

NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS

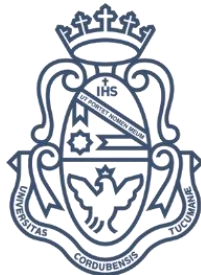
Tecnología de los alimentos

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y
Naturales. Universidad Nacional de Córdoba

Pablo D. Ribotta

pdribotta@unc.edu.ar

2023



Objetivo principal del procesamiento de alimentos



Conservación de los alimentos



Las principales razones para la conservación de los alimentos son :

- **GARANTIZAR DISPONIBILIDAD:** superar la planificación inadecuada en la agricultura, evitar deterioro
- Mejorar digestibilidad
- Proporcionar variación en la dieta
- Producir productos de valor agregado

En los procedimientos de conservación de los alimentos se deberá:

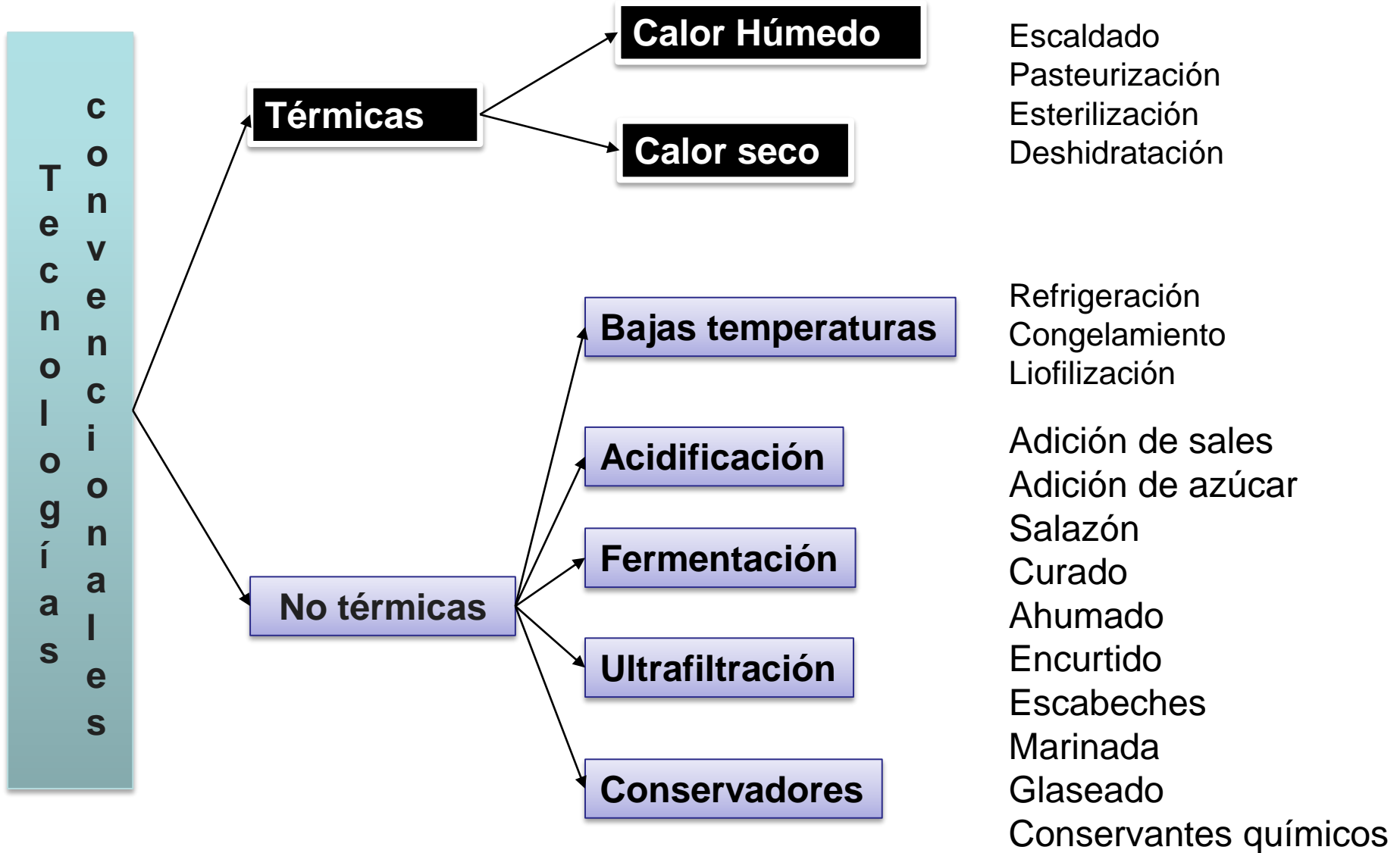
- Prevenir o retrasar la actividad microbiana
- Prevenir o retardar la descomposición de los alimentos: destruyendo o inactivando sus enzimas, previniendo o retardando las reacciones puramente químicas (ej. uso antioxidantes)
- Prevenir las lesiones debidas a insectos, roedores, causas mecánicas, etcétera.

CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS

Desde el inicio de la humanidad el hombre ha buscado la forma para conservar sus alimentos por más tiempo, iniciando esa búsqueda con técnicas rudimentarias como el salado o el secado al sol. Conforme la ciencia ha avanzado se han empleado métodos de conservación **más sofisticados** en los que se han aplicado diversos factores de conservación como la temperatura, aw, pH o la adición de conservadores.



Tecnologías convencionales de procesamiento de alimentos utilizadas principalmente en la industria alimentaria



Tendencias en el desarrollo de ALIMENTOS:

1. Una vuelta a lo natural o alimentos frescos
2. **Nuevas tecnologías: alimentos más seguros, fresco y naturales + conservación de nutrientes y características organolépticas.**
3. Alimentos saludables y funcionales.

ALIMENTACIÓN: NUTRICIÓN + MEDIO DE PROMOVER LA SALUD



Tecnologías convencionales de procesamiento de alimentos

El empleo de tecnologías de procesamiento de alimentos métodos por separado y en magnitudes elevadas



Tratamientos térmicos: dificultad de distribución uniforme de temperatura en el producto sin sobreprocesamiento, largos procesamientos asociados a menor calidad (nutricional y sensorial)



Uso extremo de cada uno de los factores
DAÑO CONSIDERABLE EN LA CALIDAD

Los consumidores están demandando alimentos:

- Más frescos
- De mayor calidad
- De mayor conveniencia
- Más naturales
- Saludables y seguros
- Con menos aditivos artificiales
- Ready-to-eat

Con el fin de armonizar estas demandas sin comprometer la seguridad alimentaria, es necesario el desarrollo de nuevas estrategias como el procesado mínimo y los métodos combinados.

Frente a estas demandas surgen

ALIMENTOS MÍNIMAMENTE PROCESADOS

Donde se aplica

Combinación inteligente de factores de conservación a bajas dosis que representan obstáculos para el crecimiento microbiano y que interactúan sinérgicamente



TECNOLOGÍA DE OBSTÁCULOS O DE BARRERAS

Dosis bajas de varios factores aprovecha interacciones significativas

Efecto barrera para controlar procesos de deterioro



Menor pérdida de calidad y seguridad

Los factores más importantes que controlan la velocidad de deterioro y la proliferación de los microorganismos en los alimentos son la disponibilidad de agua, el pH y la temperatura.

BARRERAS MAS UTILIZADAS EN ALIMENTOS

- Altas temperatura (reducción de carga microbiana inicial y actividad enzimática)
- Bajas temperaturas (retardar reacciones químicas, actividad enzimas, retrasar y prevenir actividad de mo)
- Actividad de agua (inhibición desarrollo mo)
- Acidez (pH) (inhibición desarrollo mo)
- Sal
- Potencial redox (vacío, gases inertes y atmósferas controladas)
- Conservadores
- Barreras de Origen Microbiano: Flora competitiva y Cultivos Iniciadores

NUEVAS TECNOLOGIAS DE CONSERVACION

- Menos agresivos (tratamientos no térmicos o a T menores).
- Menor consumo energético.
- Menores costos de producción
- Mayor preservación de las cualidades sensoriales del alimento.
- Mayor preservación de las cualidades nutritivas del alimento.
- Reducción/Eliminación de aditivos
- Sostenibilidad: métodos productivos más seguros, limpios y de menor consumo energético.
- Protección del medio ambiente contemplando la prevención, minimización, recuperación y reciclado de efluentes y residuos.

Nuevas técnicas de procesamiento de alimentos

T e c n o l o g í a s

Térmicas

Óhmico

Microondas

Radio frecuencia

Inyección directa de vapor

Se pueden aplicar al alimento envasado (atmósferas modificadas, vacío, películas comestibles)

No térmicas

Altas presiones

Pulsos eléctricos

Pulsos de luz

Irradiación

Plasma frío

Ultrasonido

Ultravioleta

Ozonización

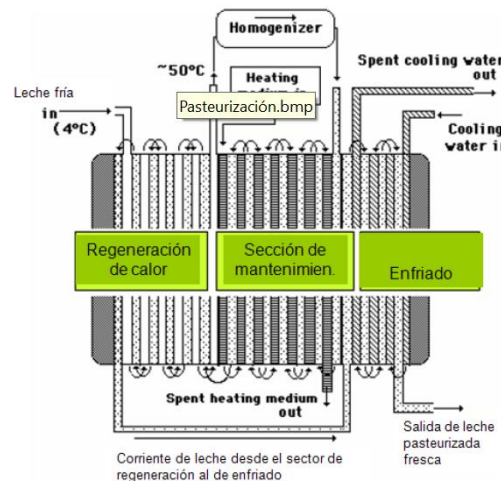
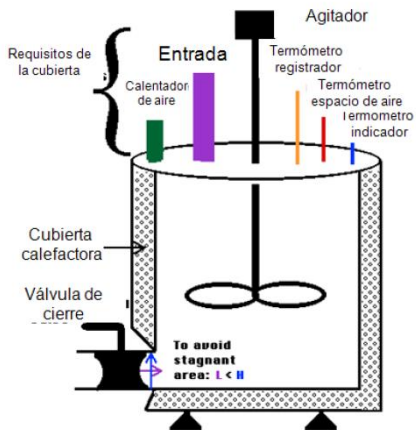
Procesos equivalente a la pasteurización, no esterilización.

La **pasteurización térmica** y la **esterilización** se utilizan predominantemente en la industria alimentaria por su **eficacia**, generalmente a expensas de sus **cualidades sensoriales y nutricionales**.

El tratamiento térmico (excesivo) puede causar **desnaturalización de proteínas, pardeamiento y pérdida de nutrientes (vit) y compuestos de sabor volátiles**.

Los avances en la tecnología permitieron la **optimización del procesamiento térmico para una máxima eficacia contra contaminantes microbianos y un deterioro mínimo de la calidad de los alimentos**.

Por ejemplo, **HTST** y **UHT** minimizan las pérdidas de vitaminas en la leche en comparación con la **pasteurización discontinua y la esterilización comercial convencional**.



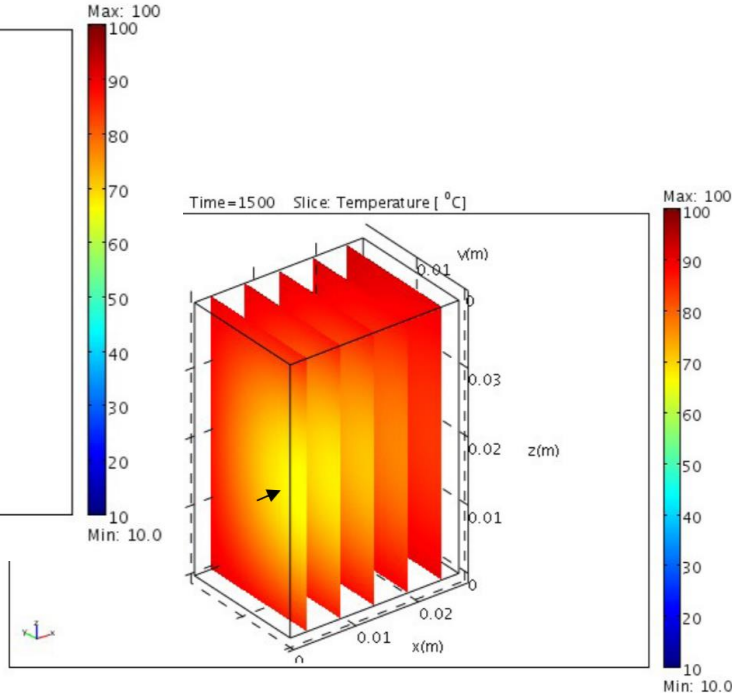
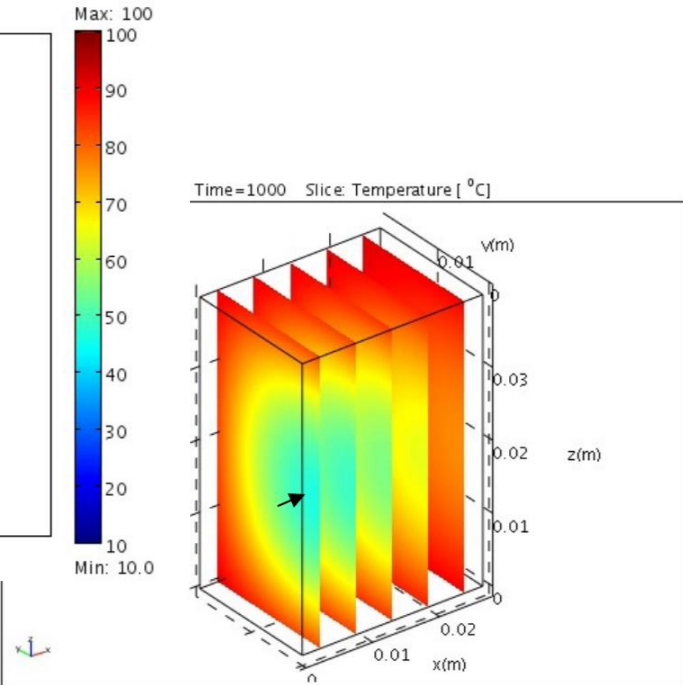
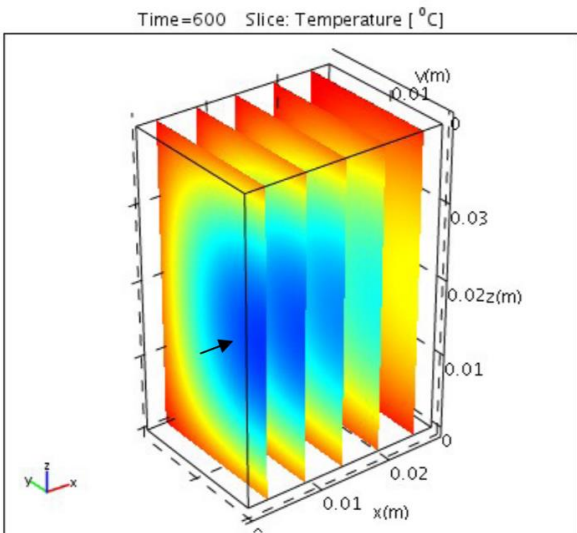
Sin embargo, los productos procesados por las **tecnologías térmicas modernas** aún carecen de **sabor y textura frescos**.

Sin olvidar que en cualquier proceso térmico suele existir:

Distribución no-uniforme de temperatura en el producto (**puntos calientes y fríos**), **sobre-procesamiento**, **largos procesamientos** asociados a menor calidad (nutricional y sensorial)



Mayores pérdidas de cualidades sensoriales y nutricionales.



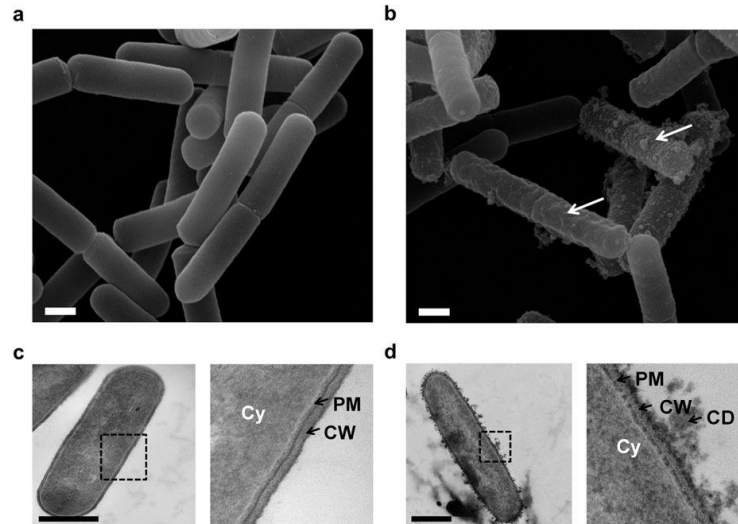
Mecanismo de inactivación

El calor puede causar la muerte celular a través de múltiples mecanismos.

- daños a las membranas,
- pérdida de nutrientes e iones,
- agregación de ribosomas,
- ruptura de filamentos de ADN,
- inactivación enzimática
- coagulación de proteínas.



Casi toda la estructura celular se ve afectada por Temperaturas elevadas

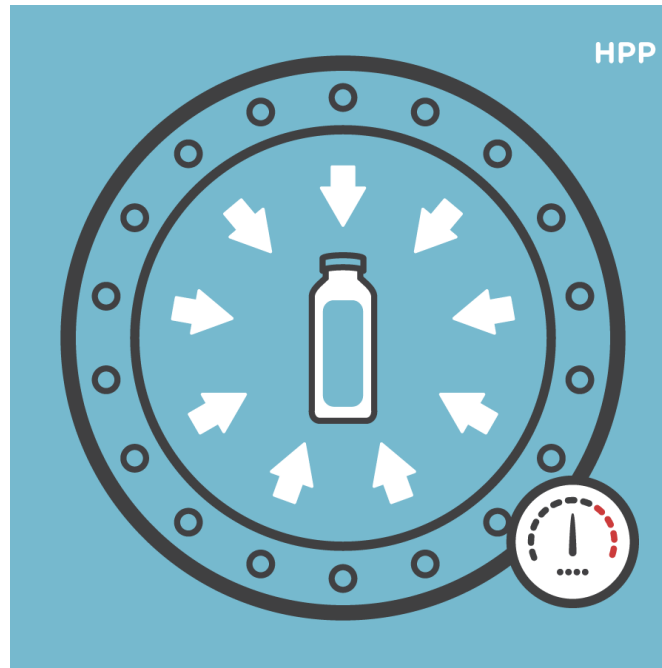


Los mecanismos de inactivación de **tecnologías no térmicas** se relacionan con:

- (i) cambiar la estructura de la membrana celular para eliminar la función reguladora del microorganismo;
- (ii) destruir materiales genéticos para causar trastornos metabólicos en el microorganismo.

Altas presiones hidrostáticas (APH): tecnología con la que se tratan alimentos líquidos o productos envasados sumergidos en un fluido a presiones entre los 1000-9000 atm \cong 100-900 MPa.

