ser tenido en cuenta al definir las condiciones de procesado, ya que hay que garantizar que todo el alimento recibe el tratamiento mínimo adecuado (Meneses et al., 2011). Atendiendo a ello, en la última década se ha generalizado el uso de métodos numéricos de simulación para mejorar el diseño de este tipo de cámaras, tendiendo en cuenta tanto la distribución del campo eléctrico y la temperatura como las características del flujo de producto (Buckow, Schroeder, Berres, Baumann, & Knoerzer, 2010;

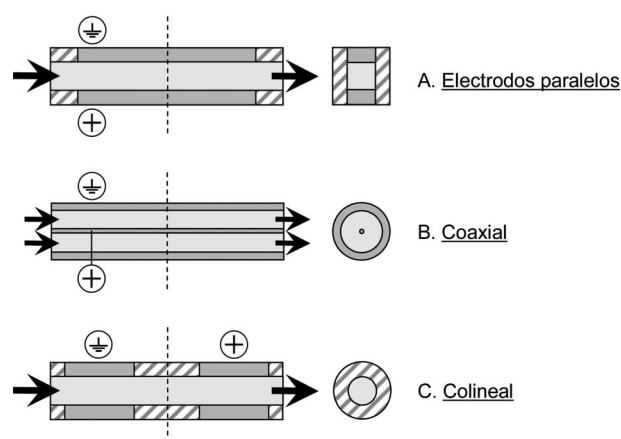


Figura 2. Principales diseños de cámaras de tratamiento de flujo continuo: diseño de electrodos paralelos (A), diseño coaxial (B) y diseño colineal (C). Las flechas indican la entrada y la salida del producto. Gris oscuro: electrodos. Gris claro: producto. Zonas rayadas: material aislante.

Figure 2. Schematic configurations of the most used PEF continuous treatment chambers: parallel electrodes (A), coaxial (B), and colinear (C). Arrows indicate the product inlet and outlet. Dark gray: electrodes. Light gray: product. Hatched areas: insulating material.

Fiala, Wouters, van den Bosch, & Creyghton, 2001; Gerlach et al., 2008; Jaeger, Meneses, & Knorr, 2009; Lindgren, Aronsson, Galt, & Ohlsson, 2002).

Además del diseño, otro aspecto fundamental de las cámaras de tratamiento es la elección de los materiales utilizados en su fabricación. Éstos, tanto en los electrodos como en los aislantes, no deben interaccionar con los productos que se tratan y se deben poder limpiar con facilidad (Zhang, Barbosa-Cánovas, & Swanson, 1995). Algunos de los materiales recomendados para la fabricación de los electrodos son el acero inoxidable, el grafito o el titanio, mientras que para el aislante, cerámicas o polímeros plásticos. Sin embargo, debido a la transmisión de la corriente eléctrica entre los electrodos siempre existe cierto paso de moléculas del electrodo al alimento y viceversa (Morren, Roodenburg, & de Haan, 2003; Rodenburg, Morren, Berg, & de Haan, 2005a, 2005b). Así, en la actualidad se está investigando el uso de recubrimientos de diversos materiales plásticos o cerámicos para evitar, o al menos minimizar, esta clase de problemas (Pizzichemi, 2009; Rodenburg et al., 2010).

Paralelamente al progreso tecnológico, en los últimos años se ha puesto de manifiesto el importante efecto sinérgico de los PEAV y la temperatura, incluso a temperaturas no letales (Heinz, Toepfl, & Knorr, 2003; Saldaña et al., 2010, 2011; Sepúlveda, Góngora-Nieto, San-Martín, & Barbosa-Cánovas, 2005; Toepfl, Heinz, et al., 2006). Según los datos publicados hasta la fecha, el uso combinado de temperaturas y tratamientos de PEAV moderados (50–70°C; 20–25 kV/cm, <150 kJ/kg) podría ser suficiente para garantizar la pasteurización de alimentos líquidos (Saldaña et al., 2011). Esta baja intensidad de tratamiento permite mejorar los flujos de producto, lo que unido al aumento de la potencia de los equipos y la optimización de los diseños de las cámaras de tratamiento, está permitiendo acercarse cada vez más a los requerimientos industriales (Bermúdez-Aguirre & Barbosa-

