

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO
PULSADO PARA PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS**



ANDRÉS FELIPE CAMILO MARTINEZ

LEONARDO GARCÍA VELÁSQUEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2018

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO
PULSADO PARA PASTEURIZACIÓN DE ALIMENTOS LÍQUIDOS**

ANDRÉS FELIPE CAMILO MARTINEZ

LEONARDO GARCÍA VELÁSQUEZ

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Físico en la modalidad de trabajo de investigación.

Director

MSc. WAYNER RIVERA MÁRQUEZ

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN

INGENIERÍA FÍSICA

POPAYÁN

2018

Nota de Aceptación

Director-----

MSc. WAYNER RIVERA MÁRQUEZ

Jurado-----

MSc. EDUARDO ANDRÉS CAÑOLA SOTELO

Jurado-----

MSc. JHON JAIRO REALPE

Fecha de Sustentación: Septiembre 11 de 2018

DEDICATORIA

Dedicada con todo mi amor y cariño a mis padres Álvaro García Agudelo y Judith Velásquez Montaña y a mi hermano, Víctor Alfonso García Velásquez, por todo el amor brindado, por creer en mí y por ser mi principal fuente de motivación e inspiración.

Leonardo García Velásquez

Dedicada a mis abuelos, mis padres y mi hermana, a quienes quiero con todo el corazón, a mi sobrino Farid Camilo a quien le deseo una vida llena de éxitos y de grandes logros.

Andrés Felipe Camilo Martínez

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradecer a Dios por la vida, sus bendiciones y por brindarnos la fuerza suficiente para culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

Quiero dar gracias a mi madre Sandra Milena Ríos y a mi padre Jairo Jesús Camilo por regalarme su apoyo incondicional en este proceso de formación, a mi hermana Laura Valentina por su afecto hacia mí, a mi abuela Alba Lucia Ríos por siempre estar ahí para mí y regalarme una palabra de aliento en los momentos difíciles, a mi abuelo Alberto Coque quien siempre me ha brindado su cariño y buenos consejos, a mi compañera, novia y amiga Stefany Torres quien me acompaña y brindo su apoyo incondicionalmente.

Este es el final de un sueño, pero el inicio de muchos más.

Andrés Felipe Camilo Martínez

A mis padres Álvaro García Agudelo y Judith Velásquez Montaña por todos sus esfuerzos y sacrificios, por sus consejos y por la educación brindada que hacen de mí la persona que soy hoy. A mi hermano Víctor Alfonso García Velásquez por estar siempre a mi lado, por su confianza y por levantarme el ánimo en los momentos de desaliento. A mis demás familiares por todo su apoyo, consejos y por su grata compañía. A mi colega y compañera Mayerlin Salgado por su brindarme compañía, apoyo y colaboración incondicional, aportes y consejos durante todo este proceso de formación.

Leonardo García Velásquez

A nuestro director Wayner Rivera Márquez por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y por compartirnos sus conocimientos y experiencias. Al profesor Carlos Alberto Rincón López por su compromiso y apoyo en este trabajo de investigación. Al señor Tirso Adelmo Mazabuel por contribuir con su experiencia a la solución de algunas complicaciones presentadas en el proyecto. A nuestro compañero y amigo Jhonnatan Stiven Mera por contribuir de manera activa y desinteresada en el desarrollo de este trabajo. Al profesor MSc. Jhon Jairo Realpe por sus consejos y sus valiosas sugerencias hechas a este proyecto. A la empresa de cerrajería, pailas y productos de molienda de caña, **la Estrella**; por permitirnos el uso de sus instalaciones y por aportarnos materiales para la construcción del equipo de campo eléctrico pulsado. A los jurados por su compromiso y tiempo dedicado a leer este documento, por sus oportunas correcciones y recomendaciones. A nuestros compañeros y amigos por los momentos y experiencias compartidas durante todo este proceso de formación profesional.

RESUMEN

El presente proyecto de grado consistió en el diseño y construcción de una fuente de campos eléctricos pulsados para aplicaciones en pasteurización de alimentos líquidos, usando componentes de fácil adquisición y de bajo costo.

Esta investigación se desarrolló en 4 etapas: En la primera se hizo una recolección de información y análisis de requerimientos para una pasteurización por campo eléctrico. La segunda etapa involucró el proceso de diseño y construcción del sistema. En la tercera se implementó la cámara de tratamiento. Se culmina con la cuarta etapa que son pruebas y resultados, la cual consistió en medir el alto voltaje que llegaba a la cámara, la forma del pulso y el ancho.

Se realizó un diseño electrónico y uno mecánico del sistema de campo eléctrico pulsado (PEF siglas en inglés) utilizando herramientas asistidas por computador. Luego se implementó un primer prototipo electrónico y se desarrolló un algoritmo para el control de las ordenes ejecutadas por el microcontrolador, éste se encargó de realizar el proceso de conmutación que necesitó el elevador de alto voltaje para entrar en funcionamiento, además permitió el control sobre la forma de la señal utilizada para el tratamiento, la señal puede ser continua o pulsada, esta última fue generada mediante un control on-off. Se le realizaron ajustes al sistema para pasar al proceso de manufactura y pruebas en medio líquido. La cámara de tratamiento implementada fue de placas paralelas y permitió contener un medio líquido estático.

Los resultados mostraron que el transformador usado eleva 1000 veces el voltaje de entrada obteniendo un rango de operación de 1-30 kV, aptos para inducir la formación de poros en la membrana celular. Para un tratamiento de señal continua la señal fue muy estable y no presentó caídas de tensión, en cuanto a la señal pulsada, la forma de la onda de tratamiento dependió de las características propias del elevador de voltaje y de los elementos usados para medir dicha señal.

El equipo cumplió con los requerimientos principales para realizar un tratamiento de pasteurización mediante la técnica de campo eléctrico pulsado, los cuales son: intensidad de campo eléctrico, tiempo de tratamiento y forma de pulso.

Palabras claves: Campo eléctrico pulsado, elevador de voltaje, fuente de alta tensión, modulación por ancho de pulso, pasteurización.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABLAS.....	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo General.....	4
1.3.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. PASTEURIZACIÓN.....	5
2.2. FUENTES DE CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS PARA CONSERVACIÓN.....	5
2.3. TIPOS DE FUENTES DE ALTO VOLTAJE Y FUNCIONAMIENTO.....	5
2.3.1. Fuente de alta tensión pulsada basada en generador de Marx.....	6
2.3.2. Red formadora de pulsos o PFN.....	6
2.3.3. Convertidor resonante en serie.....	7
2.4. TIPOS DE TRATAMIENTOS.....	7
2.4.1. Calentamiento óhmico.....	8
2.4.2. Estimulación por campos eléctricos de baja intensidad.....	9
2.4.3. Bajo voltaje de corriente alterna.....	9
2.4.4. Pulsos eléctricos de alta intensidad.....	9
2.5. INACTIVACIÓN.....	9
2.6. INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO.....	10
2.7. ELEVADORES DE VOLTAJE.....	11
2.7.1. Convertidor flyback.....	11
2.7.2. Bobina de encendido.....	12
2.8. TRANSISTORES DE BAJA Y ALTA POTENCIA.....	12
2.9. OPTOACOPLADOR.....	12
2.10. CÁMARAS DE TRATAMIENTO.....	13
2.10.1. Cámaras estáticas.....	13
2.10.2. Cámara abierta.....	13
2.10.3. Cámaras cerradas.....	13

2.10.4. Cámaras continuas	14
2.11. ELECTRODOS	14
2.12. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO PWM.....	14
2.13. ARDUINO	15
2.13.1. Módulos arduino.....	15
2.13.2. Módulo i2c con lcd 16*2	15
CAPÍTULO 3. REQUERIMIENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DE CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS	16
3.1. REQUERIMIENTOS PARA UN PROCESO DE PASTEURIZACIÓN POR CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS.....	16
3.1.1. PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO	17
3.1.1.1. Intensidad del campo eléctrico	17
3.1.1.2. Tiempo de tratamiento.....	17
3.1.1.3. Forma del pulso.....	17
3.1.1.4. Energía específica.....	19
3.1.2. RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS DE TRATAMIENTO PEF.....	19
3.1.3. PROCESO DE PASTEURIZACIÓN	22
3.2. PROCESO DE DISEÑO	23
3.2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO.....	23
3.2.2. DISEÑO DE LA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO	24
3.2.2.1. Generador de alto voltaje	24
3.2.2.2. Sistema de control y generador de pulsos.....	25
3.2.2.3. Interfaz gráfica.....	26
3.2.2.4. Fuentes de alimentación	26
3.2.2.5. Circuito de protección.....	29
3.2.2.6. Circuito de excitación	29
3.2.2.7. Sistema de conmutación	30
3.2.3. DISEÑO DEL PROTOTIPADO ELECTRÓNICO	31
3.2.4. DISEÑO DEL PROTOTIPADO MECÁNICO.....	31
3.2.5. DISEÑO DE LA CÁMARA DE TRATAMIENTO.....	32
3.3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO PARA PASTEURIZACIÓN	33
3.3.1. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ELECTRÓNICO.....	33
3.3.2. ENSAMBLE DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS.....	34

3.3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA GENERADOR DE ALTO VOLTAJE	35
3.3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE	36
3.3.5. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA	37
3.3.6. CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE TRATAMIENTO.....	37
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	39
4.1. MODIFICACIÓN DE LOS REGISTROS DE ARDUINO.....	39
4.1.1. RESPUESTA DEL ARDUINO	40
4.2. RESPUESTA DEL ELEVADOR DE VOLTAJE.....	41
4.3. PRUEBAS CON ACOPLA DE CÁMARA DE TRATAMIENTO.	45
4.3.1. RESPUESTA EN CÁMARA DE TRATAMIENTO CON MEDIO LÍQUIDO, SEÑAL PULSADA.	45
4.3.1.1. Pulsos para el proceso de inactivación y campo eléctrico producido.	48
4.3.1.2. Reducción en ancho de pulso	52
4.3.2. RESPUESTA EN CÁMARA DE TRATAMIENTO CON MEDIO LÍQUIDO, SEÑAL CONTINUA.....	62
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	67
ANEXO A. TABLAS	70
ANEXO B. FIGURAS	82
ANEXO B1 DISEÑO CAD PROTOTIPADO MECÁNICO	82
ANEXO B1.1. DISEÑO CAD DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO.....	82
ANEXO B1.2. CÁMARA DE TRATAMIENTO.....	98
ANEXO B2. PROTOTIPO ELÉCTRÓNICO.....	100
ANEXO B3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PEF.....	102
ANEXO B4. MANUAL DE USUARIO DE LA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Representación esquemática de ruptura de la membrana celular [6].	2
Figura 2.1. Esquema basado en un generador de Marx [13].	6
Figura 2.2. Esquema PFN [7].	6
Figura 2.3. Esquema convertidor resonante [7].	7
Figura 3.1. Formas de ondas de diferentes tipos de ondas [9].	18
Figura 3.2. Diagrama de bloques del sistema a implementar [Fuente propia].	24
Figura 3.3. Transformador Flyback [Fuente propia].	25
Figura 3.4. Tarjeta de desarrollo arduino uno [26].	25
Figura 3.5. Esquema de la interfaz gráfica [Fuente propia].	26
Figura 3.6. Diagrama de la fuente de alimentación fija [Fuente propia].	27
Figura 3.7. Esquema fuente de alimentación fija [Fuente propia].	27
Figura 3.8. Esquema del diseño de la fuente variable [Fuente propia].	28
Figura 3.9. Esquema de aislamiento óptico [Fuente propia].	29
Figura 3.10. Esquema de circuito de excitación [Fuente propia].	30
Figura 3.11. Esquema del sistema de conmutación [Fuente propia].	30
Figura 3.12. Esquema de la tarjeta de baja potencia [Fuente propia].	31
Figura 3.13. Prototipo mecánico de la fuente de campo eléctrico [Fuente propia].	32
Figura 3.14. Electrodo en acero inoxidable 316L [Fuente propia].	33
Figura 3.15. Prototipo electrónico del sistema PEF [Fuente propia].	34
Figura 3.16. Tarjeta de control; Shield Arduino Uno [Fuente propia].	34
Figura 3.17. Placa fuente variable [Fuente propia].	35
Figura 3.18. Baquelita del sistema de conmutación [Fuente propia].	35
Figura 3.19. Diagrama de flujo del algoritmo [Fuente propia].	36
Figura 3.20. Fuente de Campo Eléctrico Pulsado [Fuente propia].	37
Figura 3.21. Cámara de tratamiento [Fuente propia].	38
Figura 4.1 Variación del TOP desde 10-60000 [Fuente propia].	39
Figura 4.2. Tramo de frecuencia de 43-19 kHz (TOP 45-100) [Fuente propia].	40
Figura 4.3. Salida pulsada del arduino [Fuente propia].	40
Figura 4.4. Señal de salida del circuito de excitación [Fuente propia].	41
Figura 4.5. Voltaje de salida del flyback en función del voltaje de entrada para diferentes frecuencias [Fuente propia].	42
Figura 4.6. Voltaje de salida respecto a las frecuencias con el mejor comportamiento lineal [Fuente propia].	42
Figura 4.7. Voltaje de salida promedio en función del voltaje de entrada a frecuencia óptima [Fuente propia].	44
Figura 4.8. Señal de salida de alto voltaje para diferentes anchos de pulso (60, 80 y 100 ms tiempo on, 30, 30 y 50 ms tiempo off respectivos) [Fuente propia].	46
Figura 4.9. Señal de salida de alto voltaje para diferentes anchos de pulso (200 y 300 ms tiempo on y 50 ms tiempo off) [Fuente propia].	47