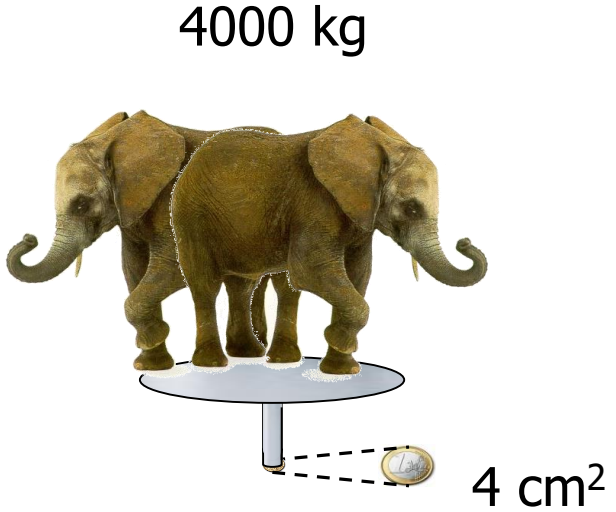
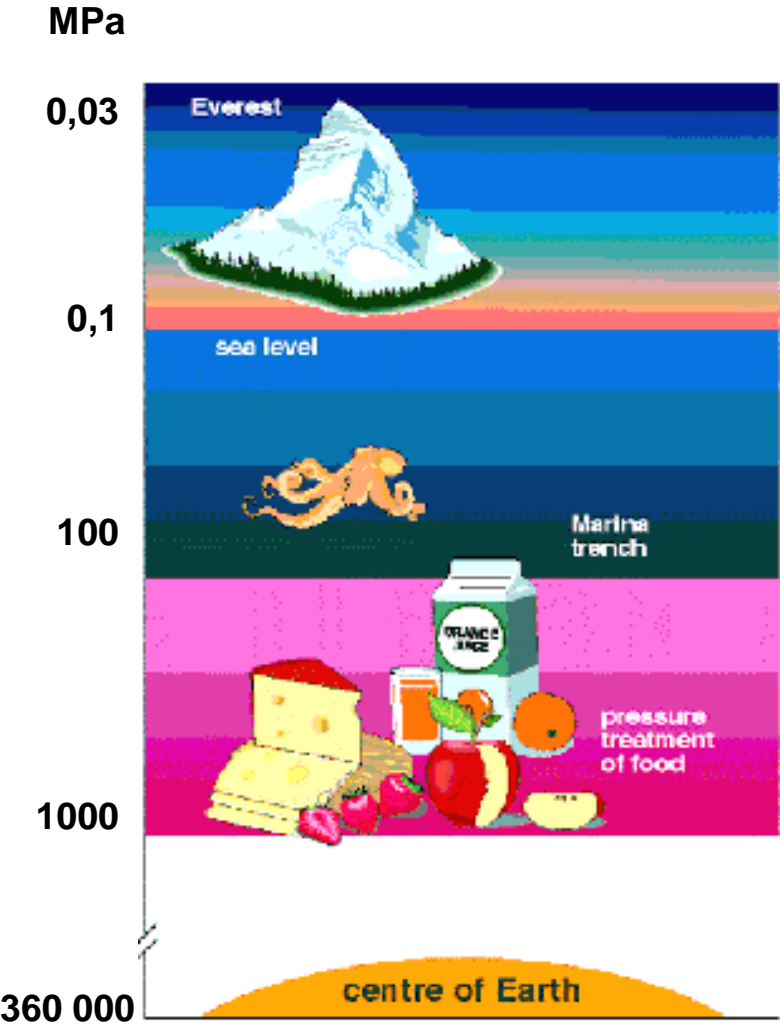
Medio utilizado para transmitir la presión suele ser agua.



El tiempo de aplicación de la presión puede oscilar entre unos pocos minutos y algunas horas, y la temperatura de tratamiento puede ir de los -20 a los 90°C .

ALTAS PRESIONES

$$\text{Presión} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Superficie}}$$



1000-9000 atm \cong 100-900 MPa

1000 bar = 100 MPa

0,101 MPa

1 atmosfera

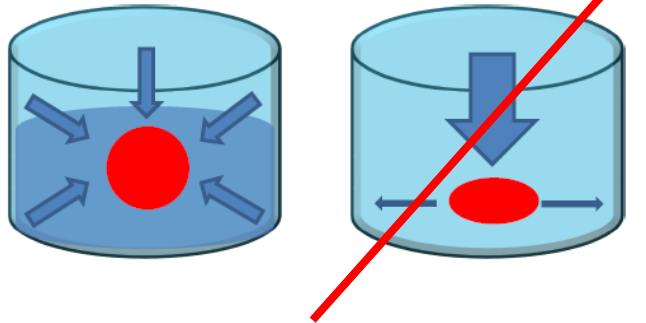
1,013 Bar

1,033 kg/cm₂

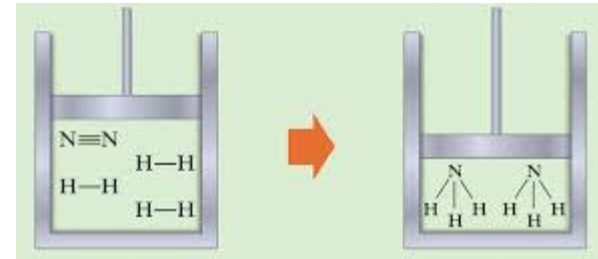
Se rige por dos principios:

Ley de Pascal: una presión externa aplicada a un fluido confinado se transmite de forma uniforme e instantánea en todas las direcciones.

Principio isostático



Le Chatelier, cualquier fenómeno (reacciones químicas, cambios moleculares, cambios de fase, etc.), que va acompañado de disminución de volumen sufre un incremento al aumentar la presión



Presión aplicada isostáticamente (uniforme) y casi instantánea a todo el alimento (envasado al vacío).

No deformación del producto y no-presenta zonas sobre-tratadas.

La intensidad del tratamiento es independiente del volumen o de la masa de producto a procesar

VENTAJAS

- Independencia del tamaño y geometría, con lo que se reduce el tiempo requerido para procesar grandes cantidades de alimentos
- Efecto uniforme en todo el alimento (todos los átomos y moléculas sujetos a la misma presión)
- Sin puntos calientes o fríos – bajo riesgo de sobre tratamiento
- Normalmente se realiza sobre alimento envasado \equiv menor riesgo de contaminación
- Mínimo calentamiento
- Reducción cambios químicos
- No aditivos – Clean level
- Reducción de cambios en propiedades sensoriales y físicas
- Conservación compuestos termolábiles
- Tecnología efectiva, segura y limpia
- Producción de alimentos novedosos (productos gelificados)

EQUIPOS

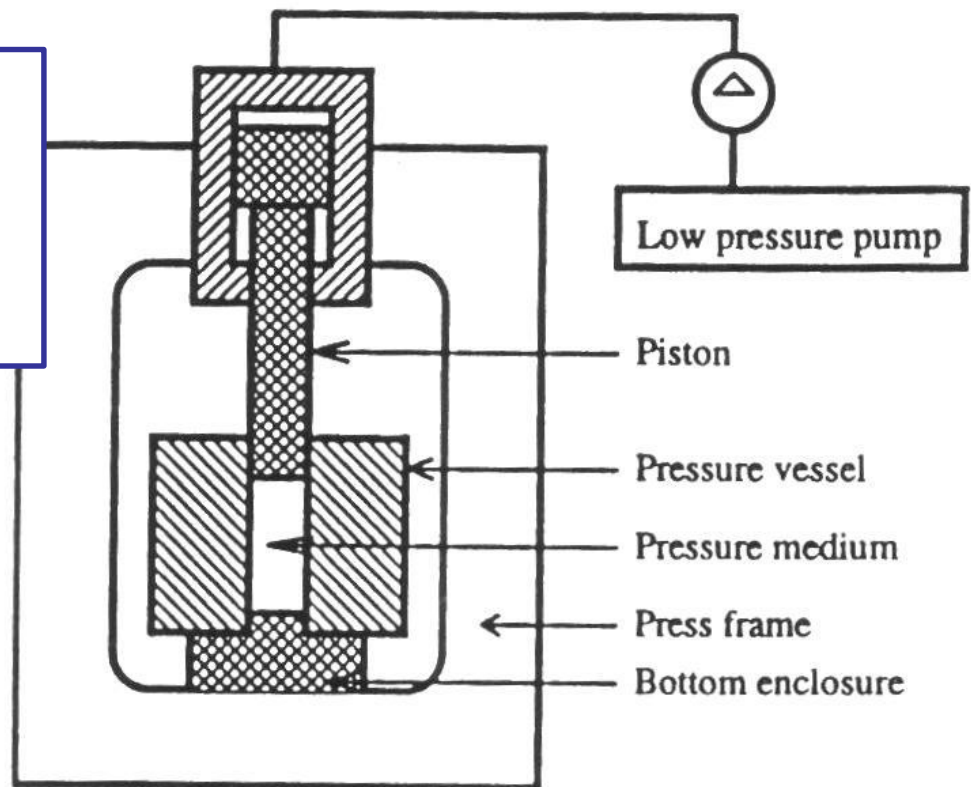
Cámara de presurización (cilíndrica de acero de elevada resistencia)

Generador de la presión (sistema de bombeo)

Sistema de control de temperatura de cámara y fluidos

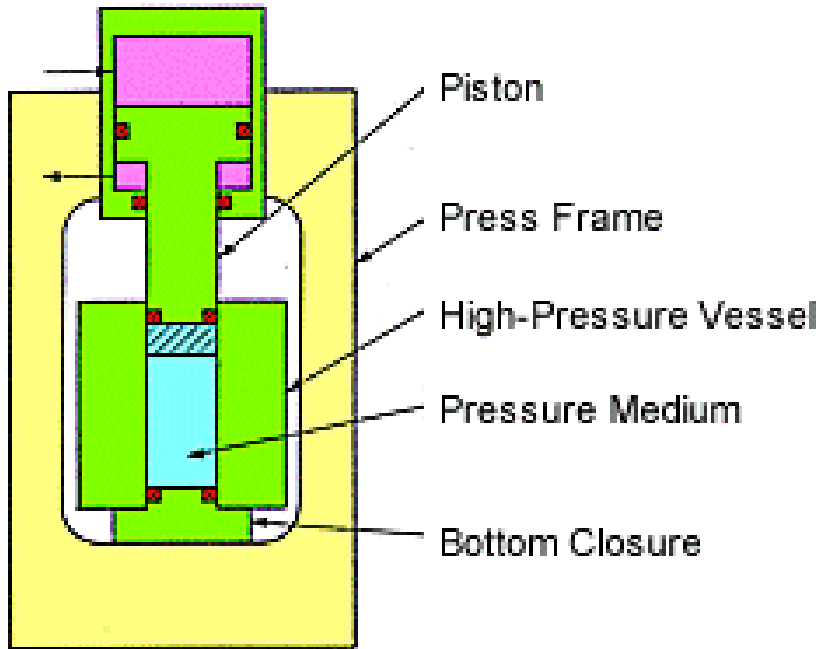
Medio de compresión:
**agua + agentes anticorrosivos +
aceites solubles (lubricación)**

Aceite sintéticos



Tipos de generadores de altas presiones

Modo directo: por pistón

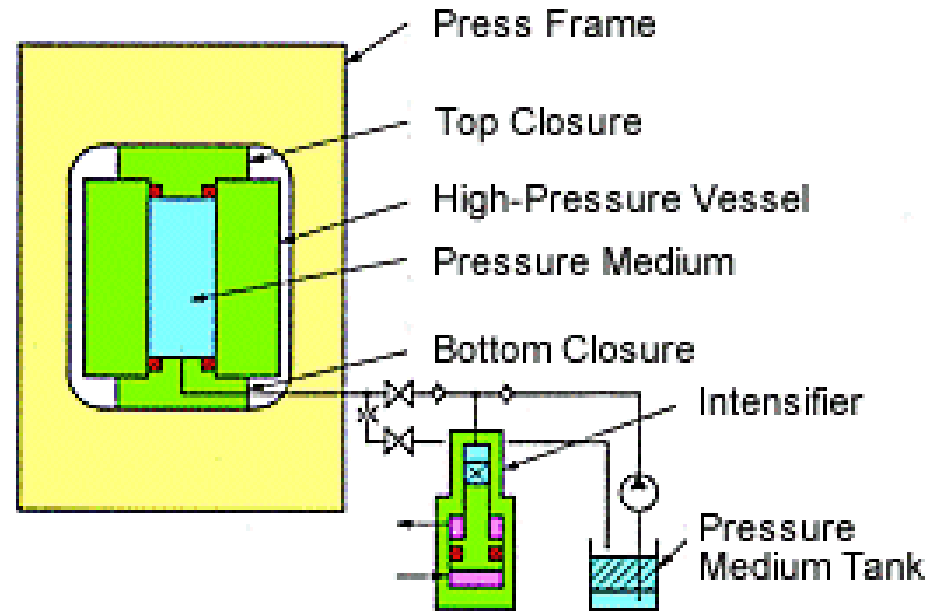


(A) Piston Direct Pressurization Type

El medio de presión se comprime directamente insertando un pistón en el recipiente a presión

Presiones > a 500MPa

Modo indirecto: presurización externa



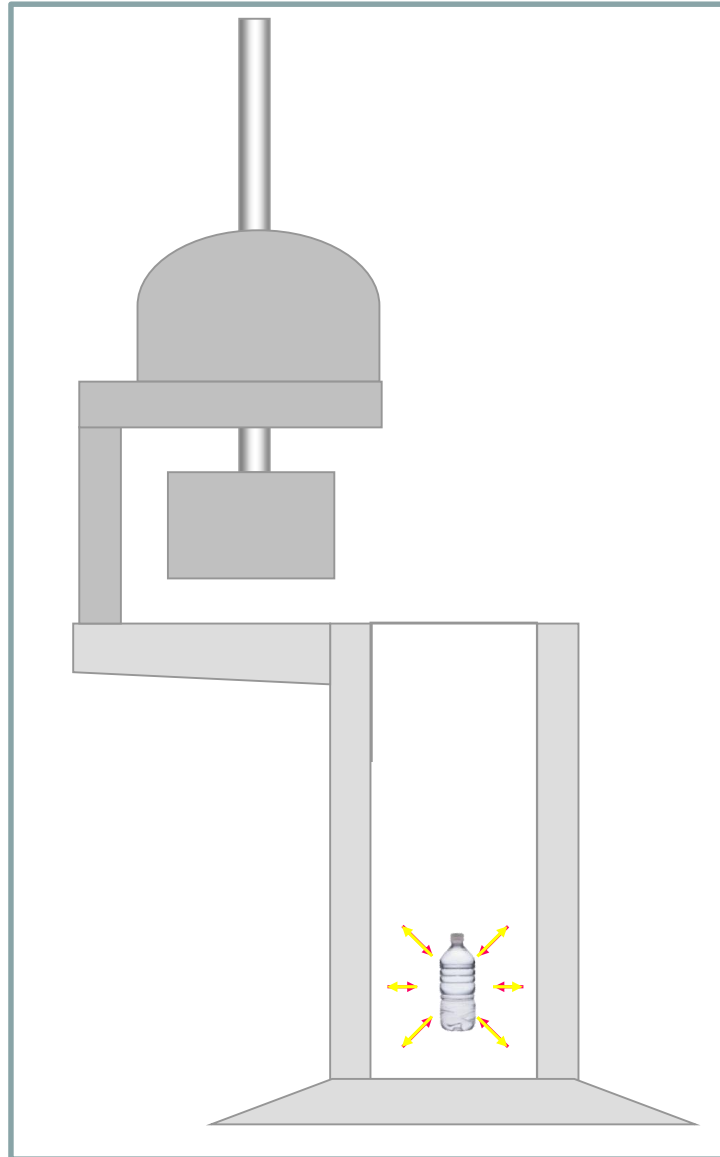
(B) External Pressurization Type

La presión aumenta por bombea del medio al recipiente de alta presión

Presiones < a 500MPa

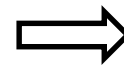
Generadores de altas presiones

Modo directo

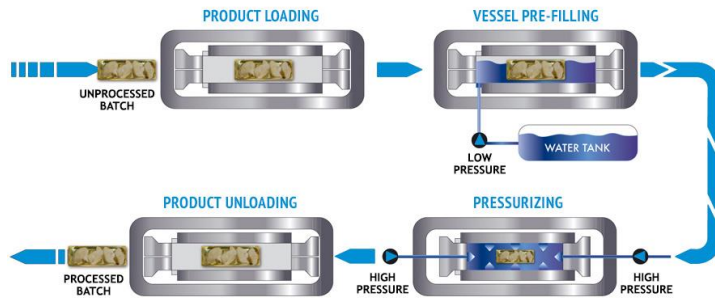
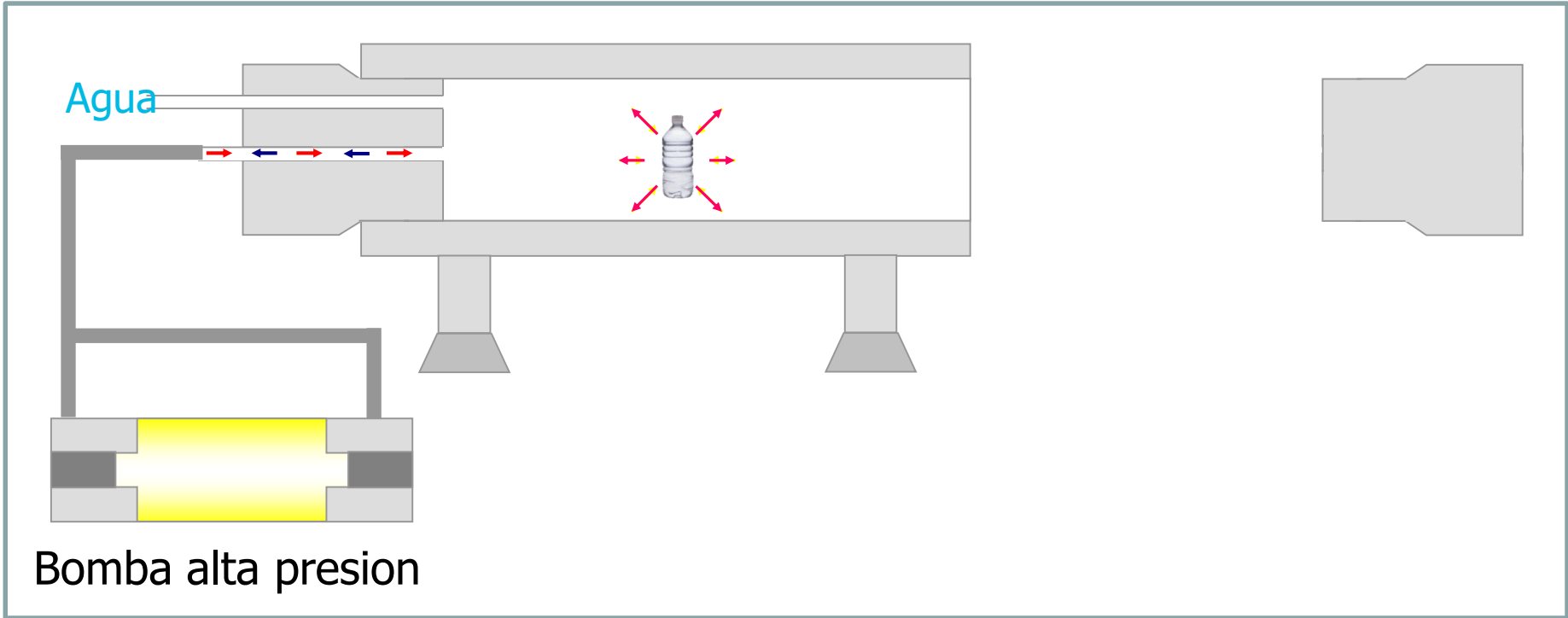


Llenar el equipo
Introducir el alimento
Cerrar el equipo
Presión : pistón
Despresurizar
Abrir el equipo

Modo indirecto: presurización externa



Mas utilizado



Introducir el alimento

Cierre del equipo

Llenado

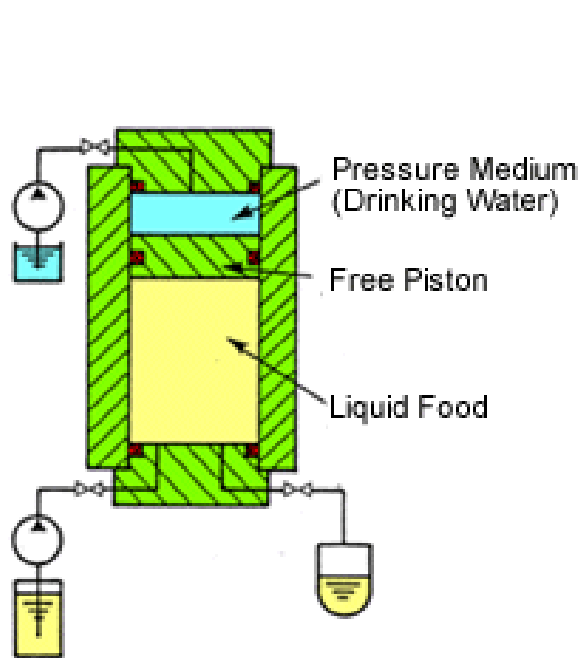
Presión (bomba)

Despresurizar

Vaciado del equipo

Abertura del equipo

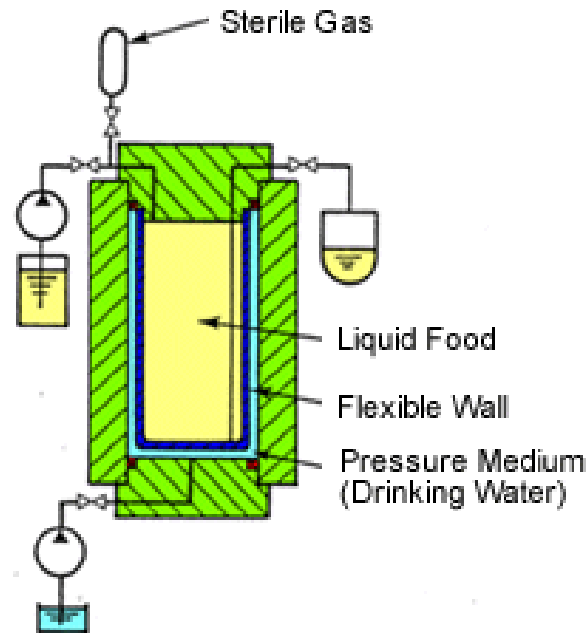
Sistemas para productos líquidos no envasados



(A) Free Piston Type

El recipiente a presión está dividido por un pistón flotante: una sección llena de alimento líquido y la otra con un medio de presión.