Cánovas, 2011). Por ejemplo, el Instituto Alemán de Tecnología Alimentaria (DIL) ha comenzado a comercializar en el año 2011 un sistema de 80 kW para inactivación microbiana, que permite procesar hasta 5000 L/h, en función de la cámara y de las condiciones de tratamiento (Toepfl, 2011). La combinación de los PEAV a temperaturas moderadas con otras técnicas, como los compuestos antimicrobianos (Mosqueda-Melgar et al., 2008; Saldaña et al., 2011), podría permitir disminuir más si cabe la intensidad de los tratamientos de PEAV necesarios, mejorando el flujo del producto por encima de esos 5000 L/h. En cualquier caso, aunque se puede concluir que a nivel técnico la aplicación de los PEAV a escala comercial es posible, antes de plantear su uso generalizado hay diversos factores que deberían ser estudiados con mayor profundidad, como la minimización del paso de sustancias de los electrodos al alimento y la mejora del diseño de las cámaras de tratamiento para garantizar la homogeneidad del procesado (Barbosa-Cánovas Ghani-Abaali, Juliano, & Knoerzer, 2011; Martín-Belloso & Elez-Matínez, 2005).

Impacto ambiental

En la actualidad apenas existen estudios sobre el impacto ambiental que podría tener el uso de esta tecnología (Pereira & Vicente, 2010). En cualquier caso, se estima que los PEAV es uno de los procesos de conservación emergentes más respetuosos con el ambiente, ya que únicamente consume corriente eléctrica y no genera ningún tipo de producto de desecho (emisión de CO₂, productos de combustión, etc.). En el caso de la combinación de los PEAV con temperaturas moderadas, habría que tener en cuenta en los estudios la necesidad de precalentar el producto mediante sistemas tradicionales (uso de combustibles fósiles). Sin embargo, en ciertas condiciones esta fase de precalentamiento no tendría un impacto muy alto o incluso no sería necesaria, ya que el calor generado por el propio tratamiento de PEAV debido al calentamiento óhmico del producto, podría ser suficiente para alcanzar la temperatura de tratamiento (Saldaña et al., 2011).

Siempre que el proceso esté optimizado, se considera que los PEAV permiten ahorrar energía respecto a los tratamientos térmicos convencionales (Toepfl, Mathys, et al., 2006). Por ejemplo, se ha calculado que la energía específica necesaria para la pasteurización de la leche mediante PEAV se sitúa entre los 110 y los 200 kJ/L, lejos de los alrededor de 300 kJ/L necesarios para la pasteurización HTST (Sobrino-López & Martín-Belloso, 2010). Es cierto que estos 300 kJ/L pueden reducirse hasta en un 80–95% gracias a los procesos de recuperación de energía, pero también lo es que en el caso de los PEAV combinados con temperaturas moderadas se podrían utilizar equipos de recuperación similares (Toepfl Mathys, et al., 2006). Asimismo, dado que la temperatura a utilizar sería inferior (alrededor de 60°C), también podría producirse un ahorro energético indirecto, al requerir menos energía de enfriamiento que en la pasteurización HTST.

Lung, Masanet y Mckane (2006) publicaron uno de los pocos estudios hasta la fecha sobre el impacto ambiental que podría tener esta tecnología. Los autores estimaron el impacto que supondría la sustitución de los tratamientos térmicos de pasteurización por la tecnología de los PEAV en la producción de zumo de naranja en EE.UU. Calcularon que esta tecnología potencialmente permitiría ahorrar al año entre 15 y 36 GWh de electricidad (entre un 10 y 18% del

total) y entre 790,76 y 1096,52 TJ en equivalentes en combustibles fósiles (el 100% del total, al utilizar sólo electricidad). Este ahorro se traduciría además en una reducción de la emisión de CO₂ a la atmósfera de 35–66 kt al año, lo que equivale a las emisiones anuales de entre 7800 y 14500 automóviles. Sin embargo, la inexistencia de datos a nivel piloto o industrial que avalaran dichas estimaciones obliga a tomar con cautela estas conclusiones. Así, para poder valorar realmente el impacto ambiental de la tecnología de los PEAV, sería necesaria la realización de estudios en base a datos obtenidos al menos a escala piloto. Además, debido a que la pasteurización mediante PEAV de cada producto exige una determinada intensidad de tratamiento (Saldaña et al., in press), estos estudios deberían de ser específicos para cada aplicación, y no podrían extrapolarse a otros alimentos.