Figura 4.10. Señal de salida de alto voltaje para anchos de pulso de 1s on y 100 ms off [Fuente propia].	47
Figura 4.11. Pulso con 50-500 y 60-500 ms, cámara 1cm [Fuente propia].	49
Figura 4.12. Pulso con 200-500 y 500-500 ms, cámara 1cm [Fuente propia].	49
Figura 4.13. Pulso con 50-500 y 60-500 ms, cámara 0,5 cm [Fuente propia].	49
Figura 4.14. Pulso con 200-500 ms y 500-500, cámara 0,5 cm [Fuente propia].	50
Figura 4.15. Comparación pulso 50-500 ms y 500-500, cámara 0,5 cm [Fuente propia].	51
Figura 4.16. Esquema interno del elevador del voltaje y acople de la cámara de tratamiento. A: Capacitor de alto voltaje, B: Cámara de tratamiento y C: Sonda de alto voltaje [30].	52
Figura 4.17. Esquema Flyback 2 [30].	53
Figura 4.18. Esquema general, cámara, sonda, capacitor interno, [Fuente propia].	54
Figura 4.19. Tiempo 30-100 ms y 50-50 ms [Fuente propia].	54
Figura 4.20. Tiempo 500-500 ms [Fuente propia].	55
Figura 4.21. Sistema reducido, resistencia interna, capacitor de alto voltaje y sonda [Fuente propia].	55
Figura 4.22. Señal con un factor de carga de 0,9127 (91% de la entrada), [Fuente propia].	59
Figura 4.23. Señal de 20 kV con 25 ms para llegar a cero [Fuente propia].	59
Figura 4.24. Señal con el 95% de 20 kV y 20kV al fijar la fuente en 21V, [Fuente propia].	60
Figura 4.25. Comparación en la forma de la señal en flyback 1y flyback 2 [Fuente propia].	62
Figura 4.26. Comparación en la forma de la señal en flyback 1y flyback 2 [Fuente propia].	62
Figura 4.27. Resultado del voltaje de salida del tratamiento continuo en cámara de 0,5 cm [Fuente propia].	63
Figura 4.28. Resultado del voltaje de salida del tratamiento continuo en cámara de 1 cm [Fuente propia].	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparativo entre MOSFET y BJT [14].	12
Tabla 3.1. Raventos (2005). Datos bibliográficos experimentales de tratamientos con campos de pulsos eléctricos [21].	20
Tabla 3.2. (Hulsheger y otros, 1983) Parámetros de tratamientos para diferentes microorganismos [25].	22
Tabla 3.3. Proceso general de pasteurización [Fuente propia].	23
Tabla 3.4. Parámetros de diseño [Fuente propia].	23
Tabla 3.5. Características de la tarjeta de desarrollo Arduino Uno [27].	26
Tabla 3.6. Costo total de la construcción de la fuente de campo eléctrico pulsado	37
Tabla 3.7. Especificaciones generales de la cámara construida [Fuente propia].	38
Tabla 4.1. Valores de alto voltaje, error absoluto y relativo en la frecuencia óptima de trabajo (38kHz) [Fuente propia].	43
Tabla 4.2. Características sistemáticas de la fuente PEF [Fuente propia].	44
Tabla 4.3. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 166,8 M Ω [Fuente propia].	57
Tabla 4.4. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 200,2 M Ω [Fuente propia].	57
Tabla 4.5. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 1000 M Ω [Fuente propia].	58
Tabla 4.6. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 115,04 M Ω [Fuente propia].	58
Tabla 4.7. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 212,7 M Ω [Fuente propia].	60

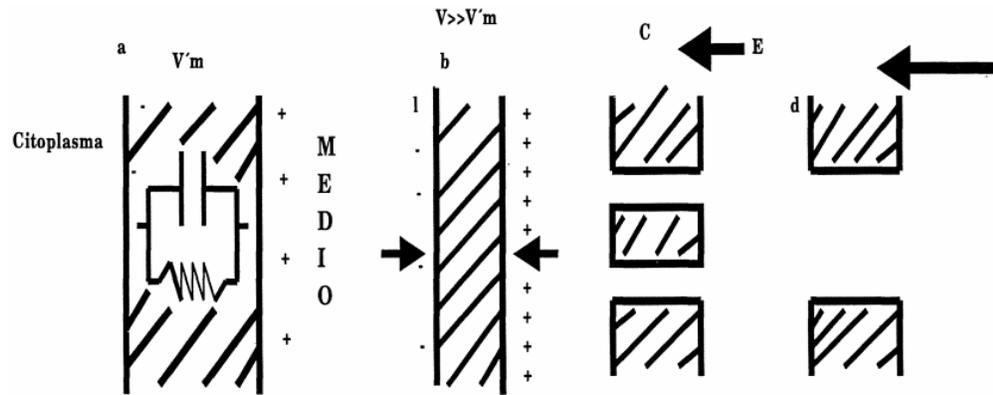
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Los campos eléctricos pulsados son producidos a través de una fuente pulsada de alta tensión. Estos sistemas consisten principalmente de un generador de pulsos de alto voltaje y una cámara de tratamiento [1]. El generador de pulsos de alto voltaje consta de una fuente de poder pulsada, en la cual, el voltaje de bajo nivel es convertido a alto voltaje [2]. La cámara de tratamiento se compone de dos electrodos colocados de forma paralela y separados por un espacio, la cual contiene el volumen del alimento a tratar y en dónde se aplican pulsos repetitivos o continuos de alto voltaje [1,2]. De la distancia de los electrodos y la amplitud del pulso aplicado depende la intensidad del campo eléctrico, además de éstos, para la inactivación de microorganismos son necesarios otros parámetros como duración del tratamiento, número de pulsos aplicados y forma del microorganismo [1,3].

Al exponer una célula biológica a un campo eléctrico de alta intensidad (KV/cm) en forma de pulsos muy cortos induce la formación de poros temporales o permanentes [4], tanto en células eucariotas como procariotas sin apenas aumentar la temperatura del medio [5]. Existen diferentes teorías que explican este fenómeno, pero la más aceptada es la ruptura dieléctrica de la membrana celular expuesta por Zimmerman (1986), la membrana puede ser considerada como un condensador lleno con circuito eléctrico [6]. El potencial eléctrico normal en ambos lados de la membrana es de aproximadamente 10 mV fig 1.1a [6]. La exposición de la membrana celular a un campo eléctrico pulsado, como se muestra en la fig 1.1b, induce una diferencia de potencial conocido como potencial transmembrana [6,7], cuando dicho potencial alcanza un valor crítico, las cargas generadas se atraen ocasionando compresión en la membrana, reduciendo su grosor y dando lugar a la electroporación o formación de poros en la membrana celular [7], como se observa en la fig 1.1b y fig 1.1c. El efecto puede ser reversible o irreversible (fig 1.1c y fig 1.1d) dependiendo de la intensidad del campo eléctrico E y de duración del pulso aplicado [6]. La intensidad de campo eléctrico necesaria para formar poros en las membranas de las células eucariotas es bastante más baja que la necesaria para inactivar microorganismos, debido a la diferencia en el tamaño celular, se necesitan campos superiores a 10 KV/cm para células eucariotas y 25 KV/cm para microorganismos [5].

Este efecto alcanzado en la membrana celular (formación de poros) es la causa de numerosos estudios que conlleva a aplicaciones en diferentes áreas como lo son: la biología celular, la biotecnología, la medicina y más recientemente en la tecnología de los alimentos [5]. Esta nueva tecnología de procesamiento de alimentos trae grandes beneficios para éstos, ya que puede inactivar

microorganismos sin destruir nutrientes esenciales y sin alterar sus propiedades organolépticas, obteniendo así alimentos con mayor valor nutricional.



(a) membrana celular con potencial V_m , (b) compresión de la membrana, (c) formación de poros con ruptura reversible, (d) gran parte de la membrana sometida a ruptura irreversible con poros muy grandes.

Figura 1.1. Representación esquemática de ruptura de la membrana celular [6].

Para realizar el presente trabajo se realiza una selección de los parámetros del pulso más importantes que debe tener la fuente de alto voltaje para llevar a cabo un proceso de pasteurización en alimentos líquidos, inactivando sus microorganismos por la técnica de campos eléctricos pulsados. Siendo de gran importancia la intensidad del pulso aplicado, el número de pulsos y el tiempo de tratamiento, para tener control de estos parámetros se implementa el uso de un microcontrolador, el cual recibirá la orden de un operario a través de una interfaz de usuario.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La pasteurización es la forma más común usada en alimentos líquidos, como leche y jugos, con el fin de garantizar que el alimento sea seguro para el consumo humano y prolongar el tiempo de vida del alimento. El tratamiento térmico es altamente efectivo en productos alimenticios para lograr una mejor estabilización del alimento e inactivación de microorganismos, pero muchas veces resulta en pérdidas de los nutrientes esenciales y cambios en sus propiedades organolépticas [1]. Si bien esta técnica es muy eficiente, no siempre garantiza la conservación de aquellos nutrientes que son necesarios para que las células del cuerpo humano realicen sus funciones vitales. De una buena nutrición depende el buen desarrollo del ser humano, gracias a esto se puede mantener saludable y tener energía para realizar sus actividades diarias.

Los alimentos que consumimos son de origen biológico y es precisamente esta naturaleza la causa del desarrollo de una serie de transformaciones que no solo modifican sus características originales, sino que llegan a producir su deterioro [8];

por esto, en la conservación de alimentos se apuesta generalmente a la inactivación o control de los microorganismos, que son los principales factores de descomposición [3]. Controlar parámetros como la intensidad del pulso eléctrico, el número de pulsos aplicados y tiempo de tratamiento, son de gran importancia para tener una inactivación eficiente de los microorganismos presentes en el medio que se realizan las descargas de alto voltaje. Para conseguir un nivel de inactivación suficiente, que garantice la seguridad microbiológica de los alimentos, se requieren intensidades de campo eléctrico superiores a los 25 kV/cm, lo que encarece considerablemente los equipos [5], siendo una de las principales limitaciones para la aplicación industrial [9]. Las fuentes más usadas tradicionalmente para descargas pulsadas de alta tensión están constituidas comúnmente por transformadores elevadores de gran tamaño y peso, circuitos elevadores y rectificadores, y bancos de capacitores. Debido a estos elementos, estas fuentes resultan ser voluminosas, no portátiles y se requiere de gran cuidado y precauciones para su manejo [10].

1.2. JUSTIFICACIÓN

La técnica de campos eléctricos pulsados ha sido de gran interés en el estudio de la electroporación de la membrana celular por la posibilidad de introducir, en el interior de la célula, sustancias tales como medicamentos o ADN. Considerables investigaciones se han llevado a cabo para poder utilizar esta técnica contra el cáncer [9], así como también en muchas otras aplicaciones biológicas y médicas [11]. Para conducir a nuevos métodos médicos de diagnóstico y terapéutico [11].

A pesar de que la electroporación se basa en la tecnología de energía pulsada, la comunidad de potencia pulsante no ha participado activamente en el desarrollo de sistemas de energía pulsada [11]. En el campo del tratamiento de alimentos se ha buscado la seguridad microbiana de éstos, junto con la conservación de sus propiedades [1, 9]. Los estudios realizados y los resultados obtenidos predicen el desarrollo de esta tecnología como alternativa al tratamiento térmico clásico, debido a que el alimento conserva, en mayor medida, sus características físicas, químicas y nutricionales. Además, es una atractiva aplicación de la electricidad, concretamente de la alta tensión, ya que es una tecnología con alta eficiencia energética, cuyo desarrollo futuro podría conducir a importantes reducciones en el consumo energético de las industrias alimentarias [2], también aumenta el tiempo de vida de los alimentos tratados conservándose incluso a temperatura ambiente, permitiendo esto, que se pueda transportar grandes distancias sin que se deteriore el producto alimenticio, el cual posibilita que campesinos productores de leche en zonas de difícil acceso puedan transportar sus productos con mayor seguridad, reduciendo la degradación del alimento entre la etapa de producción agropecuaria

y la etapa de procesamiento industrial que resultan en pérdidas para los campesinos y la industria.

Disminuir la pérdida y el desperdicio de alimentos se convirtió en un propósito mundial a partir de la aprobación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible suscritos por 193 países en la Asamblea General de Naciones Unidas el pasado 25 de septiembre de 2015. Dicho objetivo quedó plasmado como una de las 169 metas que estas naciones se comprometieron a alcanzar para el año 2030. Específicamente en este tema, el compromiso establece la obligación de “reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha” (Naciones Unidas, 2015) [12].

En Colombia, la oferta disponible de alimentos para consumo humano es de 28 millones de toneladas al año (FAO, 2014). Sin embargo, no toda la comida destinada al consumo humano se aprovecha. A lo largo de la cadena alimentaria se generan pérdidas y desperdicios de alimentos [12]. Aunque la mayoría de las pérdidas son de frutas también hay una considerable pérdida en la producción de la leche. Un generador de campo eléctrico pulsado de bajo costo, gran portabilidad y que cumplan con los requerimientos, puede hacer un tratamiento previo de la leche permitiéndose el transporte de este producto hasta su procesamiento industrial.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar y construir una fuente de campos eléctricos pulsados de alto voltaje para una cámara de tratamiento que contenga un medio líquido no conductor.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Establecer los requerimientos necesarios para llevar a cabo un proceso de pasteurización por campos eléctricos pulsados.
2. Diseñar una fuente de campos eléctricos pulsados de alto voltaje para aplicaciones en pasteurización de líquidos, que cumplan con los requerimientos establecidos.
3. Construir la fuente de alto voltaje para su posterior acople a una cámara de tratamiento que contenga un medio líquido.
4. Comprobar la viabilidad de la fuente implementada para desarrollar un sistema de pasteurización.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la información necesaria para entender un sistema basado en pulsos eléctricos de alta intensidad, y cómo este sistema puede ser utilizado en procesos de pasteurización, teniendo en cuenta parámetros ya trabajados por otros autores.

