

Capítulo 6 Campos Eléctricos Pulsados

Chapter 6 Pulsed Electric Fields

PINEDA-POSADAS, Jorge Alberto^{1†*}, ORTIZ-RODRÍGUEZ, Elsa² y ORTIZ-RODRÍGUEZ, Lilia¹

¹*Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico Superior de Perote*

²*Universidad Veracruzana*

ID 1^{er} Autor: *Jorge Alberto, Pineda-Posadas* / **ORC ID:** 0000-0001-9546-4569, **CVU CONACYT ID:** 712475

ID 1^{er} Coautor: *Elsa, Ortiz-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0001-7811-5324, **CVU CONACYT ID:** 1103106

ID 2^{do} Coautor: *Lilia, Ortiz-Rodríguez* / **ORC ID:** 0000-0002-5548-0078, **CVU CONACYT ID:** 291742

DOI: 10.35429/H.2022.1.53.61

J. Pineda, E. Ortiz y L. Ortiz

*jorge.pineda@perote.tecnm.mx

L. Ortiz, F. Sandoval, G. Morales y C. Arcila (VV. AA.). *Tecnologías Emergentes Aplicadas en Alimentos. Handbooks-TI-©ECORFAN-Mexico, 2022.*

Abstract

Pulsed Electric Fields in food is an emerging technology that began to be studied in the 1960s and its purpose is to preserve food, guaranteeing its nutritional value as it is a non-thermal treatment. It is based on the inactivation of microorganisms by the application of electrical pulses that cause the deformation or destruction of the cell membrane, and is due to the accumulation of charges that attract each other, causing the compression of the membrane, reducing its thickness and forming pores. Inactivation may be reversible or irreversible, depending on the intensity or duration of treatment.

Pulsed Electric Fields, Food preservation, Inactivation of microorganisms, Non-thermal methods

Resumen

Los Campos Eléctricos Pulsados en alimentos es una tecnología emergente que comenzó a estudiarse en la década de 1960 y su propósito es conservar los alimentos, garantizando su valor nutricional al tratarse de un tratamiento no térmico. Se basa en la inactivación de microorganismos mediante la aplicación de pulsos eléctricos que provocan la deformación o destrucción de la membrana celular, y se debe a la acumulación de cargas que se atraen entre sí, provocando la compresión de la membrana, reduciendo su grosor y formando poros. La inactivación puede ser reversible o irreversible, dependiendo de la intensidad o duración del tratamiento.

Campos Eléctricos Pulsados, Conservación de alimentos, Inactivación de microorganismos, Métodos no térmicos

6.1 Introducción

Los consumidores demandan alimentos con un valor nutritivo semejante al de los productos no procesados o conservados, sin químicos, seguros microbiológicamente y de calidad, estos alimentos deben de ser procesados en base al concepto de tecnologías de barreras o vallas, empleadas para el proceso de estabilización de alimentos (Cano, 2001). En la industria alimenticia existen diferentes métodos para la preservación de los alimentos. Tienen como objetivo bloquear el efecto de los agentes internos y externos que alteran sus características como color, sabor y aspecto.

Una tecnología considerada como emergente es el uso de los Campos Eléctricos Pulsados, reconocidos como PEF (*Pulsed Electric Fields*), se basa en la concentración de pulsos de alto voltaje, que van de 10 a 80 kV/cm, en un periodo de 1 a 100 microsegundos con una aplicación total que van de 1 a 100 pulsos eléctrico. Para llevar a cabo la técnica se deberán de ubicar entre un ánodo y un cátodo los alimentos (Oblitas, 2017). La importancia de los pulsos eléctricos reside en el efecto letal que tiene en los microorganismos, sin perturbar la calidad, frescura y valor nutricional de los alimentos. Es considerado como una de las técnicas más prometedoras al ser un tratamiento no térmico de gran eficiencia, manteniendo en los alimentos los compuestos nutricionales sin alteraciones químicas. (Puértolas, Álvarez, Raso y Martínez de Marañón, 2013; Sun, 2014; Rai, 2010).