Viabilidad económica y comercial

Cualquier estudio económico que se realice sobre una nueva tecnología es sumamente complicado, pudiendo quedarse desfasado en poco tiempo. Ello se debe a que depende por un lado del valor añadido que la tecnología aporta al producto (difícil de calcular), y por otro de los costes económicos derivados de la compra de los equipos y de la propia producción. Estos últimos pueden ser muy variables, ya que dependen a su vez de las condiciones locales (coste de agua, luz, mano de obra, ingredientes, transporte, etc.). Además, hay que tener en cuenta que, una vez que una nueva tecnología comienza a aplicarse, su coste cae debido al desarrollo industrial de la misma (producción en serie de equipos, optimización del proceso, etc.).

Cuando hablamos de la viabilidad económica de una nueva tecnología en la industria, el primer dato a valorar es la inversión necesaria para la compra del equipo (Barbosa-Cánovas & Altunakar, 2006). En los primeros estudios realizados, y ante la inexistencia de equipos que superaran los 1000 L/h, se estimó que el coste de un sistema de PEAV de escala industrial sería alto, debido a la gran potencia necesaria para conseguir los elevados requerimientos energéticos del tratamiento de PEAV sin el uso de temperaturas moderadas (pueden llegar hasta los 700 kJ/kg). Así, Braakman (2003) valoró su coste en 2–4 millones de euros en función de su capacidad (5000–10000 L/h). En otro trabajo, Toepfl, Heinz, et al. (2006) consideró que su coste podría ser incluso mayor, del orden de los 5,8 millones de euros. A pesar de estas estimaciones poco halagüeñas, el uso combinado de temperaturas moderadas (50–70°C) y tratamientos de PEAV moderados (20–25 kV/cm; <150 kJ/kg), unido a la mayor potencia de los equipos, ha permitido que el coste actual de un sistema comercial de 5000 L/h sea incluso inferior a los 500000 €. Además, es esperable que el desarrollo de la tecnología permita disminuir más si cabe esta cifra, por lo que desde el punto de vista de la inversión inicial necesaria, la aplicación de los PEAV para pasteurizar alimentos líquidos en un futuro cercano debería ser una opción a tener en cuenta.

Debido a la ausencia de datos a nivel industrial, hasta la fecha los estudios sobre el coste económico de los tratamientos de pasteurización mediante PEAV se han basado en datos obtenidos, como mucho, a nivel de planta piloto. Así, en uno de los primeros estudios detallados se evaluó el coste total (incluyendo amortización del equipo, mantenimiento, etc.) de un tratamiento de PEAV de 50–700 kJ/kg en 0,008–0,113 €/kg

(10000 kg/h; precio del kWh: 0,10 €; siete años de amortización del equipo; 1875 horas/año) (Toepfl, Heinz, et al., 2006). En otro estudio anterior llevado a cabo por el EPRI (Electronic Power Research Institute, Palo Alto, EE.UU.), los costes operacionales de un equipo planta piloto para pasteurizar se tasaron en 0,2 \$/L (Góngora-Nieto, Sepúlveda, Pedrow, Barbosa-Cánovas, & Swanson, 2002). Por su parte, la Universidad Estatal de Ohio (OSU) estimó que el coste de los tratamientos para un equipo escala semi-industrial (1000–5000 L/h) sería de entre 0,03 y 0,07 \$/L (<http://ohioline.osu.edu/fse-fact/pdf/0002.pdf>). En estos dos últimos casos, los autores no presentaron ningún desglose del gasto ni las condiciones utilizadas para su cálculo (precio del kWh, amortización, etc.). En cualquier caso, las cifras obtenidas en todos estos estudios son muy superiores a los costes de los tratamientos térmicos: se estima que la pasteurización de zumos, teniendo en cuenta los sistemas de recuperación de energía (95% de eficiencia), cuesta alrededor de 0,0002 €/L (Toepfl, Heinz, et al., 2006). Además de esta diferencia, los costes estimados descritos tienen en cuenta únicamente los factores relacionados con el tratamiento de PEAV (energía eléctrica necesaria, mantenimiento, amortización del equipo, etc.). En el caso de que el tratamiento se quisiera aplicar a temperaturas bajas (< 40°C) habría que sumar a estas cifras los gastos del sistema de refrigeración, que podrían ser muy elevados. Por ejemplo, Góngora-Nieto, Pedrow, Swanson y Barbosa-Cánovas (2003) publicaron que para pasteurizar huevo líquido mediante PEAV sería necesaria una energía de 375 kJ/L. Sin embargo, si a este valor se le sumara la energía necesaria para mantener la temperatura del producto por debajo de 40°C, los autores indicaron que el gasto energético total se dispararía hasta 714 kJ/L. Por lo tanto, el tratamiento de los alimentos mediante PEAV a bajas temperaturas únicamente cobraría sentido si el valor añadido del producto final fuera lo suficientemente alto (Toepfl, Heinz, et al., 2006).

