



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

DISEÑO DE UN SISTEMA Y CONSTRUCCIÓN DE UNA
CÁMARA ESTÁTICA DE TRATAMIENTO PARA LA
CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS UTILIZANDO CAMPOS
ELÉCTRICOS PULSADOS DE ALTA INTENSIDAD.

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA:

ALEJANDRA ANTONIETA LÓPEZ LICONA

DIRECTORES DE TESIS:

M.C. EVARISTO ISAC VELÁZQUEZ CRUZ
M.C. ENRIQUE ESPINOSA JUSTO

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAXACA
NOVIEMBRE DE 2004

RESUMEN

El uso de la tecnología de campos eléctricos pulsados de alta intensidad para la conservación de alimentos, involucra la aplicación de pulsos de corta duración y elevada intensidad de campo eléctrico, con la finalidad de destruir la membrana celular de microorganismos patógenos y deteriorativos, sin un aumento significativo en la temperatura del alimento tratado. Para diseñar y construir una cámara de tratamiento estática para la conservación de alimentos por medio de esta tecnología; así como establecer una propuesta para la construcción del generador de pulsos de alto voltaje, se realizó una detección, obtención y consulta bibliográfica de las cámaras de tratamiento reportadas en trabajos de investigación, así como de los sistemas electrónicos destinados a generar el campo eléctrico. La cámara diseñada consta de dos electrodos cilíndricos de acero inoxidable. Éstos son huecos con una base sólida y cuenta con una tapa. Dicha tapa presenta dos conductos que permiten la circulación de agua de enfriamiento y una terminal eléctrica que alimentará al electrodo. La cámara cuenta con cuatro tornillos que permiten el desplazamiento de los electrodos, lo que hace posible obtener diferentes intensidades de campo eléctrico. Los electrodos están sostenidos por un espaciador cilíndrico de Nylamid, el cual posee dos ductos: uno para la entrada y otro para la salida del alimento. El circuito eléctrico diseñado para la generación de pulsos de alto voltaje está conformado por: una fuente de alimentación de corriente alterna, un transformador elevador, un puente rectificador de onda completa, una red formadora de pulsos y un Tiratrón. Se ha logrado la construcción de la cámara de tratamiento, estableciendo la forma de los electrodos, sus dimensiones, así como la forma y dimensiones del espaciador. También se ha diseñado un sistema de enfriamiento para la cámara. Y finalmente, se ha establecido una propuesta para la construcción del circuito electrónico para la generación de pulsos de alto voltaje.

A mis papás, Ignacio y Tony

A mis hermanos, Nacho y Raquel

A mis abuelos, Álvaro[†], Ignacio[†], Bertha y Socorro[†]

AGRADECIMIENTOS.

A mi papá, mamá y hermanos por el amor, confianza, amistad y apoyo que siempre me han demostrado a lo largo de mi vida.

A mis asesores M. C. Evaristo Isac Velázquez Cruz y M. C. Enrique Espinosa Justo por guiarme durante este proceso, demostrándome su paciencia y su amistad.

A mis compañeros por esos cinco años compartidos, por haber formado un gran equipo, y sobre todo por su eterna amistad.

A mis profesores por su dedicación y tiempo empleados para transmitirme sus conocimientos en el transcurso de mi preparación.

INDICE.

	Página
Resumen.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Índice	vi
Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	x
Índice de fotografías	xi
Lista de símbolos	xii
Listas de abreviaturas.....	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	6
2.1 Tipos de pasteurización eléctrica	6
2.2 Teoría de la ruptura dieléctrica	8
2.3 Efecto de PEF sobre microorganismos	11
2.4 El sistema PEF	13
2.5 Alimentos tratados por PEF	20

3. OBJETIVOS	23
3.1 Objetivo general.....	23
3.2 Objetivos específicos	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS	24
4.1 Identificación del Problema.....	25
4.2 Investigación de Antecedentes.....	25
4.3 Especificaciones	26
5. RESULTADOS	36
5.1 Propuesta de diseño y construcción de la cámara estática de tratamiento	36
5.2 Propuesta de diseño para el circuito eléctrico del generador de pulsos de alto voltaje.....	44
5.3 Parámetros teóricos de operación del sistema PEF	47
6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	51
LECTURA CITADA.....	53
APÉNDICE A	58
APÉNDICE B	65

INDICE DE FIGURAS.

Figuras	Página
1. Disposición de la célula dentro de los electrodos y modelo de la formación de poros en la membrana de células	10
2. Modelo para pulsos de decaimiento exponencial.....	15
3. Modelo para pulsos de onda cuadrada.....	15
4. Modelo para pulsos oscilatorios	15
5. Modelo para pulsos bipolares de decaimiento exponencial y para pulsos bipolares de onda cuadrada.....	16
6. Cámara estática diseñada por Sale y Hamilton (1967).....	17
7. Cámara estática diseñada por Dunn y Pearlman (1987).....	18
8. Cámara estática diseñada por Zhang y colaboradores (1995)	19
9. Diagrama de Flujo del proceso de diseño	24
10. Isométrico de la cámara de tratamiento diseñada	36
11. Electrodo de acero inoxidable.....	37
12. Tapa de los electrodos.....	38
13. Espaciador de Nylamid.....	39

14. Diseño del circuito eléctrico para el generador de pulsos de alto voltaje	45
A-1. Vista superior cuerpo electrodos.....	59
A-2. Vista superior tapa electrodos	60
A-3. Vista superior espaciador	61
A-4. Vista frontal cámara de tratamiento	62
A-5. Vista superior cámara de tratamiento	63
A-6. Vista lateral cámara de tratamiento.....	64







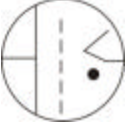
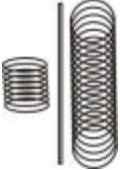

INDICE DE TABLAS.

TABLA	Página
1. Tamaño de la célula y potencial transmembrana inducido de diferentes microorganismos	11
2. Especificaciones de cámaras estáticas	28
3. Parámetros de tratamiento determinados por el modelo de Hülshager para diferentes microorganismos	32

INDICE DE FOTOGRAFÍAS.

FOTOGRAFÍA	Página
1. Espaciador de Nylamid.	40
2. Cuerpo y tapa del electrodo de acero inoxidable.	41
3. Espaciador y electrodo.	41
4. Región de tratamiento del alimento.....	42
5. Electrodo con sistema de enfriamiento.....	42
6. Sistema de desplazamiento para los electrodos.....	43
7. Vista lateral de la cámara estática completa	43

LISTA DE SÍMBOLOS.

ϵ_0	Permitividad en el vacío ($8.84 \times 10^{-8} \mu\text{F}/\text{cm}$)
ϵ_r	Constante dieléctrica del alimento
?	Resistividad del alimento (?m)
t	Duración del pulso (μs)
f_f	Densidad del alimento (g/cm^3)
??	Incremento máximo de temperatura
	Cámara de tratamiento.
	Capacitor electrolítico
	Diodo rectificador
	Fuente de corriente alterna
	Inductor
	Módulo de disparo
	Tiratrón
	Transformador elevador
	Variac. Fuente de corriente alterna variable

LISTA DE ABREVIATURAS.

a	Radio de la célula (mm)
A	Área efectiva del electrodo (cm ²)
C	Capacitancia efectiva del alimento dentro de la cámara de tratamiento (μF)
C_O	Capacitancia total de la red formadora de pulsos (μF)
C_P	Calor específico del alimento (kJ/kg °K)
d	Distancia de separación entre los electrodos (cm)
d_o	Diámetro de la célula (mm)
E	Intensidad de campo eléctrico aplicado (kV/cm)
E_c	Intensidad de campo eléctrico crítico (kV/cm)
f	Factor de forma de la célula
k	Constante cinética específica para cada microorganismo (kV/cm)
l	Longitud de la célula (mm)
L	Inductancia total de la red formadora de pulsos (μH)
n	Número de pulsos aplicados
Q	Cantidad de energía entregada por los pulsos de onda cuadrada (kJ/L)
R	Resistencia efectiva del alimento dentro de la cámara de tratamiento (?)
S	Fracción de supervivencia
t	Tiempo total de tratamiento (μs)
t_c	Tiempo de tratamiento crítico (μs)
$?$	Volumen de alimento dentro de la cámara de tratamiento (cm ³)
V_1	Voltaje de carga para los capacitores (V)
V_2	Voltaje de descarga hacia la cámara de tratamiento (V)
V_c	Voltaje crítico de tratamiento (V)
V_{pp1}	Voltaje pico-pico de entrada al transformador elevador (V)

V_{pp2}	Voltaje pico-pico de salida del transformador elevador (V)
Z_{CT}	Impedancia de la cámara de tratamiento (?)
Z_{PFN}	Impedancia de la red formadora de pulsos (?)

1. INTRODUCCIÓN.

Todos los alimentos que la humanidad consume son de origen biológico porque derivan de plantas o animales y es debido a esta naturaleza que, todo alimento presenta una serie de transformaciones ya sean físicas, químicas, bioquímicas y microbiológicas, o combinaciones de dos o más de estas que llegan a producir su deterioro, es decir, la pérdida de atributos nutricionales y sensoriales. A pesar del completo desconocimiento que se tenía en la antigüedad de las causas de esta degradación de los alimentos, nuestros antepasados desarrollaron técnicas de conservación empíricas que satisfacían su necesidad de contar con alimentos en buenas condiciones, por un tiempo más prolongado. Algunos ejemplos de estas técnicas son: el secado al sol aplicado a granos, la congelación realizada en las latitudes al norte, el salado donde la sal disminuye la cantidad de agua disponible del alimento, y el encurtido.

Los primeros métodos desarrollados para la conservación de alimentos se han refinado con el paso del tiempo, a medida que se ha comprendido más a fondo los mecanismos que causan el deterioro de los alimentos. Esto trajo como resultado la aparición de tratamientos térmicos como: pasteurización, esterilización, escaldado y cocción, en donde la utilización de calor, aparte de su capacidad para la destrucción de microorganismos, también tiene acción sobre enzimas, proteínas, vitaminas, lípidos y el agua constitucional de los alimentos, con los consecuentes cambios indeseables en las propiedades de los mismos. Por su parte la refrigeración y la congelación, que también son tratamientos térmicos si consideramos como tal la influencia de la temperatura en los alimentos, fueron el aporte hecho por la termodinámica a la conservación de alimentos donde la disminución de la temperatura

inhibe reacciones de degradación y evita la reproducción de microorganismos causantes del deterioro.

A la par de los tratamientos térmicos se dio la conservación por adición de productos químicos y bioquímicos (antioxidantes, agentes anti-pardeamiento y sustancias anti-microbianas), con la finalidad de evitar deterioros químicos y biológicos en los alimentos. Posteriores a estos métodos de conservación dirigidos a prevenir el deterioro por factores químicos, bioquímicos y microbiológicos, surgieron técnicas de conservación como: la deshidratación controlada, la utilización de películas permeables o impermeables según fuera necesario limitar al alimento de la atmósfera, o aislarlo creando un micro-atmósfera de una composición determinada que rodeara al alimento. Dichas técnicas tienen el efecto de influir en los factores físicos causantes del deterioro tales como: la humedad y composición de la atmósfera que rodea al alimento.

Hasta el momento se ha observado que con la aplicación de los métodos tradicionales para la conservación de alimentos, se generan efectos indeseables en los productos procesados como son: el deterioro de los atributos sensoriales (color, olor, textura, sabor, etc.), de las propiedades nutricionales (desnaturalización de proteínas, degradación de vitaminas, etc.), y la formación de subproductos. Por todo esto no es de extrañarse que el objetivo actual de la tecnología para la conservación de alimentos, sea el de producir alimentos mínimamente procesados, seguros microbiológicamente, nutritivos y con una apariencia fresca. Apoyados en la idea del equilibrio existente entre el ser humano y la naturaleza. Estas nuevas tecnologías abren la posibilidad de poder ser aplicadas a una gran variedad de productos alimenticios y así cubrir las necesidades creadas por el crecimiento de la población.

Lo anterior expuesto, ha llevado al nacimiento del concepto de conservación de alimentos utilizando métodos no térmicos, también conocidos como tecnologías emergentes, las cuáles tienen la finalidad de eliminar o minimizar la degradación de la calidad que resulta de los métodos tradicionales de conservación, ya que durante el procesado no térmico la temperatura del alimento se mantiene por debajo de la temperatura que normalmente se utiliza en el procesado térmico.

Los métodos no térmicos de conservación de alimentos, tienen un gran potencial como proceso alternativo o complementario a los métodos tradicionales de conservación. Dentro de las tecnologías emergentes para la conservación de alimentos se encuentran: irradiación, alta presión hidrostática, pulsos lumínicos intensos, campos magnéticos oscilantes y campos eléctricos pulsados de alta intensidad. A continuación se hará una descripción breve de estos métodos.

Irradiación.-

Tecnología extensamente estudiada durante las décadas de los 50's y 60's. Consiste en exponer el alimento a radiaciones gamma de fuentes de ^{60}Co , con una energía de 5 a 10 kGy y longitudes de onda de 2000 Å o menos. El uso comercial de esta tecnología para la conservación de alimentos ha sido muy limitado, debido al escepticismo de los consumidores en conjunción con las prohibiciones legislativas. El uso de la irradiación ha aumentado gradualmente en Europa y en Estados Unidos, en su aplicación a frutas frescas, carne de aves de corral y especies. (Ohlsson, 1994).

Altas Presiones Hidrostáticas.-

La aplicación de esta tecnología en la conservación de alimentos, consiste en poner al alimento bajo presiones que están en el intervalo de 4000 a 9000 atmósferas, con lo que enzimas y microorganismos pueden ser

inactivados, ya que origina la ruptura de la pared celular de los mismos. Esta tecnología puede producir cambios en la textura de los alimentos. (Ohlsson, 1994).

Pulsos Lumínicos Intensos.-

En esta tecnología los alimentos son expuestos a pulsos de corta duración (1 μ s a 0.1 s) de luz incoherente intensa, cuya densidad energética es de aproximadamente 0.01 a 50 J/cm² y con longitud de onda en el intervalo de 170 a 2600 nm. Los pulsos lumínicos son aplicables principalmente para la pasteurización de superficies de carne, pescado, hortalizas, frutas, productos sólidos de leche y panadería, esterilización global de fluidos transparentes homogéneos y esterilización de materiales de envasado. (Barbosa-Cánovas y col., 1999a)

Campos Magnéticos Oscilantes.-

La utilización de campos magnéticos oscilantes, con una densidad de flujo magnético de 3-50 T y frecuencias de 5-500 kHz, causan la inactivación de microorganismos. El tiempo de tratamiento requerido para la conservación de alimentos es mínimo (25 μ s o por arriba de pocos milisegundos), además de que el proceso no genera un aumento significativo de temperatura en el alimento. (Barbosa-Cánovas y col., 1999a).

Campos Eléctricos Pulsados de Alta Intensidad.-

Este proceso involucra la aplicación de pulsos de alto voltaje, generalmente de 10 a 80 kV/cm, con duración de 1 a 100 microsegundos y con un número total de pulsos de 1 a 100, sobre alimentos situados entre dos electrodos. Este proceso puede ser realizado a temperatura ambiente o a temperaturas de refrigeración, durante periodos de tiempo por debajo de un segundo. (Qin y col., 1995).