Cuando la sección de medio de presión es presurizado por la bomba de alta presión, el pistón es empujado hacia abajo para aplicar la presión a la comida líquida.



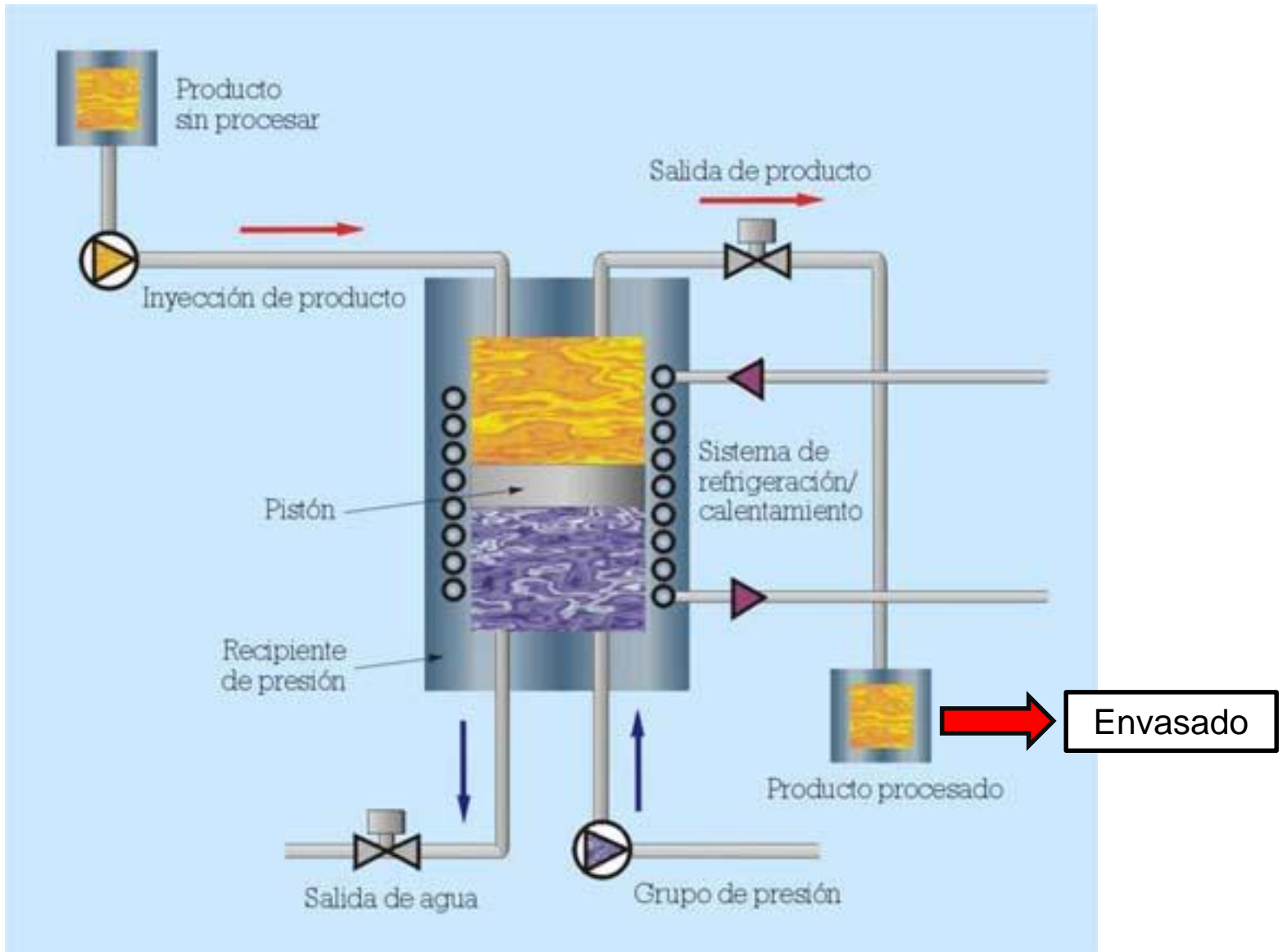
(B) Flexible Wall Type

El recipiente a presión está dividido en dos secciones por una pared flexible.

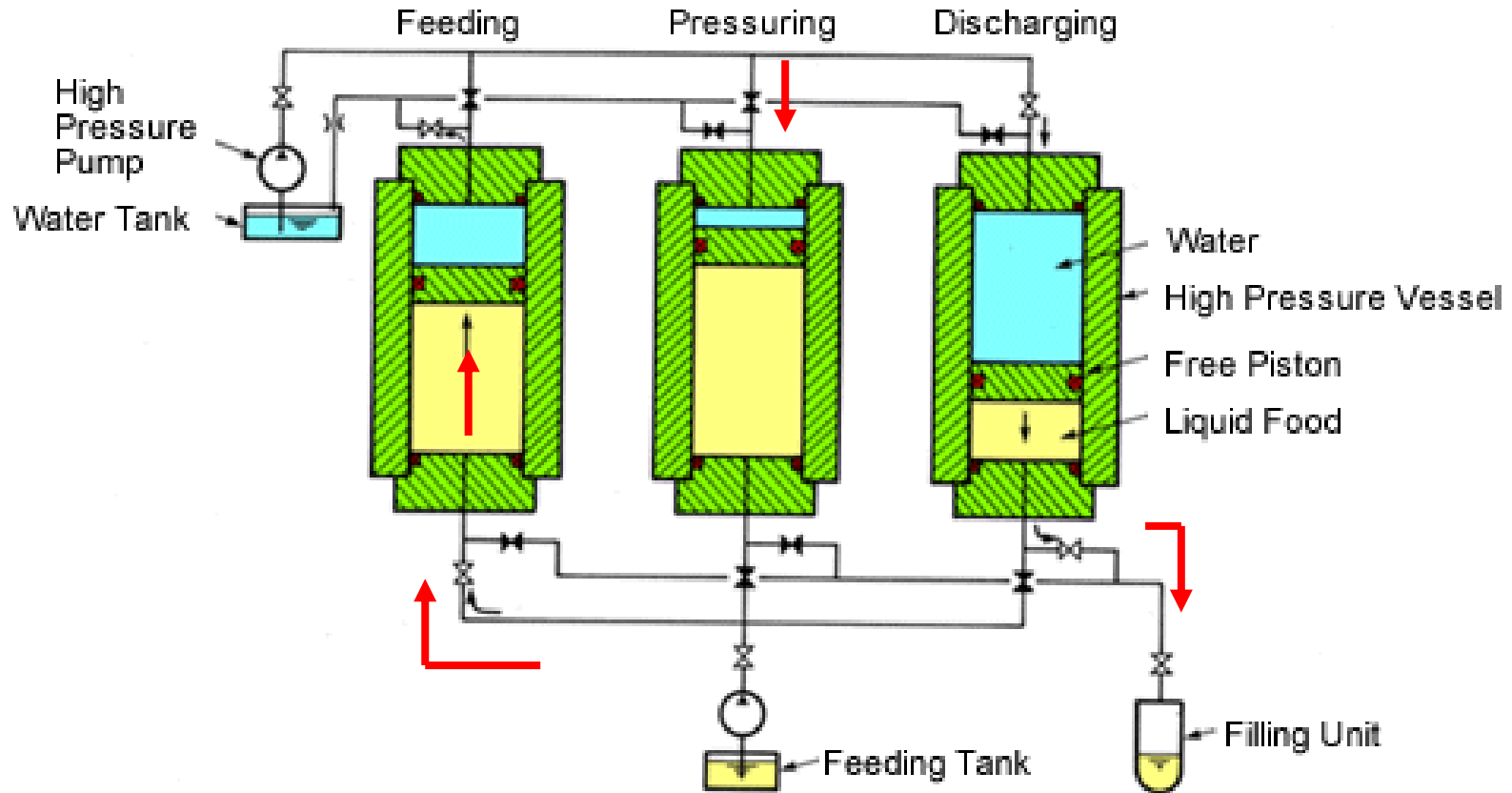
La sección interior llena de un alimento líquido y la sección exterior llena de un medio de presión.

Cuando el medio de presión es presurizado por una bomba de alta presión, la pared flexible se empuja hacia el interior para aplicar la presión a la comida líquida.

Sistemas para productos líquidos no envasados.



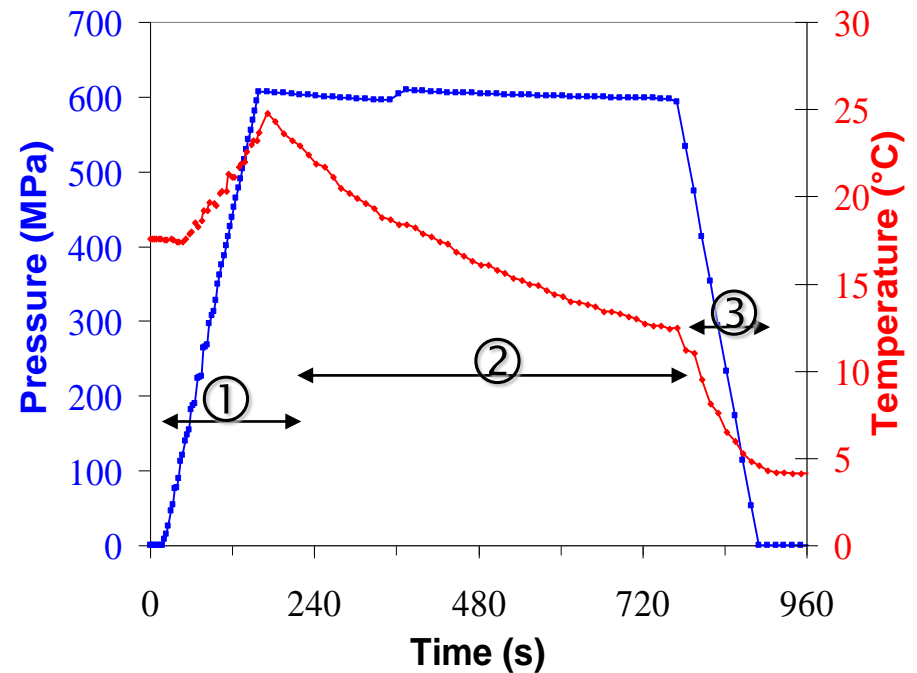
Sistema de procesamiento "continuo"



Requiere múltiples recipientes en paralelo: tres recipientes de alta presión están dispuestos en paralelo para un conjunto de intensificador y continuamente procesados por un escalonamiento de las etapas de procesamiento de cada recipiente.



Etapas del proceso altas presiones



Pre-acondicionamiento:

- refrigeración (pasteurización)
- calentamiento (para alimentos ácidos, entre 50-70°C, “esterilización”)

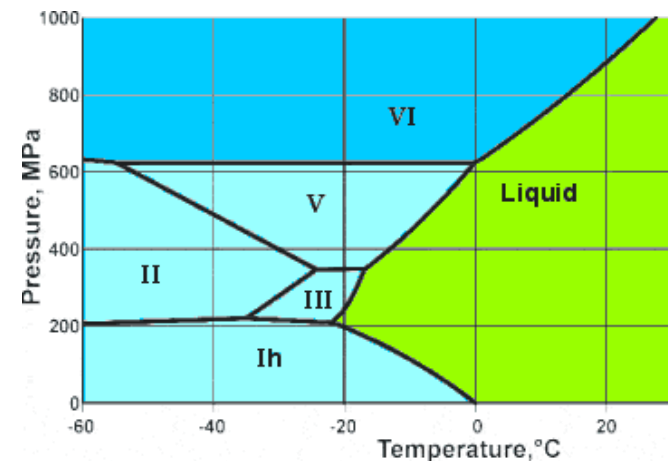
1- Incremento de la presión (2 a 3 min). Incremento de temperatura (calor de compresión - agua $\sim 3^{\circ}\text{C}/100\text{ MPa}$, aceites $\sim 6^{\circ}\text{C}-8^{\circ}\text{C}/100\text{ MPa}$)

2- Mantenimiento de la presión de trabajo (3-10 min). Temperatura disminuye por el intercambio de calor por el sistema refrigerante

3- Descompresión. Disminución de temperatura hasta valor cercano a la ambiente

EFFECTOS DE LA ALTA PRESIÓN SOBRE EL AGUA

- ❖ Se comprime poco: 4% a 100 MPa, 10% a 300 mPa y del 15% a 600 MPa, a una temperatura de 22°C.
- ❖ La compresión adiabática produce un aumento de 2 a 3°C por cada 100 MPa.
- ❖ El punto de congelación disminuye con el incremento de la presión, -5°C a 70 MPa y -20°C a 200 MPa. Puede ser líquida a -22°C (a 210 MPa).
- ❖ Se disocia. El pH disminuye por la presión, pasando de 7 a 6,27 cuando la presión aumenta de 0,1 a 1000 MPa.
- ❖ Los cristales de hielo formados bajo presión son más pequeños y tienen mayor densidad que el agua por lo que no aumenta su volumen por congelación (reducción del daño a tejidos: menos pérdida de agua y estructura más homogénea)



Efectos sobre los enlaces químicos

El comportamiento de los sistemas bioquímicos bajo presión está gobernado también por el principio de Le Chatelier:

AP favorece las reacciones que implican una disminución de volumen

Interacciones electrostáticas \Rightarrow ruptura interacciones iónicas

Interacciones hidrógeno \Rightarrow poco sensibles a la presión
 \nearrow formación

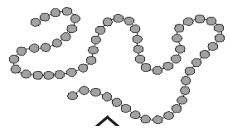
Las reacciones en las que se forman enlaces de hidrógeno se ven favorecidas por la APH, debido a que estos enlaces provocan una disminución en el volumen de las moléculas.

Interacciones hidrofóbicas \Rightarrow la presión favorece su ruptura

Enlaces covalentes: ningún efecto

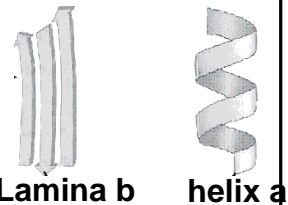
Efecto sobre proteínas

Estructura I^{ra}



- No modifica la estructura I^{ra} (enlaces covalentes no son compresibles)
- Modifica estructura 2, 3 y 4 (por debilitamiento de interacciones hidrofóbicas y la separación de enlaces electrostáticos). Produce cambios conformacionales y estructurales:

Estructura II^{ra}



- Disociación de oligómeros (~ 200 MPa)
- Despliegue y desnaturalización estructuras monoméricas, >300 mPa
- Desplegamiento de proteínas: reduce el volumen de las moléculas en un $\sim 2\%$ debido a cambios en la hidratación

Estructura III^{ra}



- Efectos variables con el tipo de proteína y el proceso (T, P, pH)
- Desnaturalizaciones reversibles para $P \leq 150$ MPa

Estructura IV^{ra}



| Temperatura | Presión |
|-------------------------------|----------------------------|
| Ruptura de enlaces peptídicos | No efecto |
| Ruptura de puentes disulfuro | No efecto |
| Desaminación | No efecto |
| Oxidación de -SH | Oxidación de -SH |
| Gelificación/precipitación | Gelificación/precipitación |

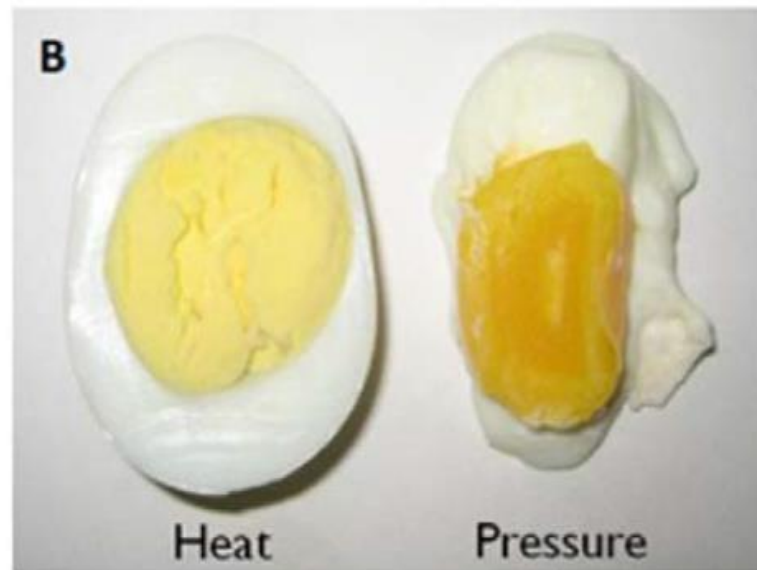
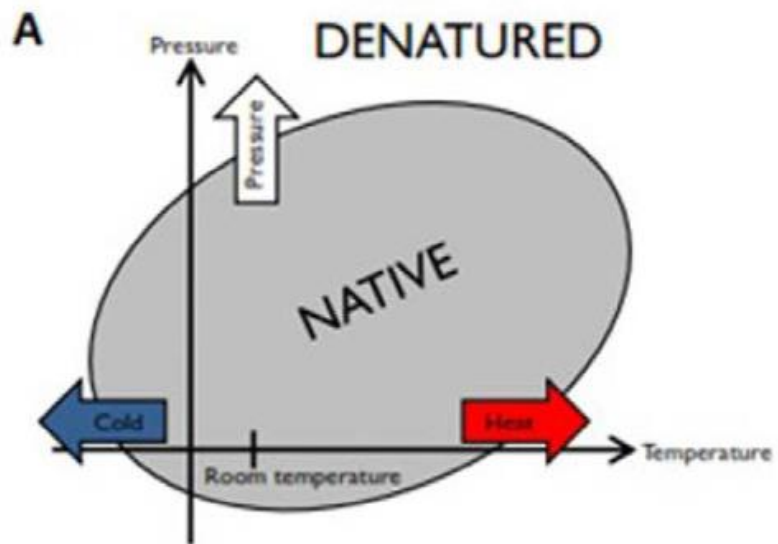


Fig. 3. A. Schematic representation of the elliptic phase diagram of proteins illustrating pressure, heat and cold denaturation (A) and B. picture of denatured eggs.
(Source: Smeller, 2002)

Efecto sobre glúcidos

Glúcidos simples son estables (enlaces covalentes no son compresibles)

Modificación glúcidos complejos (almidón = gelificación)

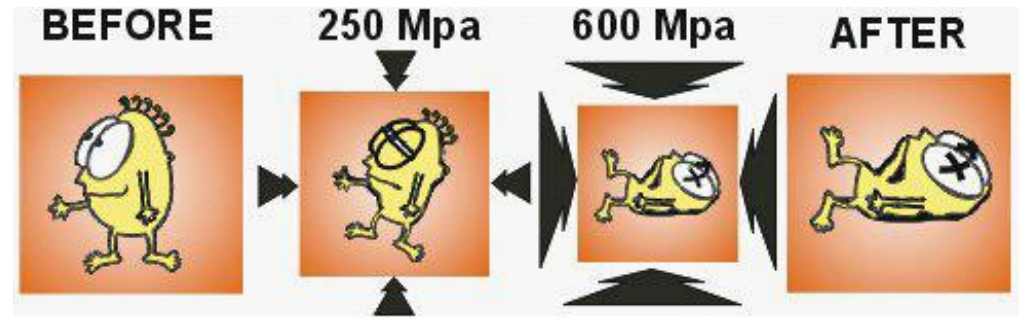
Efecto sobre lípidos. Un aumento en la presión puede producir:

Aumento de Oxidación: relacionado con desnaturalización proteínas
y liberación de iones metálicos

Efecto sobre vitaminas es bajo. Ninguno (vitamina C)

El efecto de APH sobre moléculas de baja masa moléculas es mínimo por lo que vitaminas, pigmentos y componenetes de saber son muy poco afectados

La inactivación microbiológica es el resultado de varios factores:



Modificaciones la permeabilidad y el intercambio iónico de la membrana – transferencia de masa irreversible entre el medio y el interior de la célula

Desnaturalización de proteínas

Inactivación de enzimas (replicación y transcripción del ADN)

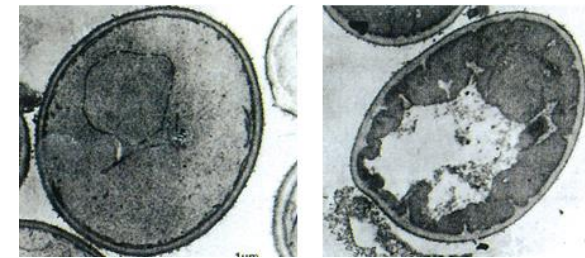
Cambio de volumen en la células

perturbación del balance físico-químico de la célula

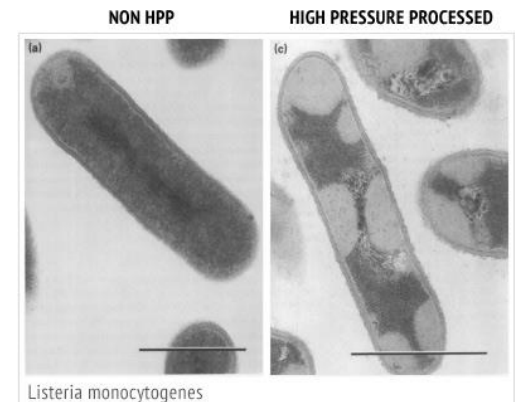
daños a estructuras internas (vacuolas)

cambios morfológicos

disminución del pH (agua y grupos ácidos)



Pressure Effects on Yeast (Left: Before Processing Right: After Processing at 600 MPa and 20°C for 10 min.)