Dentro de los estudios realizados valorando el uso combinado de los PEAV con temperaturas moderadas, quizá el más detallado sea el realizado por el Instituto Alemán de Tecnología Alimentaria (DIL) para el tratamiento de bebidas mediante dos de sus equipos comercializados, en base a unos flujos de 360 kg/h para el de 5 kW y de 2160 kg/h para el de 30 kW (Tabla 1). En este caso, la energía específica utilizada para llevar a cabo los cálculos fue de 50 kJ/kg. Con esta energía, y entrando el producto en la cámara de tratamiento a 55°C, se consiguen más de cinco ciclos logarítmicos de inactivación en *Staphylococcus aureus* o *Escherichia coli* (Toepfl, 2011). Como se observa en la Tabla 1, para una misma energía de 50 kJ/kg, el coste estimado total utilizando el equipo de mayor capacidad (30 kW; 2160 kg/h) es un 22% inferior al obtenido anteriormente por Toepfl, Heinz, et al. (2006) para el mismo nivel energético. Estas diferencias podrían ser incluso superiores si se tiene en cuenta que el precio del kWh se ha incrementado en los últimos cinco años alrededor de un 15%, y que el periodo de amortización propuesto por el DIL es inferior (cinco años en vez de siete). Además, como el coste estimado por kg es inferior en el equipo de mayor capacidad y potencia, es esperable que el escalado del proceso permita disminuir más si cabe el coste de la tecnología. A pesar de que estos datos son altamente prometedores, es necesario considerar que a estos gastos habría que añadir los costes del pretratamiento térmico y de la refrigeración del producto tras el tratamiento PEAV. Por

Tabla 1. Costes estimados (€/kg) de un tratamiento de PEAV (30 kV/cm; 50 kJ/kg) en función de la potencia del equipo (kW).

Table 1. Estimated costs (€/kg) of a PEF treatment (30 kV/cm; 50 kJ/kg) in function of the power of the equipment (kW).

	Amortización	Mantenimiento	Energía	Total
5 kW	0,00821	0,00205	0,00208	0,01234
30 kW	0,00337	0,00084	0,00208	0,00629

Coste del kWh: 0,12 €; amortización: cinco años, Horas de trabajo: 4400 h/año. Obtenido de http://www.dil-ev.de/fileadmin/user_upload/pdf/elcrack_brochure.pdf.

ello, es necesario la realización de estudios exhaustivos que valoren el coste real total de estos tratamientos teniendo en cuenta todos los gastos operacionales.

Para determinar la rentabilidad real de los PEAV, además del coste que supone el propio tratamiento (precio/L), es necesario conocer el posible valor añadido de los productos procesados, debido a sus mejores cualidades sensoriales y nutricionales. Es decir, un procesado novedoso puede ser más caro que los sistemas convencionales, pero incrementar el valor añadido del producto, pudiendo este compensar ese sobrecoste gracias a un mayor precio de venta. En este sentido, Chern, Kaneko y Tarakcioglu (2003) estudiaron lo que estarían dispuestos a pagar los consumidores por un zumo de naranja en función de sus características y del procedimiento utilizado para obtenerlo. El precio del zumo producido por PEAV se situó en 1,31 \$/L, siendo mucho más alto que el del zumo obtenido térmicamente a partir de naranjas frescas o de concentrado, 1,03 \$/L y 0,69 \$/L respectivamente, y algo inferior al precio del zumo fresco recién exprimido, 1,42 \$/L. Según estos datos, el incremento en precio debido al valor añadido que los PEAV podrían aportar al zumo de naranjas frescas tratado térmicamente se situaría en torno al 27%.