2.1. PASTEURIZACIÓN

Normalmente la pasteurización es un proceso asociado con prácticas térmicas, en donde se busca generar inactivación microbiana sometiendo el alimento a altas temperaturas. En la actualidad, no se puede pensar únicamente en la pasteurización como un proceso térmico, existen otro tipo de técnicas empleadas para generar inactivación de microorganismos, las cuales se pueden identificar fácilmente como procesos de pasteurización alternativos y menos destructivos, entre los más comunes tenemos la inactivación a través del uso de pulsos eléctricos de alta intensidad (Fuentes de campos eléctricos pulsados), también existen otro tipo de tratamiento como los pulsos luminosos, campos magnético oscilantes entre otros.

2.2. FUENTES DE CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS PARA CONSERVACIÓN

La necesidad de generar nuevos equipos de investigación en la conservación de alimentos, ha motivado la investigación y construcción de dispositivos que sean capaces de generar alternativas viables en la conservación de alimentos líquidos de baja conductividad. Con el pasar de los años nuevas investigaciones han ido arrojando prototipos que permiten una mayor acogida de esta técnica de conservación, gracias a esto se ha hecho posible el desarrollo de diversas fuentes de alta tensión pulsada o continua, en donde los pulsos generados que poseen formas rectangulares, arrojan resultados prometedores en esta técnica de conservación. La base de estas investigaciones es la fuente generadora de alto voltaje, que en conjunto con otros elementos permite la generación de los parámetros requeridos en este tipo de práctica.

2.3. TIPOS DE FUENTES DE ALTO VOLTAJE Y FUNCIONAMIENTO

Con el pasar de los años han surgido diferentes prototipos de fuentes de alto voltaje, cada fuente ha sido creada con propósitos diferentes pero su construcción y utilización ha permitido la incursión en nuevos procesos. A continuación, se presentan algunos tipos de fuentes elevadoras de voltaje.

2.3.1. Fuente de alta tensión pulsada basada en generador de Marx

Este tipo de circuito se basa en un número n de capacitores que se cargan en paralelo aproximadamente al voltaje de alimentación V_{cc} . Luego de esto son conectados en serie y producen así un voltaje igual a $n \cdot V_{cc}$, en los terminales de salida. Estos generadores consumen corrientes en el orden de los 10^{-3} A, el esquemático se puede ver en la figura 2.1 [13].

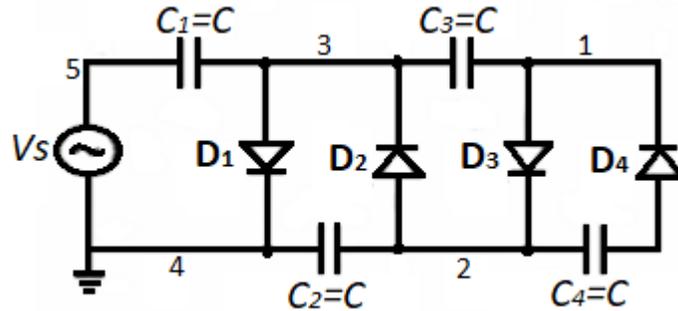


Figura 2.1. Esquema basado en un generador de Marx [13].

2.3.2. Red formadora de pulsos o PFN

Una red formadora de pulsos o PFN consta de una serie de condensadores e inductores. Estos componentes interconectados se comportan de manera similar a una línea de transmisión; la PFN se carga por medio de una fuente de alta tensión dc, luego se descarga rápidamente en la cámara de tratamiento por medio de un interruptor (para este caso se trata de un ignitrón), el tiempo de duración del pulso (ancho de pulso) es único, la figura 2.2 representa un PFN [7].

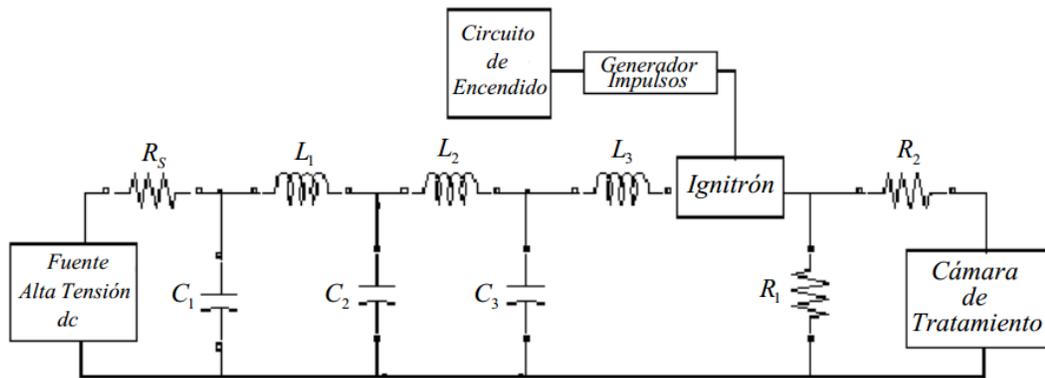


Figura 2.2. Esquema PFN [7].

2.3.3. Convertidor resonante en serie

En la figura 2.3 se presenta un convertidor resonante serie de medio puente, se utiliza para generar alta tensión dc y su operación se puede dividir en seis modos. Este prototipo se encuentra en la capacidad de producir pulsos de 10000 V con ancho de pulso 5 μ s y una frecuencia de operación de 1 KHz; la corriente máxima generada a la salida es de 0,1 A. El diseño utiliza MOSFETs como interruptores [7].

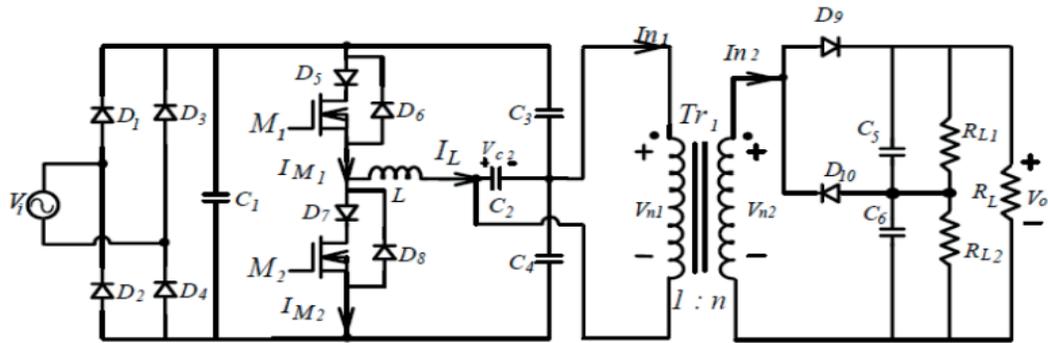


Figura 2.3. Esquema convertidor resonante [7].

2.4. TIPOS DE TRATAMIENTOS

Los métodos tradicionales de conservación de alimentos se pueden clasificar como métodos físicos y químicos. En los métodos físicos impera el uso de calor, pero el uso de frío también es importante en esta actividad, los ejemplos más comunes de métodos térmicos son la esterilización, pasteurización, el freído y la ultra-pasteurización que implica temperaturas más elevadas, pero de corto tiempo, la refrigeración y la congelación, estos últimos implican sistemas de frío. Otros procesos se basan en métodos químicos como la reducción del pH o el uso de conservantes, en la actualidad estos métodos son utilizados de manera excesiva, eliminando propiedades importantes. La acción de los métodos tradicionales implica la reducción del crecimiento microbiano y de la actividad enzimática, con el propósito de alargar la vida útil del alimento, con estos tratamientos no solo se afectan los microorganismos encargados de la degradación del alimento, también son afectados los organismos encargados de las características nutricionales [14] [15].

Con el pasar de los años la necesidad de encontrar procesos menos nocivos para la preservación de alimentos se hizo mucho más evidente, debido a la demanda de productos que presentaran menores cantidades de aditivos y conservantes, y que a su vez ofrecieran características nutricionales similares al producto fresco. Entonces surgen las Tecnologías Emergentes, las cuales presentan ventajas con

respecto a las tecnologías tradicionales, ya que hacen un uso más eficiente de la energía o hacen que las cantidades de energía requerida sean en una menor proporción; adicional a esto se trata de procesos donde se busca dañar en una menor medida los atributos sensoriales y nutricionales de los alimentos [15].

De esta manera se definen tecnologías no térmicas de conservación de alimentos aquellas donde no impera el uso de calor como factor de estabilización. La ventaja que presentan estas tecnologías frente a las térmicas es su menor impacto en la calidad del alimento.

Las tecnologías en donde no se utilizan procesos térmicos y que presentan un mayor desarrollo son: altas presiones hidrostáticas, irradiación, pulsos eléctricos de alta intensidad, pulsos lumínicos, radiación por ultravioleta y ultrasonidos. Su estado de desarrollo no es el mismo en la actualidad, pero son procesos en materia de investigación [14].

Cada tecnología no térmica tiene asociado un campo de acción, por tal razón no todos los alimentos o materiales pueden ser tratados con un único proceso no térmico. Por ejemplo, la alta presión, los campos magnéticos oscilantes, los antimicrobianos, los pulsos lumínicos y la tecnología de barreras se pueden utilizar tanto en alimentos líquidos como sólidos, mientras que los pulsos eléctricos de alta intensidad es más fácil aplicarlos en alimentos líquidos y la irradiación es eficaz para alimentos sólidos [14]. Del mismo modo, los pulsos lumínicos son más eficaces para la pasteurización de superficies. Además, los pulsos lumínicos, la irradiación, los campos magnéticos y las altas presiones hidrostáticas se pueden utilizar para procesar alimentos preenvasados, con este proceso se reduce considerablemente el riesgo de contaminación por contacto o postprocesado [14] [15]. Con todo lo anterior es apropiado decir que cada tecnología no térmica posee sus ventajas y limitaciones dependiendo de las condiciones en las que se utilice.

En ese orden de ideas los tratamientos no térmicos ofrecen una alternativa apropiada en cuanto a la inactivación bacteriana se refiere, esto se debe a las características que ofrece este tipo de tratamiento, en donde se busca mantener las propiedades nutricionales de los productos tratados. Existen tratamientos eléctricos con diferentes características, ofreciendo así opciones válidas en los procesos de inactivación, dentro de los tratamientos que involucran alto voltaje se tiene:

2.4.1. Calentamiento óhmico

Se considera una de las primeras incursiones de la electricidad en la pasteurización de alimentos, se basa principalmente en la circulación de un flujo eléctrico a través del alimento, su utilización ha sido explorada en alimentos con un elevado grado de

viscosidad [16]; una elevada viscosidad involucra un alto grado de materiales en el producto tratado.

2.4.2. Estimulación por campos eléctricos de baja intensidad

Práctica explorada principalmente en alimentos como carne, en donde campos eléctricos de baja intensidad (5-10 Kv/cm) son aplicados en forma de corriente alterna, gracias a la utilización de electrodos [16].

2.4.3. Bajo voltaje de corriente alterna

El éxito en este tipo de tratamiento se basa principalmente en la densidad de corriente. En 1970 Pareilleux y Sicard observaron que la cantidad de corriente mínima que se necesitaba para eliminar *E. coli* fue de 25 mA. El efecto del tratamiento no fue visto de manera inmediata, la reducción de células fue evidente un determinado tiempo después, en la investigación de este método se encontró que está ligado no solo a la corriente que circula por la sustancia si no, a otros factores como los componentes que contengan cloro y el tiempo de permanencia en el medio luego del tratamiento [16].

2.4.4. Pulsos eléctricos de alta intensidad

Entre todas las tecnologías emergentes no térmicas, los pulsos eléctricos de alta intensidad (PEAI) es una de las tecnologías más atractivas debido a su corto tiempo de tratamiento y reducción de los efectos de calentamiento con respecto a otras tecnologías. La tecnología de los PEAÍ permite la inactivación de células vegetativas de bacterias y levaduras en diversos alimentos. Debido a que se ha comprobado la resistencia de las esporas bacterianas a los PEAÍ, las aplicaciones de esta tecnología se centran principalmente en microorganismos patógenos y alteradores, especialmente en alimentos ácidos [7].

2.5. INACTIVACIÓN

Durante muchos años se ha estudiado el efecto generado en las células al aplicar un campo eléctrico lo suficientemente grande, las observaciones preliminares mostraron que se produce una permeabilización reversible de su membrana celular. A este fenómeno se le denomina electroporación, y ha sido ampliamente usado en el ámbito de la biotecnología, ya que permite la introducción de diversas sustancias de composiciones diferentes en células vivas. Procesos de este tipo constituyen una alternativa en procesos de extracción de constituyentes intracelulares.

Diversos estudios han establecido una correlación entre la electroporación y la inactivación microbiana [14]. También se proponen la teoría de la ruptura dieléctrica,

en donde la membrana celular puede ser comparada con un condensador, el cual en su interior posee un material de constante dieléctrica baja en comparación con el exterior e interior de la célula. Esta diferencia de constantes produciría una acumulación de cargas de signo contrario en ambos lados de la membrana generando una potencial transmembrana. En esta teoría se asume que la aplicación de un campo eléctrico externo genera un aumento en el número de cargas a ambos lados de la membrana consiguiendo así un aumento del potencial de transmembrana proporcional al aumento de la intensidad de campo aplicado. La atracción generada por las cargas de diferente signo como consecuencia del campo eléctrico produce una compresión de la membrana celular, la cual será mayor siempre que el grosor de la membrana sea menor [14].

Una fuerza viscoelástica se opone a la fatiga generada en la membrana, de esta manera se produce una ruptura localizada (dando origen a poros en la pared celular) donde la fuerza de la ruptura es mayor a la generada por la fuerza viscoelástica. El número y tamaño de los poros formados depende de la intensidad del campo eléctrico y del tiempo de tratamiento. La intensidad de campo eléctrico en la que este fenómeno se logra se ha denominado como campo eléctrico crítico.

La permeabilización presente en la pared celular puede ser reversible o irreversible, lo cual dependiendo del tamaño y número de poros. Cuando se llega al final del tratamiento y los poros generados en la célula se cierran se habla de una permeabilización reversible; cuando la configuración celular no puede regresar a su origen la permeabilización se clasifica como irreversible. La inactivación celular ocurre por el incremento de la permeabilidad de la membrana que posibilita el intercambio molecular entre la célula y el medio, causando un desequilibrio osmótico. [14]

2.6. INTENSIDAD DE CAMPO ELÉCTRICO

La intensidad del campo eléctrico aplicada (E) se define como el cociente de la diferencia de potencial existente entre dos electrodos y la distancia entre los mismos:

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

Donde E la intensidad de campo eléctrico (V/m); V , la diferencia de potencial (V); y d , la distancia entre los electrodos (m).