El efecto de los pulsos eléctricos sobre los microorganismos es descrito por González *et al.* (2016). Sin embargo, en los inicios en los años sesenta no se contaba con las tecnologías necesarias para desarrollarlo de una forma eficiente, y derivado de ello, en la actualidad se ha retomado como una nueva tecnología. Consiste en introducir los alimentos a una cámara con una solución electrolítica entre un ánodo y un cátodo por donde se pasa una corriente eléctrica, el medio debe tener una baja conductividad térmica y puede ser empleado en alimentos sólidos, semisólidos y líquidos con una mayor aplicación y estudios en estos últimos (Cerón-Carrillo, Palou y López-Malo, 2010), la aplicación está basada en función de las propiedades que presentan los alimentos al estar constituidos por minerales, vitaminas, grasas y agua, siendo elementos que favorecen la conducción eléctrica por las elevadas concentraciones de iones y su capacidad para transportar cargas eléctricas (Raventos, 2015).

En la actualidad existe una alta expectativa sobre las técnicas o métodos que tienen como principio la electricidad para la inactivación de los microorganismos que están presentes en los alimentos. El calentamiento óhmico es la aplicación de electricidad sin interrupción que tiende a presentar un sobrecalentamiento que anula la actividad de los microorganismos.

Otra forma de aplicar la electricidad es a través de pulsos eléctricos que suelen ser cortos y con una alta intensidad, lo que tiene un efecto destructor en la membrana celular del microorganismo por electroporación y no por calor (Fernández, 2001).

6.2 Antecedentes

Prochownick y Spaeth (1890) demostraron el efecto bactericida de una corriente eléctrica, lo que hoy en día es conocido como calentamiento óhmico por los efectos térmicos producidos. Para 1920 en Europa y Estados Unidos fue introducido un método para pasteurizar leche. Sin embargo, debido a los costos de energía y las nuevas tecnologías de la época las plantas fueron reemplazadas. En la década de 1950 se investigó sobre las descargas pulsadas de electricidad de alto voltaje, llamado tratamiento electrohidráulico, sumergiendo dos electrodos en un medio líquido dentro de un recipiente a presión, generando arcos eléctricos por pulsos de alto voltaje (Edebo y Selin, 1968). Sin embargo, no fue posible continuar con el estudio de los efectos que tienen los pulsos eléctricos ya que algunas de las tecnologías necesarias fueron concebidas hasta la década de los ochenta como las cámaras que permiten un tratamiento en flujo continuo (Huang y Wang, 2009)

La leche diafiltrada, tampón de fosfato y agua desionizada entre otros medios líquidos fueron los primeros modelos de alimentos que se usaron para investigar el efecto letal de los pulsos eléctricos en las bacterias. Sale y Hamilton (1967), fueron de los primeros en estudiar el efecto de los pulsos eléctricos sobre la inactivación de microorganismos; demostraron que la intensidad del campo eléctrico aplicado y el tiempo de tratamiento son dos factores importantes para ocasionar la muerte de los microorganismos, probando que dicha inactivación fue resultado de los pulsos eléctricos y no por la acción de productos químicos generados de la electrólisis o por el aumento de la temperatura.

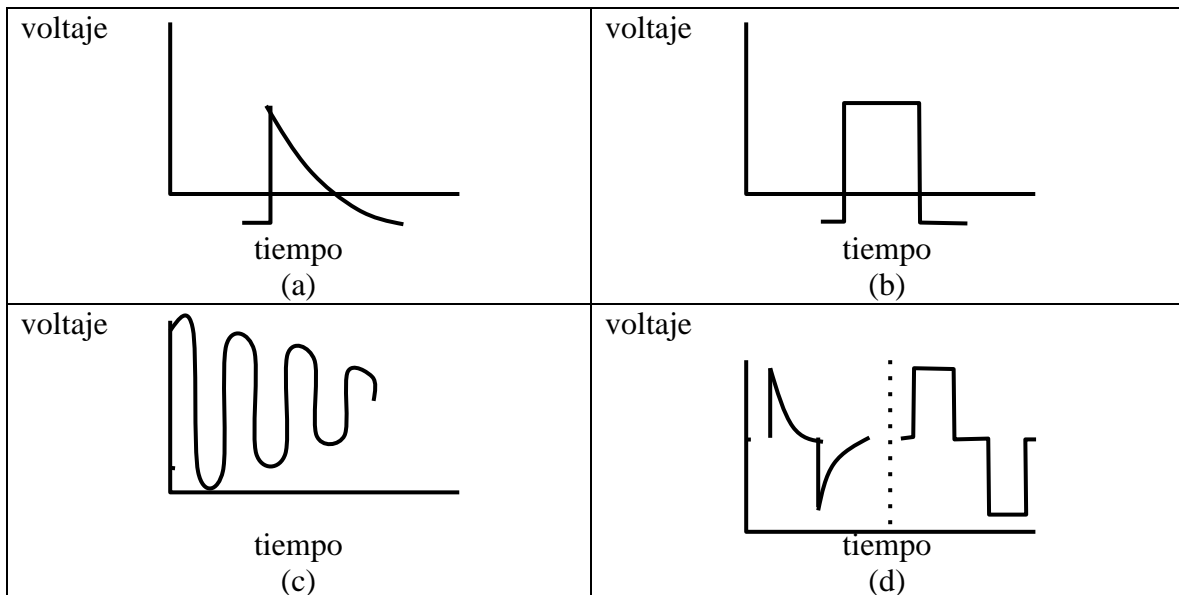
Doevenspeck (1961) determinó que los pulsos eléctricos se pueden aplicar para la ruptura de las células en el material alimentario, presentando inactivación de microorganismos y es una alternativa para el tratamiento de aguas residuales (como se cita en Grahl y Märkl, 2016). Actualmente cerca de 40 grupos y más de 500 investigadores han centrado su atención en utilizar pulsos eléctricos en alimentos. En 2006 se instaló por primera vez el procesamiento de jugo de fruta a nivel industrial en Estados Unidos, pero terminó su funcionamiento en 2008 debido a sus limitaciones comerciales. En el 2010 el primer sistema industrial para procesar vegetales fue instalado en Europa (Sun, 2014).