Es en este último método, conocido como PEF (por sus siglas en inglés *Pulsed Electric Fields*), que se ubica el presente trabajo de tesis, el cual pretende sentar las bases para la comprensión de esta nueva tecnología emergente y poder contribuir al diseño y posible construcción de un sistema para la conservación de alimentos. Esperando que cumpla con su propósito se pone a su consideración.

2. ANTECEDENTES.

Los métodos no térmicos de conservación ofrecen alimentos mínimamente procesados con pequeñas pérdidas en sus características organolépticas y nutricionales. El uso de PEF para la conservación de alimentos, está adquiriendo cada día mayor popularidad, ya que representa una de las alternativas de conservación no térmica más prometedoras que los métodos químicos y térmicos en el procesamiento de alimentos. (Knorr, 1994).

Una de las primeras aplicaciones de electricidad en el procesamiento de alimentos fue dirigida a la esterilización de leche. A inicios del siglo veinte la leche se esterilizó utilizando un proceso conocido como *Electro-pure process*, el cual fue introducido a Estados Unidos de Norteamérica desde Europa. Este proceso fue uno de los primeros intentos para la utilización de campos eléctricos en la inactivación de microorganismos. Y no ha sido utilizado en la industria desde los años sesentas, probablemente por los elevados costos de operación y la competitividad de los métodos térmicos de pasteurización. (Jeyamkondan y col., 1998).

2.1 Tipos de pasteurización eléctrica.

El método de pasteurización eléctrica presenta variantes tales como: calentamiento óhmico, estimulación por campo eléctrico de baja intensidad, descarga de alto voltaje, bajo voltaje de corriente alterna, y campos eléctricos pulsados de alta intensidad.

Calentamiento óhmico (*Ohmic Heating*).

Es una de las primeras aplicaciones de electricidad en la pasteurización de alimentos. Este método se basa en la generación de calor en el

alimento cuando una corriente eléctrica pasa a través del mismo. Este proceso es utilizado para productos viscosos, y es considerado una técnica prometedora para el proceso aséptico de alimentos. (Barbosa-Cánovas y col., 1999b)

Estimulación por campos eléctricos de baja intensidad (*Low electric field stimulation*).-

Ha sido explorado como un método para el control de bacterias en la carne. Un campo eléctrico de 5-10 V/cm es aplicado como pulsos de corriente alterna a una muestra situada entre dos electrodos. La estimulación eléctrica reduce la cantidad de bacterias. (Barbosa-Cánovas y col., 1999b)

Descargas de alto voltaje (*High voltage arc discharges*).-

Las descargas de alto voltaje se realizan en alimentos líquidos colocados entre dos electrodos para así poder destruir los microorganismos presentes. Cuando altos voltajes son descargados a través de los líquidos, una multitud de efectos físicos y componentes químicos son generados, los cuales causan la inactivación de bacterias. Las enzimas también se inactivan por esta tecnología, debido a las reacciones de oxidación ocasionadas por radicales libres y oxígeno atómico. Durante este tratamiento no se produce un aumento significativo de la temperatura. Sin embargo, los mayores inconvenientes de este método eléctrico son la contaminación del alimento tratado por compuestos químicos producidos por la electrólisis, y la desintegración de partículas alimenticias. Este método es, por lo tanto, no recomendable para la industria de alimentos. (Barbosa-Cánovas y col., 1999b)

Bajo voltaje de corriente alterna (*Low-voltage alternating currents*).-

La acción bactericida de este método está basada en una cantidad definida de electricidad aplicada en o por encima de cierta densidad de

corriente mínima. Pareilleux y Sicard en 1970, observaron que la mínima corriente requerida para eliminar *E. Coli* fue de 25 mA. No se presentó una disminución en el número de células de manera inmediata después del tratamiento, pero el número decreció con el tiempo de permanencia. El efecto bactericida de este método, depende de la corriente que pasa a través de la suspensión, la presencia de componentes que contengan cloro y del tiempo de permanencia en el medio después del tratamiento. (Barbosa-Cánovas y col., 1999b)

A pesar de que el calentamiento óhmico involucra el paso de corriente continua a través de los alimentos con el fin de calentarlos uniformemente, la tecnología PEF no intenta calentar a los alimentos. Este proceso comprende la aplicación energía eléctrica en forma de pulsos de alto voltaje a un alimento situado entre dos electrodos por unos microsegundos. Estos pulsos destruyen la membrana celular por efectos mecánicos provocando un calentamiento insignificante del alimento tratado. (Barbosa-Cánovas y col., 1999a).

2.2 Teoría de la ruptura dieléctrica.

La importancia de PEF para la conservación de alimentos, radica en el efecto letal que este proceso tiene para la inactivación de microorganismos. Dicho efecto es explicado por medio de la teoría de la ruptura dieléctrica, presentada por Zimmermann y colaboradores en 1976.

La teoría explica que: cuando se aplica un campo eléctrico externo a la célula, induce un potencial eléctrico sobre la membrana celular (potencial transmembrana), ya que se genera una acumulación de cargas en ambos lados de su superficie. Cuando el potencial transmembrana inducido excede un valor crítico de aproximadamente 1 voltio, las cargas

generadas se atraen ocasionando una compresión en la membrana, reduciendo su grosor y provocando la formación de poros (Fig. 1). (Zimmerman y col., 1976).

Exponer a los microorganismos a campos eléctricos suficientemente intensos, provoca cambios en las propiedades eléctricas de la membrana celular. Disminuyendo su resistencia y aumentando su conductividad eléctrica debido a la formación de poros en dicha membrana. Este fenómeno es conocido como rompimiento eléctrico (*electrical breakdown*) puede ser reversible o irreversible dependiendo de la intensidad y duración del tratamiento eléctrico. El potencial transmembrana que causa su rompimiento eléctrico es conocido como voltaje crítico V_c , y depende del tipo, tamaño y etapa de crecimiento de la célula (Tabla 1). El correspondiente campo eléctrico crítico E_c , está definido por:

$$E_c = V_c / fa \quad (1)$$

Donde:

V_c = voltaje crítico (V),

f = factor de forma de la célula, y

a = radio de la célula (mm).

Para células esféricas, $f = 1.5$ y para células cilíndricas está dado por:

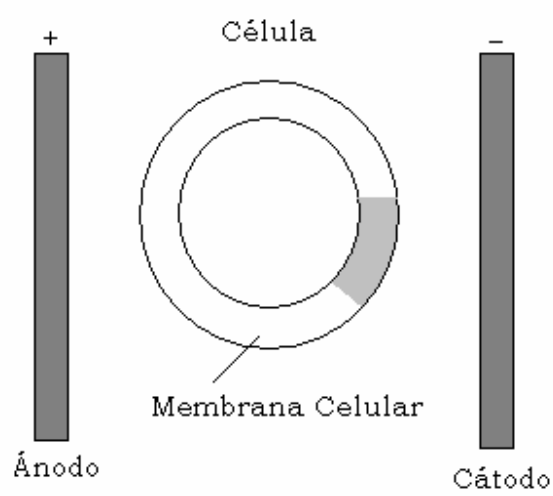
$$f = l / (l - d_o / 3) \quad (2)$$

Donde:

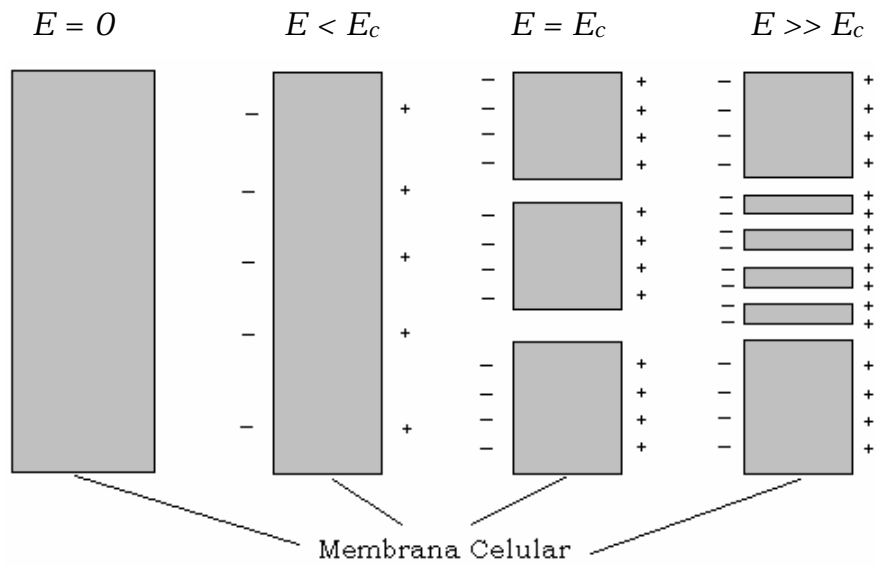
l = longitud de la célula (mm) y

d_o = diámetro de la célula (mm).

a)



b)



E = Intensidad del campo eléctrico externo aplicado.

E_c = Intensidad del campo eléctrico crítico.

Fig. 1. Disposición de la célula dentro de los electrodos (a) y modelo de la formación de poros en la membrana de células biológicas expuestas a campos eléctricos externos (b). (Mertens y Knorr, 1992).

Tabla 1.

Tamaño de la célula y potencial transmembrana inducido de diferentes microorganismos.

Microorganismos	d (μm)	l (μm)	V (μm^3)	f	V_c (V)
<i>E. coli.</i> (4 h)	1.15	6.9	7.2	1.06	0.26
<i>E. coli.</i> (30 h)	0.88	2.2	1.4	1.15	1.06
<i>K. pseudomona</i>	0.83	3.2	1.7	1.09	1.26
<i>P. aeruginosa</i>	0.73	3.9	1.6	1.07	1.25
<i>S. aureus</i>	1.03	-----	0.6	1.50	1.00
<i>L. monocytogenes I</i>	0.76	1.7	0.8	1.18	0.99
<i>C. albicans</i>	4.15	-----	38.0	1.50	2.63

d = diámetro, l = longitud, V = volumen, f = factor de forma, V_c = potencial de membrana inducido. (Castro y col. 1993).

Cuando el valor del campo eléctrico externo E es igual o ligeramente mayor al valor del campo eléctrico crítico E_c , se produce un incremento en la permeabilidad de la membrana, pero una vez que se deja de aplicar ese campo eléctrico externo la membrana se restaura por si sola. Si el valor del campo eléctrico externo E es considerablemente mayor que el valor de campo eléctrico crítico E_c , el daño causado a la membrana es irreversible y en consecuencia la célula muere. (San Martin y col., 2003).

2.3 Efecto de PEF sobre microorganismos.

Una gran cantidad de estudios se han llevado a cabo para comprobar el efecto que tiene la utilización de PEF sobre la inactivación de microorganismos, y así validar su uso como un proceso de pasteurización y esterilización no térmica de alimentos. Las primeras

investigaciones sobre los efectos bactericidas de PEF, se realizaron utilizando modelos de sistemas alimentarios tales como agua destilada, agua desionizada, solución neutra de cloruro de sodio, tampón de fosfato, leche simulada ultrafiltrada (SMUF), entre otros.

Sale y Hamilton (1967), fueron los primeros en estudiar el efecto de PEF 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 microorganismos. Probaron 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 temperatura.

Hûlsheger y col. (1981) estudiaron diferentes parámetros experimentales, tales como: la fuerza del campo eléctrico, la duración del pulso, el número de pulsos aplicados, la temperatura y el pH del medio de suspensión, para conocer el efecto que tiene cada uno de ellos sobre la inactivación de microorganismos. Obteniendo que la intensidad del campo eléctrico y el tiempo de tratamiento son los factores más importantes para la destrucción microbiana.

Jacob y col. (1981) investigaron la inactivación de células de levadura utilizando PEF, obteniendo como resultados que las células de *Saccharomyces cerevisie*, presenta mayor sensibilidad a la intensidad del campo eléctrico, cuando se encuentran en su etapa de crecimiento logarítmica. Y son menos sensibles cuando están en su fase estacionaria.

Hûlsheger y col. (1983) reportaron que las bacterias Gram-positivo y las levaduras son menos sensibles al tratamiento por PEF en comparación con las bacterias Gram-negativas, al aplicar una cantidad pequeña de pulsos. Cuando el tratamiento se aplicaba con un mayor

número de pulsos, observaron una supervivencia menor al 1% para todos los microorganismos examinados.

Jayaram y col. (1992), aplicaron PEF para la inactivación de células *Lactobacillus brevis* y concluyeron que la destrucción de la célula se debe principalmente a la ruptura dieléctrica de la membrana celular y no por la acción del calor generado durante el tratamiento.

Grahl y Märkl (1996), examinaron el efecto letal de PEF de suspensiones de varios tipos de bacterias, levaduras y esporas en soluciones buffer, determinando que las células vegetativas presentaron una reducción más significativa en su población en comparación con las esporas. También determinaron una fuerza de campo eléctrico crítica y un tiempo de tratamiento crítico para las diferentes células de estudio.

Álvarez y col. (2000), estudiaron la influencia que factores tales como: la fase de crecimiento celular, la concentración celular inicial, el pH y la conductividad del medio, tienen en la inactivación de *Salmonella senftenberg* por PEF. Demostraron que las células son más resistentes en el inicio de su fase logarítmica y en su fase estacionaria. También determinaron que la inactivación microbiana no está en función de la concentración inicial de células presentes en el medio. Por último observaron que la inactivación celular era mayor a un pH neutral que a un pH ácido del medio.

2.4 El Sistema PEF.

El sistema para la conservación de alimentos utilizando PEF, está compuesto principalmente de los siguientes elementos: una fuente de alto voltaje, un banco de capacitores, un interruptor de alto voltaje y

una cámara de tratamiento (las primeras cámaras de tratamiento utilizadas fueron estáticas). (Zhang y col., 1999).

El sistema básicamente funciona de la siguiente manera: la energía suministrada por la fuente de alto voltaje de corriente directa, es almacenada en un banco de capacitores. La energía recolectada por los capacitores es descargada en forma de pulsos de corta duración, hacia la cámara de tratamiento por medio de un interruptor, y así generar el campo eléctrico que se requiere para el tratamiento de los alimentos.

Los alimentos líquidos son considerados como conductores eléctricos por contener grandes concentraciones de iones, los cuales son portadores de cargas eléctricas. Para generar campos eléctricos pulsados de alta intensidad dentro del alimento y evitar que una gran cantidad de corriente fluya a través del mismo, es necesario que el tiempo entre los pulsos sea mucho más largo que la duración del pulso aplicado. (Zhang y col., 1995).

El campo eléctrico puede ser aplicado en forma de pulsos de decaimiento exponencial (fig. 2), pulsos de onda cuadrada (fig. 3), pulsos oscilatorios (fig. 4) y pulsos bipolares (fig. 5). Investigaciones han demostrado que los pulsos oscilatorios son los menos eficientes para la inactivación de microorganismos. Los pulsos de onda cuadrada presentan mayor eficiencia energética y mayor letalidad que los pulsos de decaimiento exponencial. (Barbosa-Cánovas y col., 1999b)

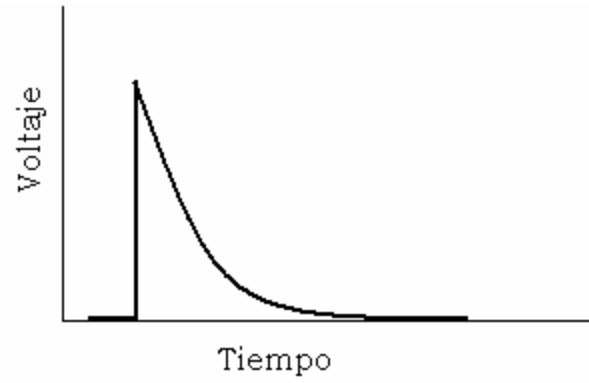


Fig. 2. Modelo para pulsos de decaimiento exponencial.