Aunque una tecnología permita obtener un producto de mayor valor añadido o disminuir los costes de producción, su éxito depende en gran medida de su aceptación por parte del consumidor (Siegrist, 2008). A pesar de que actualmente no existe ningún producto comercial tratado por PEAV, se han desarrollado varios estudios al respecto utilizando diversas metodologías: encuestas, entrevistas individualizadas, debates en grupo, etc. (Cardello, Schutz, & Lesher, 2003, 2007; Mireaux, Cox, Cotton, & Evans, 2007; Nielsen et al., 2009; Olsen, Grunert, & Sonne, 2010; Sonne et al., 2012). Como era de esperar, los resultados muestran que el consumidor evalúa en general positivamente los PEAV al tratarse de una tecnología respetuosa con el ambiente y que permite conseguir productos con mejores características sensoriales que los obtenidos mediante los procesos convencionales (Nielsen et al., 2009). Sin embargo, se ha observado que muchos consumidores asocian los PEAV con la electricidad y con ciertas tecnologías como la irradiación o las microondas, mostrándose preocupados por los posibles efectos perjudiciales para la salud que podrían tener estos alimentos (Cardello et al., 2007; Nielsen et al., 2009). Por lo tanto, para que un producto tratado por PEAV tenga éxito en el mercado, es necesario proporcionar la información adecuada para concienciar al consumidor de la seguridad de la tecnología. En algunos trabajos, los consumidores muestran además cierto escepticismo sobre si las posibles ventajas de estos productos a nivel sensorial pueden o no compensar su

posible aumento de precio, lo que afecta negativamente a su percepción de la tecnología (Butz et al., 2003; Cardello et al., 2003; Chern et al., 2003; Olsen et al., 2010). Esta cuestión podría aclararse si, además de la realización de esta clase de estudios, se llevaran a cabo paralelamente evaluaciones sensoriales de los productos tratados por PEAV.

Conclusiones

A pesar de los reveses sufridos en los primeros años de la tecnología, cada día está más cerca la aplicación de los PEAV con garantía de éxito industrial. Es esperable que el aumento de la potencia de los equipos debido a la nueva generación de interruptores y generadores permita en pocos años la aplicación de tratamientos de pasteurización a flujos incluso superiores a los 10000 L/h. Sin embargo, hay ciertos aspectos técnicos que deben ser investigados en profundidad previamente a la generalización de la tecnología a nivel industrial, como el desarrollo de cámaras de tratamiento de diseño optimizado para garantizar la homogeneidad del tratamiento, y la minimización del paso de componentes de los electrodos a los alimentos mediante la mejora de los materiales de construcción.

La implantación industrial de los PEAV requiere, además de que sea técnicamente factible, que ésta sea viable desde un punto de vista ambiental, económico y comercial. A la vista de los datos publicados en la literatura, los tratamientos de PEAV, siempre que estén optimizados, podrían aportar ventajas frente a los tratamientos térmicos convencionales. Sin embargo, la gran mayoría de estos trabajos son generales o se basan en datos obtenidos a escala de laboratorio, por lo que no permiten obtener conclusiones sólidas. Por ello, aunque los datos publicados hasta la fecha sean prometedores, antes de implantar la tecnología en cualquier línea de producción sería necesario realizar estudios individualizados para cada producto, sobre el impacto ambiental y la rentabilidad real del proceso de PEAV planteado, respecto al tratamiento térmico de pasteurización que pretende sustituir (costes Vs valor añadido), sin olvidar la mayor o menor aceptación por parte del consumidor del nuevo producto obtenido.