Sin embargo, vale la pena mencionar que la intensidad de campo eléctrico involucra otro tipo de factores, de esta manera la ecuación 2.1 es válida para cámaras de

placas paralelas. Para dispositivos que poseen una configuración diferente la definición del campo eléctrico cambia, por ejemplo, en un sistema del tipo coaxial, donde los electrodos no son placas en paralelo, la intensidad del campo eléctrico es más difícil de expresar. En el caso de las cámaras coaxiales, la intensidad de campo eléctrico puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{V}{r * \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)} \quad (2.2)$$

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

Si se considera que el propósito de tener en cuenta este tipo de parámetros es la aplicación en técnicas de pasteurización, es importante mencionar que muchos estudios han concluido como parte de sus investigaciones que al aumentar la intensidad de campo aumenta la inactivación microbiológica, (Grahl y Markl, 1996; Hülshager y col., 1981; Pothakamury y col., 1996; Qin y col. 1995). Sin embargo, un aumento súbito en la intensidad de campo eléctrico no implica tratamientos efectivos, también existen resultados donde la inactivación biológica no se logra con valores excesivos de campo eléctrico. Se ha observado que hay más factores que son de sumo interés. Algunos autores sugieren la existencia de una intensidad de campo máximo a partir del cual un aumento de éste no implica un aumento significativo de la inactivación [14].

2.7. ELEVADORES DE VOLTAJE

Son elementos encargados de elevar el voltaje a partir de inducción electromagnética, el factor de multiplicación depende de su configuración interna, que se establece en la construcción del elemento.

2.7.1. Convertidor flyback

Es un convertidor DC a DC con aislamiento galvánico entre entrada y salida. Tiene dos bobinas acopladas en lugar de una única bobina, su principal uso se da en la alimentación de tubos de rayos catódicos, entrega voltajes desde 18 hasta 30kV, incluso algunos pueden alcanzar mayores valores de voltaje dependiendo de su configuración, su velocidad de funcionamiento esta entre los 15kHz y 35 kHz, su núcleo está fabricado en ferrita, una mezcla cerámica de materiales ferromagnéticos y no conductores [17], este tipo de dispositivo también está en la capacidad de alimentar otros elementos electrónicos, gracias a que cuenta con

múltiples devanados que le permiten mayores posibilidades en su manejo, en cuanto a su relación de transformación esta depende de su configuración interna y de los materiales que se hayan utilizado en su construcción, normalmente poseen una relación de 1:1000 aunque puede variar de un flyback a otro.

2.7.2. Bobina de encendido

Una bobina de encendido consta de dos enrollamientos, primario y secundario, este elemento normalmente cuenta con una relación de espiras de 1 a 1000 aproximadamente, con calibres inversamente proporcionales en sus devanados, y un núcleo ferromagnético, ambos enrollamientos van envueltos en varias capas de material magnético y están aislados por medio de aceites o material dieléctrico. Cuenta con dos conexiones para el primario: una de alimentación positiva desde el contacto de encendido del motor, y una de negativo al dispositivo de interrupción cíclica del primario. El bobinado secundario cuenta con conexión a masa, y otra de salida de alta tensión hacia la bujía o en su caso hacia el distribuidor [18].

2.8. TRANSISTORES DE BAJA Y ALTA POTENCIA

Los transistores de baja y alta potencia son dispositivos electrónicos en estado sólido, cuyo principio de funcionamiento se basa en la física de los semiconductores. Este cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador; entre los transistores más conocidos se tienen los MOSFET y los BJT, la tabla 2.1 muestra algunas características de este tipo de elementos.

Tabla 2.1. Comparativo entre MOSFET y BJT [14]

Parámetros	MOSFET	BJT
Impedancia de entrada	Alta (1010ohmios)	Media (104 ohmios)
Ganancia de corriente	Alta (107)	Media (10-100)
Resistencia ON (saturación)	Media/alta	Baja
Resistencia OFF (corte)	Alta	Alta
Voltaje aplicable	Alto (1000V)	Alto (1000V)
Máxima temperatura de operación	Alta (200°C)	Media (150°C)
Frecuencia de trabajo	Alta (100-500 KHz)	Baja (10-80KHz)

2.9. OPTOACOPLADOR

Un optoacoplador es un elemento electrónico utilizado normalmente para aislar dos etapas en un circuito, por ello también es conocido como un optoaislador que se compone por un diodo emisor de luz y un fototransistor, ambos componentes se encuentran encapsulados en un solo elemento, la señal eléctrica es codificada

inicialmente en el led y transmitida al fototransistor que la decodifica y la convierte en una señal eléctrica nuevamente, permitiendo así la interacción entre dos etapas que pueden contar con características eléctricas diferentes[17].

2.10. CÁMARAS DE TRATAMIENTO

En una fuente de campo eléctricos pulsados el sistema donde se genera el campo eléctrico es una de las partes más importantes del equipo, en los procesos de pasteurización se define como cámara de tratamiento la cual se conecta al generador de pulsos, la cámara contiene el alimento, producto o sustancia que va a ser expuesta al campo eléctrico. Este elemento se basa en dos electrodos ubicados paralelamente y puede ser de flujo continuo donde la sustancia se encuentra en un movimiento constante o puede ser estática donde el material a tratar se encuentra confinado durante todo el proceso; como es de esperarse cada tipo de cámara ofrece ventajas y desventajas en el tratamiento, aunque inicialmente en todo proceso de pulsos eléctricos se debe iniciar con una cámara estática para comprobar el correcto funcionamiento del equipo.

2.10.1. Cámaras estáticas

Las cámaras estáticas se pueden clasificar según su configuración en abiertas o cerradas, en la tabla A1 (ver anexo), se puede visualizar algunas cámaras estáticas usadas en antiguas investigaciones.

2.10.2. Cámara abierta

Las abiertas estas compuestas principalmente de dos láminas paralelas separadas gracias a un material aislante. La ventaja que ofrece este tipo de configuración es un fácil llenado y vaciado del producto, con esto se evita la formación de burbujas de aire en el interior, también permiten una fácil adecuación de los electrodos utilizados. Las desventajas más significativas en estos dispositivos su baja seguridad eléctrica, en este tipo de cámaras el efecto conocido como arco eléctrico es más propenso a generarse, lo cual significaría un deterioro del producto tratado y la generación de reacciones que afectarían la superficie de los electrodos [9].

2.10.3. Cámaras cerradas

La configuración de este tipo de cámaras busca disminuir considerablemente la posibilidad de que se forme el arco eléctrico entre sus electrodos. La cámara consta de dos láminas preferiblemente circulares de acero inoxidable pulido, así se pretende disminuir la emisión de electrones que generan el arco dieléctrico; el cierre de la cámara debe ser hermético. La desventaja principal es el llenado, donde se

hace necesario la generación de vacío en su interior para así evitar burbujas de aire en el medio a tratar [9].

2.10.4. Cámaras continuas

Las cámaras de tipo continuo son elementos con un propósito industrial, donde es más importante la cantidad de material tratado; son elementos similares a las cámaras continuas, pero en este tipo de sistema el material a tratar esta en movimiento. En la tabla A2 (ver anexo) se exponen algunos ejemplos de cámaras continuas desarrollados y utilizados en diferentes investigaciones.

2.11. ELECTRODOS

Para poder generar campos eléctricos es necesario el uso de electrodos, su disposición y forma depende principalmente de la aplicación o tarea para la que se van a utilizar, normalmente se habla de un par de elementos conductores, cada uno con una polaridad definida y cierta separación entre los mismos. Existen diversos materiales que están en la capacidad de ser utilizados como electrodos, su característica principal es que sean materiales conductores, la elección del tipo de material con el que se elabora un electrodo depende de la actividad en la que se va a utilizar, de tal manera que el material elegido no afecte negativamente el sistema o la actividad en donde se utilice; las principales características que se tienen en cuenta al momento de elegir electrodos son:

- Tipo de material
- Facilidad de obtención de materia prima
- Fácil utilización en procesos de construcción
- Buena conductividad
- Bajo peso
- Durabilidad

También existen factores externos que deben tenerse en cuenta, como por ejemplo sus dimensiones, el precio y la facilidad de adquisición en el mercado [17].

2.12. MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO PWM

La Modulación por Ancho de Pulso (PWM = Pulse Width Modulation) es una técnica para simular una salida analógica con una salida digital. El control digital es utilizado para crear una onda cuadrada, una señal que conmuta constantemente entre encendido y apagado. Este patrón de encendido-apagado puede simular voltajes entre 0 (siempre apagado) y 5 voltios (siempre encendido) simplemente variando la proporción de tiempo entre encendido y apagado. A la duración del tiempo de

encendido (ON) se le llama Ancho de Pulso (pulse width). Para variar el valor analógico se cambia, o se modula, ese ancho de pulso. [19].

2.13. ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de hardware libre, la cual se basa principalmente en una placa con un micro controlador, esta herramienta cuenta con software y hardware flexible y de fácil manejo, su propósito es el de adaptarse a las necesidades de todo tipo de público, desde aficionados, hasta expertos en robótica o equipos electrónicos. También consta de un simple pero completo entorno de desarrollo, que permite interactuar con la plataforma de manera muy sencilla. Por lo expuesto anteriormente arduino se puede definir como una sencilla herramienta, que contribuye a la creación de prototipos, entornos y objetos interactivos destinados a proyectos multidisciplinarios [20].

2.13.1. Módulos arduino

Los módulos de arduino son herramientas que permiten aprovechar al máximo el dispositivo, estos elementos facilitan la interacción del usuario con el sistema, en este caso se tienen un módulo I2C con LCD de 16*2 y un Keypad de 4*4, con ayuda de estos elementos se puede ingresar y visualizar algunos parámetros que son solicitados por el programa al usuario para que el sistema entre en funcionamiento.

2.13.2. Módulo i2c con lcd 16*2

El Módulo adaptador de LCD I2C permite manejar la LCD utilizando solo 2 pines (SDA y SCL). Este módulo es compatible con los LCD 1602 y LCD 2004. El módulo está basado en el controlador I2C PCF8574 que es un expansor de entradas y salidas digitales controlados por I2C. Por el diseño del PCB este módulo se usa especialmente para controlar un LCD Alfanumérico.

La dirección I2C por defecto del módulo puede ser 0x3F o en otros casos 0x27. Es muy importante identificar correctamente la dirección I2C del módulo, pues de otra forma el programa no funcionará correctamente.

CAPÍTULO 3. REQUERIMIENTOS, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA FUENTE DE CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS

En este capítulo se presenta los requerimientos para llevar a cabo un proceso de pasteurización y el diseño de la fuente de campos eléctricos pulsados. Se parte por describir los factores que afectan el proceso de pasteurización, seguido de la descripción de los parámetros más importantes y resultados de diferentes estudios de tratamientos por campos eléctricos de alto voltaje. Continuando con una selección de los materiales y tecnologías para la implementación del sistema seguido de una descripción de cada uno de los módulos que conforman el sistema. Luego se presenta el diseño del prototipo electrónico y el diseño del prototipo mecánico. Por último, se muestra la etapa de construcción del sistema.

3.1. REQUERIMIENTOS PARA UN PROCESO DE PASTEURIZACIÓN POR CAMPOS ELÉCTRICOS PULSADOS

El proceso de pasteurización por campos eléctricos pulsados depende de varios factores que afectan la efectividad del tratamiento. Estos factores se pueden agrupar en: factores técnicos, factores biológicos y factores del medio [1].

Factores técnicos: Están relacionados con el equipo y los parámetros de procesamiento. Los principales parámetros de procesado son la intensidad de campo eléctrico, la forma y ancho de pulso, el número de pulsos, el tiempo de tratamiento, la frecuencia y el tipo de electrodo [1, 2, 5, 21].

Factores biológicos: Se relaciona con los microorganismos; el tamaño de las células, el tipo de célula (bacterias, levaduras, etc), la fase de crecimiento de los microorganismos y las características de las envolturas celulares (bacterias Gram+ o Gram-) [1, 2, 5, 21].

Factores del medio: Están relacionados con el tipo y la condición o composición del medio; la fuerza iónica, la conductividad, el pH, la temperatura y la energía específica, esta última también depende del factor técnico [1, 2, 5, 21].

Entre los tres factores influyentes en el proceso de pasteurización, el de mayor importancia es el factor técnico, y de éste, la intensidad del campo eléctrico, el tiempo de tratamiento y la forma del pulso son los parámetros fundamentales para el tratamiento por PEF.

3.1.1. PARÁMETROS DEL TRATAMIENTO

3.1.1.1. Intensidad del campo eléctrico

La magnitud del campo eléctrico aplicado (E), es un parámetro fundamental del proceso y uno de los más importantes que influyen en la inactivación microbiana por electroporación [1,9], debido a que cuando aumenta su intensidad, también lo hace el efecto producido en la permeabilización de las envolturas celulares [5]. La intensidad de campo eléctrico necesaria para permeabilizar las membranas de células eucariotas es bastante más baja que la necesaria para inactivar microorganismos [5]. El campo eléctrico combinado con el tiempo de tratamiento debe superar un valor crítico para producir un mayor daño en la membrana celular de los microorganismos, es decir, producir una electroporación irreversible.