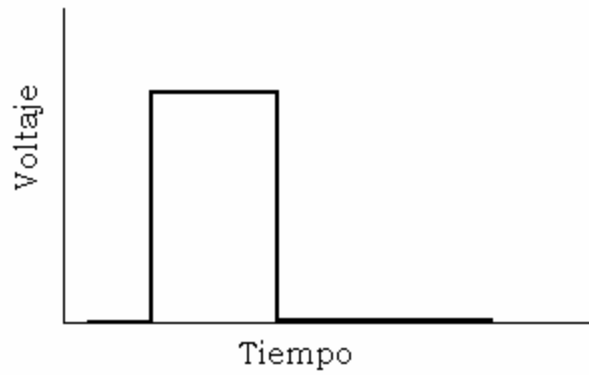


Fig. 3. Modelo para pulsos de onda cuadrada.

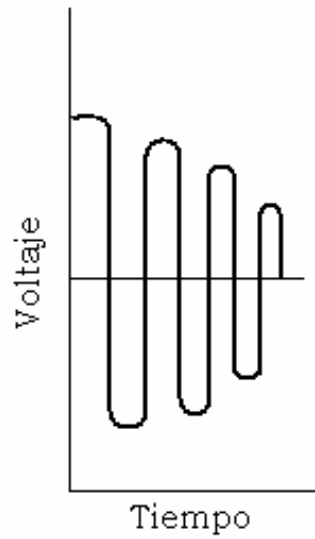


Fig. 4. Modelo para pulsos oscilatorios.

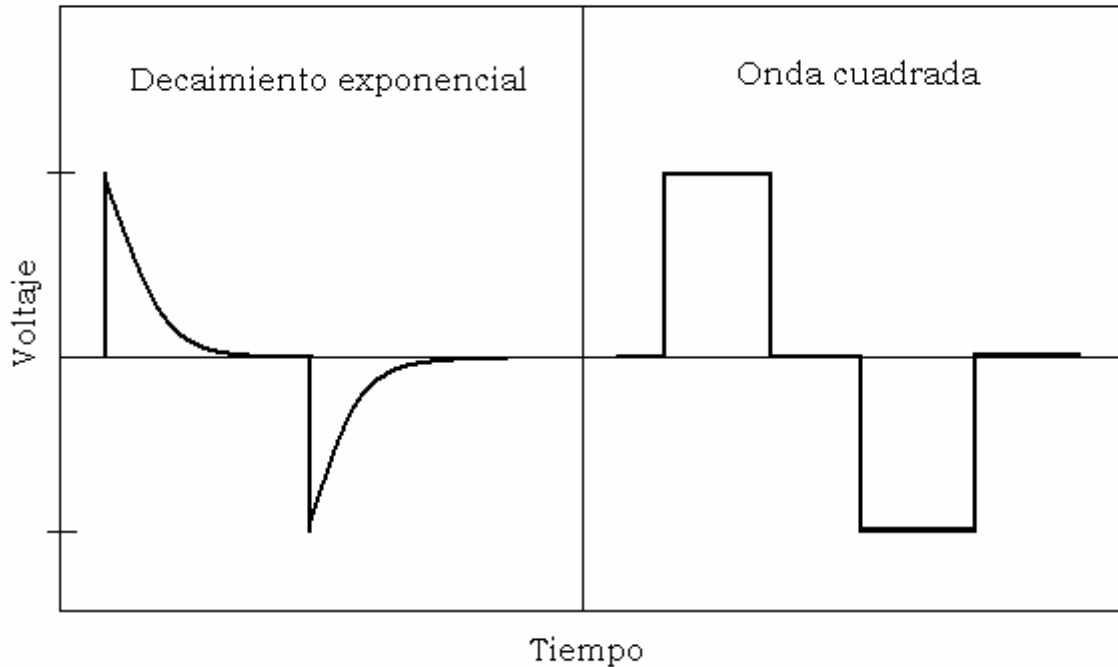


Fig. 5. Modelo para pulsos bipolares de decaimiento exponencial y para pulsos bipolares de onda cuadrada.

Los pulsos bipolares son más letales que los pulsos monopolares. Debido a que el campo eléctrico induce movimientos en las moléculas cargadas de la membrana celular de los microorganismos, una inversión en la orientación o en la polaridad del campo eléctrico, provoca un correspondiente cambio en la dirección de las moléculas cargadas. Y esa variación en el movimiento de las moléculas, causa un estrés en la membrana celular que aumenta su susceptibilidad a un rompimiento eléctrico. Los pulsos bipolares tienen la ventaja de requerir de menos energía, originando una reducción en la deposición de sólidos en las superficies de los electrodos, así como la disminución de la electrólisis de los alimentos. (FDA, 2000).

La cámara de tratamiento es uno de los componentes más importantes y complicados del sistema. Esta consiste en dos electrodos soportados por un material aislante que también forma un recinto para

contener al alimento que va a ser tratado. El procesamiento de alimentos por medio de la tecnología PEF se puede realizar en cámaras estáticas o continuas. Estudios a nivel laboratorio se han llevado a cabo con cámaras de tratamiento estáticas y continuas. Para tratar alimentos a nivel planta piloto es recomendable la utilización de cámaras continuas, ya que son más económicas y eficientes.

Sale y Hamilton en 1967, diseñaron una cámara de tratamiento que contiene dos electrodos de carbón sostenidos en una placa de latón. La cámara se forma al poner un separador de polietileno de 3 mm de espesor en forma de U entre dos electrodos (Fig. 6). El campo eléctrico máximo que se podía aplicar estaba limitado a 25 kV/cm debido a la fuerza dieléctrica del aire. Se utilizaron pulsos de onda cuadrada con una longitud de pulso de 2 a 20 μ s. (Zhang y col., 1995).

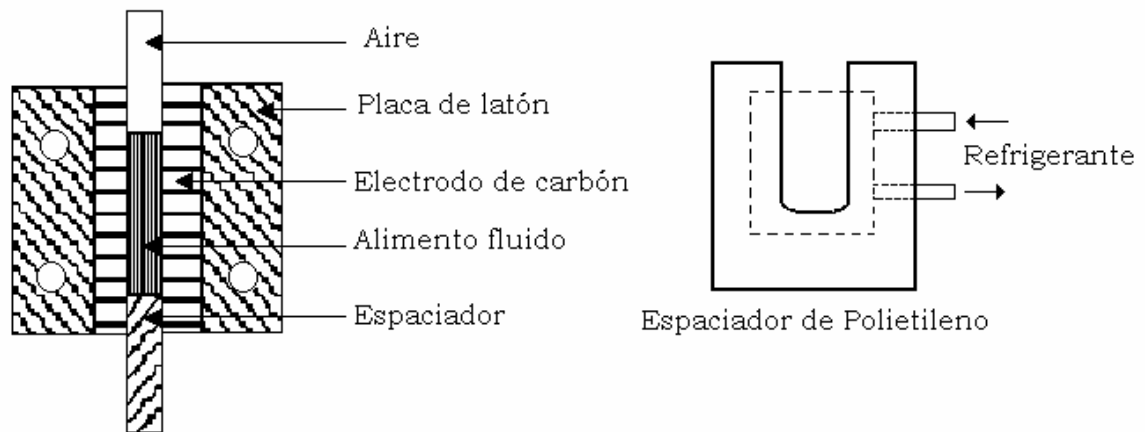


Fig. 6. Cámara estática diseñada por Sale y Hamilton (1967).

Dunn y Pearlman en 1987, construyeron un sistema utilizando una cámara estática formada por dos electrodos circulares de acero inoxidable y un separador cilíndrico de Nylon, la cual tiene 2 cm de altura y un diámetro interno de 10 cm; el área del electrodo es de 78 cm²

(Fig. 7). La fuerza del campo eléctrico utilizada fue de 30 kV/cm como valor máximo, ya que a valores superiores se observó la generación de chispas. Esta cámara fue diseñada para alimentos líquidos, que se introducían a ésta mediante un orificio en uno de los electrodos. (Barbosa- Cánovas y col., 1999b).

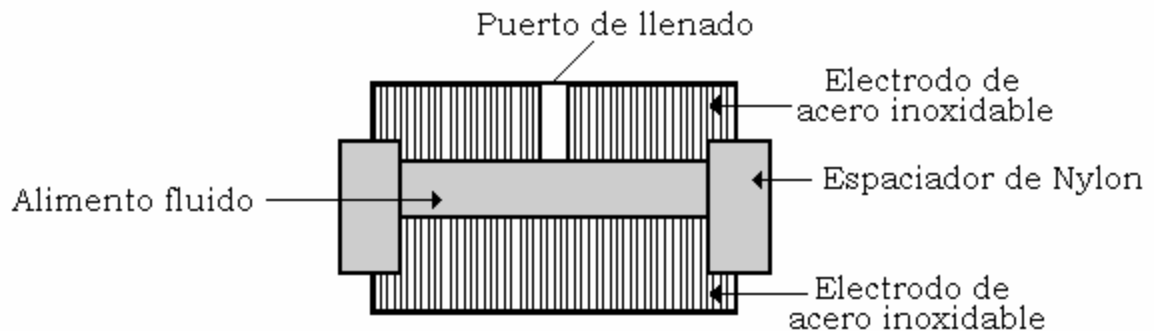


Fig. 7. Cámara estática diseñada por Dunn y Pearlman (1987).

Grahl y col. en 1992, diseñaron una cámara muy similar a la de Sale y Hamilton (1967). Utilizaron electrodos rectangulares de carbón-latón, los cuales estaban separados por un marco de Plexiglas con un espesor de 0.5 o 1.2 cm. El área efectiva del electrodo fue de 50 cm² y la fuerza máxima del campo eléctrico es de 30 kV/cm. La cámara no estaba provista de un sistema de enfriamiento para los electrodos. (Barbosa- Cánovas y col., 1999a).

Zhang y col. (1995), construyeron una cámara estática que consta de dos electrodos de placas paralelas de acero inoxidable en forma de disco, separados por un espaciador de polisulfona (Fig. 8). El área efectiva del electrodo es de 27 cm², con una distancia de 0.95 o 0.51 cm entre ellos. La fuerza máxima del campo eléctrico aplicado fue de

70 kV/cm. Como sistema de enfriamiento se utilizó la circulación de agua a través de chaquetas construidas dentro de los electrodos.

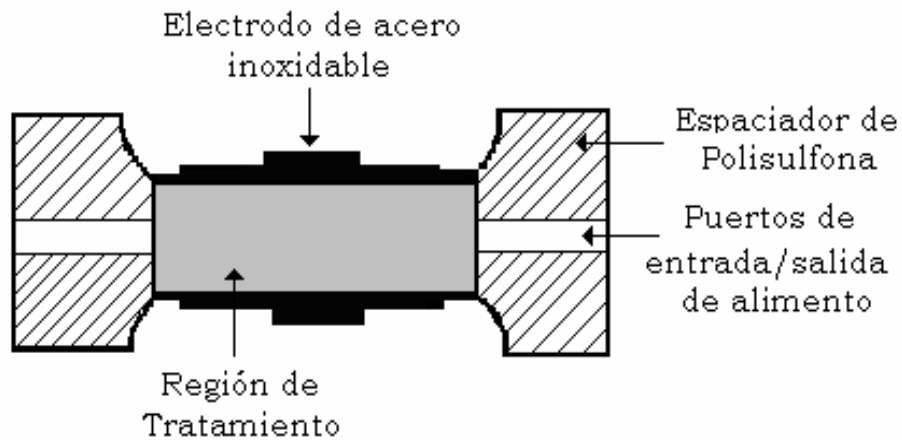


Fig. 8. Cámara estática diseñada por Zhang y colaboradores (1995).

Gásková y col. en 1996, diseñaron una cámara con electrodos de acero inoxidable, separados por un espaciador de Plexiglas. El área efectiva de cada electrodo es de 7 cm^2 con un diámetro de 3 cm. La fuerza máxima de campo eléctrico es de 28 kV/cm. (Lozano y col., 2000).

El último diseño de cámaras de tratamiento estáticas reportado en la literatura, corresponde al realizado por Ho y colaboradores en 1997. Esta cámara consiste en dos electrodos de acero inoxidable, cada uno de ellos con un área efectiva de 165 cm^2 y con un diámetro de 14.5 cm. La fuerza máxima del campo eléctrico utilizado fue de 87 kV/cm. (Lozano y col., 2000).

2.5 Alimentos tratados por PEF.

Son pocos los alimentos que han sido tratados por PEF, y que se encuentran reportados en la literatura especializada, tales alimentos son: jugos, leche, huevos líquidos y sopa de chícharos.

Jugo de manzana.-

Zhang y col. (1994) estudiaron la inactivación de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en jugo de manzana, utilizando para ello PEF de onda cuadrada y de forma exponencial.

Otra investigación fue realizada por Simpson y col. en 1995, los cuales reportaron que la vida útil del jugo, tratado con PEF, se incrementaba hasta una semana en comparación con un jugo que no había recibido tratamiento alguno, además de que no presentaba diferencias sensoriales significativas. (FDA, 2000).

Jugo de naranja.-

Zhang y col. en 1997, evaluaron la vida útil de jugo de naranja reconstituido, tratándolo con un sistema PEF a nivel planta piloto, obteniendo como resultados que el jugo almacenado a 4 ° C duraba hasta 5 meses y que la pérdida de vitamina C era menor comparado con el jugo tratado mediante un proceso térmico, además de que el color fue más atractivo. (FDA, 2000).

Por otro lado, Yeom y col. (2000) realizaron un estudio sobre la inactivación de microorganismo aerobios, hongos y levaduras presentes en el jugo de naranja, utilizando un sistema PEF a nivel planta piloto. Los resultados indicaron que no se observó crecimiento alguno de bacterias, hongos y levaduras durante 112 días de almacenamiento a diferentes temperaturas.

Jugo de zarzamora.-

Jin y Zhang, (1999) investigaron los efectos que un sistema PEF tiene sobre la inactivación microbiana, la retención de componentes volátiles y la estabilidad del color; concluyendo que la aplicación de esta tecnología es un proceso efectivo para la inactivación de bacterias aerobias, hongos y levaduras, además de mantener la calidad del jugo evitando pérdidas organolépticas de color, olor y sabor.

Leche.-

Dunn y Pearlman en 1987, aplicaron PEF a una muestra de leche homogenizada e inoculada con *Salmonella dublin* y observaron que después del tratamiento, no se encontraba la presencia de dicho microorganismo, ni aún almacenada a temperaturas de refrigeración durante 8 días. Dunn en 1995 indicó que la degradación del sabor en la leche era mínima y que no se presentaron cambios físicos o químicos en la actividad enzimática, y en la integridad de lípidos y proteínas. Qin y colaboradores en 1995 estudiaron que el tratamiento aplicado, no alteraba las propiedades fisicoquímicas del producto.(Barbosa-Cánovas, 1999b).

Calderon-Miranda en 1998, estudiaron la inactivación de *Listeria innocua* suspendida en leche descremada. Qin y col. en 1995; Fernández-Molina y col. en 1999, estudiaron la vida útil de leche cruda descremada tratada por PEF, obteniendo como resultados una vida útil de 2 semanas a una temperatura de almacenamiento de 4 ° C, además no observaron cambios en las propiedades físicas y químicas del producto, ni diferencias significativas en sus atributos sensoriales en comparación con leche pasteurizada mediante un tratamiento térmico. (FDA, 2000).