References

- Barbosa-Cánovas, G.V., & Altunakar, B. (2006). Pulsed electric fields processing of foods: An overview. In J.Raso & V.Heinz (Eds.), *Pulsed electric fields technology for the food industry. Fundamentals and applications* (pp. 3–21). New York, NY: Springer.
- Barbosa-Cánovas, G.V., Fernández-Molina, J.J., & Swanson, B.G. (2001). Pulsed electric fields: A novel technology for food preservation. *Agro Food Industry Hi-Tech*, 12, 9–14.
- Barbosa-Cánovas, G.V., Ghani-Abaali, A., Juliano, P., & Knoerzer, K. (2011). Introduction to innovative food processing technologies: Background, advantages, issues, and need for multiphysics modeling. In K.Knoerzer, P.Juliano, P.Roupas, & C.Versteeg (Eds.), *Innoovative food processing technologies: Advances in multiphysics simulation* (pp. 3–21). Hoboken: Wiley-Blackwell.
- Barssoti, L., Merle, P., & Cheftel, J.C. (1999). Food processing by pulsed electric fields. I. Physical aspects. *Food Reviews International*, 15, 163–180.
- Bendicho, S., Barbosa-Cánovas, G.V., & Martín, O. (2002). Milk processing by high intensity pulsed electric fields. *Trends in Food Science and Technology*, 13, 195–204.
- Bermúdez-Aguirre, D., & Barbosa-Cánovas, G.V. (2011). Recent advances in emerging nonthermal technologies. In J.M.Aguilera, G.V.Barbosa-Cánovas, R.Simpson, J.Welti-Chanes, & D.Bermúdez-Aguirre (Eds.), *Food engineering interfaces* (pp. 285–323). New York: Springer.
- Braakman, L., 2003. Breakthrough in pasteurisation-pulsed electric fields. *Food Engineering and Ingredients*, 28, 34–38.
- Buckow, R., Schroeder, S., Berres, P., Baumann, P., & Knoerzer, K. (2010). Simulation and evaluation of pilot-plant pulsed electric field (PEF) processing. *Journal of Food Engineering*, 101, 67–77.
- Butz, P., Needs, E.C., Baron, A., Bayer, O., Geisel, B., Gupta, B., ... & Tauscher, B. (2003). Consumer attitudes to high pressure food processing. *Food Agriculture and Environment*, 1, 30–34.
- Cardello, A.V., Schutz, H.G., & Leshner, L.L. (2003). Consumer concerns and expectations about novel food processing technologies: effects on product liking. *Appetite*, 40, 217–233.
- Cardello, A.V., Schutz, H.G., & Leshner, L.L. (2007). Consumer perceptions of food processed by innovative and emerging technologies: a conjoint analytic study. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 8, 73–83.
- Chern, W., Kaneko, N., & Tarakcioglu, G.B. (2003). *Willingness to pay for PEF-processed orange juice: evidence from an auction experiment*. Paper presented at the annual meeting of Agricultural and Applied Economics Associations, Montreal, Canada.
- Clark, P. (2006). Pulsed electric field processing. *Food Technology*, 60, 66–67.
- da Cruz, A.G., Fonseca-Faria, J.D.A., Isay-Saad, S.M., André-Bolini, H.M., SantAna, A.S., & Cristianini, M. (2010). High pressure processing and pulsed electric fields: potential use in probiotic dairy foods processing. *Trends in Food Science and Technology*, 21, 483–493.
- de Haan, S.W.H. (2007). Circuitry and pulse shapes in pulsed electric field treatment of food. In H.L.M.Lelieveld, S.Notermans, & S.W.H.de Haan, *Food preservation by pulsed electric fields* (pp. 43–69). Cambridge: Woodhead.
- de Haan, S.W.H., & Willcock, P.R. (2002). Comparison of the energy performance of pulse generation circuits for PEF. *Innovative in Food Science and Emerging Technologies*, 3, 349–356.
- Dunn, J.E. (2001). Pulsed electric field processing: An overview. In G.V.Barbosa-Cánovas & Q.H.Zhang (Eds.), *Pulsed electric fields in food processing: Fundamental aspects and applications* (pp. 1–30). Lancaster: Technomic.
- Fiala, A., Wouters, P.C., van den Bosch, E., & Creighton, Y.L.M. (2001). Coupled electrical-fluid model of pulsed electric field treatment in a model food system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2, 229–238.
- Gerlach, D., Alleborn, N., Baars, A., Delgado, A., Moritz, J., & Knorr, D. (2008). Numerical simulations of pulsed electric fields for food preservation: A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 408–417.
- Gómez-López, V.M., Ragaert, P., Debevere, J., & Devlieghere, F. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 18, 464–473.
- Góngora-Nieto, M.M., Pedrow, P.D., Swanson, B.G., & Barbosa-Cánovas, G.V. (2003). Energy analysis of liquid whole egg pasteurized by pulsed electric fields. *Journal of Food Engineering*, 57, 209–216.
- Góngora-Nieto, M.M., Sepúlveda, D., Pedrow, P., Barbosa-Cánovas, G., & Swanson, B. (2002). Food processing by pulsed electric fields: treatment delivery, inactivation level, and regulatory aspects. *LWT-Food Science and Technology*, 35, 375–388.
- Heinz, V., Toepfl, S., & Knorr, D. (2003). Impact of temperature on lethality and energy efficiency of apple juice pasteurization by pulsed electric fields treatment. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4, 165–175.
- Huang, K., & Wang, J. (2009). Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods pasteurization process: A review. *Journal of Food Engineering*, 95, 227–239.
- Jaeger, H., Meneses, N., & Knorr, D. (2009). Impact of PEF treatment inhomogeneity such as electric field distribution, flow characteristics and temperature effects on the inactivation of *E. coli* and milk alkaline phosphatase. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 10, 470–480.
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O., & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2, 203–235.
- Lindgren, M., Aronsson, K., Galt, S., & Ohlsson, T. (2002). Simulation of the temperature increase in pulsed electric field (PEF) continuous flow treatment chambers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 3, 233–245.