3.1.1.2. Tiempo de tratamiento

Es el tiempo en que el alimento está sometido al campo eléctrico de alta intensidad, viene determinado por el número de pulsos aplicados y la anchura del pulso aplicado, es otro de los factores importantes en la inactivación bacteriana. Aunque normalmente se habla de un campo eléctrico crítico E_c , también es de gran importancia el tiempo crítico para que la formación de los poros sea o no reversible. Este parámetro presenta un compromiso entre la inactivación bacteriana y el calentamiento de la muestra [2, 5, 9], cuando se expone el alimento al campo eléctrico por un largo tiempo puede generar un aumento en su temperatura producto del efecto Joule, esta temperatura está por debajo de la temperatura letal de los nutrientes e incluso de los microorganismos. La temperatura produce un movimiento superior de las células provocando un mayor estrés en su membrana logrando una importante inactivación.

3.1.1.3. Forma del pulso

Otro parámetro reconocido como importante para la efectividad de este tratamiento es la forma de los pulsos. El campo eléctrico puede ser aplicado en forma de pulsos de decaimiento exponencial, pulsos de onda cuadrada, pulsos oscilatorios, y pulsos bipolares (ver figura 3.1) [1,9]. Los pulsos de caída exponencial consisten en un voltaje unidireccional que asciende rápidamente a un valor máximo y desciende lentamente al cero. Los pulsos de forma cuadrada son más letales y más eficientes, energéticamente, que los pulsos de caída exponencial [1]. Los pulsos oscilatorios son menos eficientes para la inactivación de microorganismos ya que evitan que la célula esté en contacto continuo con el pulso eléctrico de alta intensidad y por lo tanto evita que tenga daños irreversibles [1, 9]. Los pulsos bipolares están formados por un pulso positivo y uno negativo, y son más letales que los pulsos monopolares,

ya que el tratamiento ocasiona que las moléculas cargadas se muevan en la membrana celular del microorganismo y un cambio en la polaridad del campo eléctrico ocasiona un cambio en las moléculas cargadas lo que causa estrés y ocasiona ruptura de la membrana [1,9].

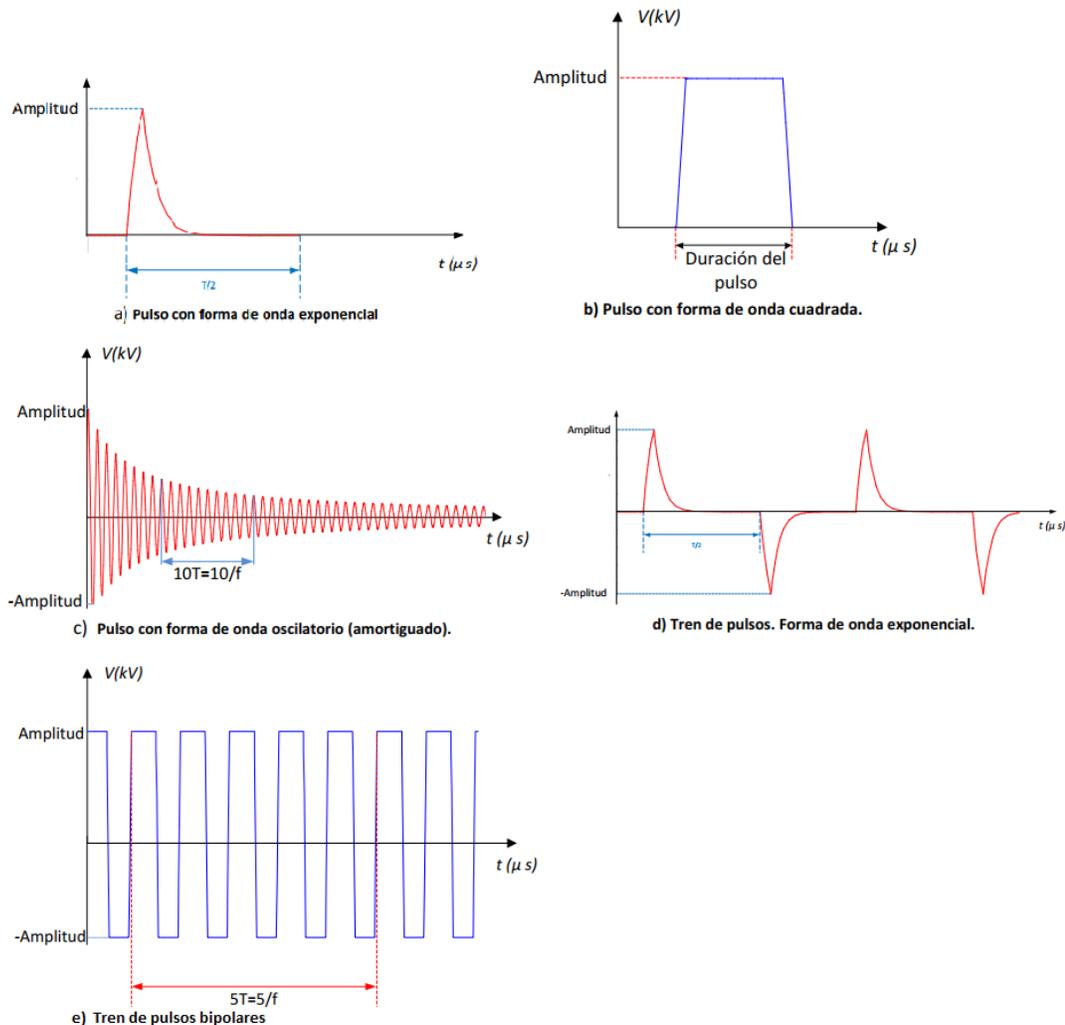


Figura 3.1. Formas de ondas de diferentes tipos de ondas [9].

Los dos tipos de pulsos más comúnmente usados en los tratamientos son pulsos de onda cuadrada y pulsos de caída exponencial monopolares, aunque lo pulsos bipolares son más eficientes, se ha demostrado en diferentes estudios, que su principal inconveniente son los equipos para producirlo, ya que se requieren de fuentes más complejas [5].

3.1.1.4. Energía específica

La energía específica es un parámetro en cuyo valor se integran varios parámetros del tratamiento, como la resistencia de la cámara de tratamiento, que depende de sus dimensiones y de la conductividad del alimento, la intensidad del campo eléctrico y el tiempo de tratamiento. El empleo de este parámetro resulta especialmente útil cuando se utilizan pulsos de caída exponencial ya que con este tipo de pulso ni la medida del tiempo de tratamiento ni de la intensidad del campo eléctrico son precisas. La energía W aplicada en un tratamiento está definida por [5]:

$$W = \frac{1}{R} \int V^2(t) dt \quad (3.1.)$$

donde R es la resistencia eléctrica de la cámara de tratamiento, V es el voltaje aplicado y t la duración del pulso.

Teniendo en cuenta los parámetros del tratamiento, se presentan una serie de resultados obtenidos en diferentes estudios de inactivación de microorganismos presentes en un medio líquido o vegetal.

3.1.2. RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS DE TRATAMIENTO PEF

Bouzrara y Vorobiev, observaron que en un tratamiento a 0,04 kV/cm se necesitaban 200 segundos para permeabilizar las membranas, mientras que a 10 kV/cm, únicamente se necesitaron 5 μ s. En general, se observa que tratamientos de alta intensidad y cortos tiempos de tratamiento son más efectivos que los de baja intensidad y larga duración [5].

La aplicación de tratamientos PEAV permite conseguir a temperatura ambiente niveles de inactivación similares a los alcanzados por tratamientos de pasteurización térmica en alimentos líquidos. Así, para conseguir seis ciclos de destrucción de *Salmonella Senftenberg* 775 W es necesario aplicar tratamientos de 28 kV/cm, 1.000 μ s y 1.500 kJ/kg en condiciones estáticas [5].

Algunos ejemplos de enzimas que se han inactivado en cantidades considerables son la α -amilasa (85% de inactivación a 80 kV/cm), lipasa (85% a 87 kV/cm), y la glucosa-oxidasa (75% a 64 kV/cm), todas con un tratamiento de caída exponencial y 30 pulsos de 2 microsegundos [5].

Gutiérrez De Piñeres y col. (2007), en su estudio, al aplicar campos eléctricos en muestras de uchuva (*Physalis peruviana*) de 15[kV/cm] en tratamientos de 20

segundos, describe que el proceso es capaz de detener el crecimiento fúngico por más de 10 días (tratamiento aplicado a *Fusarium* sp), disminuyendo las pérdidas pos- cosecha de ésta fruta [21].

Juárez (2007), aplica pulsos eléctricos en “salsas mexicanas” con 9 y 12 kV por 20 y 40s, la inactivación microbiana fue efectiva en un 99.99%. El tiempo de almacenamiento máximo fue de treinta días refrigeración y temperatura ambiente. A los 45 días a temperatura ambiente hay desarrollo de 9 ufc/g de mesófilos, 1 ufc/g de mohos, 6 ufc/g de levaduras, y 2 ufc/g de colonias mesófilas en las muestras en refrigeración [21].

A continuación, se presenta una tabla que muestra la reducción de los microorganismos tratados en diferentes estudios y diferentes investigadores [21].

Tabla 3.1. Raventos (2005). Datos bibliográficos experimentales de tratamientos con campos de pulsos eléctricos [21].

Alimento	Población microbiana	Reducción	Tratamiento	Fuente - año
Leche	<i>E. coli</i>	10 ⁹	20°C, 64 pulsos de 2 μs a 70[kV/cm]	Zhang – 1994
Alimento sólido modelo	<i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>S. cerevisiae</i> .	5-6 ciclos logarítmicos	15°C, pulsos de 3 μs a 40[kV/cm]	Zhang – 1994
Zum de naranja y leche	<i>E. coli</i> , <i>S. cerevisiae</i> , <i>L. brevis</i>	4-5 ciclos logarítmicos	-	Grahl – 1992
	<i>Cl. ryobutyricum</i>	0	-	Grahl – 1992
Leche	<i>E. coli</i>	10 ⁷ - 10 ³ ufc/ml	15°C, pulsos de 1.5 μs a 30[kV/cm]	Martín Belloso – 1996
Leche	<i>E. coli</i>	10 ⁷ - 10 ³ ufc/ml	43°C, 23 pulsos de 20[kV/cm]	Dunn y Pearlman 1987-1989
Huevo líquido	Microorganismo inoculado sin especificar	10 ⁶ – 10 ⁵ ufc/ml	39°C (max), pulsos de caída esponencial de 4 μs a 37[kV/cm]	Martín Belloso 1996
Crema de guisantes	<i>E. coli</i>	10 ⁷ – 0 ufc/ml	30 pulsos de 2μs a 30[kV/cm]	Vega y Mercado - 1996
	<i>B. subtilis</i>	5 D	33 [kV/cm] a 4.3 Hz y 0.5 ml/min de velocidad de flujo	
Zumo de manzana	<i>S. cerevisiae</i>	10 ⁶ ufc/ml	Pulsos de 2.5 μs a 50 [kV/cm]	Harrison - 1996

PurePulse Technologies, generó unas patentes que consistían en aplicar pulsos de 10 hasta 25 kV/cm a zumos de frutas, con lo que el tiempo de vida aumentaba en una semana, según reportaron Dunn y Pearlman, en (1987) [9].

Los campos eléctricos de alto voltaje inactivan a ciertos microorganismos: *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus lysodeikticus*, *Sarcina lutea*, *Bacillus megaterium*, *Clostridium welchii*, *Sacharomyces cerevisiae*, y *Candida utilis*. Se aplicaron campos eléctricos de hasta 25 KV/cm en pulsos desde 2 a 20 μ s sobre suspensiones de los microorganismos [2]

La bacteria *E. Coli* puede ser eliminada en jugos de frutas usando campos eléctricos de alta intensidad, alcanzando efectos letales de hasta 99%, como prueban los resultados obtenidos al aplicar dos pulsos de 15 kV/cm en algunos jugos [22].

Se demostró que la permeabilización del tejido vegetal comienza a ocurrir con un único pulso de 100 μ s a una intensidad de campo de 0,35 kV / cm. La escala de tiempo para la difusión del contenido intracelular en la región extracelular está en el rango de 2 min [23].

Se pasteurizó leche utilizando PEF con un campo eléctrico de 55 kV/cm con pulsos de 0.8 s obteniéndose una eliminación total de las cepas de *Enterobacter*, *Escherichia coli* y *Staphylococcus* inicialmente presentes en la leche y con la simultánea inactivación de la fosfatasa alcalina (Al-Hilphy, 2012) [24].

La inactivación aumenta considerablemente, cuando la fuerza de campo aplicada (E) excede un determinado valor crítico E_c . La tabla 3.2 muestra los valores de E_c , t_c y K para diferentes microorganismos, calculados mediante diferentes experimentos [25]:

En resumen, como se pudo notar en los resultados de las diferentes investigaciones, no hay unos valores fijos de los distintos parámetros para llevar a cabo una pasteurización por campo eléctricos pulsados, sino que estos pueden variar dependiendo de muchos factores, como lo son: tipo de cámara, el tipo de microorganismo y las propiedades del medio líquido a tratar. Si bien la mayoría de los tratamientos son llevados a cabo en tiempos muy cortos, en el orden de los microsegundos, también hay tratamientos con tiempos mayores (milisegundos y segundos), y esto depende principalmente del sistema de descarga del equipo.

Tabla 3.2. (Hulsheger y otros, 1983) Parámetros de tratamientos para diferentes microorganismos [25].

Microorganismos	E (kV/cm)	t (μ.s)	E (kV/cm)	t _c (μ.s)	K (kV/cm)	r (%)
Escherichia coli (4 h)¹	4 - 20	0.07 - 1.1	0.7	11	8.1	97.7
E.coli (30 h)¹	10 - 20	0.07-1.1	8.3	18	6.3	97.6
Klebsiella pneumonia	8 - 20	0.07 - 1.1	7.2	29	6.6	95.7
Pseudomonas auriginosa	8 - 20	0.07-1.1	6.0	35	6.3	98.4
Staphylococcus aureus	14 - 20	0.07-1.1	13.0	58	2.6	97.7
Listeria monocytogenes I	12 - 20	0.07-1.1	10.0	63	6.5	97.2
L. monocytogenes II	10 - 20	0.07 - 1.1	8.7	36	6.4	98.5
Candida albicans	10 - 20	0.14 - 1.1	8.4	110	2.2	96.6

E, campo eléctrico; *t*, tiempo de tratamiento; *E_c*, campo eléctrico crítico; *t_c*, tiempo crítico; *K*, constante cinética; *r*, coeficiente de correlación de la línea de regresión; ¹ tiempo de incubación.