6.3 Funcionamiento de los Pulsos eléctricos

Oblitas (2017) describe el procedimiento usado en la aplicación de Campos Eléctricos Pulsados para la conservación de alimentos, constituido principalmente por una cámara de tratamiento donde están presente un par de electrodos (ánodo y cátodo), capacitores, una fuente de alto voltaje y un interruptor. Para llevar a cabo la técnica es necesario que la fuente eléctrica provea de corriente directa de alto voltaje, la cual es acumulada en un conjunto de capacitores, quienes descargaron la potencia eléctrica a una cámara de tratamiento, la corriente eléctrica es recibida en forma de pulsos de corta duración formando un campo eléctrico, que es necesario para la aplicación de la técnica en los alimentos. Es un principio del método generar campos eléctricos de alta intensidad ya que se debe de prevenir que una gran descarga eléctrica traspase por el alimento, derivado de ello, la duración de los pulsos eléctricos debe de ser menor al tiempo de exposición, y para poder llevarlo a cabo, existen diferentes modelos en la aplicación de los pulsos como: pulsos oscilatorios, pulsos bipolares, pulsos de onda cuadrada y de decaimiento exponencial los cuales son graficados para su interpretación (Figura 6.1).

El efecto resultante de la aplicación de pulsos eléctricos en los alimentos es la inactivación de los microorganismos por la deformación y/o destrucción de la membrana citoplasmática, la cual tiene como función el proteger y proporcionar condiciones estables en el interior de la célula del organismo. Para que sea posible la deformación o destrucción, se deben acumular cargas en los dos lados de la superficie de la membrana y cuando llega a un estado crítico (aproximadamente 1 voltio), las cargas almacenadas se atraen produciendo tensión en la membrana, disminuyendo su grosor e induciendo a la creación de poros, lo que puede según el grado de tensión afectarla de forma permanente, produciendo permeabilidad hacia el interior de las células (Wang et. al, 2018).

Figura 6.1 Modelo para pulsos



(a) Pulsos en decaimiento exponencial, (b) Pulsos de onda cuadrada, (c) Pulsos oscilatorios, y (d) Pulsos bipolares. Donde el eje horizontal representa el tiempo de descarga y el vertical el voltaje recibido. Fuente consultada: Oblitas, 2017.

La generación de pulsos eléctricos puede requerir una carga lenta y una descarga rápida de energía. En un tiempo determinado debe de considerar el ritmo y constancia entre pulso y pulso, la carga de voltaje requerida para generar los pulsos eléctricos es altamente dependiente de la distancia del electrodo. La corriente eléctrica es almacenada en un conjunto de capacitores que son instalados en serie o en paralelo (Sun, 2014). El interruptor eléctrico del sistema determina el modelo de los pulsos que genera. Sin embargo, de acuerdo con diversos estudios se describe que los modelos más usados son dos, los de onda cuadrada y los de caída exponencial. En el caso de este último, se libera una descarga eléctrica que no es regulada por los condensadores, lo que provoca un incremento de voltaje en un tiempo corto y como consecuencia existe una disminución exponencial (de Haan, 2007).