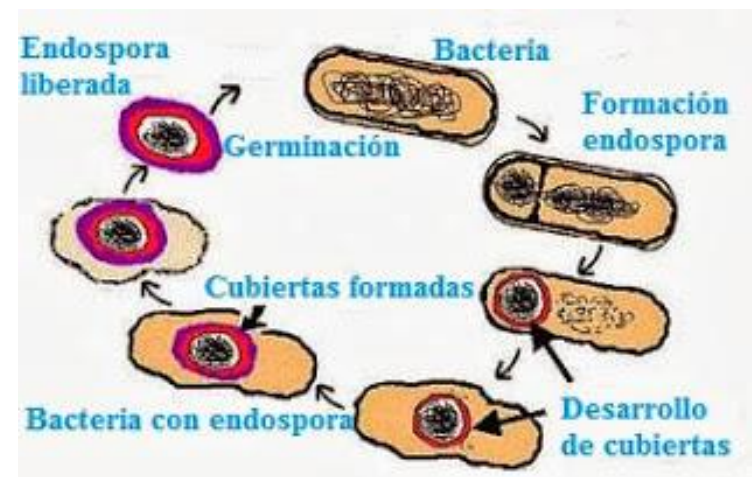
Listeria monocytogenes

Efecto sobre microorganismos

- Las células vegetativas en fase de crecimiento son más sensibles a la presión que las células que están en fase de crecimiento estacionario
- Inactivación de bacterias, levaduras y mohos para $P > 200$ MPa (Gram+ más resistentes que Gram-)
- Esporas de mohos y levaduras se inactivan a P 300-400 MPa a Ambiente
- La inactivación de las esporas bacterianas pueden resistir P de hasta 1000 MPa y Ambiente: esterilización imposible (procesos combinados)

Inactivación de esporas: la presión induce germinación de esporas, la subsecuente presión y temperatura actúan sobre la espora germinada. **Sin embargo una porción de las esporas iniciales pueden permanecer no germinar**

No esterilización, “pasteurización”



Las altas presiones modifican la estructura terciaria y cuaternaria de las proteínas



Enzimas son alteradas por la APH.

Esta alteración es debida a la modificación de las estructuras y cambios conformacionales en el sitio activo de la enzima.



Generalmente reducción de actividad o inactivación



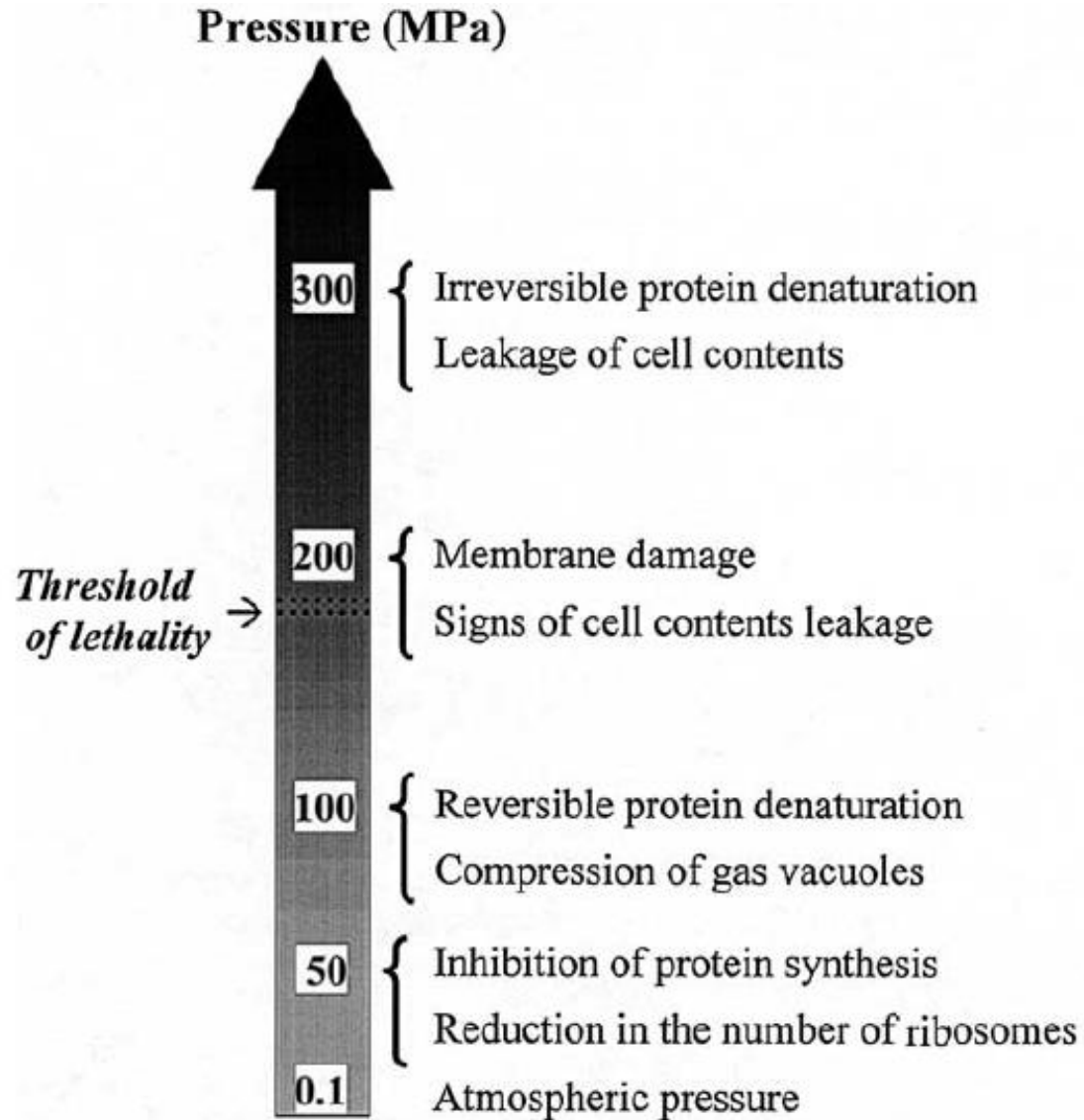
Pero: La actividad de la aspartasa de esta bacteria se incrementó cuando la presión se elevó a 680 MPa.

Otras enzimas pueden no ser afectadas

Tabla 4.- Inactivación de enzimas por alta presión hidrostática.

| Enzima | Condiciones de tratamiento | Efecto | Matriz alimentaria |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Peroxidasa | 230 MPa, 15 min, 43°C | Reducción de la actividad un 50 % | Puré de fresa |
| Transglutaminasa | 300 MPa, 10 min | Inactivación | Surimi |
| | 600 MPa | Actividad inalterada | Suero de bovino |
| Fosfatasa alcalina | 300 MPa, 5 min, 63°C | Inactivación | Leche de bovino |
| Lipoxigenasa | 689 MPa, 15 min | Inactivación | Guacamole |
| Polifenoloxidasas | 689 MPa, 4 ciclos, 5 min | Reducción de la actividad un 15 % | Guacamole |
| | 900 MPa, 25°C | Inactivación | Melocotón |
| | 285 MPa, 15 min, 25°C | Reducción de la actividad un 40 % | Puré de fresa |
| | 6 MPa en CO ₂ , 1 min 43°C | Inactivación | Langosta |
| | 400 MPa, 10 min, 25°C | La actividad se multiplica por 5 | Peras |
| | 400 MPa, 10 min, 25°C | Actividad inalterada | Manzanas, plátanos y boniatos |
| | 800 MPa, 5 min | Inactivación | Champiñones |

Cambios estructurales y funcionales en microorganismos a diferentes presiones



Consecuencias de los efectos sobre microorganismos

Estabilización de los alimentos

Almacenamiento al frío (*actividades enzimáticas residuales*)

Mantenimiento de las propiedades nutricionales y organolépticas

Sabor de alimento crudo

La reacción de Maillard no se desarrolla

"Descontaminación" de productos (ex. : *Listeria* free food, USDA)

USDA has approved HPP as an intervention method for listeria contaminated pre-packed ready-to-eat (RTE) meat products.

FDA has accepted the commercial use of HPP for application of low acid foods.

EFFECTO BACTERICIDA DEPENDE DE:

-Tipo y número de microorganismos

- Formas vegetativas o esporuladas
- Sensibilidad varía con la especie, la cepa y la etapa de crecimiento. El mayor grado de inactivación se lleva a cabo en la etapa logarítmica de crecimiento

- Magnitud y duración del tratamiento

- > presión mayor mortalidad, > tiempo mayor mortalidad hasta un valor determinado

-Temperatura del tratamiento

- Resistencia máxima entre 15 y 30°C y disminuye a altas y bajas temperaturas (cambios membrana y su fluidez, debilitamiento de interacciones hidrofóbicas y cristalización de fosfolípidos)

-Composición del medio suspensión, pH

- Medios nutritivos aumentan tolerancia (efecto protector sobre célula)
- Reducción A_w mejora la resistencia (engrosamiento membrana)
- Menor pH favorece la inactivación durante el tratamiento y también inhibe el crecimiento de células que han sido dañadas por el tratamiento

Table 1.2 Pressures required to achieve a 5-log cycle inactivation ratio for certain microorganisms, for a 15-minute treatment (Patterson et al., 1995)

| Microorganism | Pressure (MPa) |
|---------------------------------|-----------------------|
| <i>Yersinia enterocolitica</i> | 275 |
| <i>Salmonella typhimurium</i> | 350 |
| <i>Listeria monocytogenes</i> | 375 |
| <i>Salmonella enteritidis</i> | 450 |
| <i>Escherichia coli</i> O157:H7 | 680 |
| <i>Staphylococcus aureus</i> | 700 |

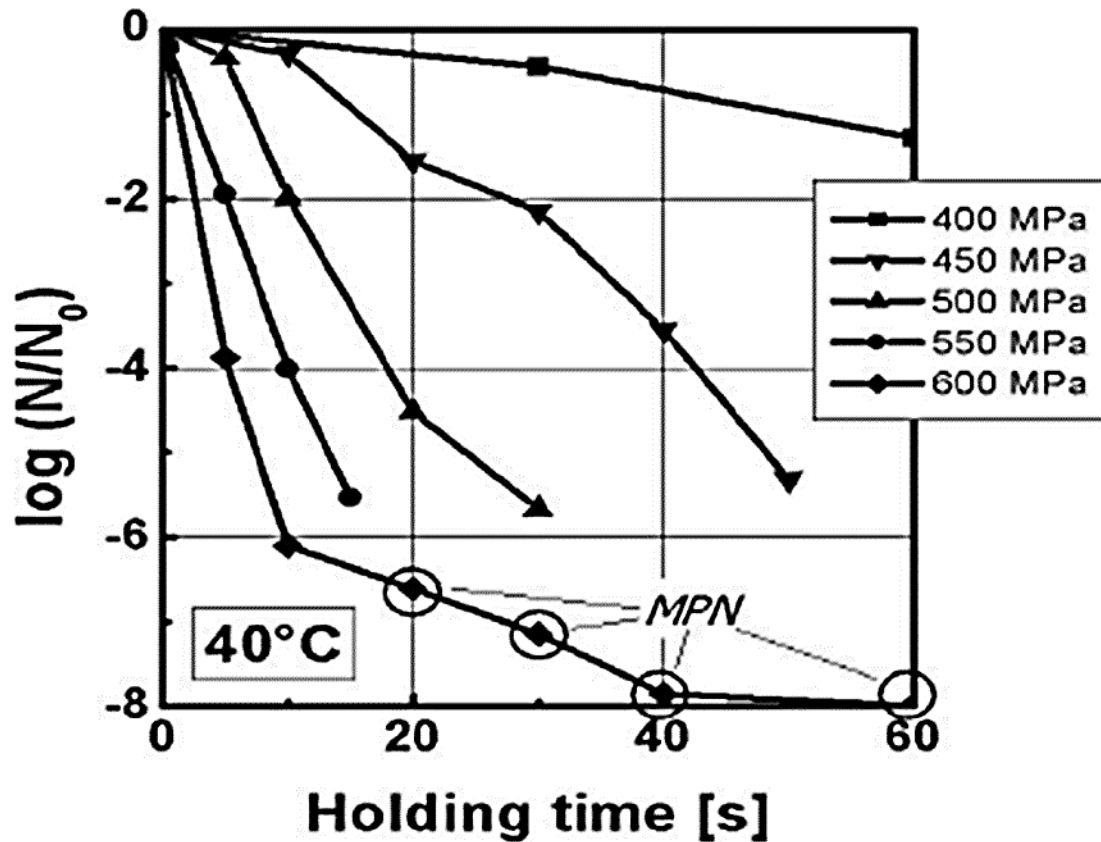


Fig.3.2.1.1 Inactivation kinetics of *LGG* in orange juice at 40°C and different pressure levels, evaluated through standard plate counting method. The kinetic at 600MPa for pressure holding times higher than 10 seconds was estimated by standard MPN method.

Table 1.3 Predicted treatment pressure required at various temperatures for a 5-log₁₀ inactivation of *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* in poultry meat and milk, for a treatment time of 15 minutes (Patterson and Kilpatrick, 1998)

| Temperature (°C) during pressure treatment | Estimated pressure (MPa) | | | |
|--|--------------------------|----------|------------------------------|----------|
| | <i>Escherichia coli</i> | | <i>Staphylococcus aureus</i> | |
| | Poultry meat | UHT milk | Poultry meat | UHT milk |
| 10 | 850 | 1014 | 647 | 749 |
| 20 | 779 | 966 | 694 | 625 |
| 30 | 681 | 840 | 735 | 602 |
| 40 | 544 | 638 | 701 | 583 |
| 50 | 371 | 392 | 524 | 478 |
| 60 | 125 | 133 | 177 | 196 |

MATERIAL DE ENVASE

Debe resistir cambio de volumen del medio de presión sin perder las propiedades de barrera ni la integridad del sellado.

Debe soportar ~**15% de reducción** y su posterior expansión

Optimo: sin incorporación de gases, sin espacio de cabeza y alta humedad

Las películas de plástico son generalmente usados

Materiales de película comunes:

- copolímero de etileno y alcohol vinílico (EVOH)
- alcohol polivinílico (PVOH)
- Polipropileno (PP)
- Polietileno (PE)

El uso de bandejas semirrígidas es posible

Metal y vidrio no son apropiados

Productos envasados al vacío son
ideales para HP.



APLICACIONES

- Gelificación (proteínas)
 - Huevos cocidos (todas vitaminas y buena textura)
 - Obtención de surimi de pescado (gelificación proteínas)
 - Hamburguesas (reducción de sal y polifosfato)
- Garantizar la ausencia de microorganismos patógenos
- Pasteurización de jugos y productos de pulpas vegetales
- Escaldado de frutas y verduras
- Modificación de la textura:
 - Ablandamiento de carnes frescas y algunas frutas (permeabilidad de las paredes celulares), depende de temperatura, presión y tiempo de tratamiento.
 - Acortar tiempo de cocción del arroz (pre-gelatinización almidón)
 - Aumento de opacidad en canes de pollo y pescado

➡ Productos vegetales (desde 1990)



Gazpacho
HHP

<https://www.youtube.com/watch?v=fVCGsT2rjHY>

<https://www.hiperbaric.com/en/vegetables-fruits>

Productos de carne y pescado



Platos preparados y productos cárnicos cocidos



MRM - España



Sandridge - USA



Mariscos

Recuperación de la carne de langostas



Abertura de las ostras



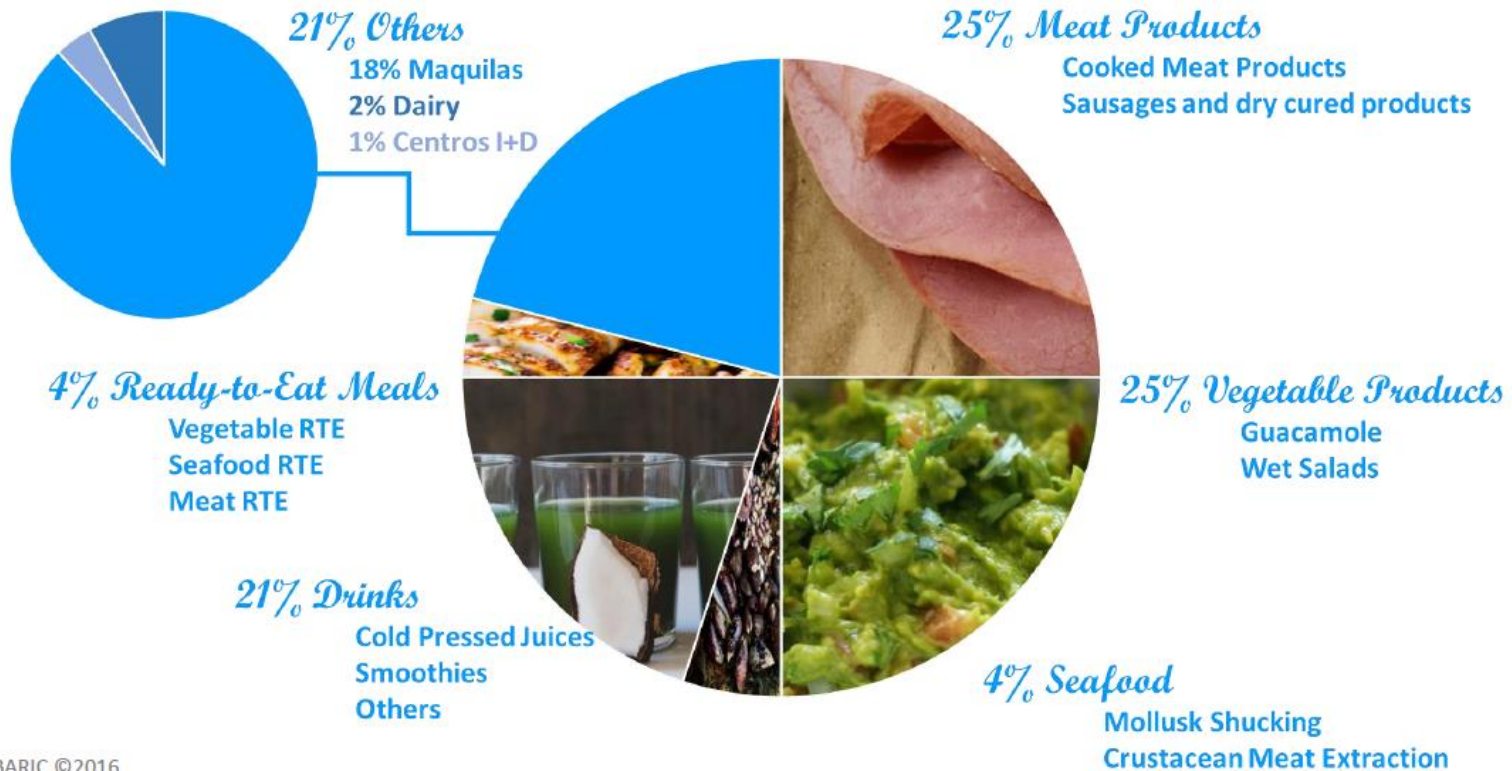
RELLENO SANDWICHES, SALSAS



Rodilla Rodilla (España)