3.1.3. PROCESO DE PASTEURIZACIÓN

El proceso de pasteurización se lleva a cabo mediante la inactivación de los principales microorganismos causantes del deterioro del alimento y de agentes patógenos. Existen muchos agentes patógenos pese a que no generan alteraciones en los alimentos si pueden ser un peligro para la salud de las personas que consumen el producto contaminado, ocasionando enfermedades e infecciones que puede ir desde una intoxicación leve hasta la muerte.

Como ya se mencionó, para garantizar una seguridad microbiológica de los alimentos, es necesario superar cierto umbral de campo eléctrico, esta intensidad debe ser superior a los 25 kV/cm. El tipo de célula también es un factor influyente en el tratamiento, como las células eucariotas tienen un mayor tamaño que las procariontas, la permeabilización por pulsos eléctricos de alto voltaje requiere la aplicación de campos eléctricos inferiores a los 10 kV/cm.

Al aplicar un campo eléctrico externo de intensidad 2-20 kV/cm se produce la formación de poros en la membrana celular, pero estos poros vuelven a cerrarse retornando nuevamente la membrana a su estado inicial normal. Si la duración del pulso es mayor que 10-15 ms, el daño de la membrana es irreversible [2].

A continuación, se realiza una descripción general del proceso de pasteurización basados en la literatura (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Proceso general de pasteurización [Fuente propia].

Proceso de pasteurización	Condiciones
Tipo de cámara	Placas paralelas para un campo eléctrico homogéneo
Introducir líquido a tratar en cámara de tratamiento	Cámara de tratamiento estática o continua
Tratamiento	Campo eléctrico: 1-100 (kV/cm) Número de pulsos: 1-1000 Ancho de pulso: De microsegundos hasta segundos (μ s-s) Temperatura de la muestra: Temperatura ambiente o de refrigeración

3.2. PROCESO DE DISEÑO

Considerando la información de la literatura consultada, se hace una selección de los componentes para el diseño de la fuente de campos eléctricos pulsados que cumplan con los parámetros más importantes necesarios para un proceso de pasteurización. Para la selección de los componentes se tiene en cuenta que sea económicos, fácil adquisición y manejo. Se hace una descripción de cada uno de los módulos que componen el sistema y se presenta el diseño del prototipado electrónico, posteriormente se presenta el diseño del prototipado mecánico,

3.2.1. PARÁMETROS DE DISEÑO

Con base en los parámetros más importantes para la inactivación de microorganismos en alimentos líquidos, se determinó que la fuente de campo eléctrico debe cumplir con las siguientes especificaciones:

Tabla 3.4. Parámetros de diseño [Fuente propia].

Parámetros	Rango
Campo eléctrico (E)	≥ 25 (kV/cm)
Ancho de pulso	10-1000 (ms)
Forma de pulso	Onda cuadrada o exponencial

Otro parámetro importante es la forma del pulso, como se expuso en el ítem 3.1.1.3, por ello se busca que el equipo pueda generar pulsos de onda cuadrada o de caída exponencial.

3.2.2. DISEÑO DE LA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO

La fuente de campo eléctrico consiste en transformar un voltaje de bajo nivel en uno de alta potencia. Comúnmente está conformada por componentes de gran tamaño y peso como transformadores elevadores y sistema de acumulación de energía (banco de capacitores), un generador de pulsos y una etapa de conmutación.

En este proyecto se busca que la fuente sea de bajo costo y tamaño, y cumpla con los parámetros de tratamiento, aprovechando los recursos del medio y de fácil adquisición, como: elementos reciclados, recursos digitales de libre acceso y diseño asistido por computador.

Los diseños de los circuitos se realizaron en el entorno de desarrollo electrónico ISIS Proteus.

A continuación, se muestra el diagrama de bloques del sistema a desarrollar.

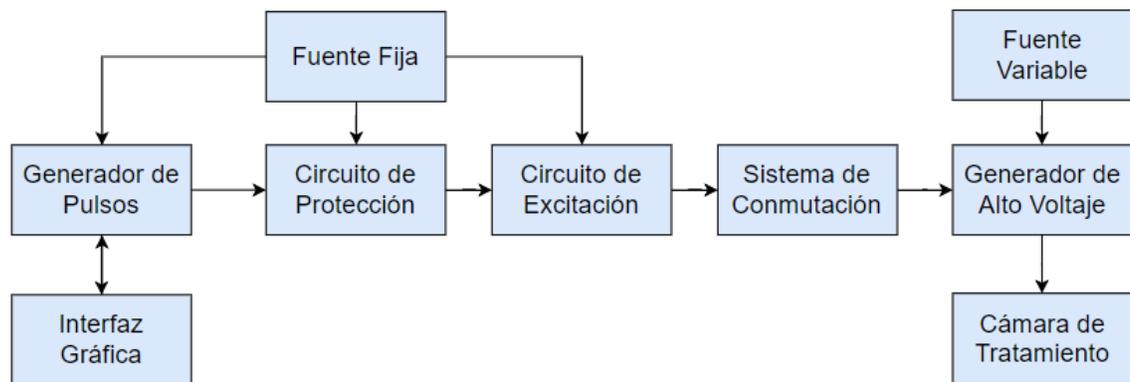


Figura 3.2. Diagrama de bloques del sistema a implementar [Fuente propia].

3.2.2.1. Generador de alto voltaje

Se empieza por seleccionar el elevador de voltaje para así determinar que componentes son necesarios para su funcionamiento. Como se describió en el capítulo anterior, existen diferentes tipos de fuentes de alta tensión, pero algunas son costosas de construir, y gran tamaño, por esta razón se busca que el elevador de voltaje sea capaz de proporcionar la intensidad de campo eléctrico requerida, sin que su costo o tamaño sea muy elevado.

El generador de alto voltaje seleccionado está constituido por un transformador de líneas o transformador flyback, normalmente es usado para alimentar el tubo de rayos catódicos de los televisores y monitores debido a su gran capacidad de generar alta tensión, los cuales pueden llegar a producir tensiones superiores a los 20 kV. Este transformador está formado por varios bobinados internos en un núcleo

de ferrita y su frecuencia de operación puede rondar de 15-40 kHz, el cual dependen del fabricante. Una manera económica para obtener el transformador (figura 3.3) es mediante el reciclaje de los aparatos electrónicos antes mencionados.



Figura 3.3. Transformador Flyback [Fuente propia]

3.2.2.2. Sistema de control y generador de pulsos

El elemento principal de este sistema está conformado por una tarjeta de desarrollo arduino uno, la cual consta de un microcontrolador atmega328p de la empresa Atmel (ver figura 3.4), en la tabla 3.5 se muestra sus características. Esta tarjeta es la encargada de generar la señal de control para el circuito de excitación y a su vez al circuito de voltaje de conmutación a la bobina primaria del transformador flyback. El pulso de onda cuadrada es una señal modulada por ancho de pulso PWM, y es modificada a través del enlace sistema-usuario; interfaz gráfica.



Figura 3.4. Tarjeta de desarrollo arduino uno [26].

Tabla 3.5. Características de la tarjeta de desarrollo Arduino Uno [27].

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 – 12V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20V
Pines para entrada- salida digital.	14 (6 pueden usarse como salida de PWM)
Pines de entrada analógica	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0,5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

3.2.2.3. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica es el área en donde se puede modificar y visualizar los parámetros del tratamiento. Para esto se usa un teclado matricial 4x4 y una pantalla lcd con módulo i2c respectivamente (figura 3.5).

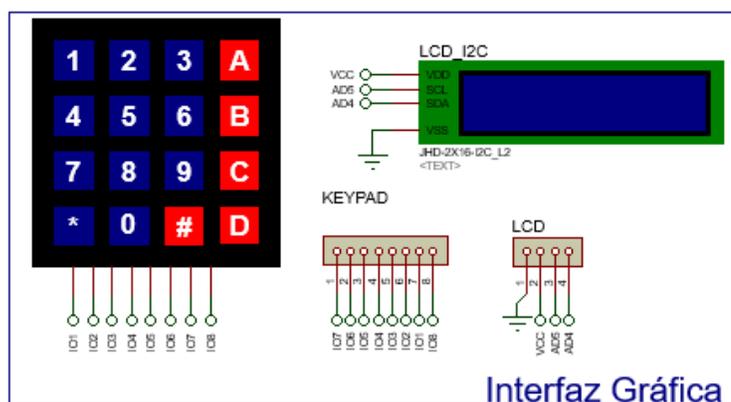


Figura 3.5. Esquema de la interfaz gráfica [Fuente propia].

3.2.2.4. Fuentes de alimentación

Se ha implementado dos fuentes de alimentación para alimentar el sistema; una fuente fija y otra variable.

Fuente Fija

Para alimentar la etapa de generación de pulsos, el circuito de protección y el circuito de excitación, se usa un cargador de computador portátil reciclado el cual proporciona una corriente continua de 3,2 A y 18 V. A este cargador se le acondiciona la tensión que suministra implementando un circuito basado en los reguladores de voltaje de la serie LM78XX, los cuales absorben la tensión excedente y la disipan en forma de calor. Se descompone el diagrama de flujo para mostrar la etapa de alimentación fija (figura 3.6).

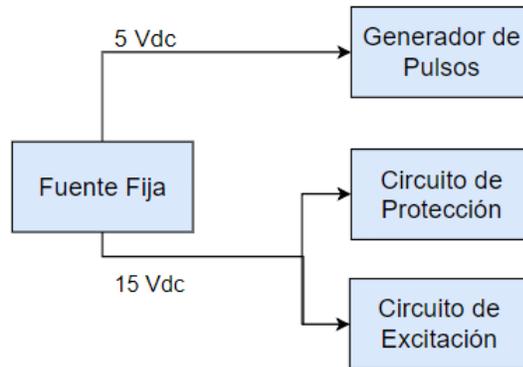


Figura 3.6. Diagrama de la fuente de alimentación fija [Fuente propia].

Se usa un regulador LM7805 para alimentar el generador de pulsos y así garantizar que a la tarjeta de desarrollo no le llegara un voltaje superior a 5V, evitando una avería en dicha tarjeta. Para alimentar el circuito de protección, el de excitación y el sistema de conmutación se usa un regulador LM7815, esto con el fin de alimentar cada una de las secciones a un voltaje constante, aunque la tensión que suministra el cargador está por debajo de la tensión crítica, esto se hace para evitar sobre tensiones (figura 3.7).

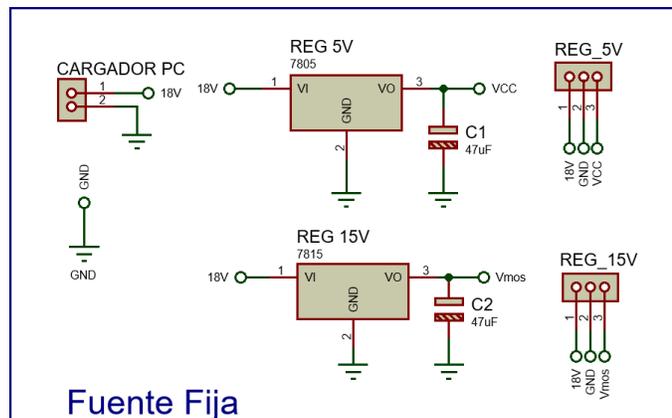


Figura 3.7. Esquema fuente de alimentación fija [Fuente propia].

3.2.2.5. Circuito de protección

Es la parte encargada de la protección del microcontrolador y consiste en el aislamiento de la etapa de baja potencia con la de alta potencia mediante un acoplamiento óptico. Este circuito está basado en un optoacoplador PC817. Teniendo en cuenta las características del arduino uno (tabla 3.3) en donde muestra que la corriente continua máxima por pin IO es de 40 mA, se pone una resistencia de 270 ohm (R9) para limitar la corriente a unos 18.5 mA en dicho pin (figura 3.9). Adicionalmente se divide las dos etapas; baja potencia y alta potencia en dos placas para mayor seguridad del sistema generador de pulsos.

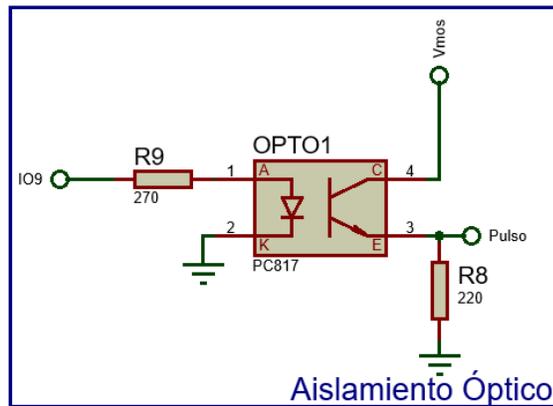


Figura 3.9. Esquema de aislamiento óptico [Fuente propia].

3.2.2.6. Circuito de excitación

El circuito de excitación o driver es implementado con el fin de garantizar una correcta conmutación de los transistores de potencia, permitiéndoles pasar de corte a saturación sin permanecer mucho tiempo en la zona activa (figura 3.10). En otras palabras, es capaz de gobernar eficazmente la conducción o no conducción de un interruptor de potencia partiendo de las ordenes que le llegan desde el circuito de control [28]. Esto es debido a que los circuitos de control, y los circuitos de potencia no tienen los mismos niveles de tensión y corriente [28].