Un equipo que utiliza campos eléctricos de alta intensidad para procesar los alimentos posee un determinado número de componentes como: cámara de tratamiento, sistema de control de datos del proceso, generador de pulsos de alto voltaje, sondas de temperatura, equipo de envasado aséptico y un sistema de enfriamiento de la cámara. El interruptor eléctrico controla la fuente de energía que es depositada sobre el banco de condensadores, de ahí es dirigida a los electrodos que forman parte de la cámara de tratamiento donde se encuentra almacenado el alimento a procesar.

El diseño de la cámara de tratamiento es muy importante en la aplicación de los pulsos eléctricos ya que está relacionada con su eficiencia, se pueden mencionar dos tipos de cámaras: la estática y la continua. La cámara estática permite hacer pruebas en el laboratorio, pero no es factible para ser usada a nivel industrial a diferencia de la cámara continua. En cualquiera de los casos una vez que el alimento fue procesado se debe de envasar cuidando las condiciones asépticas y después debe de ser almacenado a una temperatura baja (Barbosa *et al.*, 1999). En el caso de plantas industriales que tienen como finalidad la conservación de los alimentos, se usan cámaras continuas con flujo no laminar. Herrero y Romero (2006) describe las cámaras de campo eléctrico convergente que cuenta con electrodos de discos separados por teflón. Es muy importante considerar la forma y el diseño en la cámara de tratamientos ya que permite mejorar la uniformidad e intensidad de los procedimientos (Meneses, Jaeger, Moritz, y Knorr, 2011).

La cámara de tratamientos es un elemento fundamental dentro de los pulsos eléctricos, y se debe de tomar en cuenta al buscar la ruptura dieléctrica que se puede conseguir cuando el campo eléctrico entre dos conductores supera el valor crítico, cuando se supera la fuerza de campo eléctrico del alimento, se producen deterioros al electrodo, lo que aumenta la presión dentro de la cámara y puede llevar a la detonación de la cámara de tratamiento (Sepulveda y Barbosa-Cánovas, 2005). En cuanto al medio (solución electrolítica) se deben de considerar factores como: conductibilidad electrolítica, presencia de sales, composición del medio y ph.

6.3.1 Efectos de los pulsos eléctricos sobre los microorganismos

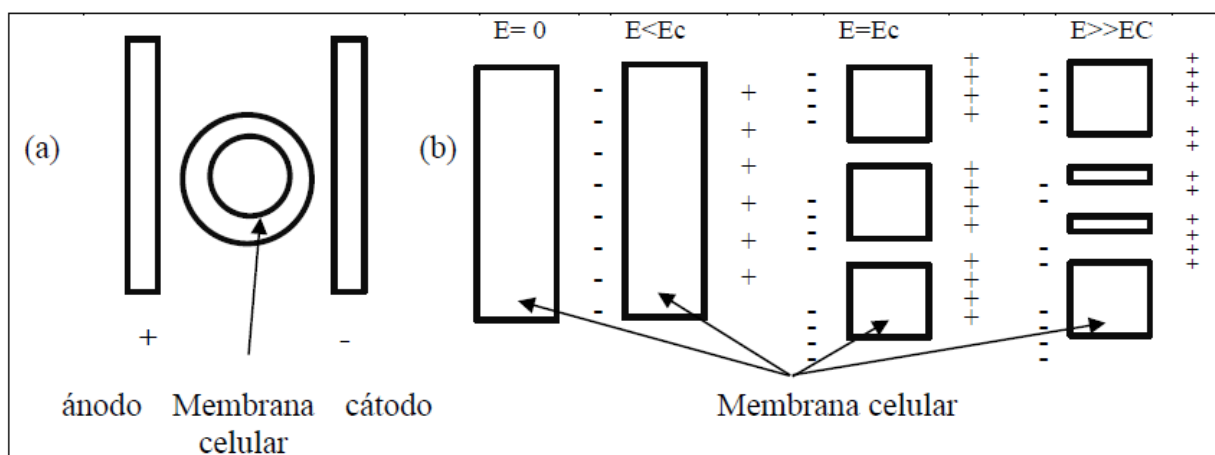
Existen disímiles niveles de inactivación para mohos, levaduras y bacterias, siendo estas últimas las más persistentes (Aronsson y Röner, 2001). La resistencia de las bacterias se debe a su estructura, ya que la capa de las esporas es gruesa y no permite la filtración hacia el interior, la aplicación de los pulsos eléctricos afecta la pared celular inactivando la germinación de la spora y afectando el protoplasma (Hamilton y Sale, 1967).