- Lung, R.B., Masanet, E., & McKane, A. (2006). The role of emerging technologies in improving energy efficiency: Examples from the food processing industry. Paper presented at the Industrial Energy Technologies Conference, New Orleans, LA.
- Martin-Belloso, O., & Elez-Martínez, P. (2005). Food safety aspects of pulsed electric fields. In D.W. Sun (Ed.), *Emerging technologies for food processing* (pp. 183–217). San Diego, CA: Elsevier.
- Meneses, N., Jaeger, H., Moritz, J., & Knorr, D. (2011). Impact of insulator shape, flow rate and electrical parameters on inactivation of *E. coli* using a continuous co-linear PEF system. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 12, 6–12.
- Min, S., Evrendilek, G.A., & Zhang, Q.H. (2007). Pulsed electric fields: Processing system, microbial and enzyme inhibition, and shelf life extension of foods. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35, 59–73.
- Mireaux, M., Cox, D.N., Cotton, A., & Evans, G. (2007). An adaptation of repertory grid methodology to evaluate Australian consumers' perception of food products produced by novel technologies. *Food Quality and Preference*, 18, 834–848.
- Morren, J., Rodenburg, B., & de Haan, S.W.H. (2003). Electrochemical reactions and electrode corrosion in pulsed electric field (PEF) treatment chambers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4, 285–295.
- Mosqueda-Melgar, J., Raybaudi-Massilia, R.M., & Martín-Belloso, O. (2008). Non-thermal pasteurization of fruit juices by combining high-intensity pulsed electric fields with natural antimicrobials. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 328–340.
- Nafchi, A.M., Bhat, R., & Karim-Alias, A. (2012). Pulsed electric fields for food preservation: An update on technological progress. In R. Bhat, A. Karim-Alias, & G. Paliyath (Eds.), *Progress in food preservation* (pp. 277–295). Oxford: Wiley-Blackwell.
- Nielsen, H.B., Sonne, A.M., Grunert, K.G., Banati, D., Pollák-Tóth, A., Lakner, Z., ... Peterman, M. (2009). Consumer perception of the use of high-pressure processing and pulsed electric field technologies in food production. *Appetite*, 52, 115–126.
- Olsen, N.V., Grunert, K.G., & Sonne, A.M. (2010). Consumer acceptance of high-pressure processing and pulsed-electric field: a review. *Trends in Food Science and Technology*, 21, 464–472.
- Pagán, R., Esplugas, S., Góngora-Nieto, M.M., Barbosa-Cánovas, G.V., & Swanson, B.G. (1998). Inactivation of *Bacillus subtilis* spores using high intensity pulsed electric fields in combination with other food conservation technologies. *Food Science and Technology International*, 4, 33–44.
- Pereira, R.N., & Vicente, A.A. (2010). Environmental impact of novel thermal and non-thermal technologies in food processing. *Food Research International*, 43, 1936–1943.
- Pizzichemi, M. (2009). Pulsed electric field inactivation of microbial cells: the use of ceramic layers to increase the efficiency of treatment. *Nuclear Physics B – Proceedings Supplements*, 197, 374–377.
- Puértolas, E., López, N., Condón, S., Álvarez, I., & Raso, J. (2010). Potential applications of PEF to improve the red wine quality. *Trends in Food Science and Technology*, 21, 247–255.
- Puértolas, E., Luengo, E., Alvarez, I., & Raso, J. (2012). Improving mass transfer to soften tissues by pulsed electric fields: Fundamentals and applications. *Annual Review of Food Science and Technology*, 3, 263–282.
- Rajkovic, A., Smigic, N., & Devlieghere, F. (2010). Contemporary strategies in combating microbial contamination in food chain. *International Journal of Food Microbiology*, 141, 29–42.
- Raso, J., Manas, P., Pagan, R., & Sala, F.J. (1999). Influence of different factor son the output power transferred into medium by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 5, 157–162.
- Rastogi, N.K. (2003). Application of high-intensity pulsed electric fields in food processing. *Food Reviews International*, 19, 229–251.
- Rodenburg, B., de Haan, S.W.H., van Bostel, L.B.J., Hatt, V., Wouters, P.C., Coronel, P., & Ferreira, J.A. (2010). Conductive plastic film electrodes for pulsed electric field (PEF) treatment – A proof of principle. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 11, 274–282.