Equipos HPP por sector



Efecto del procesamiento de jugos y batidos de frutas sobre su calidad sensorial

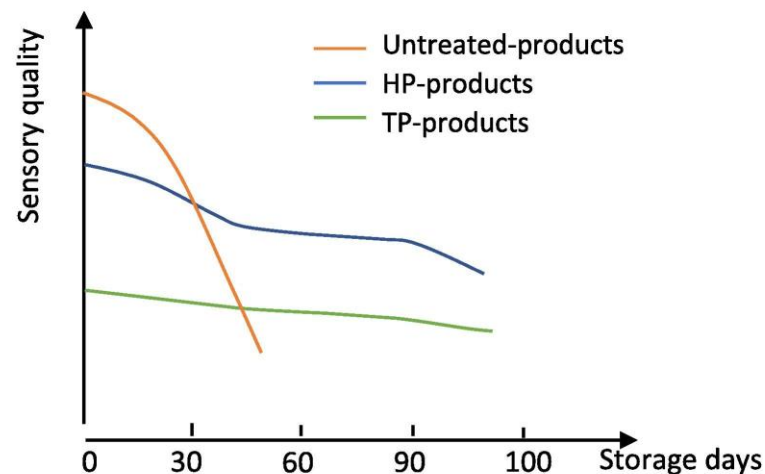
Tiempo inicial: Muestras no tratadas similares a HP. TP cambios y pérdidas en los atributos sensoriales

Almacenamiento:

Reducción en la intensidad de la mayoría de los atributos sensoriales, aunque el nivel sigue siendo superior al producto TP

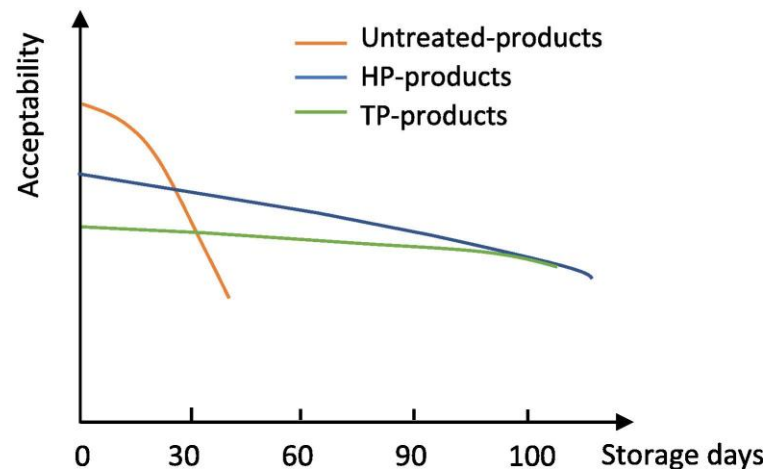
Reducción en la aceptabilidad de los sin tratar (mucho mayor) y tratados

a)



b)

Proceso térmico (TP) típico: entre 60-100°C



Los cambios de calidad sensorial (a) y aceptabilidad (b) durante el almacenamiento

Equipo HPP industrial estándar

Industria alimentaria

Acero inoxidable
Fácil limpieza
Carga / descarga automática

Trabaja hasta 600 MPa



Diseño horizontal

Producción 0,25 - 2,8 Ton/h

Frenos al desarrollo :

Precio de los equipos, ejemplos de modelos Nicolas Correa Hyperbaric (2009)

Wave 6000/55 litros



Coste ~500 k€

Wave 6000/150 litros



Coste ~ 1000 k€

Wave 6000/300 litros



Coste 1 ~ 1500 k€

Aunque: Costo de funcionamiento está entre 0,05 y 0,19 € / kg según el equipo, el llenado, el tiempo y la presión de Tratamiento

Aplicación:

Alimentación infantil y purés de frutas

Alimentación para mascotas

Farmacia y Cosmética

Guacamole y productos de aguacate

Pescados y mariscos

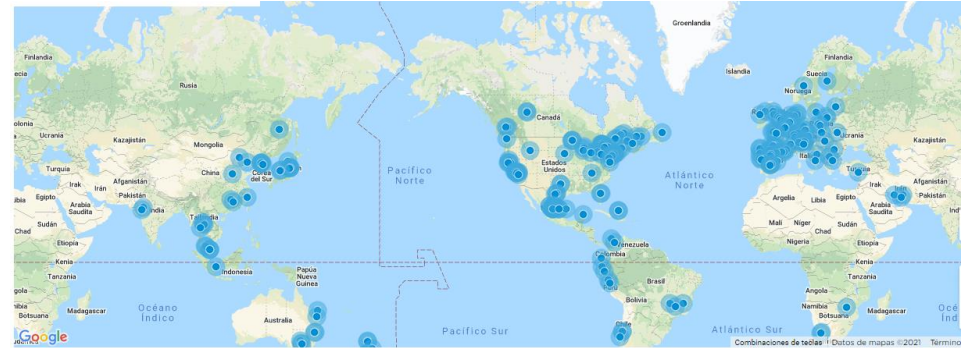
Platos preparados

Productos cárnicos

Productos lácteos

Salsas, productos vegetales y de frutas

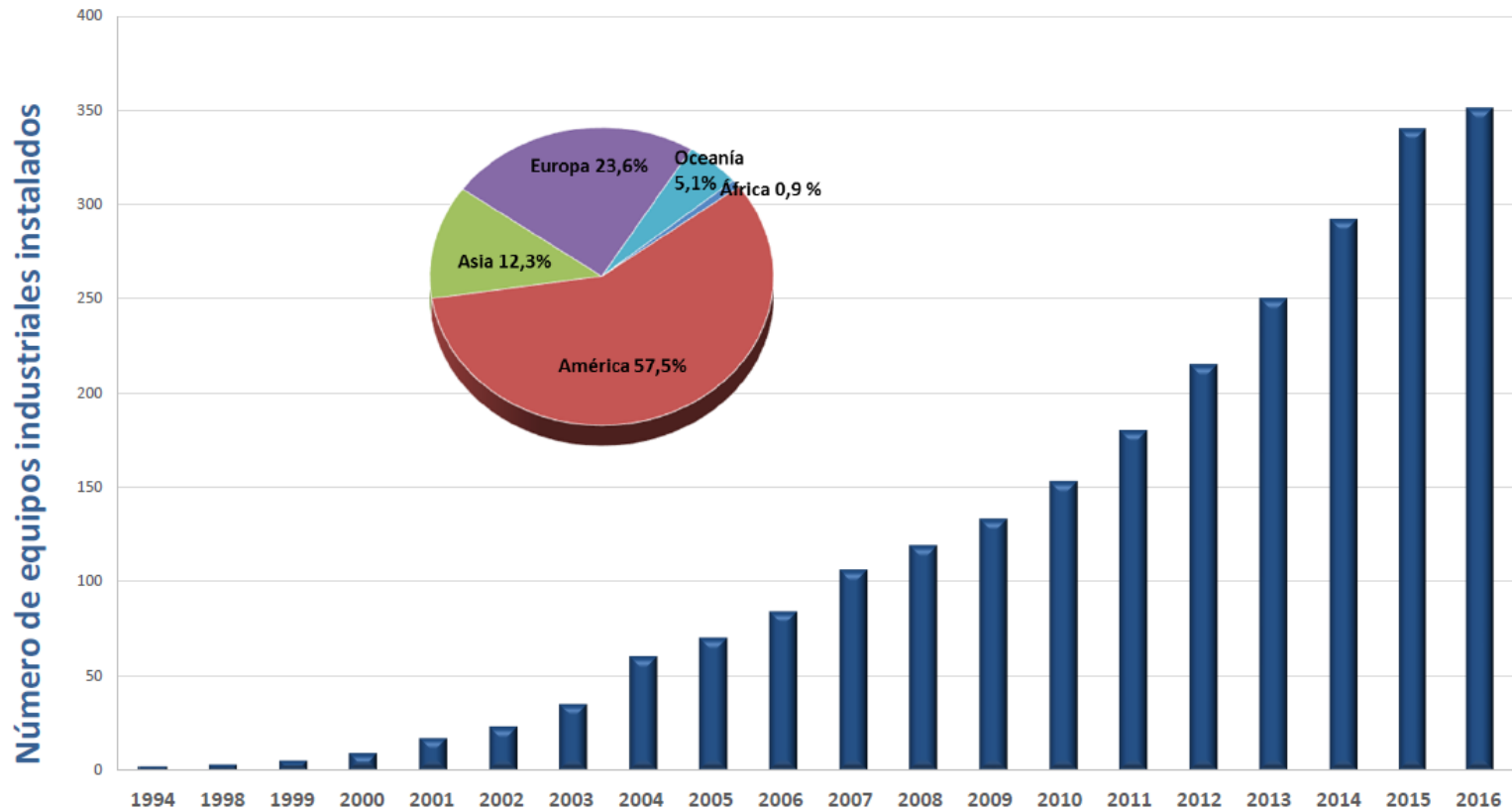
Zumos y bebidas



Generalmente: las plantas HPP ofrecen servicios de procesado a otras industrias agroalimentarias: permite a cualquier fabricante de alimentos o bebidas tener acceso a equipos industriales HPP sin necesidad de invertir en capital (pagan servicio)

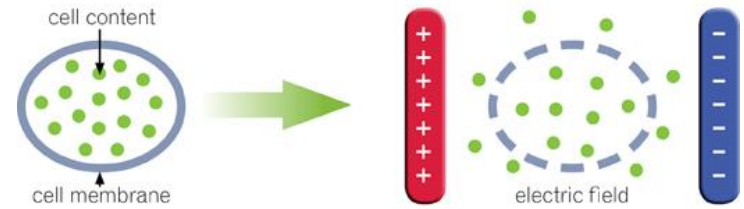
Número de unidades comerciales de equipos de alta presión en todo el mundo

Evolución de las altas presiones



CAMPOS ELÉCTRICOS (CE) PULSANTES DE ALTA INTENSIDAD

Involucra la utilización repetida de pulsos eléctricos de alto voltaje (20-80 KV/cm) por cortos períodos de tiempo (max 300 μ s) en el alimento colocado entre dos electrodos



Inactivación de enzimas y microorganismos minimizando cambios sensoriales por efecto del campo eléctrico.

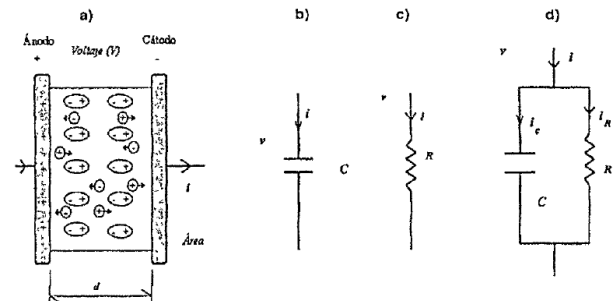
Puede haber calentamiento durante el procesamiento (se debe minimizar)

El CE produce la polarización de las moléculas dipolares y el movimiento de transportadores de cargas (iones) en el interior del producto, inducen corrientes **capacitivas y resistivas**.



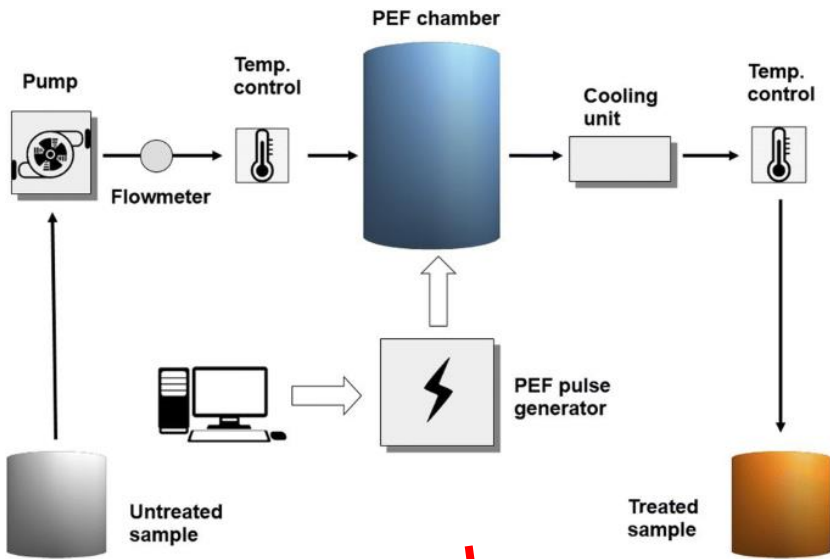
La cámara de tratamiento con el alimento se puede considerar eléctricamente como un circuito con una **resistencia** (transporte de cargas) y un **condensador** (por tanto puede almacenar carga eléctrica)

Se debe evitar que el CE produzca la ruptura dieléctrica del producto (descomposición del alimento ocurre como una chispa)



Circuito equivalente

Sistema de tratamiento por PEF

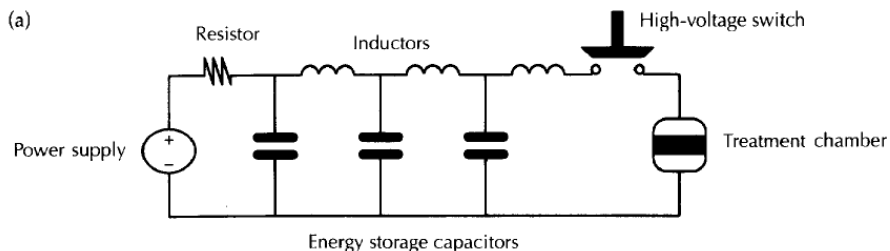


Cámara de tratamiento (electrodos entre los que circula el alimento)

Generador de PEF

Sistema de refrigeración y dispositivos de control (paso de corriente produce calentamiento)

Conectados a líneas de envasado aséptico



Las grandes intensidades de campo se logran almacenando una gran cantidad de energía en un banco de condensadores (serie de condensadores) de una fuente de alimentación de CC, que luego se descarga en forma de pulsos de alto voltaje.

Ventajas

- Mínimo calentamiento
- Reducción cambios químicos
- No aditivos
- Reducción de cambios en propiedades sensoriales y físicas
- Conservación compuestos termolábiles
- Tecnología efectiva, segura y limpia

Mecanismos de inactivación microbiana x2

El daño estructural o funcional de la membrana es la causa de la muerte celular por PEF

La inactivación se basa en la teoría de la **ruptura eléctrica** de las membranas celulares

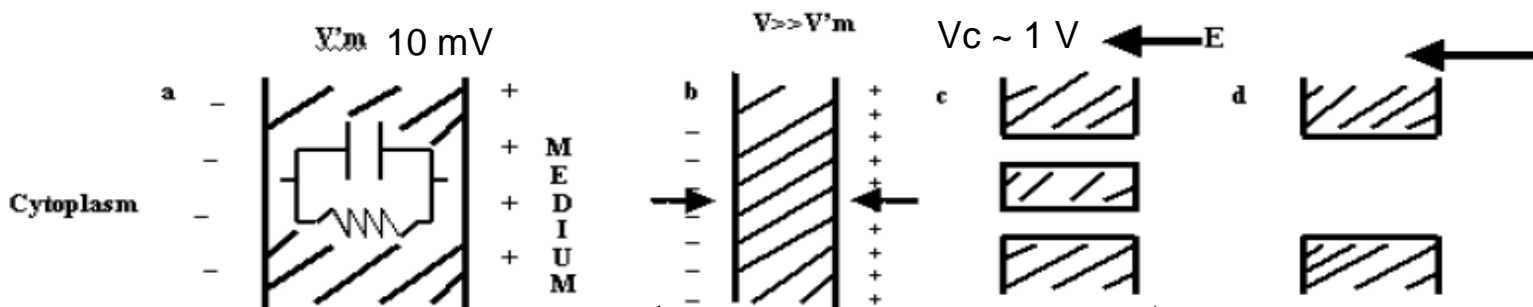


Figure 5. Schematic diagram of reversible and irreversible breakdown. (a) cell membrane with potential V_m , (b) membrane compression, (c) pore formation with reversible breakdown, (d) large area of the membrane subjected to irreversible breakdown: large pores (Zimmermann, 1986)

Las membranas biológicas pueden ser consideradas un capacitor. Resisten un potencial de membrana de 10 mV debido a la separación de cargas

Aplicación de CE a células biológicas produce un potencial diferencial (V) promovido por una mayor separación de cargas electrostáticas a través de la membrana

Contracción de la membrana

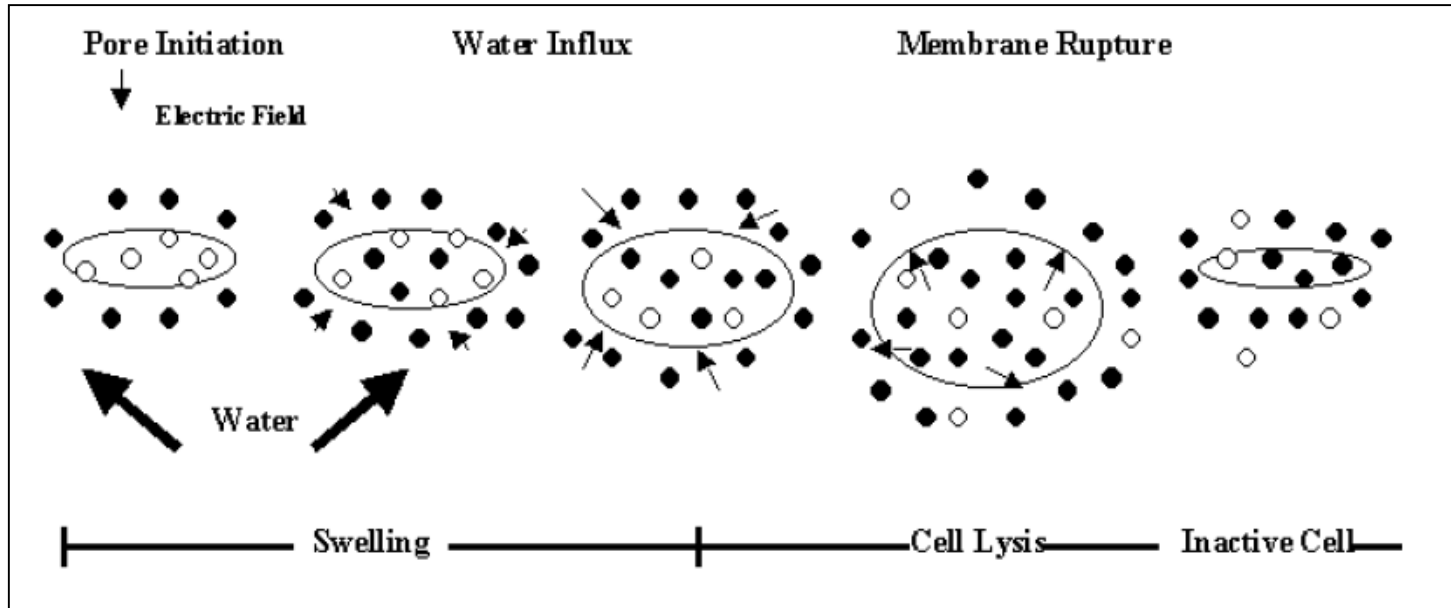
Si el CE alcanza un valor crítico ($V_c \sim 1 \text{ V}$) = ruptura de la membrana celular