Las bacterias patógenas más relevantes, que están relacionadas con las enfermedades transmitidas por los alimentos son: *Bacillus cereus*, *Clostridium botulinum*, *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella*, *Vibrio vulnificus*, *Campylobacter*, *Listeria monocytogenes*, *Vibrio cholerae* y otras como *Vibrio parahaemolyticus*, *Aeromonas hydrophila* y *Yersinia enterocolitica* (Van Schothorst, 1999), la efectividad de los pulsos eléctricos para la destrucción de la membrana celular cambia con el tipo de microorganismos, la etapa de crecimiento en la cual se encuentra y la concentración celular. Los factores biológicos que se deben de considerar para aplicar los pulsos eléctricos, tiempo y frecuencia son el tipo de célula, el tamaño y la forma.

La inactivación de los microorganismos por la aplicación de los pulsos eléctricos se debe a un principio físico, relacionado con la deformación de la pared celular y la formación de poros, estos permiten la filtración de la membrana y de acuerdo al tamaño de los poros el daño puede ser reversible o irreversible, dependiendo del umbral de intensidad del campo eléctrico. Cuando se aplica a una célula energía eléctrica a través de un campo eléctrico externo se produce la acumulación de carga superficial y, por tanto, un aumento en la diferencia del potencial de la membrana en reposo, lo cual es el resultado de los gradientes de concentración de iones a través de la membrana y la penetrabilidad hacia el interior para cada tipo de ion. Las cargas en cada lado de la membrana son opuestas y se atraen, lo que produce una compresión de la membrana. En la membrana celular existe la concentración de aniones y cationes, cuando la intensidad del campo eléctrico es igual o mayor a la intensidad del campo eléctrico crítico se produce la creación de poros y empieza la permeabilización de la membrana. Por tanto, la inactivación del microorganismo. Si el potencial supera este valor crítico, la formación del poro es irreversible (Figura 6.2).

Se comprobó que cuando los organismos patógenos son expuestos a pulsos eléctricos no tienen la capacidad de regenerar la membrana celular que los componen y derivado de ello se inactivan y no pueden actuar sobre el alimento y sobre el consumidor final (Ulmer *et al.*, 2002). Las características del microorganismo definen la potencial transmembrana, derivado de ello, es necesario conocer los organismos patógenos que actúan en los tipos de alimentos a los cuales se pretende aplicar la técnica, otro factor a tomar en cuenta es el tamaño y la forma de la célula y las enzimas del medio en donde se encuentra (Raventós, 2015).

Figura 6.2 Modelo que ilustra la creación de poros en la membrana celular. (a) ubicación de la célula entre los electrodos; y (b) describe el proceso en la formación de poros en las membranas que son expuestas a campos eléctricos externos



En la figura 6.2 “E” representa la intensidad del campo eléctrico externo aplicado y “Ec” la intensidad del campo eléctrico crítico. Cuando se aplica los pulsos eléctricos el campo eléctrico generado, da lugar a un contraste de potencial en los dos lados de la membrana plasmática, los efectos son: la afectación mecánica de la pared celular de los organismos patógenos, la separación de las sustancias por efecto de la electricidad y calor (Raventós, 2015).

Cuando se expone a los organismos patógeno que se encuentran en los alimentos a campos eléctricos intensos, se tiene como resultado un cambio en las propiedades eléctricas de la pared celular, teniendo una repercusión en su resistencia y mejorando su conductibilidad eléctrica como resultado de la formación de poros en las membranas citoplasmáticas, reconocido el fenómeno como electrical breakdown (rompimiento eléctrico), y su destrucción será reversible o no en función de la intensidad y tiempo de exposición al tratamiento eléctrico, reconocido como voltaje crítico (V_c), el tipo de organismo, etapa de desarrollo de la célula y tamaño. (Oblitas, 2017; Puértolas *et al.*, 2013).

El potencial de la membrana se refiere a la energía almacenada en la células y está relacionado al proceso de electroporación, también llamado electropermeabilización y es posible por la diferencia de cargas de los dos lados de la membrana (interior y exterior de la célula) la cual está separando dos soluciones con distintas concentraciones de iones, el potencial de la membrana cambia al estar expuesto a un campo eléctrico exterior, por lo que el resultado del tratamiento estará en función de la forma y tamaño de la célula, lo que está relacionado con el potencial de la membrana, la intensidad del campo eléctrico y el hecho de que supere o no el umbral que permite la electropermeabilización (Vivanco, Ardiles, Castillo y Puente, 2021).