- Rodenburg, B., Morren, J., Berg, H.E., & de Haan, S.W.H. (2005a). Metal release in a stainless steel pulsed electric field system. Part I. Effect of different pulse shapes; theory and experimental method. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6, 327–336.
- Rodenburg, B., Morren, J., Berg, H.E., & de Haan, S.W.H. (2005b). Metal release in a stainless steel pulsed electric field system. Part II. The treatment of orange juice; related to legislation and treatment chamber lifetime. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 6, 337–349.
- Sack, M., Sigler, J., Frenzel, S., Eing, C., Arnold, J., Michelberger, T., ... Müller, G. (2010). Research on industrial-scale electroporation devices fostering the extraction of substances from biological tissue. *Food Engineering Reviews*, 2, 147–156.
- Saldaña, G., Álvarez, I., Condón, S., & Raso, J. (in press). Microbiological aspects related to the feasibility of PEF technology for food pasteurization. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. doi: 10.1080/10408398.2011.638995
- Saldaña, G., Puértolas, E., Álvarez, I., Meneses, N., Knorr, D., & Raso, J. (2010). Evaluation of a static treatment chamber to investigate kinetics of microbial inactivation by pulsed electric fields at different temperatures at quasi-isothermal conditions. *Journal of Food Engineering*, 100, 349–356.
- Saldaña, G., Puértolas, E., Monfort, S., Raso, J., & Álvarez, I. (2011). Defining treatment conditions for pulsed electric field pasteurization of apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, 151, 29–35.
- Saulis, G. (2010). Electroporation of cell membranes: The fundamental effects of pulsed electric fields in food processing. *Food Engineering Reviews*, 2, 52–73.
- Sepúlveda, D.R., Góngora-Nieto, M.M., San-Martín, M.F., & Barbosa-Cánovas, G.V. (2005). Influence of treatment temperature on the inactivation of *Listeria innocua* by pulsed electric fields. *LWT-Food Science and Technology*, 38, 167–172.
- Siegrist, M. (2008). Factors influencing acceptance of innovative food technologies and products. *Trends in Food Science and Technology*, 19, 603–608.
- Sitzmann, W., & Münch, E.W. (1988). Das ELCRACK Verfahren: Ein neues Verfahren zur Verarbeitung tierischer Rohstoffe. *Die Fleischmehlindustrie*, 40, 22–28.
- Sobrinho-López, A., & Martín-Belloso, O. (2010). Review: Potential of high-intensity pulsed electric field technology for milk processing. *Food Engineering Reviews*, 2, 17–27.
- Sonne, A.M., Grunert, K.G., Olsen, N.V., Granli, B.S., Szabó, E., & Banati, D. (2012). Consumer's perception of HHP and PEF food products. *British Food Journal*, 114, 85–107.
- Teissie, J., Golzio, M., & Rols, M.P. (2005). Mechanisms of cell membrane electroporation: A minireview of our present (lack of?) knowledge. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1724, 270–280.
- Toepfl, S. (2011). Pulsed electric field food treatment – Scale up from lab to industrial scale. *Procedia Food Science*, 1, 776–779.
- Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Applications of pulsed electric fields technology for the food industry. In J. Raso & V. Heinz (Eds.), *Pulsed electric fields technology for the food industry. Fundamentals and applications* (pp. 197–221). New York, NY: Springer.
- Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). History of pulsed electric field treatment. In H.L.M. Lelieveld, S. Notermans & S.W.H. de Haan (Eds.), *Food preservation by pulsed electric fields* (pp. 9–39). Cambridge: Woodhead.
- Toepfl, S., Mathys, A., Heinz, V., & Knorr, D. (2006). Review: Potential of high hydrostatic pressure and pulsed electric fields for energy efficient and environmentally friendly food processing. *Food Reviews International*, 22, 405–423.
- Wouters, P.C., Álvarez, I., & Raso, J. (2001). Critical factors determining inactivation kinetics by pulsed electric field food processing. *Trends in Food Science and Technology*, 12, 112–121.
- Zhang, Q., Barbosa-Cánovas, G.V., & Swanson, B.G. (1995). Engineering aspects of pulsed electric field pasteurization. *Journal of Food Engineering*, 25, 261–281.