Formación de poros que se llenan de solución conductora = descarga de la membrana

Reversible: poros pequeños en relación a la membrana

Irreversible: si tamaño y número de poros es grande = destrucción mecánica

Electroporación o formación de poros en la membrana celular

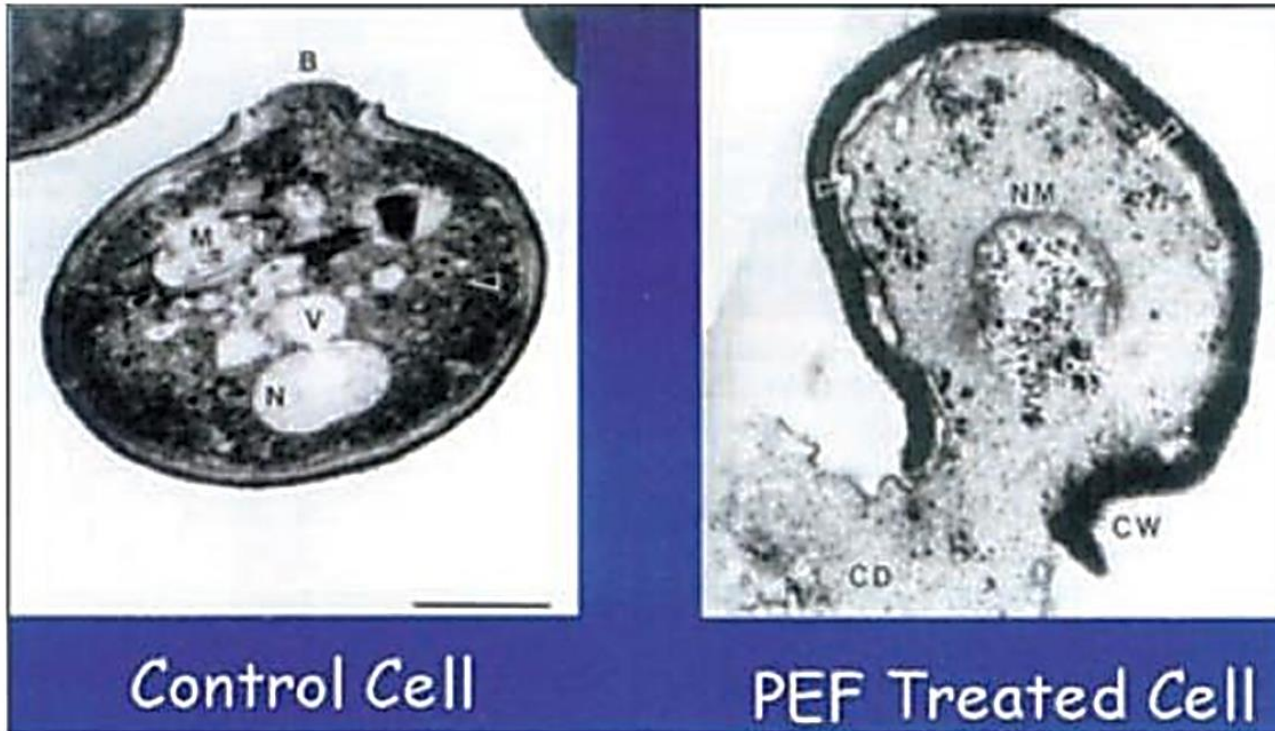


La aplicación de CE produce la desestabilización de las bicapas lipídicas y las proteínas de membrana, por lo que la membrana se hace permeable a pequeñas moléculas (poros hidrofóbicos e hidrofílicos).

Resultado: se establece un flujo de agua (presión osmótica) que hincha la célula hasta la ruptura

El tamaño de poro incrementa con la intensidad del campo y la duración del pulso

Además, se sugirieron diferentes mecanismos para la acción biocida de la electricidad. La descarga eléctrica en medios líquidos puede generar pequeñas cantidades de agentes microbicidas como cloro, radicales libres y H₂O₂ que alteran el ADN y la actividad citoplasmática durante el tratamiento.



Picture 1 - Comparing a reference cell (*Saccharomyces cerevisiae*) with a PEF-treated cell, showing the damage to the cell membrane.

Source: Washington State University, Harrison et al 1996

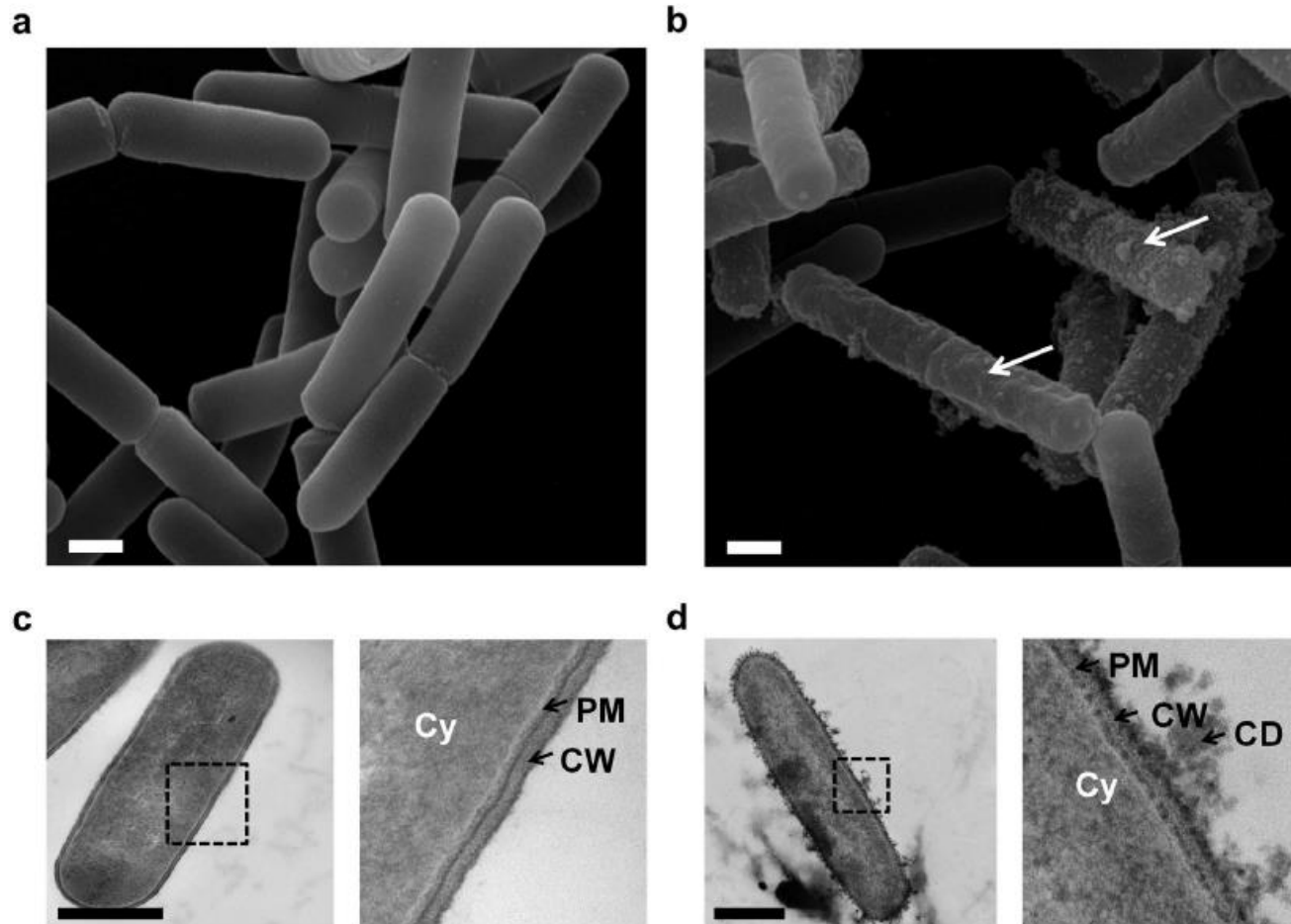


Figure 2. PEF-induced cell wall disruption on vegetative bacteria. (a) SEM image showing population of untreated bacteria. Bacteria are smooth. (b) Pulsed bacteria were visualized by SEM after PEF exposure (1000 micropulses at 7.5 kV/cm). White arrows indicate surface damage. (c) TEM image of untreated *Bacillus pumilus*. Inset shows bacterial architecture with the cytoplasm (Cy), plasma membrane (PM) and cell wall (CW). (d) TEM image of a pulsed bacterium after PEF. Inset shows the expulsion of cell-debris (CD), damage to the PM and the CW. Scale bars: 500 nm.

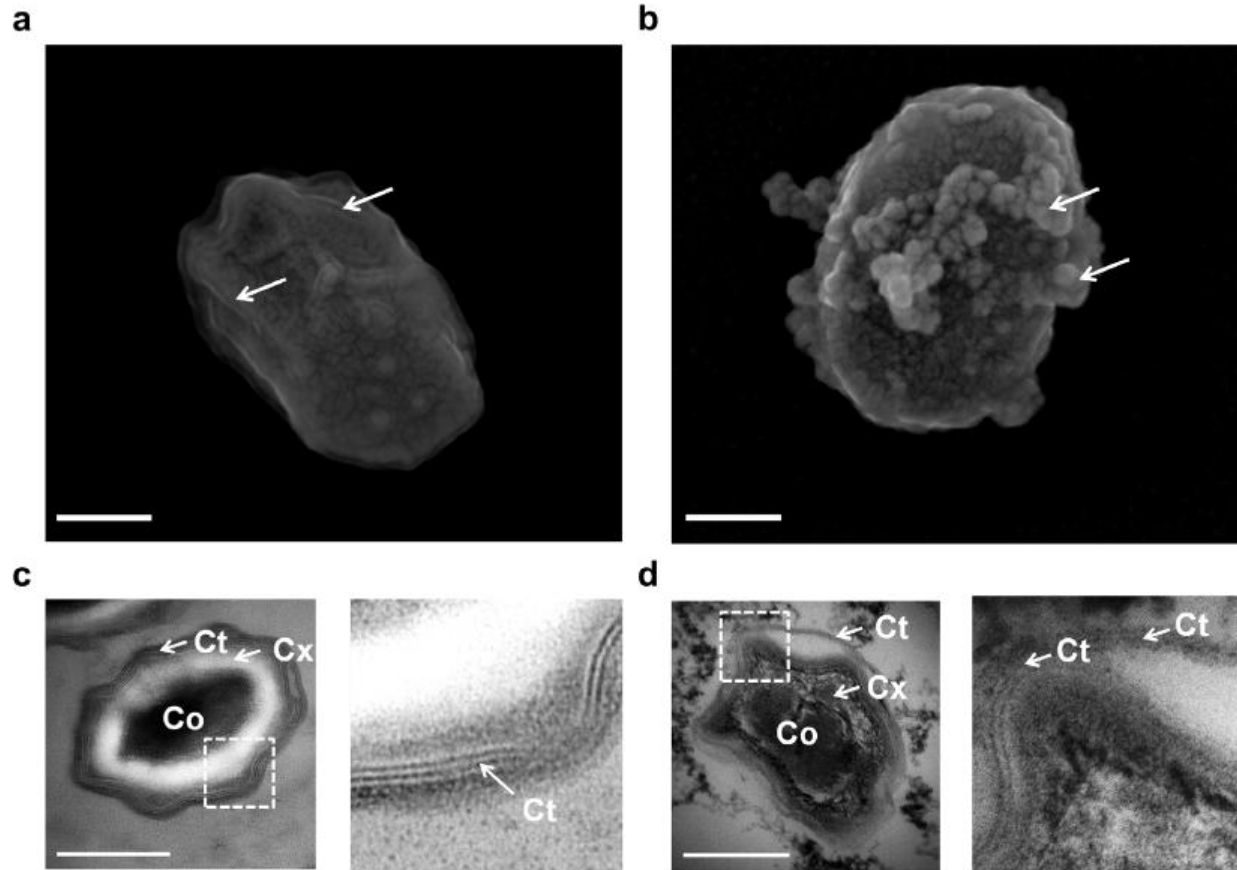


Figure 4. PEF induced internal damage to spores. (a) SEM image of a typical untreated spore. Ridges are indicated by the white arrows. (b) Example of a pulsed spore visualized by SEM after 10 000 micropulses at 7.5 kV/cm. Budding structures were observed. (c) TEM images of an untreated spore. The core (Co), the cortex (Cx) and the coat (Ct) are observable. Inset display nanostructures of internal coat organized in protein multilayers. (d) TEM image of a pulsed spore. Internal damage is seen in core and cortex. Inset indicates the cleavage of protein multilayers in the coat. Scale bars: 250 nm.

Efecto bactericida mejora con:

- Número, duración (aumento de temperatura), tipo y velocidad de pulsos.
Balance entre maximizar inactivación y minimizar aumento de temperatura
- Mayor intensidad de campo
- Mayor temperatura de proceso (~ 50-60°C) (mayor desestabilización de la membrana)
- Menor pH (transporte de H⁺, disminución del pH del citoplasma produce desestabilización de la membrana)
- Menor fuerza iónica (menor conductividad) del medio: mayor capacidad dieléctrica (menor movilidad de e⁻ mayor intensidad de CE)
- Fase exponencial de crecimiento del mo (membrana celular mas fina y susceptible a PEF).
- Resistencia frente a PEF: levaduras < bacterias G- < bacterias G+

Inactivación de enzimas indeseables

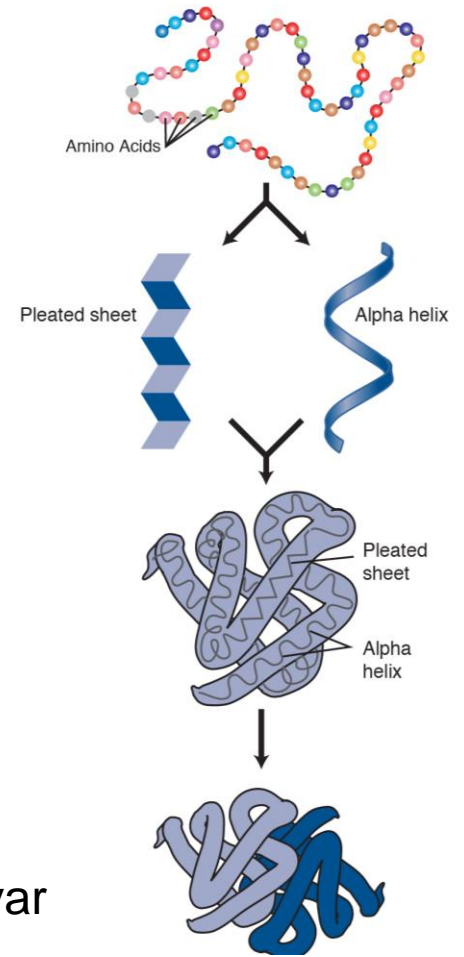
PEF (efectos electroquímicos y calentamiento óhmico) cambian principalmente las estructuras secundarias (α -hélice, láminas β , etc.), terciarias (conformación espacial) y cuaternarias (número/disposición de subunidades proteicas) de las enzimas.

Función de la enzima

Estructura primaria no afectada.

Requiere mayores aportes de energía específica para inactivar las enzimas (en comparación con microorganismos)

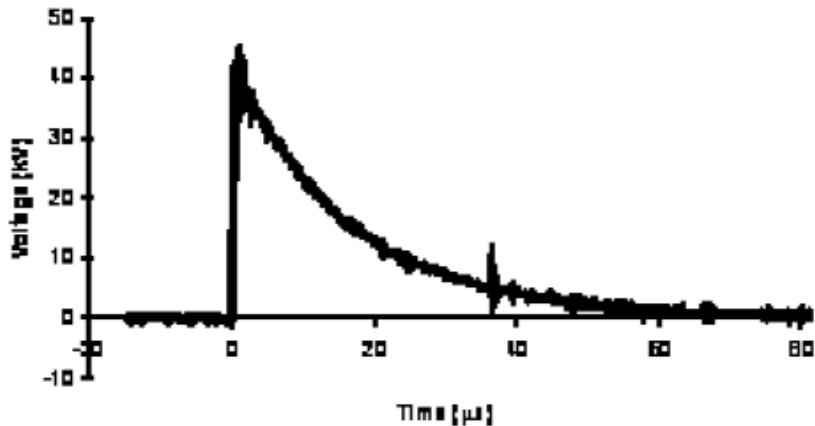
También existe evidencia que los **PEF también puede estimular** la actividad de enzimas beneficiosas en tratamientos de baja intensidad.



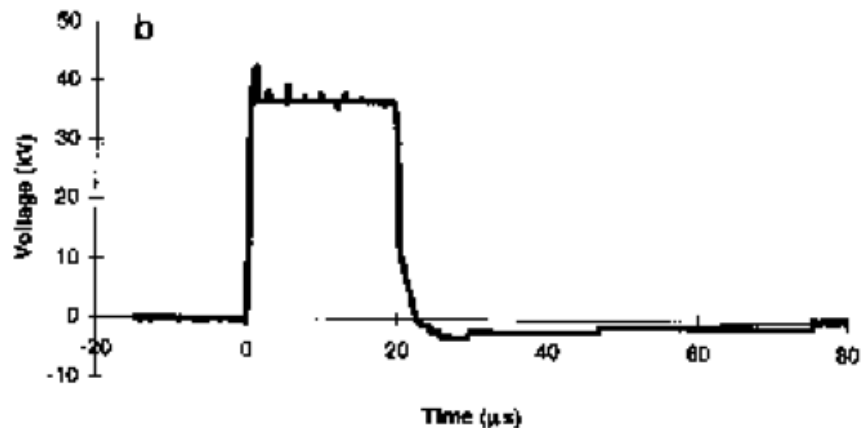
Tipos de pulsos

20–80 kV

Mayor eficacia que los disminución exponencial

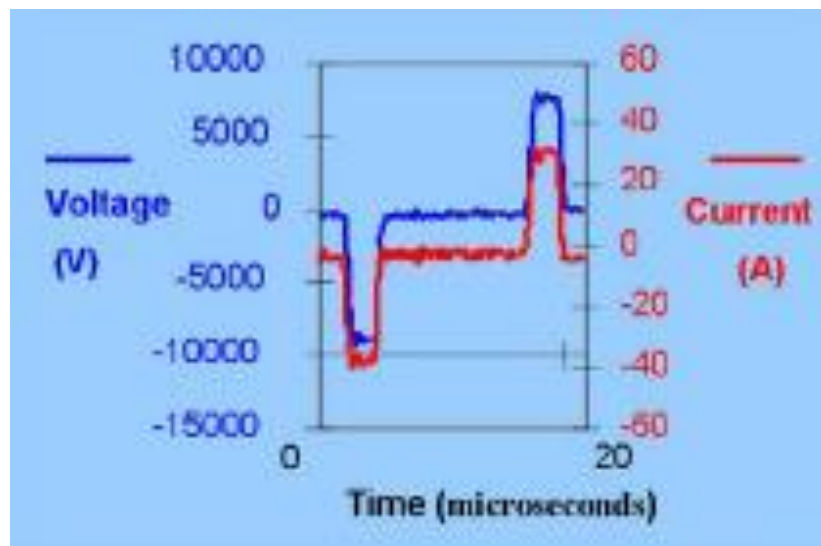
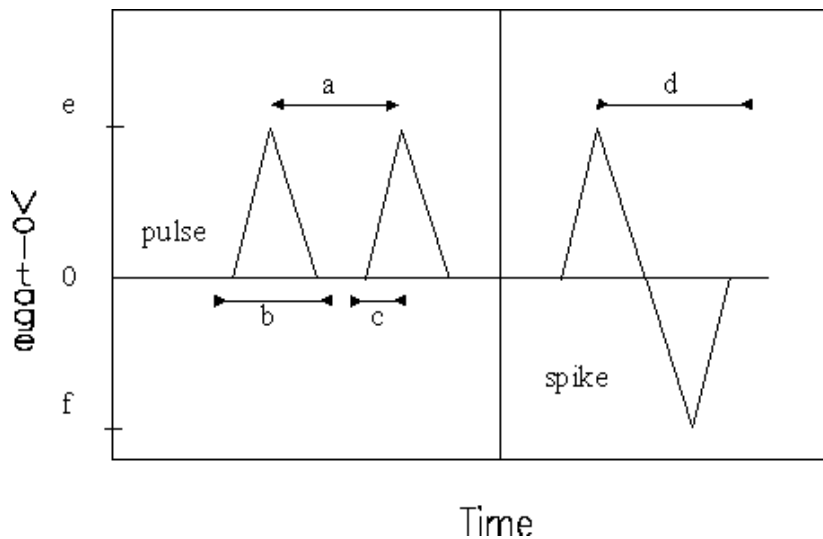


Pulso de disminución exponencial



Pulso cuadrado

Pulsos bipolares (más letales): producen tensión adicional en membranas



TIPOS DE PRODUCTOS

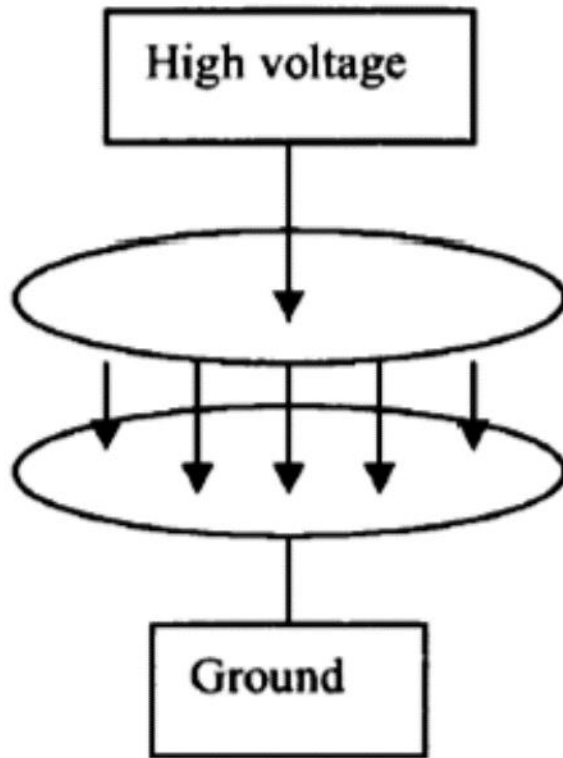
- ❖ Capaces de soportar CE de alta intensidad sin producir ruptura dieléctrica (conductor).