Evrendillek y col. (2001) realizaron un estudio con el fin de evaluar la vida útil de leche sabor chocolate procesada por PEF, encontrando que este tipo de proceso es muy efectivo para mantener la estabilidad microbiológica del producto, así como para conservar sus atributos sensoriales.

Huevos líquidos.-

La utilización de PEF ha demostrado que, a temperaturas de refrigeración, los huevos presentan una vida útil de 4 semanas. Entre los cambios producidos por este tratamiento, se encuentran: disminución en su viscosidad y aumento en el color del producto. (Qin y col., 1995)

Sopa de chícharo.-

La aplicación de PEF en sopa de chícharo inoculada con *E.coli*, indicó la efectividad del tratamiento para la inactivación de este microorganismo. Análisis microbiológicos, químicos y estudios de vida de anaquel realizados a la sopa tratada y almacenada a temperaturas de refrigeración, ambiente y elevada; demostraron que a temperatura ambiente y elevada no es conveniente almacenar el producto. No se observaron cambios en las propiedades físicas y químicas, una vez almacenada en refrigeración. (Qin y col., 1995)

3. OBJETIVOS.

3.1 Objetivo General.

Diseñar y construir una cámara de tratamiento estática para la conservación de alimentos por campos eléctricos pulsados de alta intensidad. Así como establecer una propuesta para la construcción de un sistema generador de pulsos de alto voltaje.

3.2 Objetivos específicos.

- Diseñar un sistema para la conservación de alimentos utilizando campos eléctricos pulsados de alta intensidad.
- Construir una cámara de tratamiento para la conservación de alimentos utilizando campos eléctricos pulsados de alta intensidad.
- Proponer un diseño conceptual para la construcción del generador de pulsos de alto voltaje.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

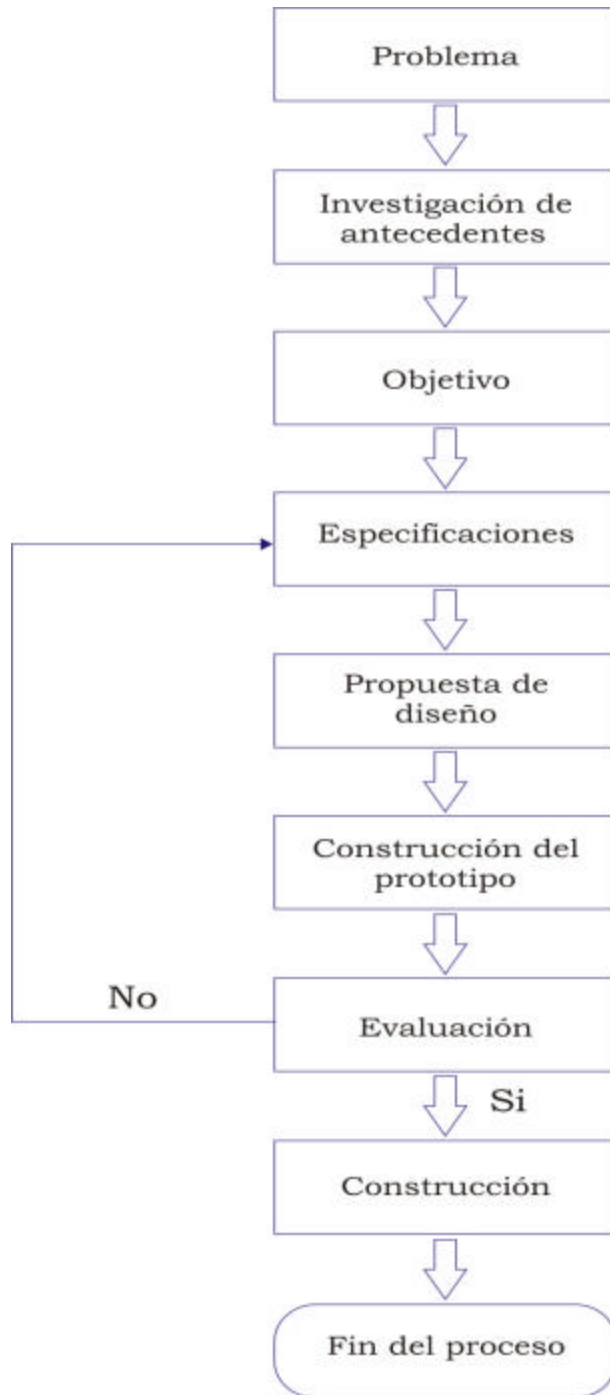


Fig. 9. Diagrama de flujo del proceso de diseño. (Bertoline y col., 1999; Ulrich y Eppinger, 2000).

En el diagrama de flujo (Fig. 9), se presenta el proceso que se llevó a cabo para el diseño de un sistema para la conservación de alimentos por medio de la tecnología PEF. En este proyecto de investigación se abarca hasta la propuesta del diseño para el generador de pulsos de alto voltaje y la construcción del prototipo de la cámara del tratamiento. La evaluación y construcción del sistema final forman parte de los trabajos futuros.

4.1 Identificación del Problema.

Los actuales métodos térmicos de conservación de alimentos como se ha mencionado anteriormente, presentan desventajas como son la disminución de las propiedades nutricionales y sensoriales de los alimentos, lo cual no satisface las expectativas de los consumidores. Esto hace necesario el dominio de tecnologías que no presenten estos inconvenientes. Actualmente han surgido tecnologías que son una solución a este problema; una de ellas es la conservación de alimentos utilizando campos eléctricos pulsados de alta intensidad (PEF). Para poder explotar al máximo esta tecnología es necesario contar con un sistema PEF, que nos permita conocer los parámetros más importantes que deben ser considerados dentro de esta tecnología.

4.2 Investigación de Antecedentes.

Una vez definido el problema y para poder diseñar y construir el sistema PEF, se procedió a hacer una extensa revisión de fuentes bibliográficas relacionadas con esta tecnología; tales como publicaciones internacionales del área de ingeniería en alimentos, tecnología de alimentos y ciencia de los alimentos. Encontrándose con dificultades debido a la inexistencia de libros especializados en esta tecnología a nivel nacional, ni en las bibliotecas de algunas universidades consultadas que

poseen la carrera de Ingeniería en Alimentos. Consiguiendo sólo dos libros referentes al tema en los EEUU. También se estableció contacto con un grupo de investigación de Colombia y con otro de Estados Unidos de Norteamérica, con quienes se pudo conseguir poca información respecto al tema.

El **objetivo** del proyecto de investigación es el descrito en el apartado número 3, sección 3.1.

4.3 Especificaciones.

Una vez que se hizo una detección, obtención y consulta de referencias bibliográficas, se pudo extraer y recopilar la información más útil e importante correspondiente al problema de investigación, lográndose identificar y establecer las especificaciones para el diseño de la cámara de tratamiento, así como para el diseño del generador de pulsos de alto voltaje.

El diseño para la construcción de la cámara de tratamiento para la conservación de alimentos por medio de la tecnología PEF, se realizó partiendo de los principales constituyentes que conforman este dispositivo, los cuales son:

- Dos electrodos en posición paralela uno con respecto a otro y un espaciador que los sostiene.
- La selección del material para la construcción de los electrodos se llevó a cabo considerando que: éstos deben ser de metal para que tengan la capacidad de almacenar cargas eléctricas cuando se

aplique a ellos una diferencia de potencial, y así generar un campo eléctrico.

- La forma de los electrodos se eligió tomando en cuenta que, para que los alimentos reciban un tratamiento adecuado es necesario que exista una distribución uniforme de las fuerzas del campo eléctrico entre los electrodos; siendo la forma de discos paralelos una de las más recomendables para este objetivo. Además, con esta forma de electrodos se reduce la deposición de sólidos en su superficie por efecto de la electrólisis.
- El espaciador que sostiene a los electrodos y que forma el recinto que contendrá al alimento, debe de ser de un material aislante eléctrico como el plástico, para que se evite la acumulación de cargas eléctricas en él mismo, y así asegurar que el campo eléctrico sólo se va a producir entre los electrodos.
- El material para cada uno de estos elementos debe ser de fácil limpieza y/o permitir su esterilización. Ambos materiales deben ser de uso permitido en la industria de alimentos. Los materiales seleccionados para la cámara de tratamiento son: Acero inoxidable para la fabricación de los electrodos, y Nylamid M para la manufactura del espaciador.
- La distancia de separación entre los electrodos dentro de la cámara debe ser considerablemente más pequeña que la superficie de los electrodos, para la obtención de un campo eléctrico uniforme.
- Las dimensiones de los electrodos y por consiguiente, las dimensiones generales de la cámara de tratamiento, se

establecieron analizando las características de las diferentes cámaras estáticas que han sido construidas, tratando de adecuar los recursos materiales y económicos disponibles para esta investigación.

En la tabla 2, se muestran las especificaciones generales de para las cámaras de tratamiento estáticas que han sido construidas.

Tabla 2. Especificaciones de Cámaras estáticas.

Referencia	Electrodo	Espaciador	Área electrodo (cm²)	Intensidad de campo eléctrico (kV/cm)
Sale y Hamilton (1967)	Carbón	Polietileno	-----	25
Dunn y Pearlman (1987)	Acero inoxidable	Nylon	78	30
Grahl y col. (1992)	Carbón	Plexiglas	50	30
Zhang y col. (1995)	Acero inoxidable	Polisulfona	27	70
Gásková y col. (1996)	Acero inoxidable	Plexiglas	7	28
Ho y col. (1997)	Acero inoxidable	Derlin	165	87

En lo referente al cálculo y diseño para el generador de pulsos de alto voltaje, se hicieron las siguientes consideraciones y definiciones basadas en conceptos de electrónica, propiedades eléctricas del alimento a tratar y el modelo matemático para calcular la fracción de supervivencia teórica de diferentes microorganismos:

- Se eligió la leche como el sistema alimentario líquido para el desarrollo de esta investigación. Se consideró este alimento por tener un elevado consumo en gran parte de la población, además por ser de gran importancia tecnológica debido a la gran variedad de productos que de él se generan.
- La intensidad del campo eléctrico generado entre los electrodos de la cámara de tratamiento está dado por:

$$E = V_2/d \quad (3)$$

Donde:

E = intensidad del campo eléctrico (kV/cm),

V_2 = voltaje de descarga hacia la cámara de tratamiento (kV),

d = distancia de separación entre los electrodos (cm).

- La cámara de tratamiento se considera como un capacitor, ya que está formada por dos electrodos conductores en donde el material dieléctrico que los separa es un alimento líquido. Asumiendo que el alimento líquido tiene propiedades tanto dieléctricas como eléctricas homogéneas, se tiene que la capacitancia y resistencia efectivas del alimento dentro de la cámara de tratamiento están dadas por:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A/d \quad (4)$$

Donde:

C = capacitancia efectiva (μF),

ϵ_0 = permitividad en el vacío,

ϵ_r = constante dieléctrica del alimento líquido,

A = área efectiva de los electrodos (cm^2),

d = distancia de separación entre los electrodos (cm).

Y,

$$R = \rho d/A \quad (5)$$

Donde:

R = resistencia efectiva (Ω),

ρ = resistividad del alimento líquido ($\Omega \text{ m}$),

d = distancia de separación entre los electrodos (m),

A = área efectiva de los electrodos (m^2).

- Estableciendo como base la aplicación de un número fijo de pulsos cuadrados, así como la duración de cada uno de estos pulsos, se obtiene el tiempo total de tratamiento que el alimento en estudio recibirá para provocar la inactivación de microorganismos. El tiempo total de tratamiento está definido por:

$$t = t n \quad (6)$$

Donde:

t = tiempo total de tratamiento (μs),

t = duración del pulso (μs),

n = número de pulsos aplicados.

- Para determinar la fracción de supervivencia teórica de diferentes microorganismos, una vez que el tratamiento por PEF ha sido aplicado se puede recurrir al modelo matemático desarrollado por Hülshager y col. en 1981.

$$S = \left(\frac{t}{t_c} \right)^{\frac{-(E-E_c)}{k}} \quad (7)$$

Donde:

S = fracción de supervivencia,

t = tiempo total de tratamiento (μ s),

t_c = tiempo crítico de tratamiento,

E = intensidad de campo eléctrico aplicado (kV/cm),

E_c = intensidad de campo eléctrico crítico,

k = constante cinética específica para cada microorganismo (kV/cm).

Los valores de t_c , E_c , y k , son específicos para cada microorganismo. Estos parámetros dependen de características tales como: tipo, forma, tamaño y etapa de crecimiento de los microorganismos, así como del medio en el que estén suspendidos y del número de pulsos que se apliquen para el tratamiento. En la tabla 3 se muestran estas variables estudiadas por Hülshager y col. en 1983 sujetas al modelo matemático antes descrito.

Tabla 3.

Parámetros de tratamiento determinados por el modelo de Hülshager para diferentes microorganismos suspendidos en una solución buffer de fosfatos con un pH de 7.0.

Microorganismos	E (kV/cm)	t (ms)	E_c (kV/cm)	t_c (μ s)	k (kV/cm)	G (%)
<i>E. coli.</i> (4 h)	4-20	0.07-1.1	0.7	11	8.1	97.7
<i>E. coli.</i> (30 h)	10-20	0.07-1.1	8.3	18	6.3	97.6
<i>K. pseudomona</i>	8-20	0.07-1.1	7.2	29	6.6	95.7
<i>P. aeruginosa</i>	8-20	0.07-1.1	6.0	35	6.3	98.4
<i>S. aureus</i>	14-20	0.07-1.1	13.0	58	2.6	97.7
<i>L. monocytogenes I</i>	12-20	0.07-1.1	10.0	63	6.5	97.2
<i>L. monocytogenes II</i>	10-20	0.07-1.1	8.7	36	6.4	98.5
<i>C. albicans</i>	10-20	0.14-1.1	8.4	110	2.2	96.6

E = intensidad de campo eléctrico, t = tiempo de tratamiento, E_c = intensidad de campo eléctrico crítico, t_c = tiempo crítico de tratamiento, k = constante cinética, G = coeficiente de regresión. (Hülshager y col., 1983).

- Debido a que se eligieron pulsos de onda cuadrada para ser utilizados en el sistema de conservación de alimentos, por ser los que presentan mayor letalidad, es necesario construir una red formadora de pulsos también conocida como PFN por sus siglas en inglés (*Pulse Forming Network*).

La impedancia de la red formadora de pulsos Z_{PFN} debe ser igual a la impedancia de la cámara de tratamiento Z_{CT} , debido a las condiciones de resonancia. Esto es:

$$Z_{PFN} = Z_{CT} \quad (8)$$

La impedancia Z_{CT} está definida por:

$$Z_{CT} = R \quad (9)$$

Donde:

Z_{CT} = impedancia de la cámara de tratamiento (?), y

R = resistencia efectiva del alimento dentro de la cámara de tratamiento (?).

La red formadora de pulsos está constituida por capacitores e inductores, por lo que es necesario calcular la capacitancia total C_O de la red formadora de pulsos, así como su inductancia total L .

Para el cálculo de la capacitancia total se tiene que:

$$C_O = t / R \quad (10)$$

Donde:

C_O = capacitancia total de la red formadora de pulsos (μF),

t = duración del pulso (μs),

R = resistencia efectiva del alimento dentro de la cámara de tratamiento (?).