Cuando una célula es presentada a un campo eléctrico los efectos pueden ser divididos en cuatro etapas: primero un incremento en el potencial de la membrana, segundo comienza la formación de poros. Tercero cambia la cantidad y dimensión de los poros y cuarto la membrana recobra su integridad y es envuelta por una circulación de moléculas (Raventós, 2015).

6.3.2 Pulsos eléctricos en los alimentos

Para garantizar la seguridad alimentaria es necesario identificar los organismos patógenos, que se encuentran presentes en los alimentos que se desean preservar, lo anterior derivado de la estructura y sensibilidad de los mohos, bacterias y demás microorganismos a los tratamientos, también es necesario conocer las características de los organismos que le permiten resistir.

Para tener un efecto sobre ellos, debemos establecer los criterios que permitan reducir las poblaciones o inactivarlas (Puértolas *et al.*, 2013). La mayoría de los alimentos líquidos son preservados comercialmente por métodos como la pasteurización HST o UHT (proceso usado a nivel industrial). Aunque el calor inactiva las enzimas y los microorganismos, cambia las propiedades nutricionales, debido al proceso de desnaturalización que sufren las proteínas, así como, la pérdida de vitaminas. Por lo que existe una necesidad de nuevos métodos no térmicos, eficientes, seguros y que consideren el medio ambiente.

La validación del efecto de los pulsos eléctricos que permiten la inactivación de microorganismos, se ha estudiado desde los años sesenta teniendo una gran cantidad de investigaciones a la fecha, un ejemplo de ello es los descritos en la Tabla 1, buscando validar la técnica como un proceso de esterilización no térmica de alimentos (Oblitas, 2017) que permita conservar las propiedades nutrimentales de los mismos.

La aplicación de esta metodología se debe a la composición de los alimentos que va desde triglicéridos, minerales, vitaminas y agua, que presentan buena conductividad de las cargas eléctricas y la concentración de iones (Sun, 2014). En los alimentos sólidos se ha aplicado la técnica de Pulsos eléctricos, sin embargo, no ha sido tan eficiente como en los alimentos líquidos, usando únicamente la técnica en la actualidad para la liberación de azúcares o la extracción de elementos bioactivos (Vivanco *et al.*, 2021). A continuación, se describen algunos estudios utilizando campos eléctricos pulsados:

Tabla 6.1 Inactivación de microorganismos a través de Pulsos Eléctricos

Organismo	Medio	Autor	Campo Eléctrico (Kv/cm)	Ciclo de conteo de reducción de colonias (log)
<i>Salmonella typhimurium</i>	Caldo de carne de res	Simpson <i>et, al.</i> (1999)	15	0 - 6
<i>Escherichia coli</i>	Leche ultrafiltrada	Pothakamury <i>et, al.</i> (1995)	12	2 - 3.5
<i>E. coli</i>	Sopa de guisantes	Vega M <i>et, al.</i> (1997)	28	0 - 1
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Jugo de manzana	Zhang <i>et, al.</i> (1994)	12	1 - 4
<i>E. coli</i>	Leche ultrafiltrada	Zhang <i>et, al.</i> (1994)	36	0 - 2.5
<i>E. coli</i>	Leche ultrafiltrada	Vega Mercado <i>et, al.</i> (1997)	55	0 - 3

Fuente Consultada: Sun, 2014

6.3.3 Proceso de inactivación de microorganismos en los alimentos

Las células que son sometidas a pulsos eléctricos experimentan una permeabilidad en su membrana, la magnitud de esta permeabilidad determina la formación de poros, dando como resultado un proceso reversible o irreversible, dependiendo de las propiedades del alimento. Los estudios realizados por Wouters, Bos y Ueckert (2001), demostraron que al usar pulsos eléctricos en las células causa permeabilidad en la pared celular lo que lleva a inactivar a los organismos presentes (Fernández, 2001). Hay dos teorías que describen la destrucción de los organismos patógenos cuando se aplican los pulsos eléctricos una es la electroporación que causa el desprendimiento de la pared celular y otra la ruptura dieléctrica (Fernández, 2001).