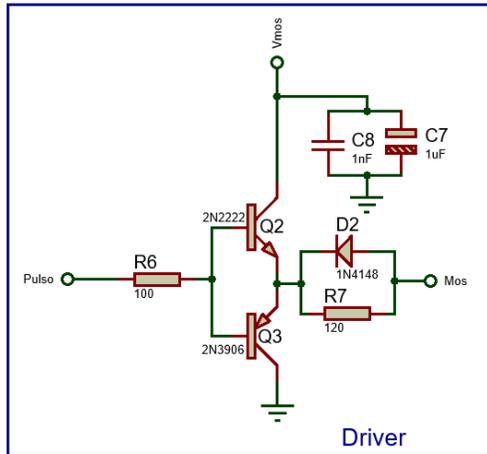


Figura 3.10. Esquema de circuito de excitación [Fuente propia].

3.2.2.7. Sistema de conmutación

El circuito de conmutación está constituido por transistores de potencia IRFP260, este transistor puede proporcionar hasta 49A de corriente de drenaje continuo (ID) a 25°C y 29A a 100°C. A veces es necesario la colocación de varios Mosfet en paralelo, ya que uno solo no puede llevar el nivel de corriente que exige el circuito [28]. Si bien un solo transistor IRFP260 está en la capacidad de proporcionar la corriente necesaria para la excitación del flyback, se decide implementar un arreglo de transistores en paralelo con el fin de que la corriente se distribuya equitativamente por los Mosfet, y que no haya tendencia a que por un transistor circule más corriente que por los demás [28].

El arreglo Mosfet posee unas resistencias en los terminales de puerta (ver figura 3.11), estas resistencias buscan evitar tener un circuito oscilatorio [28].

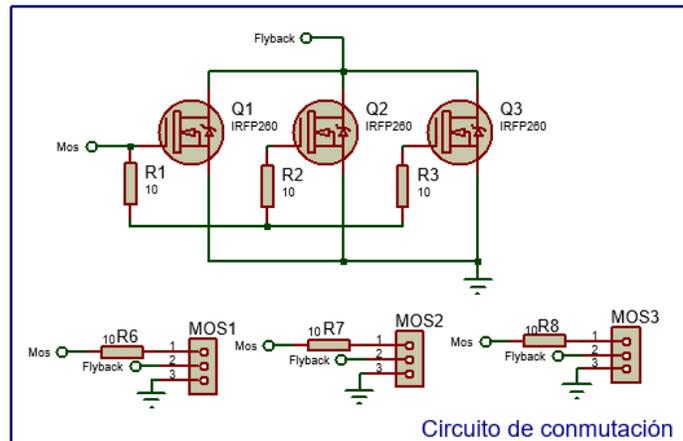


Figura 3.11. Esquema del sistema de conmutación [Fuente propia].

3.2.3. DISEÑO DEL PROTOTIPADO ELECTRÓNICO

Teniendo ya los esquemas y funciones de cada una de las etapas del proyecto, se integran en tres módulos que serán las PCB de baja potencia, fuente variable y sistema de conmutación. El módulo de baja potencia (figura 3.12) estará compuesto por las etapas de sistema de control y generador de pulsos, interfaz gráfica, circuito de aislamiento, circuito de excitación y fuentes de alimentación fijas (5V y 15V). Los otros dos módulos se mostraron en las figuras 3.8 y 3.11 respectivamente.

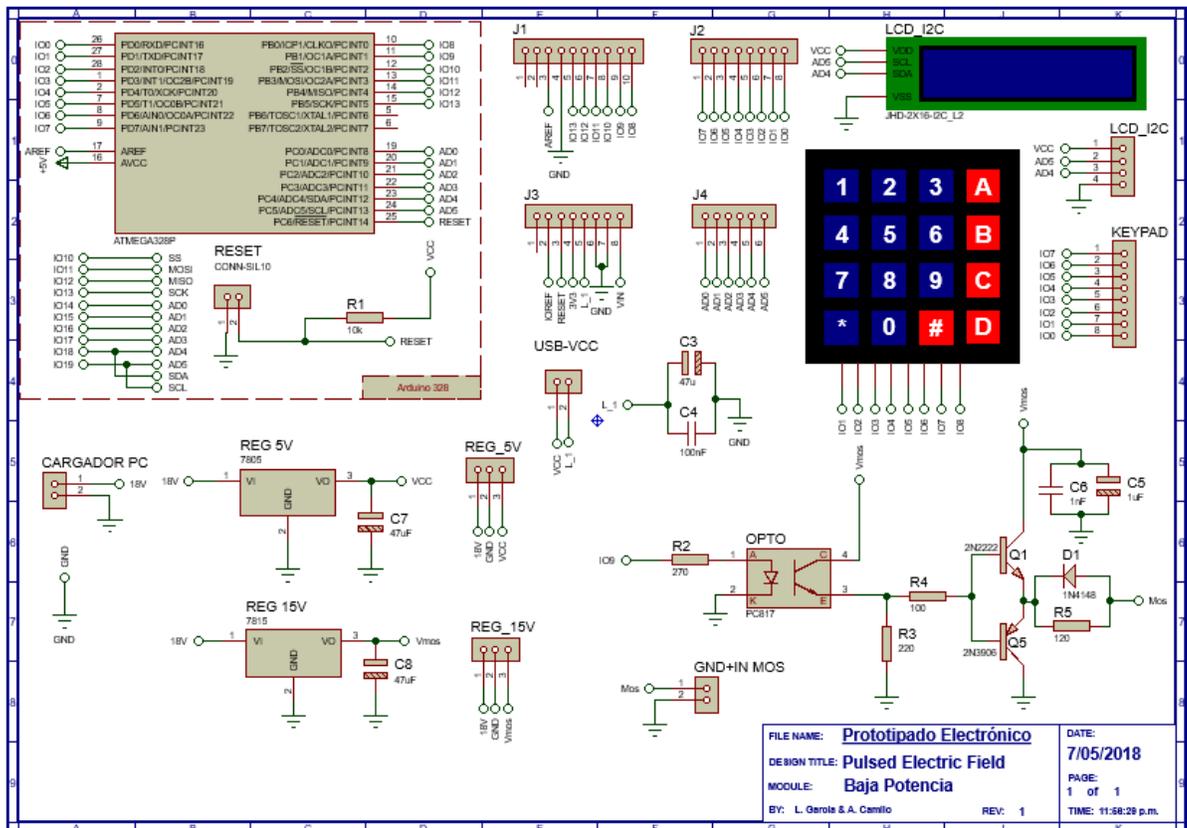


Figura 3.12. Esquema de la tarjeta de baja potencia [Fuente propia].

3.2.4. DISEÑO DEL PROTOTIPADO MECÁNICO

Siempre es necesario que los elementos que ensamblan un equipo o sistema se pueda mostrar de manera clara al fabricante, por lo tanto, para el diseño del prototipo mecánico se hace uso de un software de diseño asistido por computador (CAD) Solid Edge versión estudiantil. Con el propósito de ubicar y ordenar cada uno de los componentes y elementos electrónicos que conforman la fuente de campo eléctrico (ver figura 3.13). Para mayores detalles del diseño del equipo ver anexos B1.1.

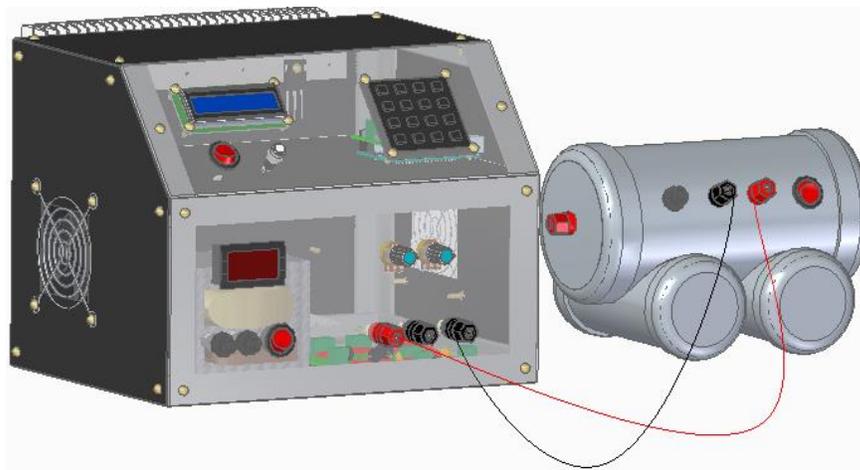


Figura 3.13. Prototipo mecánico de la fuente de campo eléctrico [Fuente propia].

3.2.5. DISEÑO DE LA CÁMARA DE TRATAMIENTO

Un factor importante en el diseño de la cámara de tratamiento es la forma de sus electrodos, ya que estos deben evitar un fenómeno interferente en el tratamiento; que son los arcos eléctricos, productos del fenómeno conocido como el efecto punta; resultado de la acumulación de carga en zonas de menor volumen, el cual impide una distribución uniforme de la carga eléctrica en la superficie del material conductor y a su vez la formación de un campo eléctrico homogéneo. Por tal motivo se usa electrodos paralelos circulares (figura 3.14). El diseño CAD de la cámara de tratamiento se puede ver en el anexo B1.2.

Adicionalmente, el material del cual están compuestos los electrodos no deben reaccionar al contacto con el medio líquido a tratar, esto con el fin de evitar desgastes en los electrodos y la contaminación de la muestra a tratar, por tal motivo el material debe tener las siguientes propiedades:

- **Buena conductividad eléctrica:** Esto permite que no haya pérdidas o caídas de tensión en el generador de alto voltaje, además favorece una distribución uniforme de la carga eléctrica sobre la superficie del electrodo.
- **Durabilidad:** Debe tener una resistencia al desgaste debido a que los electrodos pueden estar en contacto con el medio líquido a tratar y estos podrían provocar efectos negativos en los electrodos y en el medio mismo.
- **Rigidez:** La rigidez permite que no haya una deformación del material en la construcción del electrodo.

- **Facilidad de obtención:** Se relaciona este punto con el bajo costo del material a usar, debido a que existen varios materiales que se pueden utilizar, pero son de difícil obtención económica.

La separación de los electrodos se selecciona con relación al alto voltaje que puede proporcionar la fuente para alcanzar el campo eléctrico deseado.

El diámetro de los electrodos debe ser mayor que la separación entre ellos para reducir el efecto de borde y así generar un campo eléctrico homogéneo.

Por lo descrito anteriormente, se usa acero inoxidable de referencia AISI 316L, ya que es un material con buenas características y es usado en la industria alimenticia, química y refinería, equipos hospitalarios quirúrgicos [29], entre otros (para mayor detalle de las especificaciones del acero inoxidable AISI 316L, consultar Anexo A, tabla A7).



Figura 3.14. Electrodo en acero inoxidable 316L [Fuente propia].

3.3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO PARA PASTEURIZACIÓN

3.3.1. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ELECTRÓNICO

Partiendo de las condiciones de diseño se procede a implementar un primer prototipo del sistema, en donde se evalúa su funcionamiento y se le realizan ajustes pertinentes. Esta etapa es de gran importancia ya que esta permite hacer refinamientos del sistema antes de pasar a la etapa de manufactura. En la figura 3.15 se puede ver el prototipo electrónico del sistema. En el anexo B2 se puede ver con más detalle el prototipo electrónico de cada uno de los módulos.

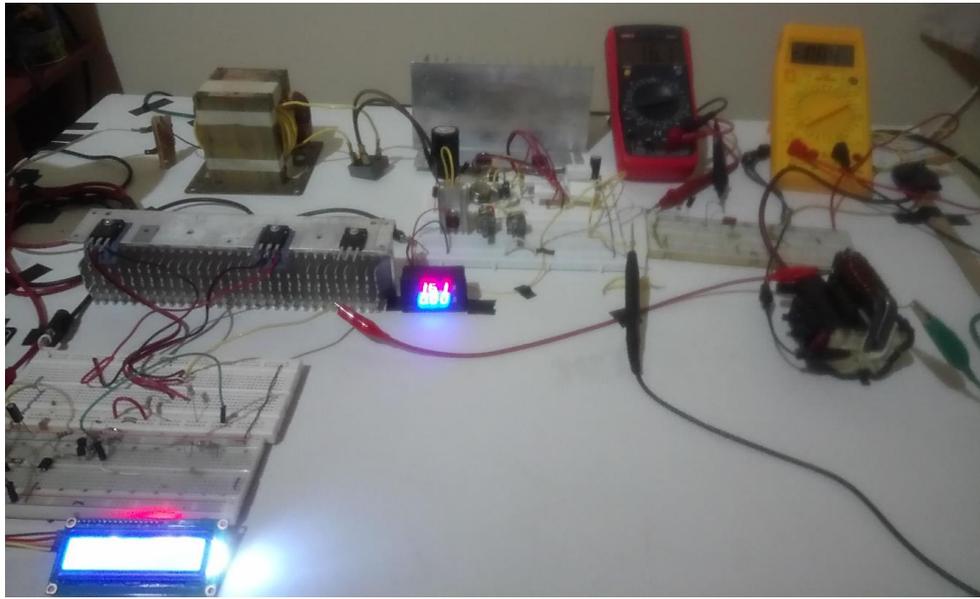


Figura 3.15. Prototipo electrónico del sistema PEF [Fuente propia].

3.3.2. ENSAMBLE DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

Al comprobar el funcionamiento de las etapas del sistema PEF, se procede a la fabricación y ensamble de las tarjetas electrónicas. Se cuentan con tres tarjetas electrónicas, la primera está compuesta por el módulo de baja potencia (figura 3.16), la segunda es la tarjeta de la fuente variable (figura 3.17) y la última corresponde al sistema de conmutación, esta última no es implementada en placa de circuito impreso, sino que es construida en una baquelita, debido a los refuerzos con alambre de cobre, necesarios para el soporte de corrientes de elevado amperaje (figura 3.18).