La ruptura dieléctrica de los alimentos se caracteriza generalmente por causar daños en las superficies de los electrodos, producir a explosiones de la cámara de tratamiento y formación de burbujas de gas. La constante dieléctrica del alimento esta estrechamente relacionada a su estructura física y composición química.

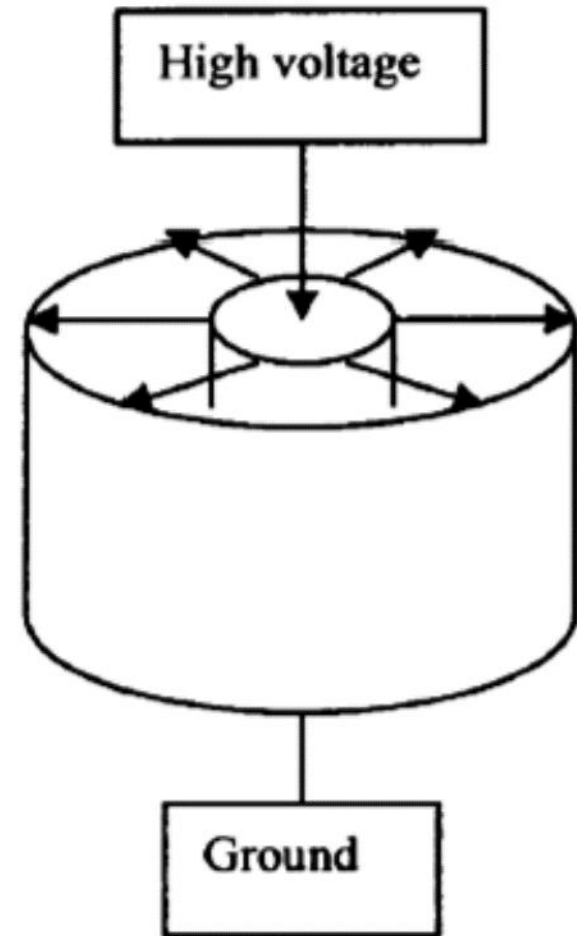
- ❖ Líquidos homogéneos de baja conductividad eléctrica (ideal)
- ❖ Alimentos sólidos, si la ruptura dieléctrica puede ser prevenida
- ❖ Fluidos con burbujas, eliminar aire (arcos eléctricos dañan cámara y electrodos)
- ❖ Sólidos sin burbujas
- ❖ Tamaño de partículas limitado por la apertura a la región de tratamiento
- ❖ Líquidos con partículas: los microorganismos dentro de las partículas pueden requerir altos CE (ruptura dieléctrica)

Los alimentos *más idóneos*: leche, huevo líquido, zumos de frutas y concentrados, sopas y extractos de carne.

Configuraciones de electrodos comunes en cámaras de tratamiento de PEF



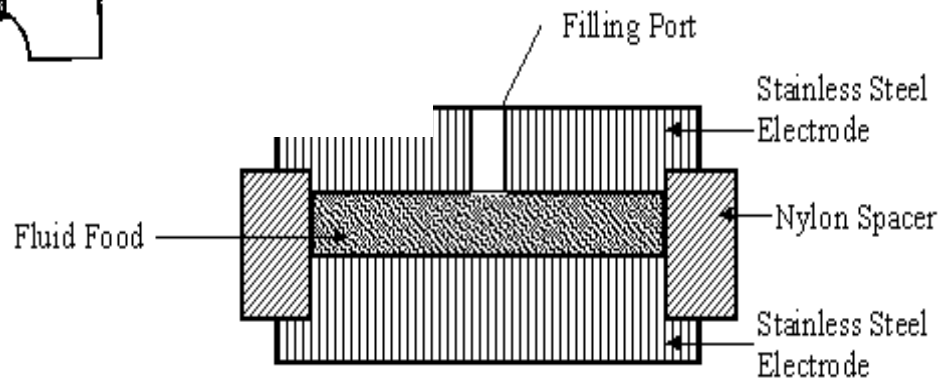
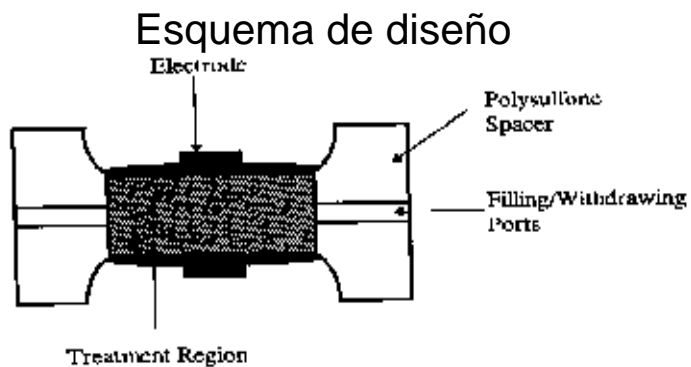
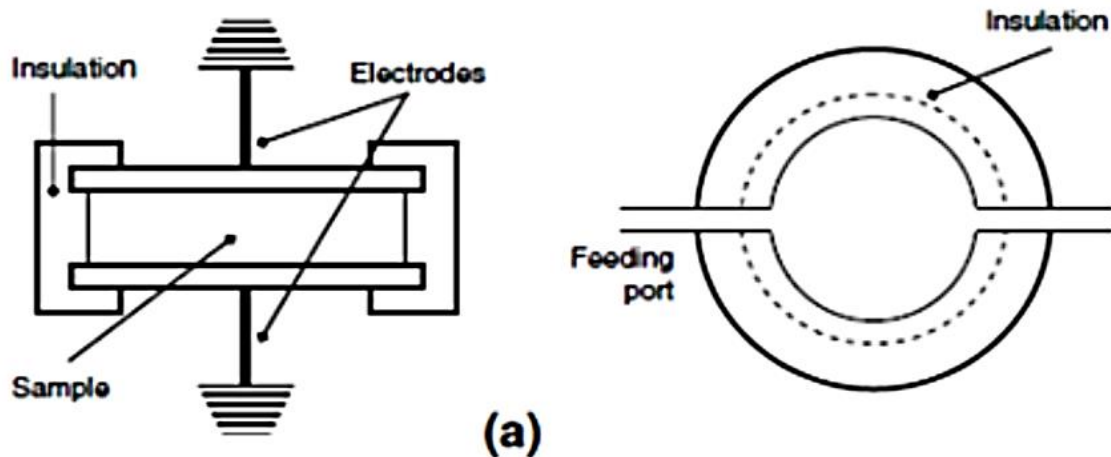
parallel-plate, batch modes



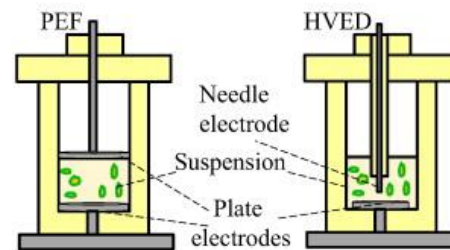
Coaxial, continuous modes

EQUIPOS-Cámaras de tratamiento

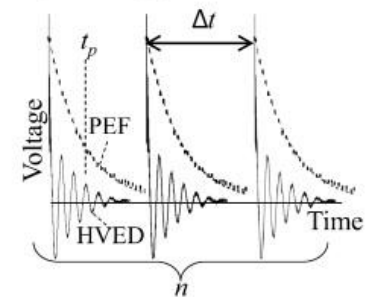
Estáticos



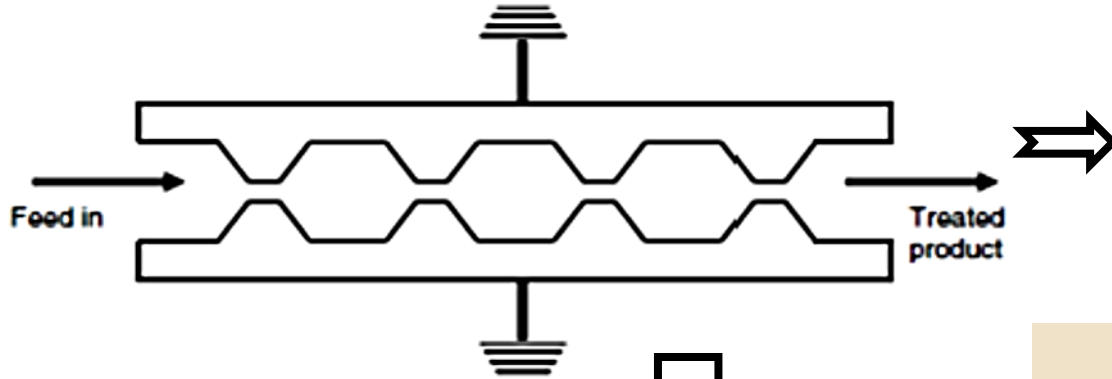
a) Treatment cells



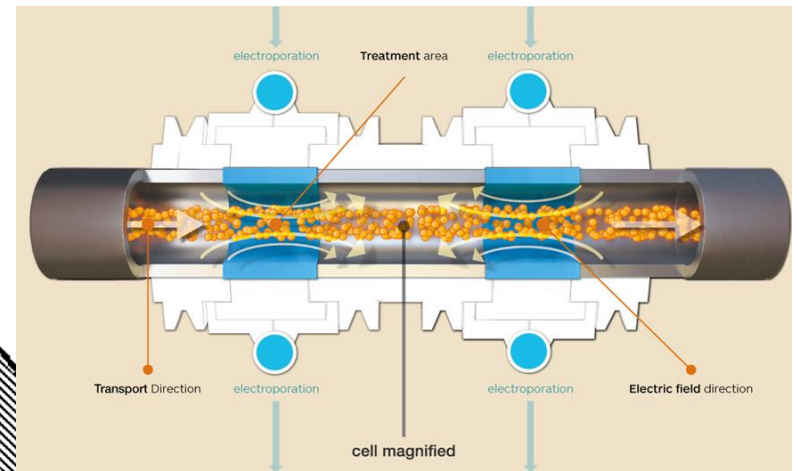
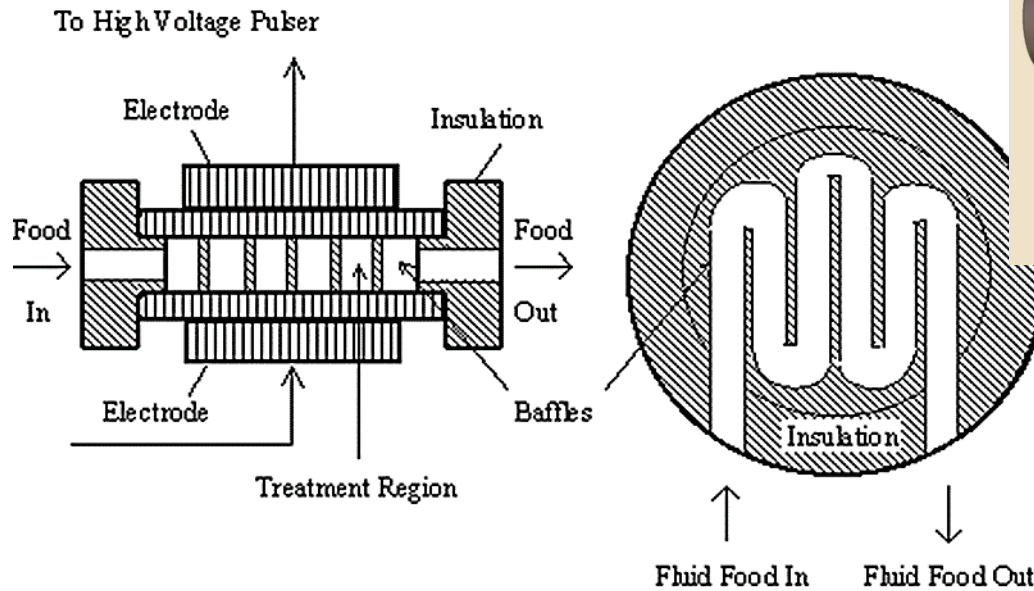
b) Pulsing protocols



Continuos



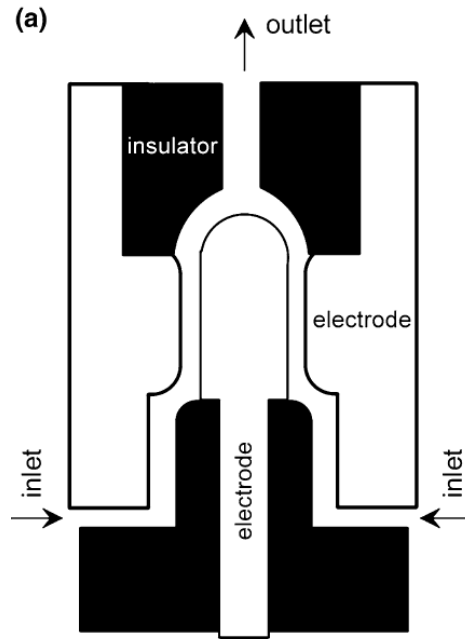
vista lateral de un diseño continuo básico



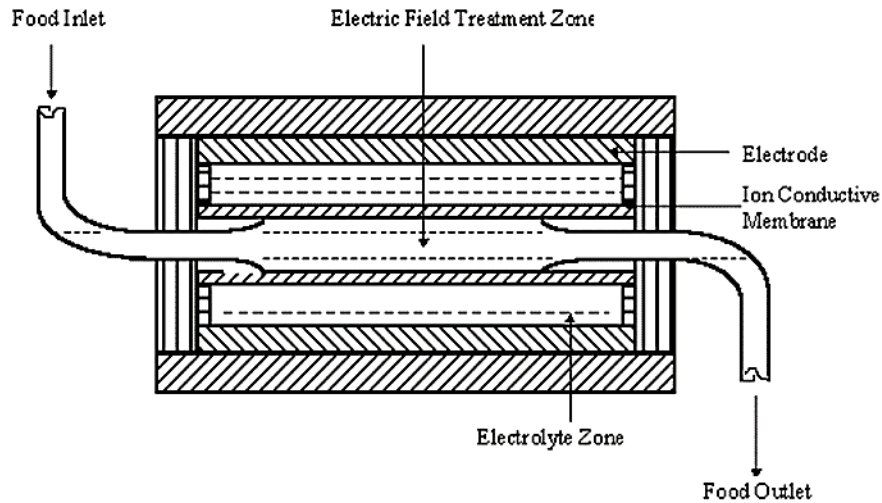
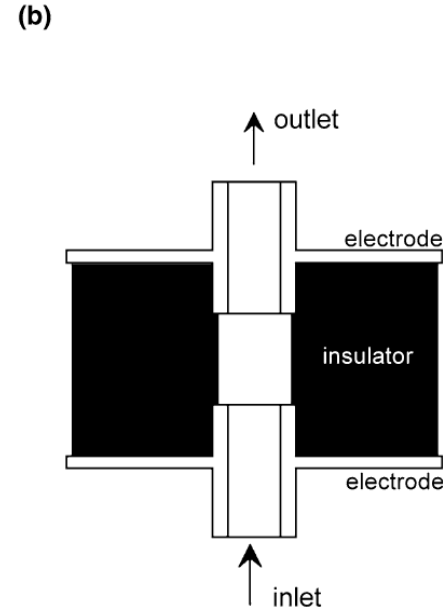
Cámara de tratamiento continuo con deflectores

Continuos

Cámara coaxial



Cámara co-lineal



cámara de tratamiento continuo con membrana conductora de iones

Extensión de la vida útil.

PEF extiende vida útil de los **jugos de frutas y verduras frescas** sin comprometer la frescura o la calidad del producto.

Un tratamiento con un aporte de energía de 100 a 120 kJ/kg: inactivación de 5 log de mo en jugo de naranja.

Temperatura + PEF: efecto sinérgico, se pueden usar enfoques combinados para reducir la cantidad de energía eléctrica requerida.



Dependiendo de la intensidad del tratamiento se logra hasta 21, 40 o incluso 60 días para el jugo tratado con PEF (7 a 10 días para el jugo sin tratar)

Productos a base de proteínas como aderezos, derivados lácteos y de huevo.

Bajo grado de desnaturalización e incrustaciones de proteínas, y mayor tiempo de actividad del equipo: principales beneficios del PEF en comparación con la pasteurización térmica tradicional.

Mejora del transporte másico

PEF de frutas y verduras (manzanas, uvas, remolacha azucarera o zanahorias) aumenta el rendimiento del jugo y mejora la liberación de compuestos como colorantes o antioxidantes.

Mejora liberación de humedad intracelular y procesos de secado de alimentos (papas, cebollas o pimientos morrones), se informó una reducción del tiempo de secado de hasta un 25% para el secado con aire convectivo después del tratamiento con PEF.

Mejora de corte y pelado

PEF incrementa permeabilización de membranas, resultando pérdida de presión de turgencia y un ablandamiento significativo de los tejidos.



Esto facilita los procesos posteriores de manipulación, bombeo y / o corte

PEF puede reemplazar el precalentamiento convencional de papas (60°C, 30 min) y mejorar la calidad del corte para la producción industrial de patatas fritas.

PEF: cáscaras de tomate y ciruela se aflojan y se quitan fácilmente.

En comparación con el pelado al vapor, los requisitos de energía para pelar son significativamente menores.

A diferencia del peeling de lejía, no se requiere neutralización y se reduce la contaminación de los efluentes.

Durante la década de 1960, se propuso la aplicación del PEF al procesamiento de alimentos. En 2006 se instaló la primera instalación comercial para la conservación de jugos de frutas.

Desde entonces, el PEF se ha implementado para el procesamiento comercial de jugos de frutas, así como para el procesamiento de verduras.

En la actualidad (2016), aproximadamente 50 sistemas PEF a escala industrial se utilizan en todo el mundo.



<https://elea-technology.com/applications/>

Zumos y bebidas, Productos lácteos (leche, yogur, queso) extender vida útil al inactivar bacterias y enzimas que pueden causar deterioro.

Carnes y productos cárnicos: reducir la carga microbiana en carne cruda y procesada.

Frutas y verduras frescas y procesadas para reducir los niveles de microorganismos y prolongar su vida útil sin recurrir a productos químicos.