- a) **Electroporación:** La electroporación afecta de forma parcial la capa lipídica y las proteínas estructurales de la membrana, siendo resultado de la aplicación de campos eléctricos pulsados de alto voltaje. En este caso se hace permeable la pared celular a moléculas de menor tamaño, causando turgencia y en ocasiones la ruptura de la membrana. En este caso no es común encontrar ruptura en la membrana celular, sino, una cantidad considerable de poros que causan la permeabilidad como resultado de la compresión de aniones y cationes.
- b) **Ruptura dieléctrica:** El rompimiento de la membrana citoplasmática se presenta cuando el voltaje crítico se debe a un incremento abrupto del campo eléctrico externo y se induce que la ruptura de la membrana es causada por la formación de poros que permite el paso al interior de la célula de la solución conductora, que, a su vez, causa la desintegración de la estructura celular. En este caso el daño es reversible si la cantidad de poros es irrelevante en función del tamaño total de la célula, pero, el área afectada en cuanto a tamaño y cantidad de poros es considerable en función del área total el daño será irreversible, ocasionando un daño mecánico.

La temperatura es un factor preponderante en la destrucción de la membrana celular cuando son aplicados los pulsos eléctricos al iniciar el tratamiento, el aumento de temperatura de entrada a valores moderados mejora significativamente el efecto letal (Wouters, Dutreux, Smelt y Lelieveld, 1999)

6.4 Conclusiones

Las técnicas implementadas para la conservación de alimentos buscan inactivar, deteriorar o ralentizar los patógenos presentes, manteniendo la calidad nutricional y sensorial. Los campos eléctricos pulsados son una técnica que ha demostrado ser eficiente por un efecto de electroporación en las células, la destrucción de la membrana puede ser permanente o no en función de la etapa de crecimiento de los microorganismos y la concentración celular, así como, la intensidad y duración del tratamiento eléctrico. Aún se sigue estudiando los efectos, tiempos de tratamiento, modelos de pulsos, efectividad y la combinación de esta técnica con otros tratamientos.

El continuo avance tecnológico (condensadores, interruptores, diseño de cámaras para el tratamiento, sondas de intensidad de corriente, sistemas de control, entre otros) ocasiona que la inversión realizada para el establecimiento de la industria resulte peligrosa, ya que, en un breve tiempo puede surgir una nueva tecnología más sustentable y eficiente que desplace la inversión tecnológica inicial. En el mismo contexto, cuando se habla de Pulsos eléctricos es necesario tener en cuenta que la técnica tiene como principio el uso de la corriente eléctrica, por lo que debe de ser evaluado el impacto ecológico que pueda tener, según el lugar donde se lleve a cabo. Una ventaja muy clara, es que hasta el momento no se ha reportado que su aplicación produzca desechos que afecte el medio ambiente, permitiendo catalogar la metodología como sustentable.

6.5 Referencias

- Aronsson, K., y Ronner, U. (2001). Influence of pH, water activity and temperature on the inactivation of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* by pulsed electric fields. *International of Food Science of Technology*, 2: 105-112. [https://doi.org/10.1016/S1466-8564\(01\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S1466-8564(01)00030-3)
- Barbosa-Cánovas, G.V., Pothakamury, U.R., Palou, E., y Swanson, B.G. (1999). Conservación no térmica de alimentos. Zaragoza, España: Editorial Acribia, S.A.
- Cano, P. (2001). Procesado y conservación de alimentos vegetales. *Revista Horticultura*, 150,110-114. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=171085>
- De Haan, S W. H. (2007). Circuitry and pulse shapes in pulsed electric field treatment of food, *Foodpreservation by pulsed electric field*, Woodhead, 43-69. <https://doi.org/10.1533/9781845693831.1.43>
- Edebo, L., y Selin, I. (1968) The effect of the pressure schock wave and some electrical quantities in the microbicidal effect of transient electric arcs in aqueous systems. *Journal of General Microbiology*, 50, 253-259. <https://doi.org/10.1099/00221287-50-2-253>
- Fernandez, J. (2001). Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos sin calor. *Arbor: Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 157-160. <https://doi.org/10.3989/arbor.2001.i661.827>
- Gerón-Carrillo. T. G., Palou, E., y López-Malo, A. (2010). Pulsos eléctricos: fundamentos y aplicaciones en alimentos, *Temas selectos de Ingeniería de Alimentos*, 4(1), 9-26. <https://tsia.udlap.mx/pulsos-electricos-fundamentos-y-aplicaciones-en-alimentos/>
- Grahl, T., Märkl, H. Killing of microorganisms by pulsed electric fields. *Appl Microbiol Biotechnol* 45, 148–157 (1996). <https://doi.org/10.1007/s002530050663>
- González-Aguayo, E., Campos-Montiel R. G., Pinedo-Esinoza, J. M., Contreras-Esquibel, J. C. Y Hernández Fuentes, A. D. (2016). Efectos de la aplicación de pulsos eléctricos de alto voltaje en las características fisicoquímicas de pulpa de diferentes genotipos de tuna, *Investigación y desarrollo en ciencia y tecnología de alimentos*, 1(1), 383-388. <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/3/66.pdf>
- Hamilton, W. A., y Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric field in microorganismos II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochim Biophys Acta*. 789-800. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(67\)90053-0](https://doi.org/10.1016/0304-4165(67)90053-0)
- Herrero, A.M., y Romero de Ávila, M.D. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas. *Rev. Med. Univ. Navarra*, 50(4), 71-74. <https://revistas.unav.edu/index.php/revista-de-medicina/article/view/7633/6687>
- Huang, K., y Wang, J. (2009). Designs of pulsed electric fields treatment chambers for liquid foods pasteurization process: A review. *Journal of Food Engineering*, 95, 227-239. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.06.013>