Para calcular la inductancia total se recurre a la siguiente definición:

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L}{C_O}} \quad (11)$$

Despejando L se obtiene que:

$$L = (Z_{PFN})^2 C_O \quad (12)$$

Donde:

L = inductancia total de la red formadora de pulsos (μH),

Z_{PFN} = impedancia de la red formadora de pulsos (?),

C_O = capacitancia total de la red formadora de pulsos (μF).

- La energía entregada por los pulsos de onda cuadrada a la cámara de tratamiento está definida por:

$$Q = \frac{V_2^2 t}{Ru} \quad (13)$$

Donde:

Q = cantidad de energía entregada (kJ/L),

V_2 = voltaje de descarga hacia la cámara de tratamiento (V),

t = tiempo total de tratamiento (s),

R = resistencia efectiva del alimento dentro de la cámara de tratamiento (?),

u = volumen de alimento dentro de la cámara de tratamiento (L).

- El incremento máximo en la temperatura del alimento sujeto al tratamiento por campos eléctricos pulsados de alta intensidad es calculado usando la siguiente ecuación termodinámica:

$$\Delta T = \frac{Q}{j_f C_p} \quad (14)$$

Donde:

ΔT = incremento máximo en la temperatura,

Q = cantidad de energía (kJ/L),

j_f = densidad del alimento (kg/L), y

C_p = calor específico del alimento (kJ/kg °K).

5. RESULTADOS.

5.1 Propuesta de diseño y Construcción de la cámara estática de tratamiento.

La cámara de tratamiento para la conservación de alimentos (Fig. 10), consta de dos electrodos cilíndricos (1,2) de acero inoxidable, con sus bases colocadas paralelamente y sostenidos por un espaciador cilíndrico (3) de Nylamid, formando el recinto (4) que contendrá al alimento que será expuesto a campos eléctricos pulsados. Tiene dos conductos para la entrada (5) y salida (6) del alimento, ubicados en la parte superior e inferior del espaciador respectivamente. Presenta una terminal eléctrica en cada uno de sus electrodos (7,8), así como un sistema de enfriamiento (9,10) hacia el interior de éstos. También cuenta con un sistema para el desplazamiento de los electrodos (11).

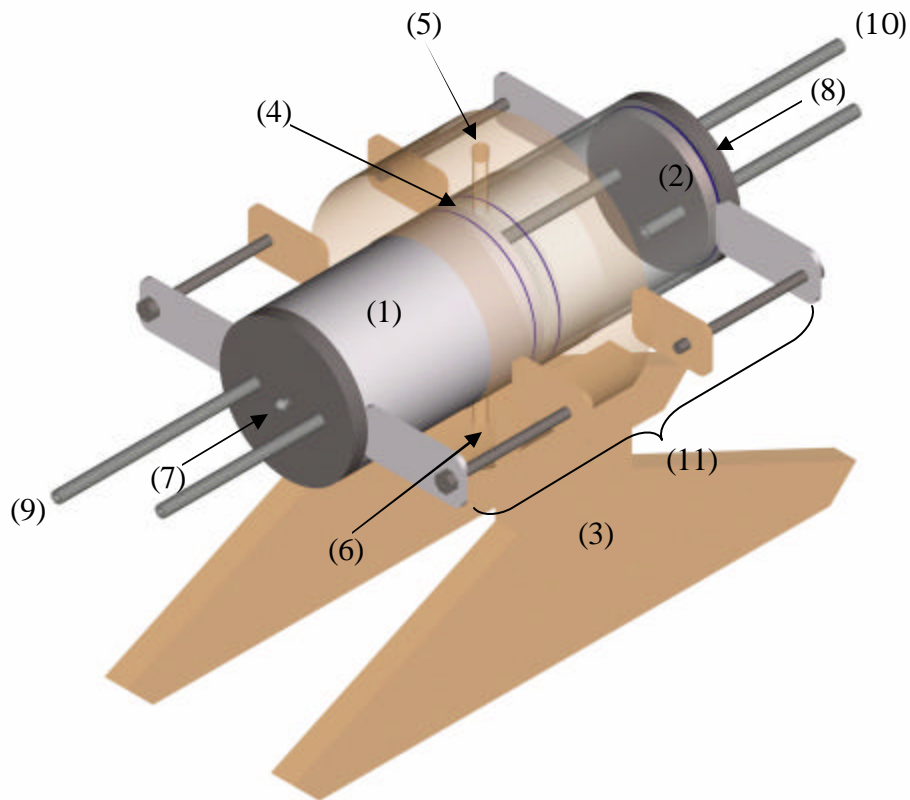


Fig. 10. Isométrico de la cámara estática de tratamiento diseñada.

Los electrodos de acero inoxidable (Figs. 11 y A-1) son cilíndricos, tienen un cuerpo hueco con una base sólida de 1 cm de espesor. El diámetro externo de su cuerpo es de 7.62 cm, el diámetro interno es de 7.02 cm, y su longitud es de 10 cm. Estos electrodos tienen un área efectiva de tratamiento $A = 45.604 \text{ cm}^2$. Cada uno de ellos cuenta con un *O-ring* de 3 pulgadas de diámetro para tener un ajuste adecuado con el espaciador de Nylamid que los sostiene. Al cuerpo de cada uno de los electrodos están soldadas dos placas de acero inoxidable de 5.7 cm de longitud. Estas placas sirven para sostener los tornillos sin fin que permiten mover los electrodos en una distancia d entre 4 mm y 10 mm, esto con la finalidad de operar la cámara a diferentes intensidades de campo eléctrico y tratar diferentes volúmenes de alimento.

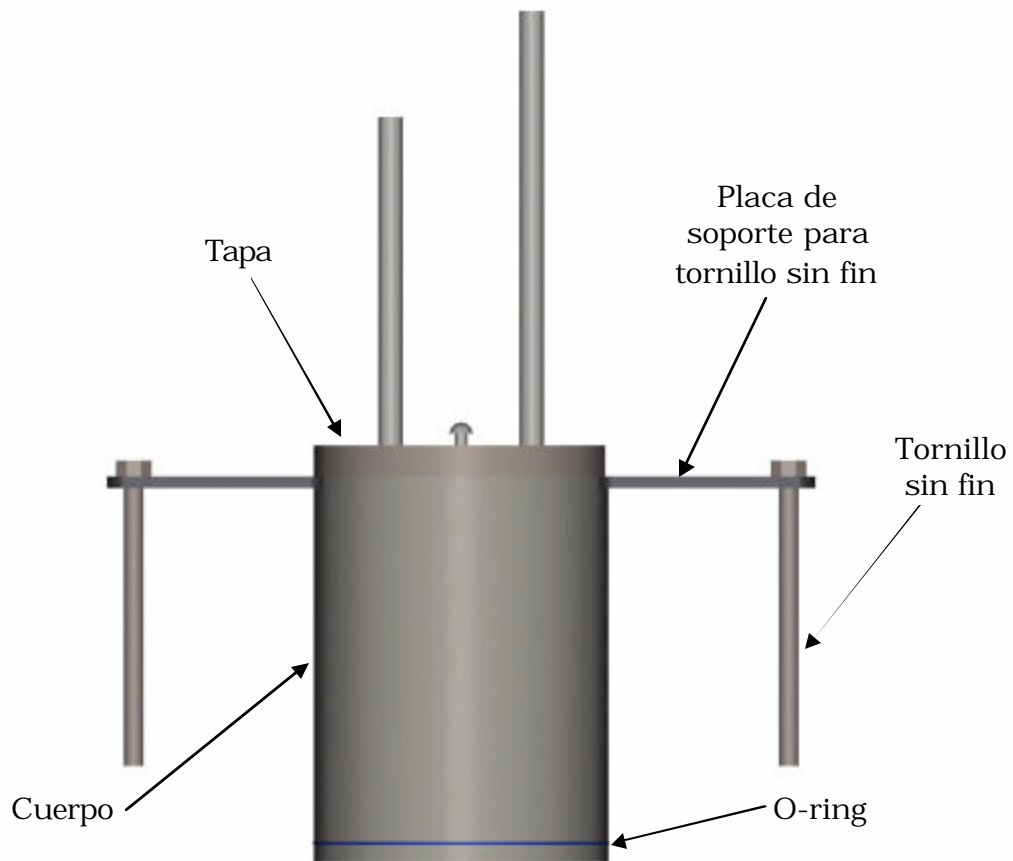


Fig. 11. Electrodo de acero inoxidable.

La tapa de cada electrodo (Figs. 12 y A-2) tiene una cabeza de 0.8 cm de espesor y una rosca de 0.7 cm de longitud con *O-ring* en el borde superior de ésta como sistema de cierre. En la cabeza de cada una de las tapas se encuentra una terminal eléctrica que permitirá la aplicación de pulsos cuadrados para generar la acumulación de cargas eléctricas en ambos electrodos y producir un campo eléctrico. La tapa también presenta dos tubos, cada uno con un diámetro externo de 0.63 cm. El tubo largo tiene una longitud de 20 cm y el corto tiene 12 cm de longitud. Estos tubos permitirán la entrada y salida de agua hacia el interior de los electrodos, como sistema de enfriamiento con la finalidad de evitar el calentamiento de los mismos durante el proceso.

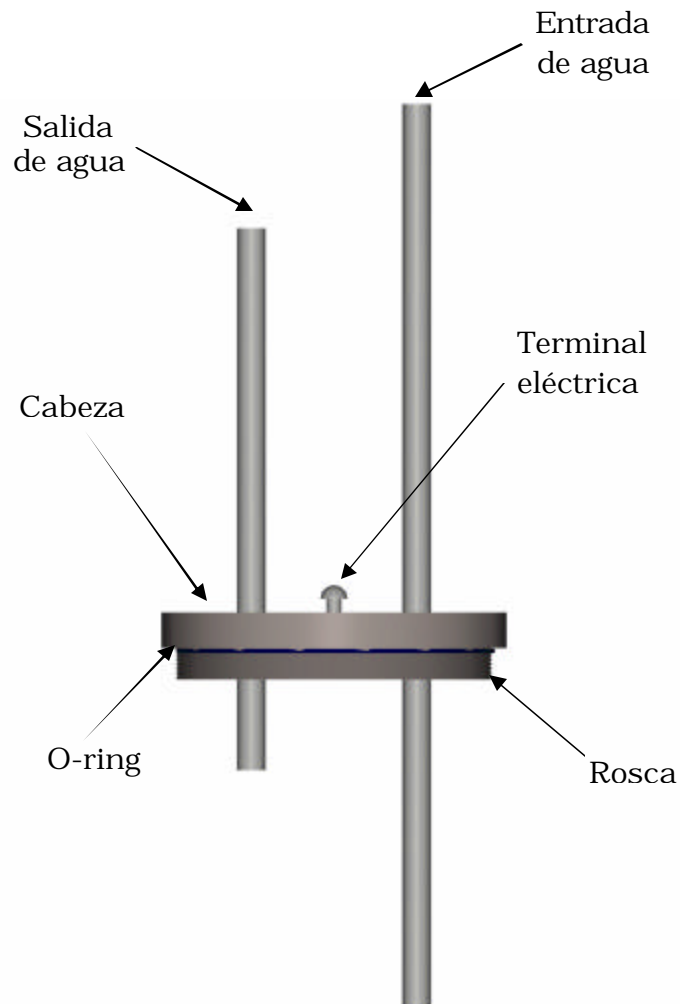


Fig. 12. Tapa de los electrodos.

El espaciador de Nylamid (Figs. 13 y A-3), que sirve para sostener los electrodos, y que en conjunto forman la región de tratamiento, tiene una forma cilíndrica con un diámetro externo de 13 cm, un diámetro interno de 7.72 cm y una longitud de 6.5 cm. En su parte superior se encuentran un orificio para la entrada del alimento líquido y en su parte inferior se localiza otro orificio para la salida del alimento, cada uno de ellos tiene un diámetro de 0.63 cm. También presenta cuatro placas de 4.3 cm de longitud, para sostener a los tornillos sin fin y permitir el desplazamiento de los electrodos. El espaciador cilíndrico cuenta en su base, con dos estructuras de 32 cm de longitud y 1.27cm de espesor, que sirven de soporte para toda la cámara.

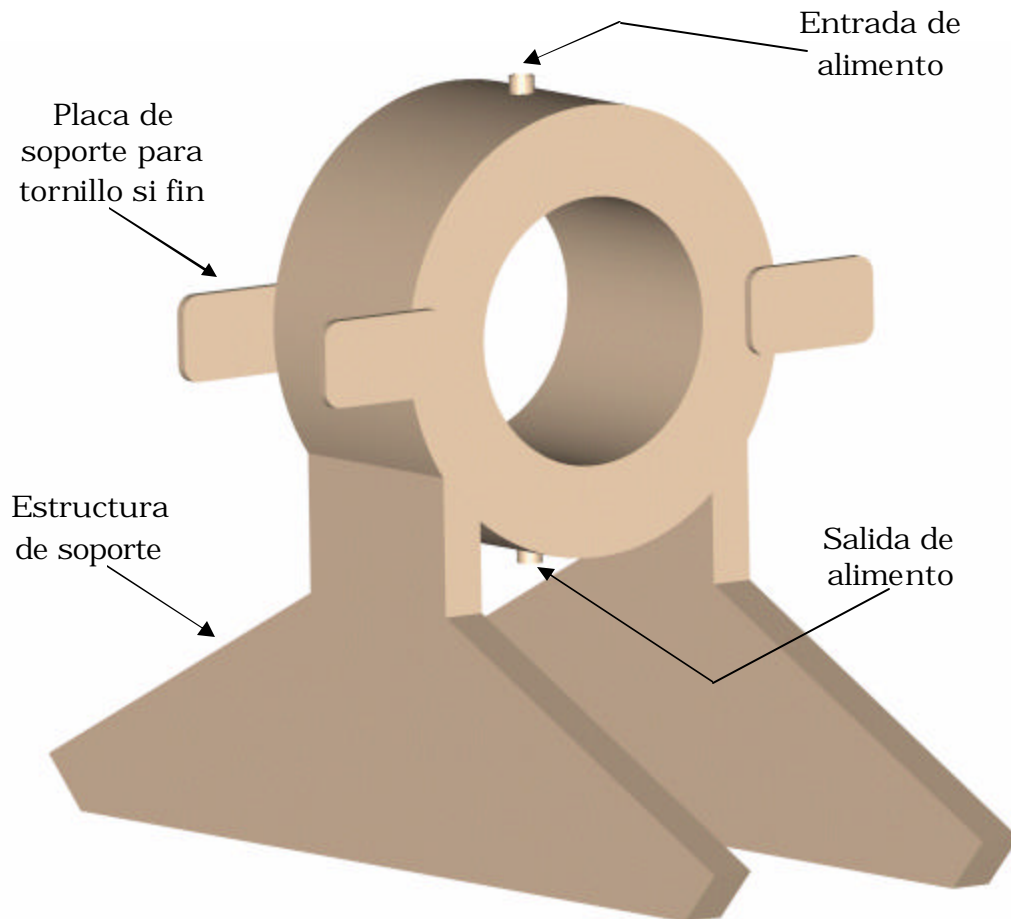


Fig. 13. Espaciador de Nylamid.

Los planos de la vista frontal (Fig. A-4), de la vista superior (Fig. A-5) y de la vista lateral (Fig. A-6) del diseño de la cámara estática de tratamiento se muestran en el Apéndice A, de este documento.