Huevos: inactivar patógenos presentes en la superficie

Pescados y mariscos: reducir la carga bacteriana en pescados y mariscos, manteniendo la frescura y seguridad del producto.

Salsas y aderezos líquidos: inactivar microorganismos y prolongar la vida útil.

Alimentos listos para comer: como ensaladas precortadas.

Alimentos envasados en conserva: mejorar pasteurización y eliminar patógenos



Inactivación microbiana de líquidos: para la conservación suave de bebidas y otros (semi) líquidos.

Capacidad: 30 a 5000 L/h.

Para leche cruda, leche para hacer queso, bebidas de yogur o suero de leche,

<https://www.pulsemaster.us/pef-machinery>



Tratamiento de sólidos / Desintegración celular de sólidos:
unidad de tanque de tratamiento, (frutas, verduras y papas)
Capacidad: hasta 150 kW por sistema, permite procesamiento
de hasta (90 toneladas de papa por hora)

Table 2
Inactivation of *E. coli* in milk by heat and alternative preservation technologies

| Preservation process | Treatment conditions | Log count decreased | Refs. |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|-------|
| Heat | 63 °C, 16.2 s | 5.9 | [15] |
| γ -Irradiation | 10 kGy | 7.0 | [16] |
| High-pressure processing | 500 MPa, 5 min, 25 °C | 5.9 | [17] |
| Pulsed electric field | 22.4 kV/cm, 330 μ s | 4.7 | [14] |

Table 3
Inactivation of *Bacillus* spp. spores by heat and alternative preservation technologies

| Technology | Treatment conditions | Medium | Targeted spores | Log count decrease |
|--------------------------|----------------------------------|---------------|------------------------------------|--------------------|
| Heat | 140 °C, 3 s | Milk | <i>Bacillus stearothermophilus</i> | 3 |
| γ -irradiation | 12 kGy | Frozen yogurt | <i>Bacillus cereus</i> | 3 |
| High-pressure processing | 2 \times 5 min, 600 MPa, 70 °C | Soil medium | <i>Bacillus stearothermophilus</i> | 3 |
| Pulsed electric field | 22.4 kV/cm, 250 μ s | Milk | <i>Bacillus cereus</i> | 0 |

CALENTAMIENTO OHMICO

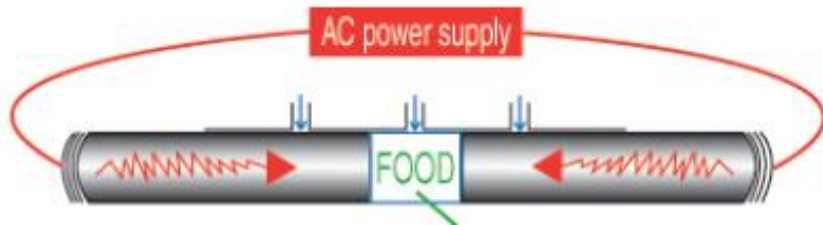
Se hace pasar una corriente eléctrica a través del alimento.

Debido a la resistencia eléctrica que ofrece el medio se calienta.

Generación interna de energía: colisión entre partículas que forman la corriente eléctrica, aceleradas por el CE, con iones del elemento conductor, generan un aumento de la energía vibracional.

Corriente alterna de baja frecuencia 50-60 Hz

Potencias de 5 KV



Pasaje de corriente eléctrica a través de un conductor genera calor

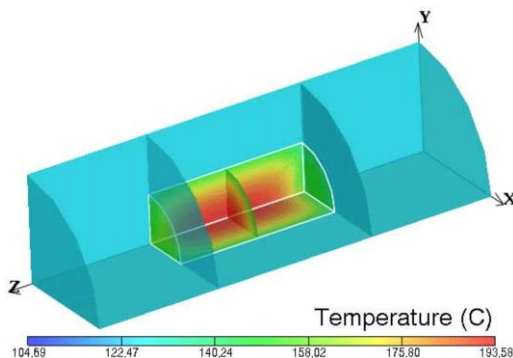
1^{ra} ley de Joule

$$Q = I^2 \cdot R = \sigma \cdot V^2$$

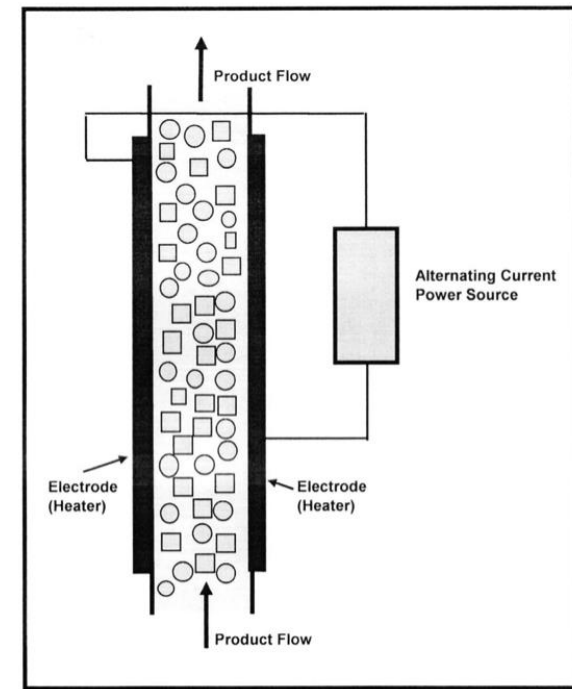
σ = conductividad eléctrica

VENTAJAS

- Calentamiento rápido y uniforme – calentamiento volumétrico – sin superficie caliente. Reduce abuso térmico.
- Mayor capacidad de penetración que las microondas
- Tratamiento de sistemas con partículas (sólidos pueden calentarse más rápido que los líquidos “manejando” la conductividad de los líquidos, contenido iónico)
- Gastos operación bajo 90% E convertida en calor (microondas no supera el 70%)
- Bajo daño térmico (no superficie caliente)



Distribuciones de temperaturas (modeladas) dentro de un calentador óhmico después de 150 s de calentamiento óhmico



Efecto bactericida depende de

- ✓ Flujo eléctrico, Temperatura (σ aumenta con la temperatura, calentamiento óhmico mas efectivo) y Tiempo
- ✓ Velocidad calentamiento:
 - ✓ Aumenta con la conductividad eléctrica alimento (se puede controlar con sales agregadas al alimento)
 - ✓ Aumenta con la temperatura del medio
 - ✓ Depende del tamaño (mas chicos mayor velocidad de calentamiento), concentración (menor concentración mayor velocidad de calentamiento) y C_p de los sólidos
 - ✓ Viscosidad (mejora con agitación)
 - ✓ Orientación relativa de los electrodos



El problema clave es localizar la (s) zona (s) de tratamiento térmico mínimo

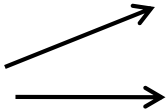
Los sólidos aislantes no se calientan por CO sino por conducción térmica:
quesos, grasas, aire, alcohol, huesos

PROBLEMAS

Contaminación por Electrólisis-Disolución de electrodos metálicos

Electrodos deben refrigerarse para evitar calentamiento excesivo (daño sobre alimentos)

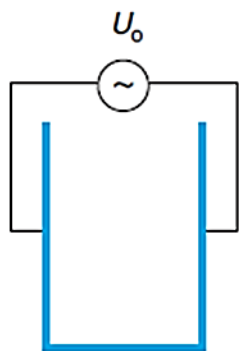
EFFECTOS SOBRE LOS ALIMENTOS

Efecto térmico  Muerte microorganismos
Inactivación enzimática

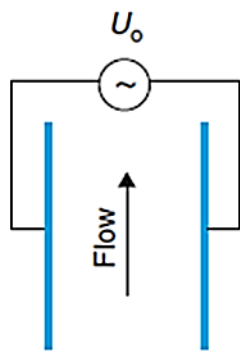
Pasaje electricidad produce efecto letal suave por electroporación
(formación de poros en células)

Continuos

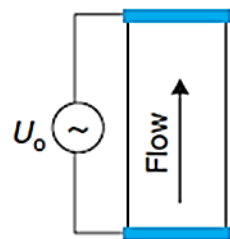
Configuración de la cámara de tratamiento



(a) Batch



(b) Transverse



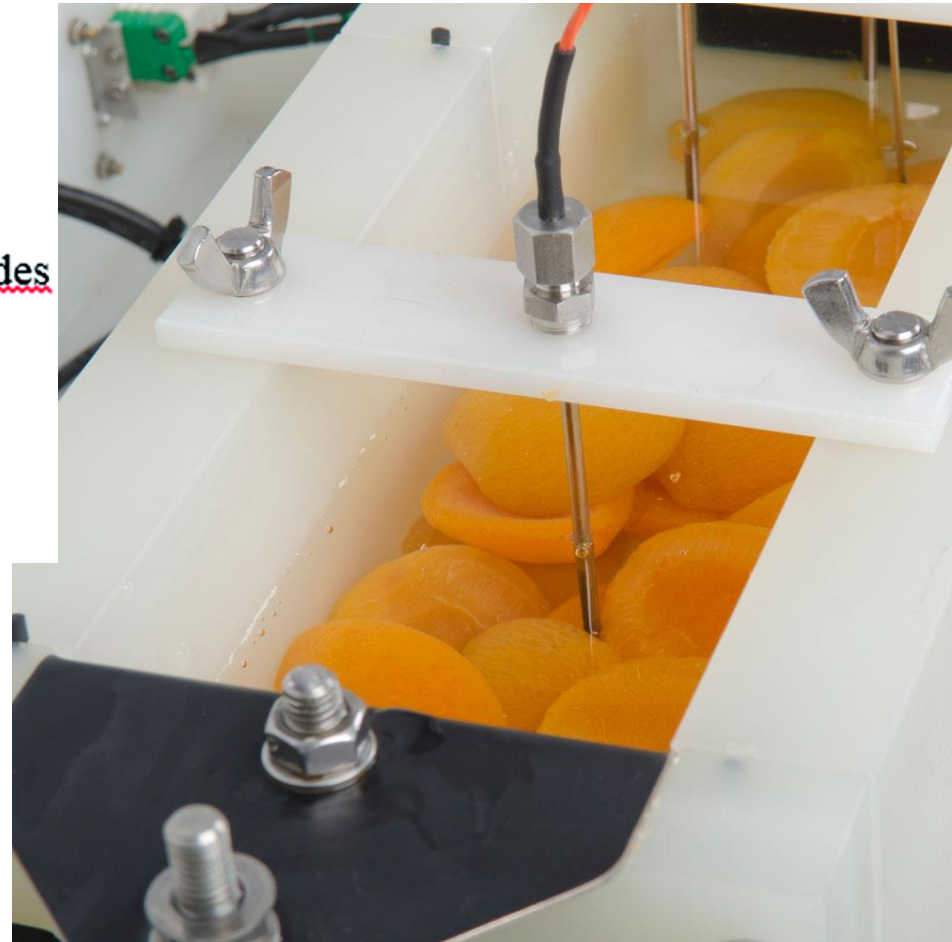
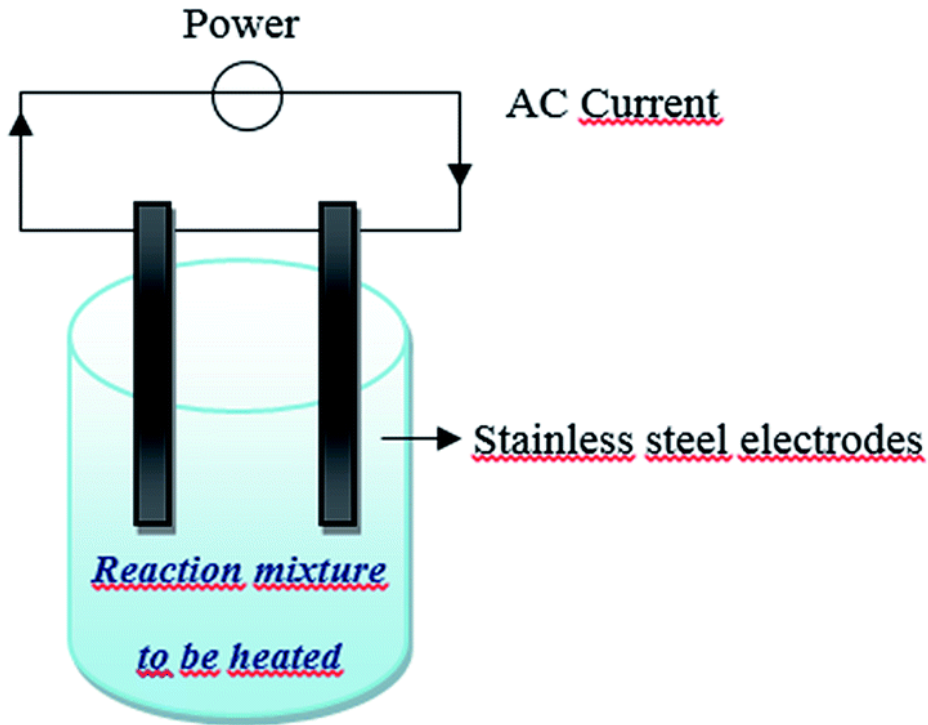
(c) Collinear



© emmepiemme s.r.l.



Estáticos



USOS EN ALIMENTOS

Blanqueado vegetales

- Menor tiempo que otros métodos
- Evita troceado para aumentar superficie contacto
- Reduce pérdida soluto (menor daño celular)

Efectos sobre la calidad

- Mejor textura, flavor y retención de nutrientes que métodos de calentamiento convencionales

Con el calentamiento óhmico se evitan los sobrecalentamientos y se consigue un menor deterioro de los alimentos

Mayoritariamente este sistema es utilizado por la industria para esterilizar distintos alimentos como las sopas, salsas o frutas

Table 1. D-values and kinetic reaction rate constants (k) for *Bacillus subtilis* spores under conventional and ohmic heating (Cho and others 1999).

| Temperature (°C) | D-values, conventional heating (min ⁻¹) | D-values, ohmic heating (min ⁻¹) | k, conventional heating (s ⁻¹) | k, ohmic heating (s ⁻¹) |
|---|---|--|--|-------------------------------------|
| 88 | 32.8 | 30.2 | 0.00117 | 0.001271 |
| 92.3 | 9.87 | 8.55 | 0.003889 | 0.004489 |
| 95 | 5.06 | | 0.007586 | |
| 95.5 | | 4.38 | | 0.008763 |
| 97 | 3.05 | | 0.012585 | |
| 99.1 | | 1.76 | | 0.021809 |
| z-value (°C) or Activation energy (E _a)(kcal/mol) | 8.74* | 9.16* | 70.0** | 67.5** |

D tiempo de reducción decimal: tiempo (min) para que la población original se reduzca a un décimo

Z incremento en la T par que el tiempo de reducción decimal disminuya a la décima parte

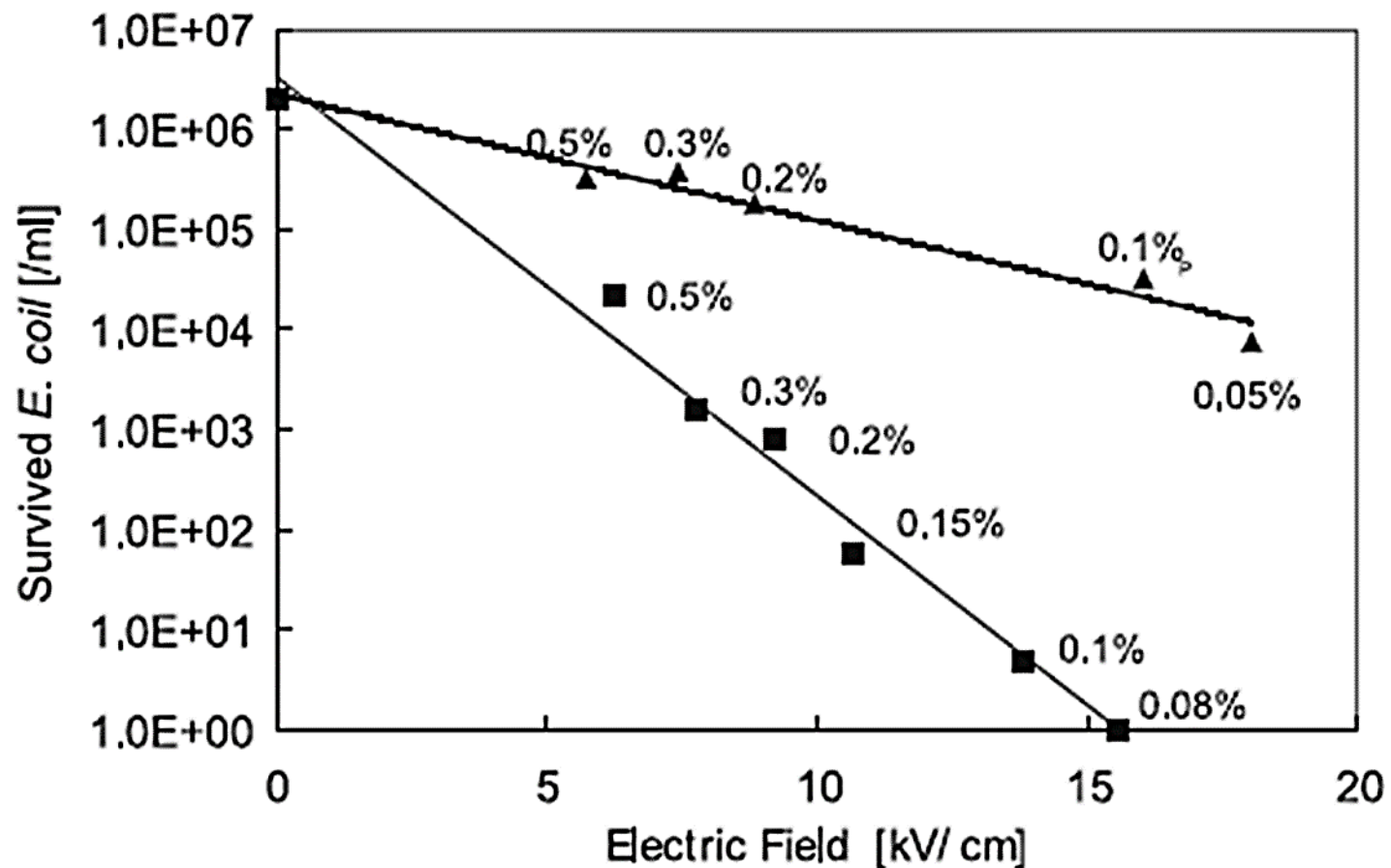


Fig. 5. Change of *E. coli* cells as a function of electric field of 65 and 70 °C process final temperature. The triangle (▲) and the square (■) represent the controlled process temperature at 65 and 70 °C, respectively. The symbols on each point show the concentration of saline.

Alimentos líquidos con partículas y líquidos sensibles al calor

Jugo de tomate, naranja y leche
Salsas, carnes, sopas



Ohmic processed commercial available products



The aseptic filling of the vegetable side dishes, containing big, al dente pieces of vegetables, into aseptic carton packs is made possible by a product preparation system that uses the ohmic process



Conservación no térmica de alimentos. Barbosa-Cánovas, GV, Pothakamury, UR, Palou, E, Swanson, BG. – ACRIBIA – 1999.

Emerging Technologies for Food Processing (First Edition) 2005 Elsevier Ltd. Da-Wen Sun.

<https://www.fda.gov/Food/FoodScienceResearch/SafePracticesforFoodProcesses/ucm101662.htm>

Pulsed Electric Field Processing of Foods: A Review. *Journal of Food Protection*, Vol. 62, No. 9, 1999, Pages 1088–1096. S. JEYAMKONDAN, D. S. JAYAS, R. A. HOLLEY

Hurdle technology: A novel approach for enhanced food quality and safety: A review. Imran Khan, Charles Nkufi Tango, Sumaira Miskeen, Byong H. Lee, Deog-Hwan Oh. *Food Control* 73 (2017) 1426-1444

Aplicación de la alta presión hidrostática en la conservación de los alimentos. *Cienc. Tecnol. Aliment.* Vol. 3, No. 2, pp. 66-80, 2001. Téllez-Luis, S. J.; Ramírez, J. A.; Pérez-Lamela, C.; Vázquez, M.3; Simal Gándara, J.