- Meneses, N., Jaeger, H., Moritz, J., y Knorr, D. (2011). Impacto 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. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2010.11.007>
- Oblitas, J. (2017). Tecnologías emergentes en la preservación de alimentos. *Caxamarca*, 16(2), 151-161. <https://revistas.unc.edu.pe/index.php/Caxamarca/article/view/26>
- Puértolas, E. Álvarez, I., Raso J., y 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. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.693542>
- Rai N. A., Zulkurnain A.M., Abdullah M., Zolkafle B., Mohd H. A., Yanti M.M.J., ALAA., E. B., Ume R., Muhammad F. M., y Rana M. A. (2020).Electrical systems for pulsed electric field applications in the food industry: An engineering perspective.*Trends in Food Science & Technology*. 104,1-13, ISSN 0924-2244. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.008>
- Raventós S.M. (2015). *Industria alimentaria: tecnologías emergentes*. Universidad Politécnica de Catalunya, pp 75-80 <http://hdl.handle.net/2099.3/36183>
- Sale, A. J., y Hamilton W. A. (1967). Effect of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeast. II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica Biophysica Acta*, 148. 781-800. [https://doi.org/10.1016/0304-4165\(67\)90052-9](https://doi.org/10.1016/0304-4165(67)90052-9)
- Sepulveda, D., y Barbosa-Cánovas, G. V. (2005). Present status and the future of PEF technology. En: Barbosa-Cánovas, G. V., Tapia, M. S. y Cano, M. P. (Eds). *Novel Food Process Technologies*. CRC Press, Boca Ratón, Fl. 1-45. <https://doi.org/10.1201/9780203997277-4>
- Sun, D.W.,(2014) *Emerging Technologies for Food Processing*. Elsevier Science & Technology, 93-115. <https://www.elsevier.com/books/emerging-technologies-for-food-processing/sun/978-0-12-411479-1>
- Ulmer, H. M., Herberhold, H., Fahsel, S., Ganzle, M. G., Winter, R., y Vogel, R. F. (2002). Effects of Pressure induced membrane phase transitions on inactivation of *HorA*, and ATP-dependent multidrug resistance transporter, in *Lactobacillus plantarum*. *Applied and Environmental Microbiology*. 68: 1088-1095. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.3.1088-1095.2002>
- Van Schorthorst, M. (1999). Microbiological and hygienic aspect of food safety. *International Food Safety Handbook*. New York: Marcel Dekker, Inc, 27-46. <https://doi.org/10.1201/9780203750346>
- Vivanco, D., Ardiles, P., Castillo, D., y Puente. L. (2021). Tecnología emergente: Campo de pulsos eléctricos (PEF) para el tratamiento de alimentos y su efecto en el contenido de antioxidantes. *Rev Chil Nutr*, 48(4): 609-619. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182021000400609>
- Wang, M. S., Wang, L. H., Bekhit, A. E., Yang, J., Hou, Z. P., Wang, Y. Z., y Zeng, X. A. (2018). A review of sublethal effects of pulsed electric field on cells in food processing. *Journal of Food Engineering*, 223, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.035>
- Wouters, P. C., Bos, A. P., y Ueckert. J. (2001) Membrane permeabilization in relation to inactivation kinetics of *Lactobacillus* species due to pulsed electric field. *Applied and Environmental Microbiology*, 67(7), 3092-3101. <https://doi.org/10.1128/AEM.67.7.3092-3101.2001>
- Wouters, P. C., Dutrueux, N., Smelt, J. P., y Lelieveld, H. L. (1999) Effects of pulsed electric fields on inactivation kinetics of *Listeria innocua*. *Applied and Environmental Microbiology*, 65(12), 5364-5371. <https://doi.org/10.1128/AEM.65.12.5364-5371.1999>