A continuación se presentan una serie de fotografías que muestran los elementos que componen la cámara estática de tratamiento que ha sido construida, así como la forma final de dicha cámara.



Foto. 1. Espaciador de Nylamid.



Foto. 2. Cuerpo y tapa del electrodo de acero inoxidable.



Foto. 3. Espaciador y electrodo.



Foto. 4. Región de tratamiento del alimento.



Foto. 5. Electrodo con sistema de enfriamiento.



Foto. 6. Sistema de desplazamiento para los electrodos.

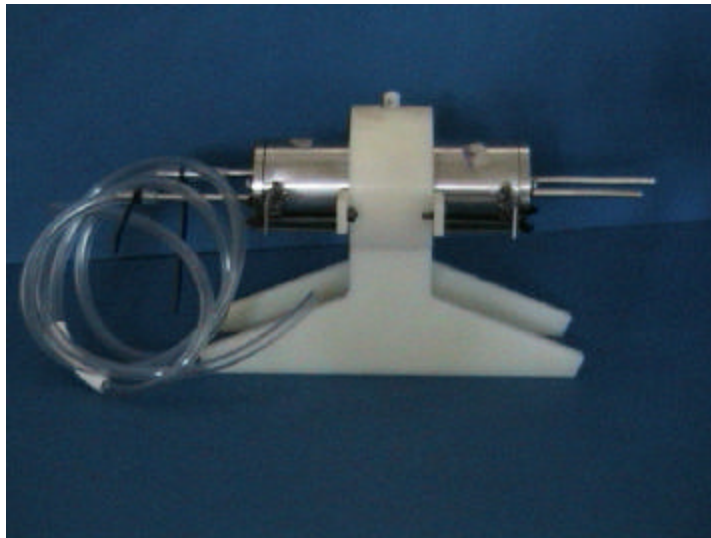


Foto. 7. Vista lateral de la cámara estática completa.

5.2 Propuesta de diseño para el circuito eléctrico del generador de pulsos de alto voltaje.

El circuito eléctrico (Fig. 14) para la generación de pulsos de alto voltaje está conformado por: una fuente de alimentación de corriente alterna, denominado *Variac* (transformador variable modelo *1010B* de *STACO ENERGY*), un transformador elevador, un puente rectificador de onda completa, una red formadora de pulsos y un Tiratrón.

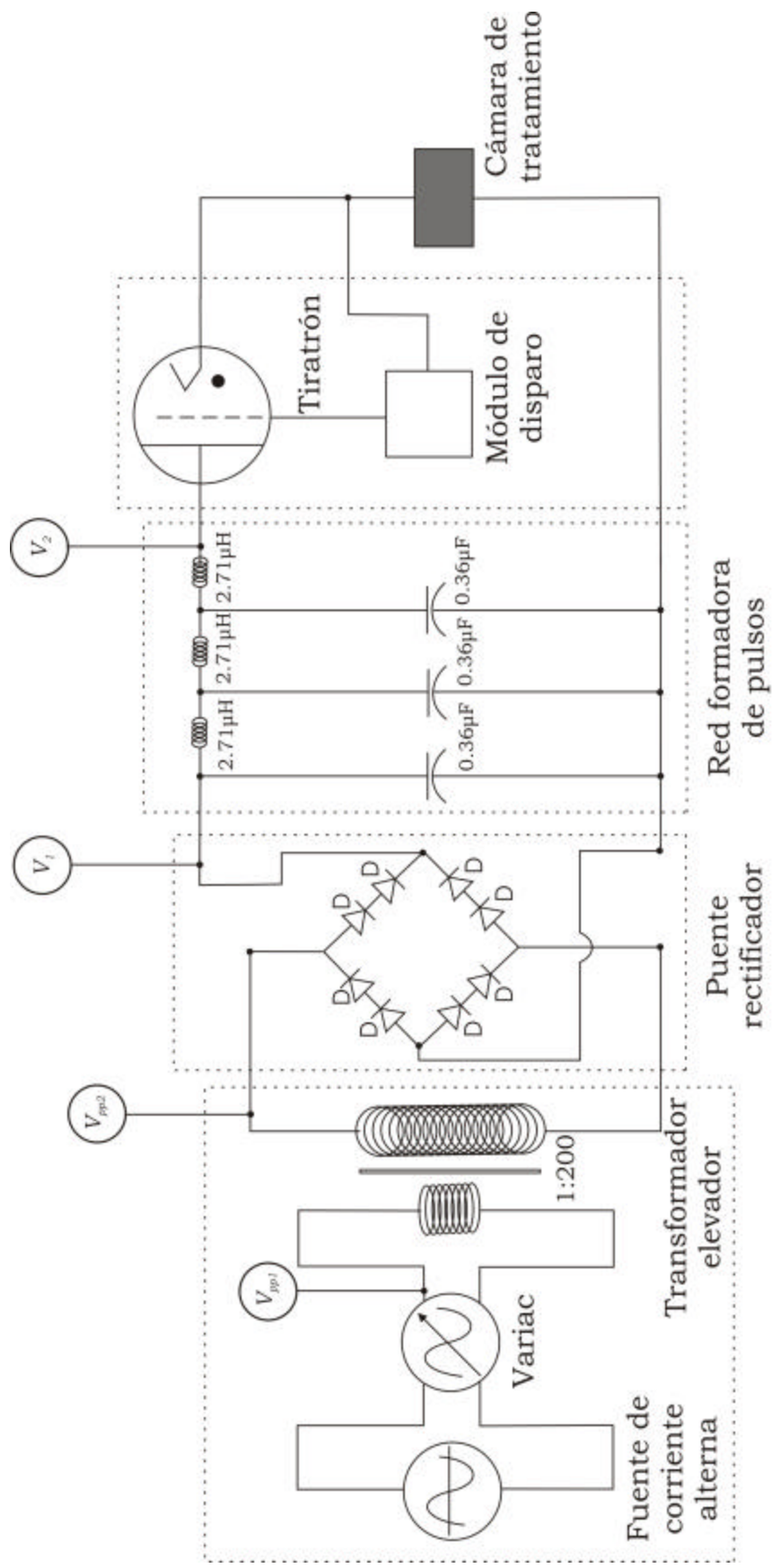


Fig. 14. Circuito eléctrico para el generador de pulsos de alto voltaje.

El Variac permite controlar el voltaje pico-pico V_{pp1} de entrada de 1.4 a 179.6 V, este voltaje representa la señal de entrada al transformador elevador. El voltaje en la salida del transformador elevador será 200 veces mayor que el voltaje de entrada, debido a que su relación de espiras es de 1:200, es decir, que por cada vuelta de alambre conductor en la bobina primaria se tienen 200 vueltas en su bobina secundaria. De esta manera el voltaje del Variac se eleva al intervalo de 280 a 35920 V, denominado voltaje pico-pico V_{pp2} en la salida del transformador elevador.

Para que se puedan generar pulsos unidireccionales, es necesario que la corriente alterna se rectifique y se produzca una corriente continua pulsante. Para llevar a cabo esta rectificación de la corriente alterna se requiere de un puente rectificador de onda completa. En el circuito de la fig. 14 se observa un puente rectificador de onda completa que consta de 8 diodos de alto voltaje (*NTE548*, Apéndice B). Cada rama del puente consta de 2 diodos en serie para asegurar su óptima operación.

Una vez que se ha obtenido la corriente continua pulsante con una amplitud 17960V, la energía entregada por esta corriente va a ser almacenada en una red formadora de pulsos o PFN. Esta red está compuesta por tres unidades cada una de ellas formada por un inductor y un capacitor (Fig. 14); que permite la generación de pulsos de onda cuadrada. Los pulsos son obtenidos cuando la impedancia Z_{CT} de la cámara de tratamiento y la impedancia Z_{PFN} de la red formadora de pulsos son iguales, $Z_{CT} = Z_{PFN}$, esto debido a las condiciones de resonancia del sistema. Los capacitores de la PFN se van a cargar hasta un voltaje máximo V_I de corriente directa. Dicha energía almacenada se va a descargar a través de un interruptor de alto voltaje denominado

Tiratrón (CX1836A, Apéndice B). Los pulsos de onda cuadrada entregados por el Tiratrón a la cámara de tratamiento, tienen un voltaje máximo V_2 correspondiente a la mitad del voltaje de carga V_1 , valor que está en función de la impedancia Z_{CT} de la cámara de tratamiento:

$$V_2 = V_1 [Z_{PFN} / (Z_{PFN} + Z_{CT})] \quad (15)$$

Donde:

V_2 = voltaje de descarga hacia la cámara de tratamiento (V),

V_1 = voltaje de carga para los capacitores (V),

Z_{PFN} = impedancia de la red formadora de pulsos (?), y

Z_{CT} = impedancia de la cámara de tratamiento (?).

En la Fig. 14 también se observa un módulo de disparo (MA2709A, Apéndice B). Este módulo va a comandar a un circuito de polarización de rejilla de control (Apéndice B). Este conjunto de elementos permite controlar el disparo en el Tiratrón.

5.3 Parámetros teóricos de operación del sistema PEF.

Los electrodos de la cámara de tratamiento reciben un voltaje de descarga $V_2 = 8980$ V, cuando fijamos la distancia mínima que los separa, la cual es de 0.4 cm, entonces se tiene una intensidad de campo eléctrico máximo $E = 22.45$ kV/cm de acuerdo a la Ec. (3). Como la cámara cuenta con un sistema para el desplazamiento de los electrodos se podría incrementar la distancia de separación hasta 1 cm, teniendo así un campo eléctrico mínimo de 8.98 kV/cm.

Para determinar algunas características para el diseño del sistema de conservación, fue necesario definir sobre que alimento líquido se estudiaría la tecnología PEF. Como se mencionó anteriormente la leche es el sistema alimentario elegido.

La leche está formada principalmente por agua y nutrientes como proteínas, grasas, vitaminas y minerales. Cuando ésta se somete a campos eléctricos pulsados, las moléculas bipolares se polarizan y en los iones se provoca un gran movimiento, lo que induce una corriente capacitiva y una corriente resistiva. Por lo anterior, la leche presentan propiedades dieléctricas que la hacen poseer un valor de capacitancia efectiva cuando se encuentra dentro de la cámara de tratamiento, siendo esta $C = 6.22 \times 10^{-4} \mu\text{F}$, Ec. (4); el valor de la constante dieléctrica $\epsilon_r = 61.75$ para leche con 1.5% de grasa y con una temperatura 15°C . La leche también posee propiedades eléctricas, por lo que presenta una resistencia efectiva dentro de la cámara de tratamiento de $R = 2.72 \Omega$, Ec. (5); el valor de la resistividad es $\rho = 3.1 \Omega\text{m}$, para leche con las mismas características antes mencionadas.

El tiempo de tratamiento que se aplicará para la conservación de la leche está definido como el producto obtenido de la duración del pulso por el número de pulsos que se deseen aplicar. Estableciendo una duración de pulso $t = 3 \mu\text{s}$, y eligiendo la aplicación de un número de pulsos $n = 60$ pulsos, se tiene por la Ec. (6) un tiempo total de tratamiento $t = 180 \mu\text{s}$. Por lo tanto, fijando la duración del pulso a $3 \mu\text{s}$, se pueden obtener diferentes tiempos de tratamiento dependiendo del número de pulsos que se deseen aplicar. La elección del número de pulsos generalmente no excede de 100 debido a que, cuanto mayor sea el número de pulsos aplicados mayor será la cantidad de energía suministrada al alimento, lo que traerá como consecuencia un aumento

en la temperatura del alimento, perdiendo así las condiciones de tratamiento no térmicas que se pretenden para la aplicación de la tecnología PEF.

Utilizando el campo eléctrico de 22.45 kV/cm y un tiempo de tratamiento $t = 180 \mu\text{s}$, y de acuerdo con el modelo matemático para conocer la fracción de supervivencia de los microorganismos establecido por Hülshager y col. en 1981 Ec. (7), se estarían logrando alrededor de una a dos reducciones logarítmicas teóricas en la población de *Staphylococcus aureus*, *Listera monocytogenes*, y *Escherichia coli* (como ejemplo de un microorganismo coliforme fecal). Siendo estos algunos de los principales microorganismos de interés, según la NOM-091-SSA1-1994 para leche pasteurizada. Los valores de t_c , E_c y k para cada uno de estos microorganismos fueron tomados de la Tabla 3.

Por otro lado, para que la red formadora de pulsos genere pulsos de onda cuadrada, las impedancias de la cámara de tratamiento y de la red formadora de pulsos deben ser iguales. Debido a que la impedancia $Z_{CT} = 2.72 \Omega$ para la cámara de tratamiento por la Ec. (9), la impedancia Z_{PFN} de la red también es de 2.72Ω de acuerdo a la Ec. (8). Para que la red formadora de pulsos produzca pulsos con una duración de $3 \mu\text{s}$, es necesario calcular la capacitancia total del banco de capacitores C_0 , así como la inductancia total de los inductores L , que forman dicha red. Por la Ec. (10), se tiene que $C_0 = 1.10 \mu\text{F}$ y por la Ec. (12) se obtiene una $L = 8.14 \mu\text{H}$.

Como se mencionó anteriormente, cuando se describió el diseño para el generador de pulsos de alto voltaje; los pulsos de onda cuadrada producidos en la red formadora de pulsos y entregados por el Tiratrón a la cámara de tratamiento, tienen un voltaje máximo V_2 correspondiente a

la mitad del voltaje de carga V_1 de los capacitores de la red. Por la definición de la Ec. (15), los pulsos de onda cuadrada entregados por el interruptor hacia la cámara de tratamiento tendrán un voltaje $V_2 = 8980 \text{ V}$.

Los pulsos de onda cuadrada van a entregar cierta cantidad de energía al alimento, la cuál es $Q = 292.571 \text{ kJ/L}$, Ec. (13); para un tiempo de tratamiento $t = 180 \mu\text{s}$ y para un volumen de leche $v = 18.24 \text{ cm}^3$. Esta cantidad de energía va a producir un aumento teórico en la temperatura de la leche ?? de 73.77° C , Ec. (14); para leche con una densidad $\rho_f = 1.03 \text{ kg/L}$, y con un calor específico $C_p = 3.85 \text{ kJ/kg K}$. Este aumento en la temperatura se minimiza utilizando el sistema de enfriamiento con el que cuentan los electrodos. Otra alternativa que se puede emplear para reducir este aumento de temperatura, es no aplicando los 60 pulsos seleccionados de forma continua, es decir, haciéndolo de manera intermitente, dosificando los pulsos en 6 grupos de 10 pulsos cada uno.

Todos los parámetros que anteriormente se han definido, se consideran teóricos debido a que no se aplicó la tecnología PEF de manera práctica. Por lo tanto, pueden existir variaciones una vez que se cuente con todo el sistema y se haga funcionar.

6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

- Se ha diseñado y construido una cámara estática de tratamiento con materiales y características que permiten su utilización para la aplicación de campos eléctricos pulsados de alta intensidad en sistemas alimentarios (Leche).
- Se ha realizado un diseño conceptual de un generador de pulsos de alto voltaje, que permite la aplicación y control de pulsos de onda cuadrada de corta duración para la conservación de alimentos.
- Lo que se pretende en un futuro es, contar con los recursos económicos necesarios para la adquisición de los componentes que forman el generador de pulsos de alto voltaje, y así construir esta parte del sistema PEF que hasta el momento se encuentra solo en su etapa de diseño.
- Una vez construido en su totalidad el sistema PEF, estudiar la respuesta y estabilidad del sistema.
- Contar con un sistema para la conservación de alimentos por medio de la tecnología de campos eléctricos pulsados de alta intensidad, ofrecerá la oportunidad de estudiar las ventajas y desventajas que este tipo de proceso tiene en la conservación de alimentos.

- Continuar con el estudio de la tecnología PEF, permitirá la ejecución de experimentos encaminados a realizar nuevos diseños de cámaras, tanto estáticas como continuas, que proporcionen un campo eléctrico más uniforme. Así como generadores de pulsos que optimicen costos y suministren pulsos de mayor eficiencia energética y letalidad.

LECTURA CITADA.

- ❖ Álvarez, I., J. Raso, A. Palop y F. J. Sala. 2000. Influence of diferentes factors on the inactivation of *Salmonella senftenberg* by pulsed electric fields. *Int. J. Food Microbiol*, 55(1-3): 143-146. (Abstr.)

- ❖ Barbosa-Cánovas, Gustavo V., M. Marcela Góngora-Nieto y Barry G. Swanson. 2000. *Pulsed Electric Power in Food Preservation*, En: <http://www.ifis.co.uk/hottopics/pulsedpower.html>. Accesado Diciembre 08, 2002.

- ❖ Barbosa-Cánovas, Gustavo V., Usha R. Pothakamury, Enrique Palou y Barry G. Swanson. 1999a. *Conservación no Térmica de Alimentos*. Editorial Acribia. España. 1-5, 53-111.

- ❖ Barbosa-Cánovas, Gustavo V., M. Marcela Góngora-Nieta, Usha R. Pothakamury y Barry G. Swanson. 1999b. *Preservation of foods with Pulsed Electric Fields*. Academic Pres. U.S.A.

- ❖ Bertoline, G., E. Wiebe, C. Millar y J. Moler. 1999. *Dibujo en Ingeniería y Comunicación Gráfica*. Editorial Mc. Graw-Hill. México.

- ❖ Castro, Amando J., Gustavo V. Barbosa-Cánovas y Barry G. Swanson. 1993. Microbial Inactivation of Foods by Pulsed Electric Fields. *J. Food Proc. Pres.*, U.S.A., 17(1): 47-73.

- ❖ Evrendilek, G. Akdemir, W. R. Dantzer, C. B. Streaker, P. Ratana Triwong y Q. H. Zhang. 2001. Shelf -life Evaluations of Liquid Foods Treated by Pilot Plant Pulsed Electric Field. *J. Food Proc. Pres.*, U.S.A., 25(4): 283-297.

- ❖ FDA. 2000. Food and Drug Administration. Center for Food Safety and Applied Nutrition. *Kinetics of Microbial Inactivation for Alternative Food Processing Technologies: Pulsed Electric Fields*, En: <http://vm.cfsan.fda.gov/~comm/ift-pef.html>. Accesado Diciembre 12, 2002.

- ❖ Grahl, T. y H. Märkl. 1996. Killing of Microorganisms by Pulsed Electric Fields. *Appl Microbiol. Biotechnol.*, 45: 148-157.

- ❖ Hülshager, H., J. Potel, y E. G. Niemann. (1983). Electric field effects on bacteria and yeast cells. *Radiat. Environ. Biophys.*, 22(2): 149-162 (Abstr.).

- ❖ Hülshager, H., J. Potel y E. G. Niemann. (1981). Killing of bacteria with electric pulses of high field strength. *Radiat. Enviro. Biophys.*, 20(1): 53-65. (Abstr.).

- ❖ Jacob, H. E., W. Forster y H. Berg. (1981). Microbiological implications of electric field effects. II. Inactivation of yeast cells and repair of their cell envelope. *Z Allg Mikrobiol.*, 21(3): 225-233.(Abstr.).

- ❖ Jayaram, S., G. S. P. Castle y A. Margatitis. 1992. Kinetics of sterilization of *Lactobacillus brevis* cells by the application of high voltage pulses. *Biotech. Bioeng.*, 40(11): 1412-1420. (Abstr.).

- ❖ Jeyamkondan S., D.S. Jayas y R.A. Holley. 1998. *Pasteurization of Foods by Pulsed Electric Fields at High Voltages*, Paper No. SD98-122, Universidad de Manitoba, Winnipeg Canada. En: <http://bse.unl.edu/About/Faculty/subbiah/PEFields.pdf>. Accesado Agosto 05, 2004.
- ❖ Jin, Z. Tony y Q. Howard. 1999. Pulsed Electric Field Inactivation of Microorganisms and Preservation of Quality of Cranberry Juice. *J. Food Proc. Pres.*, U.S.A., 23(6): 481-497.
- ❖ Knorr, Dietrich, Manuela Geulen, Thomas Grahl y Tener Sitzman. 1994. Food Application of High Electric Field Pulses. *Trends in Food Science and Technology*, Elsevier Trends Journals, U.K., 5:71-75.
- ❖ Lozano, E. Jorge, Cristina Añón, Efrén Parada-Arias y Gustavo V. Barbosa-Cánovas. 2000. *Trends in Food Engineering*, Technomic Publishing Company, Inc., U.S.A., 209-220.
- ❖ Mertens, Bart y Dietrich Knorr. 1992. Developments of Nonthermal Processes of Food Preservation. *Food Technol.*, U.S.A., 46(5):124-133.
- ❖ Ohlsson, Thomas. 1994. Minimal Processing Preservation Methods of the future: an overview. *Trends in Food Science and Technology*, Elsevier Trends Journals, U.K., 5: 131-134.
- ❖ Qin, Bai-Lin, Usha R. Pothakamury, Humberto Vega, Olga Martín, Gustavo V. Barbosa-Cánovas y Barry G. Swanson. 1995. Food Pasteurization Using High-Intensity Pulsed Electric Fields. *Food Technol.*, U.S.A., 45 (12); 55-60.

- ❖ Sale, A. J. H., W. A. Hamilton. 1967. Effects of high electric fields on microorganisms. I. Killing of bacteria and yeast. *Biochim. Biophys. Acta* 148, 781-788. (Abstr.).

- ❖ San Martín, M.F., Gustavo V. Barbosa-Cánovas y Barry G. Swanson. 2003. Innovations in Food Processing. *Food Technol.*, U. S. A., 54-60. En: [http:// www.cepmagazine.org/pdf/030354.pdf](http://www.cepmagazine.org/pdf/030354.pdf). Accesado Junio 12, 2004.

- ❖ Sitzmann, W. 1995. High-voltage pulse techniques for food preservation. En: G. W. Gould (ed.) *New Methods of Food Preservation*. (11), 236-252. Blackie Academic and Professional, London.

- ❖ Ulrich, Karl T. y Steven D. Eppinger. 2000. *Product Design and Development* Editorial McGraw-Hill. U.S.A.

- ❖ Yeom, H.G., C. B. Streaker, Q. H. Zhang y D. B. Min. 2000. Effects of Pulsed Electric Fields on the Activities of Microorganisms and Pectin Methyl Esterase in Orange Juice. *J. Food Sci.*, U.S.A., 65 (8): 1359-1363.

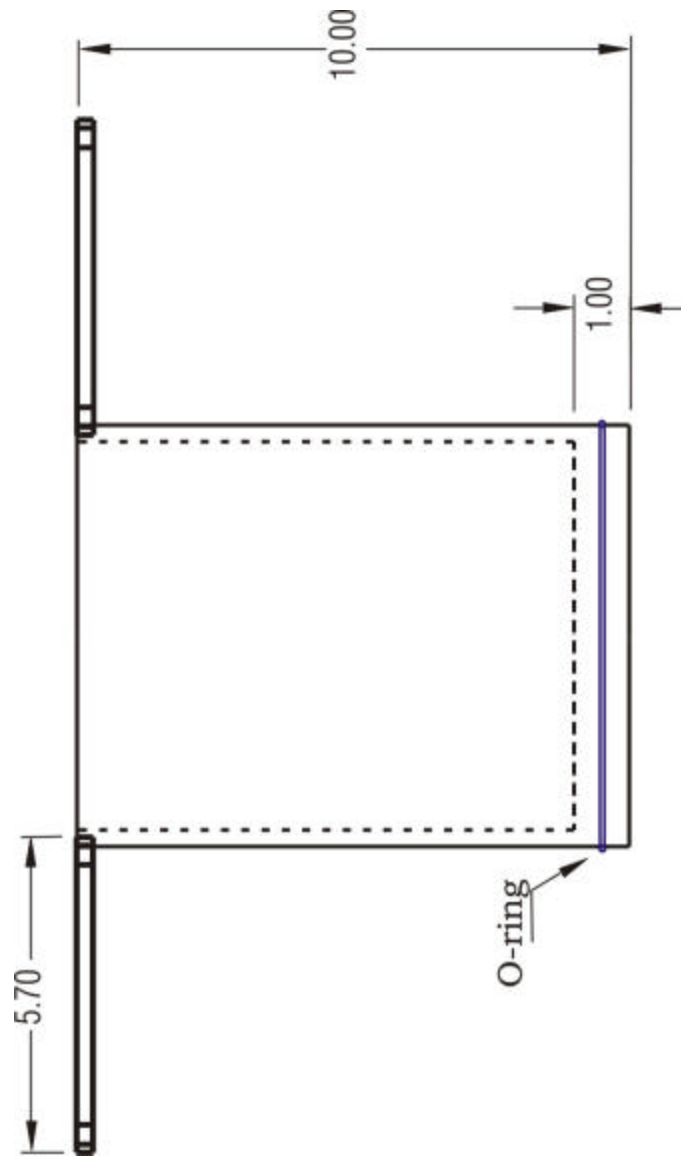
- ❖ Zhang, Qinghua y X. Qiu. 1999. *High voltage pulse generator*. U. S. Patent: 5,549,041.

- ❖ Zhang, Qinghua, Gustavo V. Barbosa-Cánovas y Barry G. Swanson. 1995. Engineering Aspects of Pulsed Electric Field Pasteurization. *J. Food Eng.*, U.S.A., 25(2):261-281.

- ❖ Zhang, Qinghua, Adelmo Monsalve-González, Bai-Lin Qin, Gustavo V. Barbosa-Caánovas y Barry G. Swanson. 1994. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in Apple Juice by Square-Wave and Exponential Decay Pulsed Electric Fields. *J. Food Proc. Eng.*, U.S.A., 17(4): 469-479.

- ❖ Zimmermann, U., G. Pilwat, F. Beckers and F. Riemann. 1976. Effects of external electrical fields on cell membranes. *Bioelectrochem. Bioenergetics.*, 3(1): 58-83. (Abstr.).

APÉNDICE A



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA SUPERIOR CUERPO ELECTRODOS

Material: Acero inoxidable

Fig. A-1

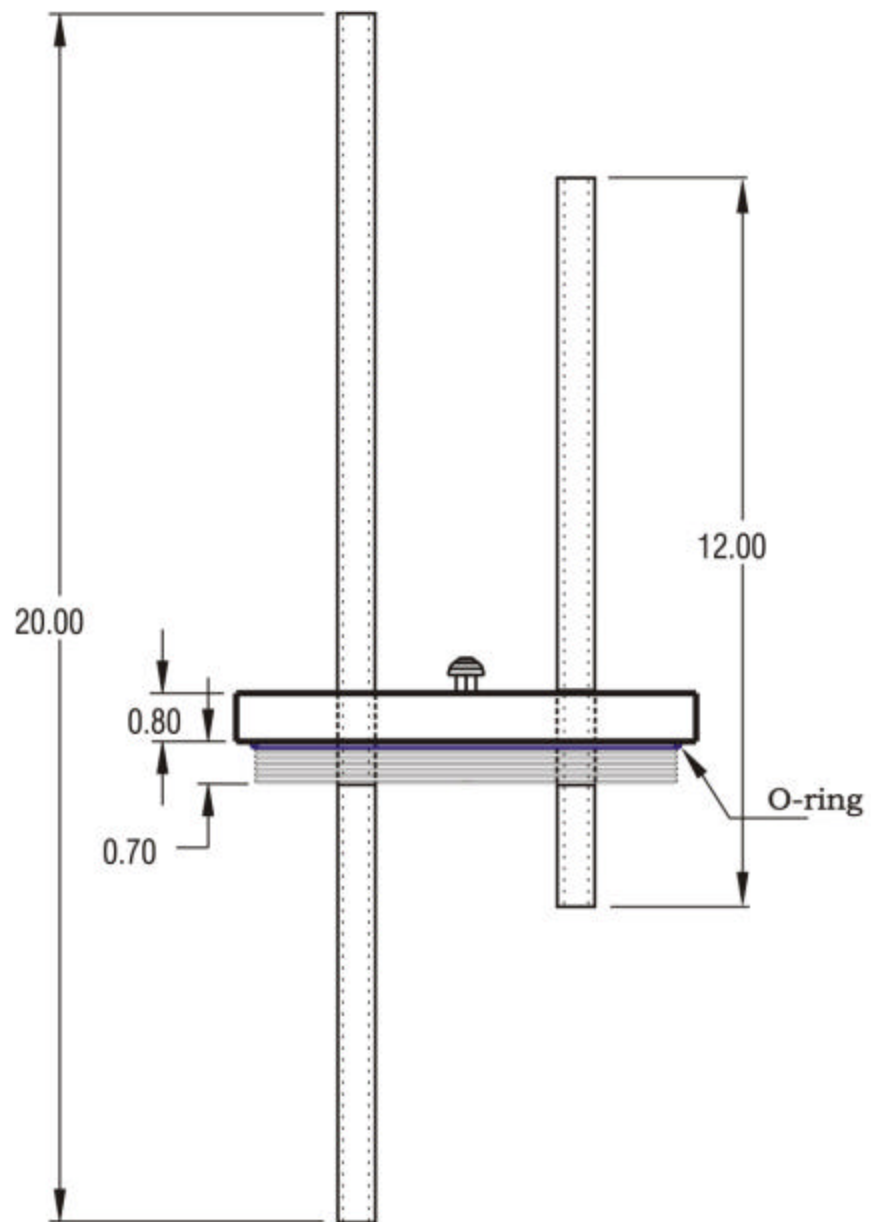
Acotación: cm

Hecho por: A.A.L.L.

Fecha: 8/11/04

Ingeniería en Alimentos

Lámina 1/6



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA SUPERIOR TAPA ELECTRODOS

Material: Acero inoxidable

Fig. A-2

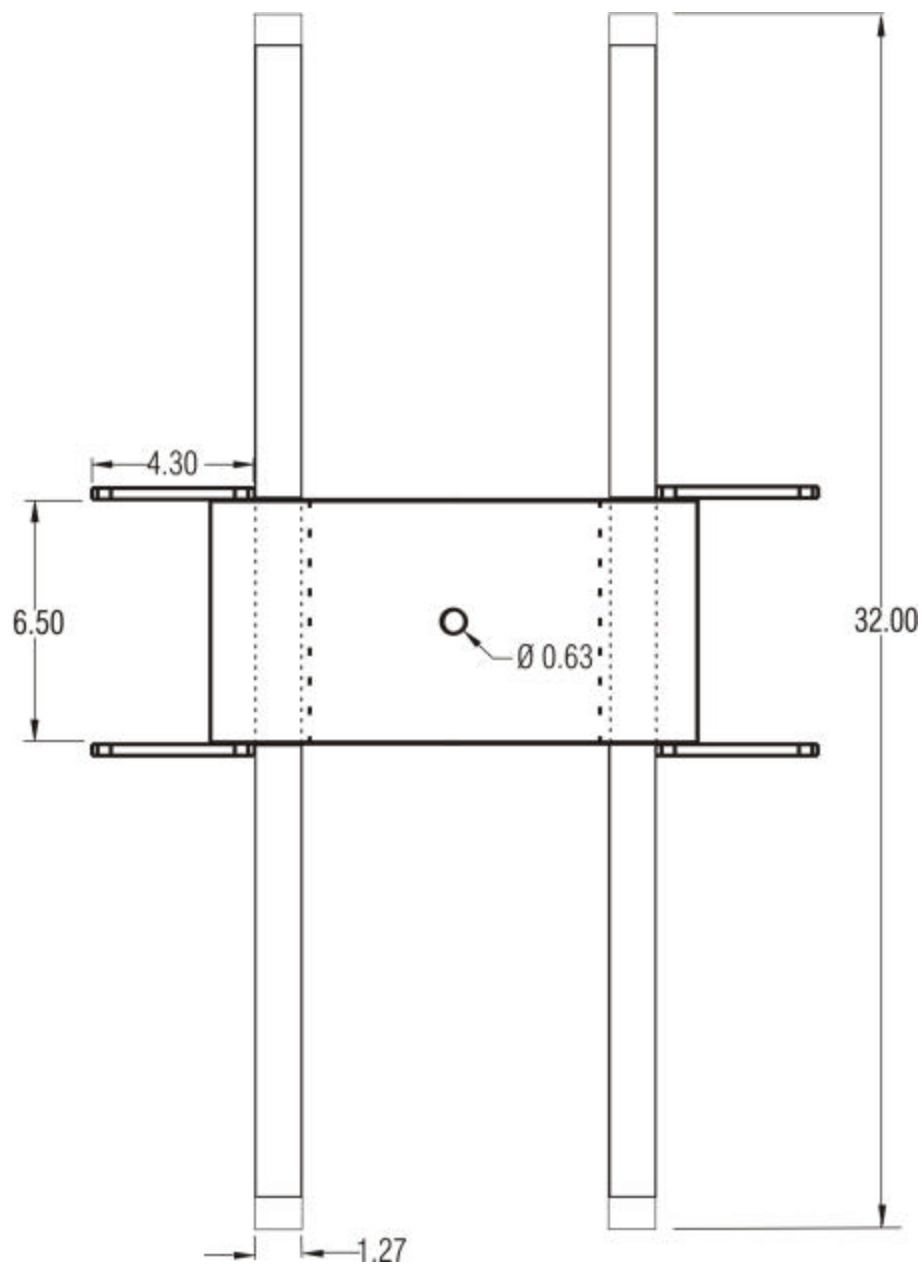
Acotación: cm

Hecho por: A.A.L.L.

Fecha: 8/11/04

Ingeniería en Alimentos

Lámina 2/6



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA SUPERIOR ESPACIADOR

Material: Nylamid

Fig. A-3

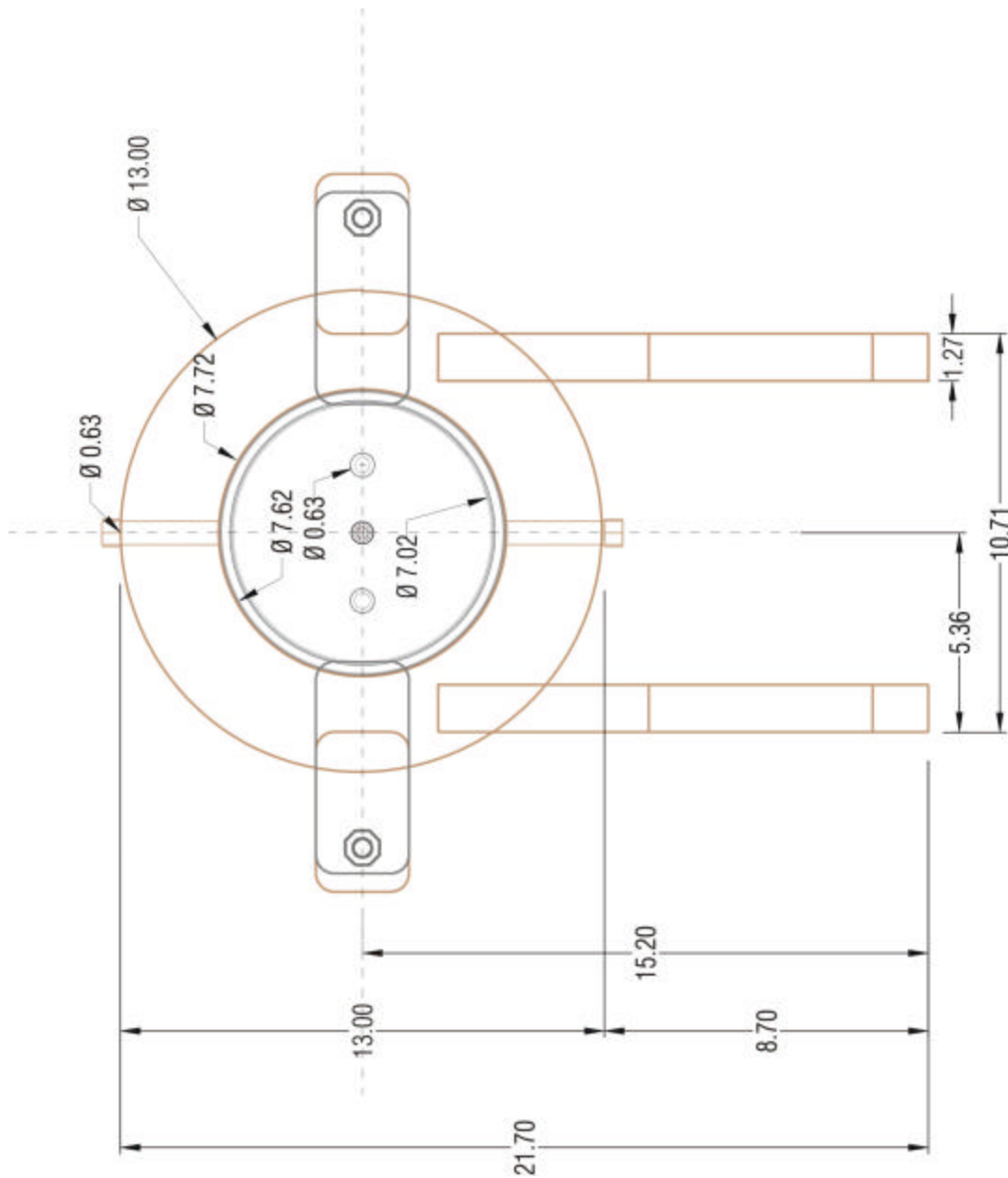
Acotación: cm

Hecho por: A.A.L.L.

Fecha: 8/11/04

Ingeniería en Alimentos

Lámina 3/6



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA FRONTAL CÁMARA DE TRATAMIENTO

Material: Acero inoxidable y Nylamid

Fig. A-4

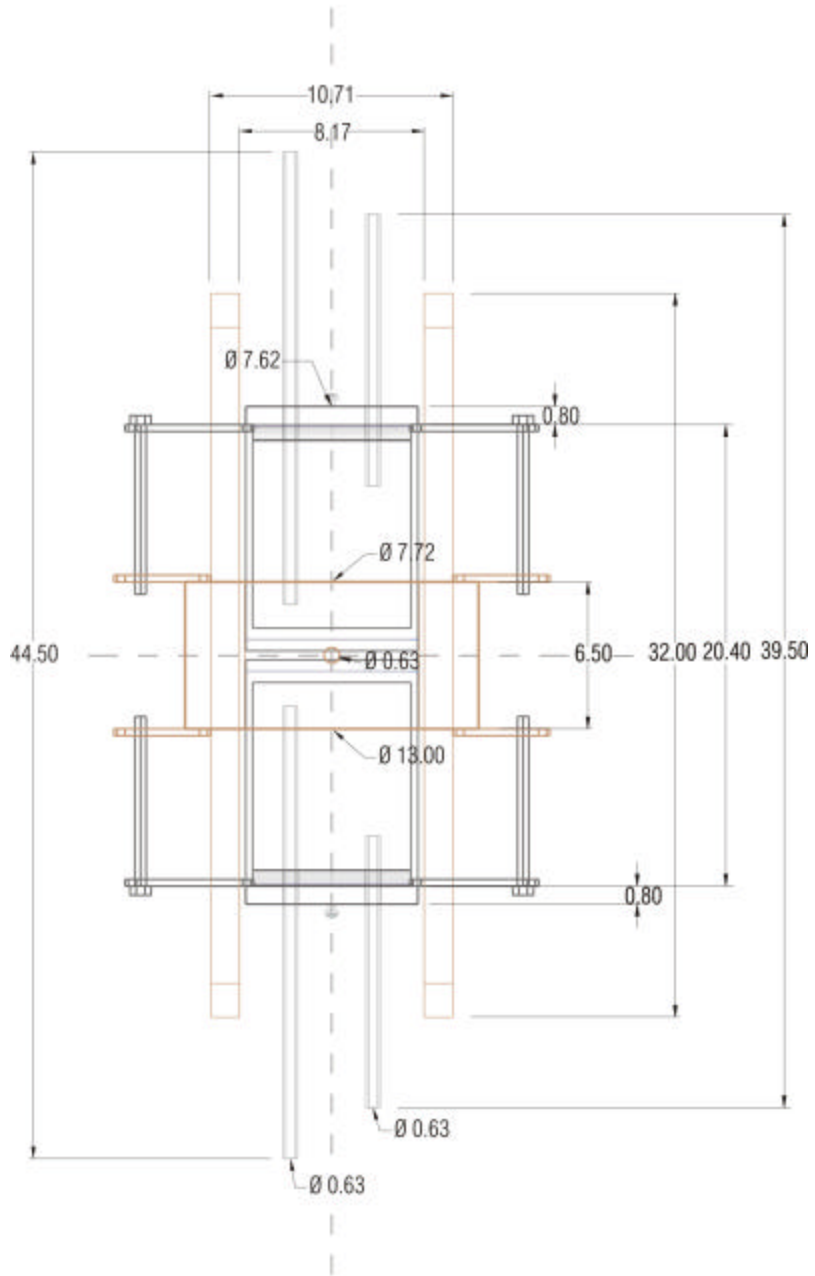
Acotación: cm

Hecho por: A.A.L.L.

Fecha: 8/11/04

Ingeniería en Alimentos

Lámina 4/6



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA SUPERIOR CÁMARA DE TRATAMIENTO

Material: Acero inoxidable y Nylamid

Fig. A-5

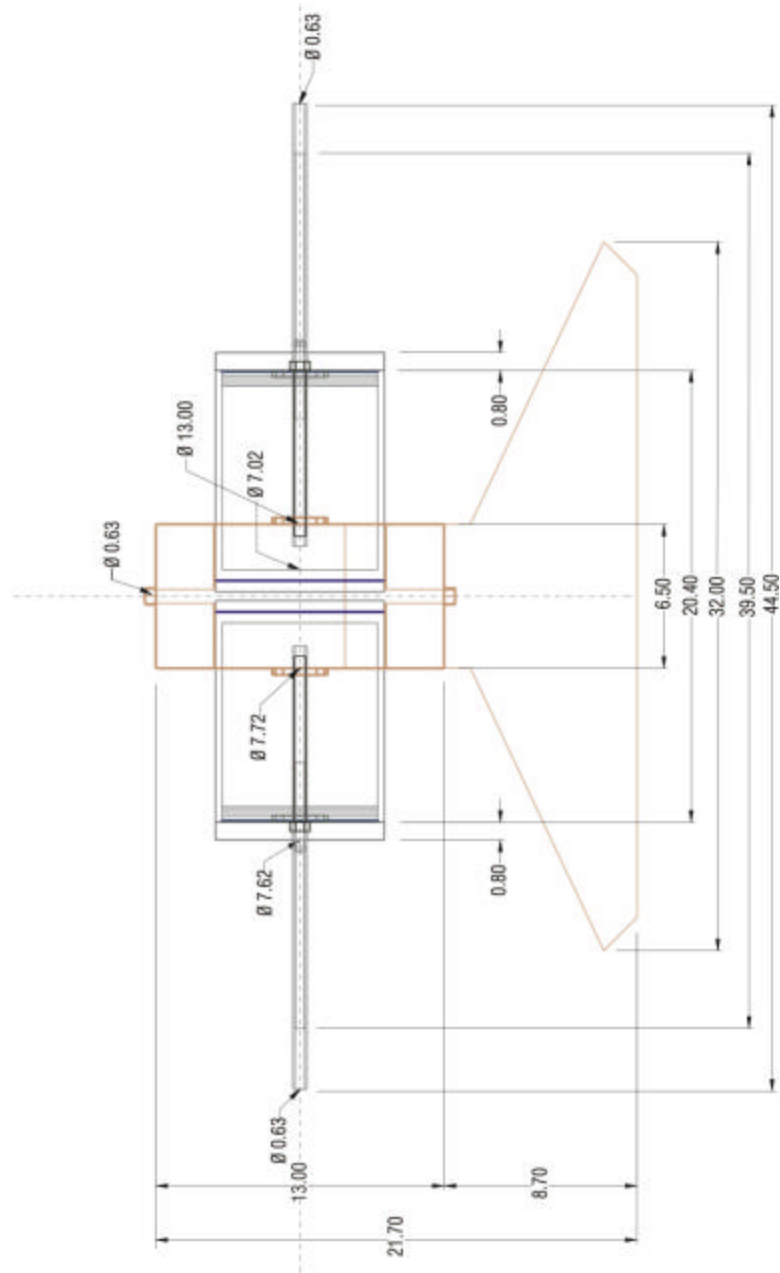
Acotación: cm

Hecho por: A.A.L.L.

Fecha: 8/11/04

Ingeniería en Alimentos

Lámina 5/6



Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oaxaca

VISTA LATERAL CÁMARA DE TRATAMIENTO

Material: Acero inoxidable y Nylamid

Fig. A-6

Acotación: cm
Fecha: 8/11/04

Hecho por: A.A.L.L.
Ingeniería en Alimentos

Lámina 6/6

APÉNDICE B

Componentes electrónicos

Referencia Electrónica

- Circuito de polarización de rejilla
E2V Technologies. 2002. *Hydrogen Thyratrons Preamble*. U.S.A. p 10.
En: http://e2vtechnologies.com/datasheets/thyratrons/thyratron_preamble.pdf
- Diodos rectificadores de alto voltaje
NTE548
NTE Electronics, Inc. *NTE548 Silicon High Voltage Rectifier for Industrial/Microwave Oven*. U.S.A. p 1.
En: <http://www.nteinc.com/specs/500to599/pdf/nte548.pdf>
- Módulo de disparo
MA2709A
E2V Technologies. 2004. *MA2709A Thyatron Trigger System*. England, 7: 1-5.
En: <http://e2vtechnologies.com/datasheets/thyratrons/ma2709a.pdf>
- Tiratrón
CX1836A
E2V Technologies. 2002. *CX1836A, CX1836AX Air Cooled, Deuterium Filled Two-Gap Metal/Ceramic Thyratrons*. U.S.A., 5: 1-8.
En: http://e2vtechnologies.com/datasheets/thyratrons/cx1836a_cx1836ax.pdf