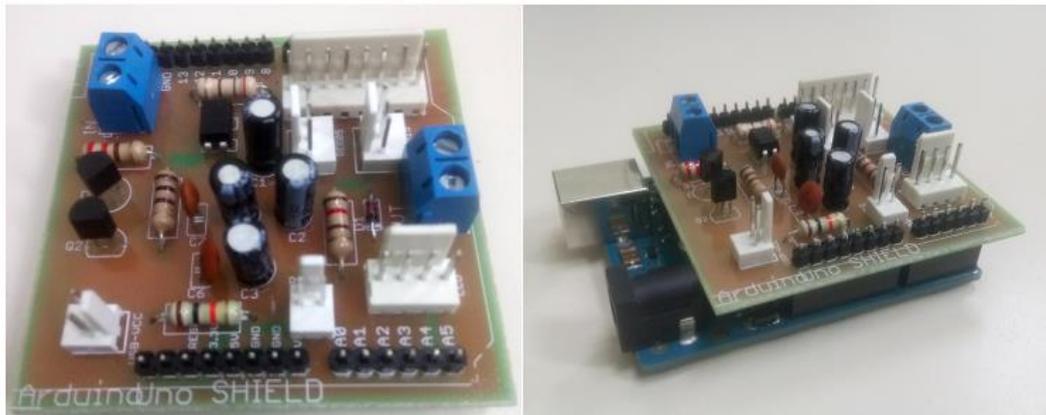


Figura 3.16. Tarjeta de control; Shield Arduino Uno [Fuente propia].



Figura 3.17. Placa fuente variable [Fuente propia].

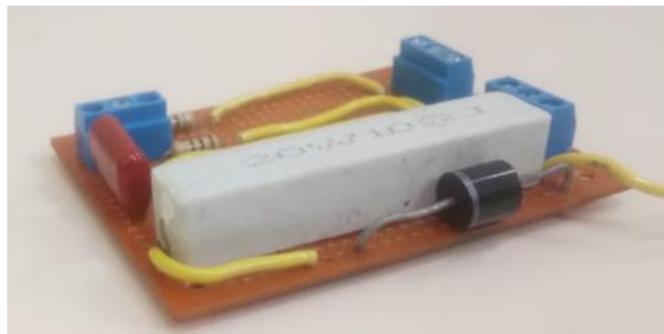


Figura 3.18. Baquelita del sistema de conmutación [Fuente propia].

3.3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA GENERADOR DE ALTO VOLTAJE

El transformador Flyback para su uso común, debe ser alimentado, dependiendo de la región, con una tensión que puede ir desde 100 hasta 240 V, esto para alimentar los múltiples bobinados en un núcleo de ferrita interno. Parte del núcleo de ferrita se encuentra expuesto en la superficie del transformador, en donde se aprovecha esta zona del núcleo de ferrita y se le implementa un bobinado primario externo, de manera que ya no se requieren voltajes superiores a los 100 V para su funcionamiento, sino que puede operarse con valores de voltaje a partir de 1 V. Por tal motivo el transformador ya no tendrá una salida de tensión fija, sino que se puede variar, el cual dependerá del voltaje de polarización. Este transformador está en la capacidad de elevar en un factor de 1000 el voltaje de alimentación.

3.3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE

Aprovechando las ventajas de la tarjeta de desarrollo que es de fuente abierta tanto el hardware como el software, el algoritmo se implementa en el lenguaje de programación C++ en el entorno de desarrollo de arduino versión 1.8.5. El programa es el encargado de recibir los datos, mostrarlos en la pantalla LCD y generar los pulsos que recibirá la etapa de conmutación. A continuación, se plantea un diagrama de flujo que mostrará la función del algoritmo, figura 3.19.

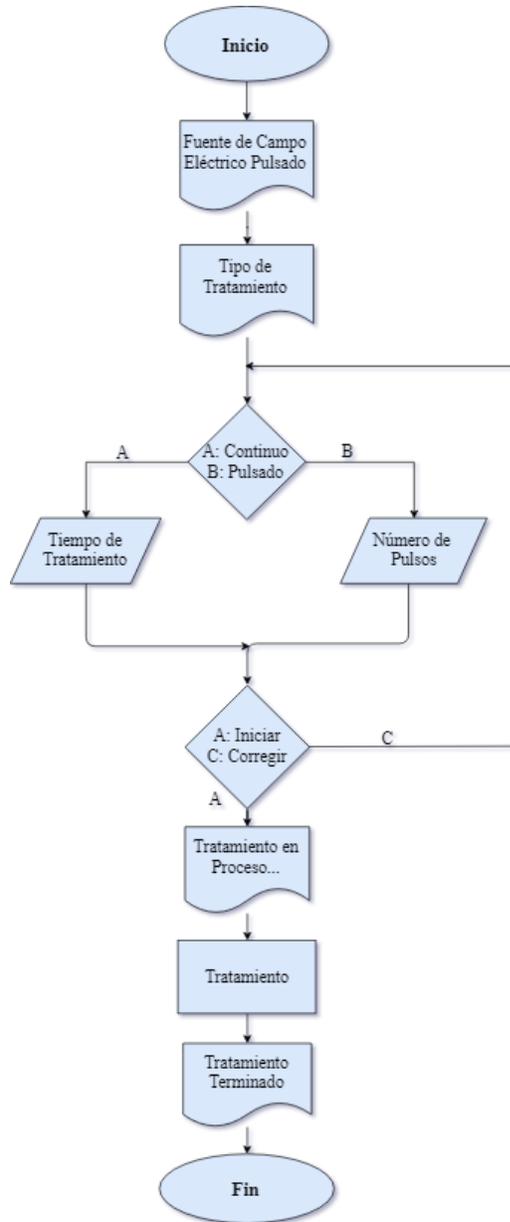


Figura 3.19. Diagrama de flujo del algoritmo [Fuente propia].

3.3.5. CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL SISTEMA

Se usa materiales reciclados para la construcción del sistema; ángulos de hierro con dimensiones 20x20x3 mm y láminas de acero inoxidable. También se usa acrílico para los paneles de la interfaz gráfica y de la fuente variable. El proceso de construcción se lleva a cabo gracias a la colaboración de la empresa de cerrajería, pailas y productos de molienda de caña, **la Estrella**; ubicada en la vereda **la Florida**, Cajibío-Cauca. Empresa, que facilitó el uso de sus instalaciones y herramientas de corte, pulido y equipo de soldadura. En anexos B3 se puede detallar el proceso de construcción.

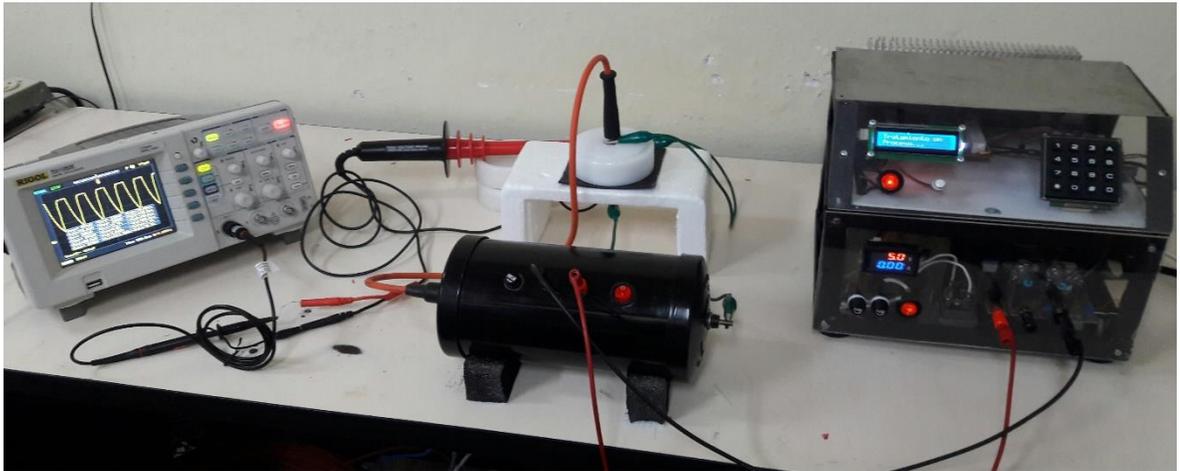


Figura 3.20. Fuente de Campo Eléctrico Pulsado [Fuente propia].

En la tabla 3.6 se especifican los costos generales de la fabricación de la fuente de campo eléctrico pulsado, en el anexo A (tablas A8-A10) se detallan los costos de cada rubro y en la tabla A11 se muestra las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 3.6. Costo total de la construcción de la fuente de campo eléctrico pulsado

Rubros	Precio
Prototipado Mecánico	\$ 250.166
Prototipado Electrónico	\$ 319.262
Total	\$ 569.428

3.3.6. CONSTRUCCIÓN DE LA CÁMARA DE TRATAMIENTO

Para la construcción de la cámara de tratamiento se utiliza teflón (figura 3.21), este material es un buen aislante eléctrico. Con el propósito de hacer una mayor cantidad de pruebas en cuanto al desempeño del equipo, se diseña y se construye dos cámaras de tratamiento que difiere una de la otra en la separación a la que se ubican

los electrodos, esto también genera una variación en el volumen de líquido que cada una puede almacenar y permite un mayor o menor rango de intensidad de campo de operación del instrumento.

La cámara número uno cuenta con una separación entre electrodos de 0.5 cm y puede contener un volumen máximo de 22.09 cm³, la cámara número dos, cuenta con una separación de 1 cm y almacena un máximo de 44.19 cm³.



Figura 3.21. Cámara de tratamiento [Fuente propia].

Tabla 3.7. Especificaciones generales de la cámara construida [Fuente propia].

Producto	Material	Dimensiones (mm)		Capacidad (cm ³)	Número de componentes
Electrodo	Acero inoxidable AISI 316L	Diámetro: 76,2		-	2
		Espesor: 3		-	
Cámara	Teflón	Separación entre electrodos	Cam1:5	22,09	1
			Cam2:10	44,19	1
Tapón	Teflón	Radio interno: 20 Radio externo: 76 Espesor: 10		-	2

Cam1: Cámara de tratamiento 1, Cam2: Cámara de tratamiento 2.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas y los resultados obtenidos para comprobar la viabilidad de la fuente implementada. Se parte por garantizar que la señal generada por el microcontrolador sea adecuada para la activación del sistema elevador de voltaje. Luego se procede a determinar la operación óptima del elevador de voltaje. Por último, se realizan pruebas en la cámara de tratamiento y se observa la estabilidad de los pulsos generados.

4.1. MODIFICACIÓN DE LOS REGISTROS DE ARDUINO

El microcontrolador usado tiene solamente dos valores de frecuencia establecidos (490 y 980 Hz), para que éste proporcione la frecuencia deseada es necesario hacer modificaciones en sus registros, a través de uno de sus timers (temporizadores), de la frecuencia de reloj y de un divisor programable llamado prescaler.

Se hace un barrido de un parámetro que es el encargado de cambiar el registro del arduino, el cual se le llamó TOP y se mide la frecuencia entregada por éste, obteniéndose como resultado la figura siguiente (figura 4.1).

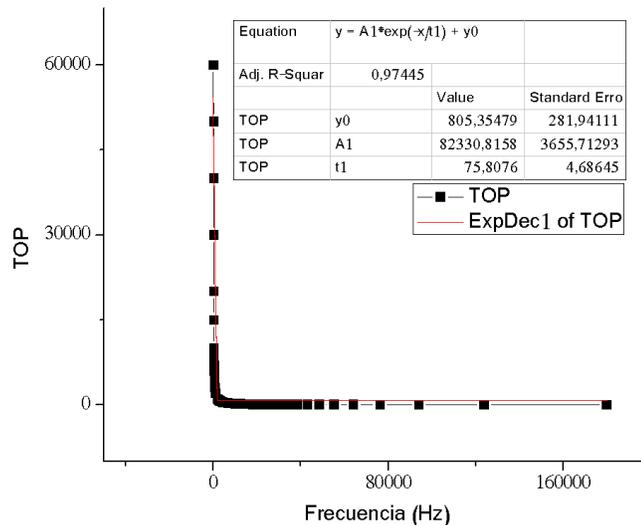


Figura 4.1 Variación del TOP desde 10-60000 [Fuente propia].

La figura 4.1 muestra la variación de la frecuencia en función del TOP, en donde se observa que a medida que disminuye el TOP aumenta la frecuencia y lo hace de manera exponencial. A pesar de este comportamiento no se percibe claramente el valor en cada punto de la gráfica y es debido al amplio rango en la medida; TOP 10-60000, respuesta en frecuencia 179.9 kHz – 32 Hz respectivamente.

Con el fin de disminuir el error en el valor de frecuencia entregado por el arduino, se hace un análisis por tramos de los resultados obtenidos, en donde se selecciona el tramo con menor variación y que se encuentre en el rango de la frecuencia óptima de operación. Se obtiene como resultado la figura 4.2, en donde se puede ver claramente un comportamiento exponencial. La ecuación producto de dicha figura se le programa al arduino y será la encargada de proporcionar la frecuencia deseada.

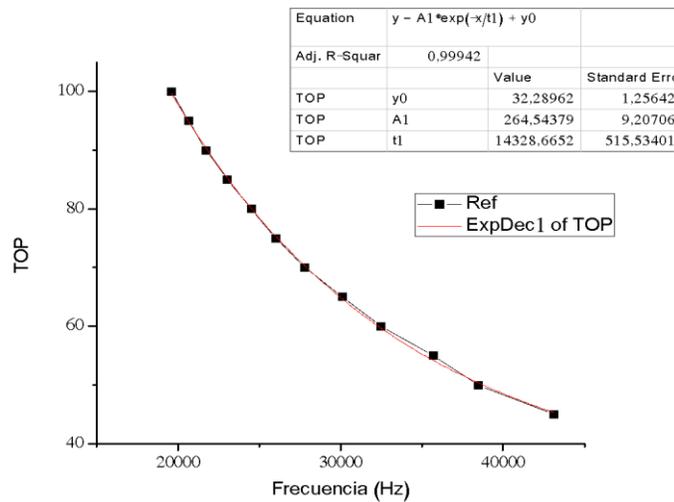


Figura 4.2. Tramo de frecuencia de 43-19 kHz (TOP 45-100) [Fuente propia].

4.1.1. RESPUESTA DEL ARDUINO

La señal de salida del arduino posee la frecuencia óptima de operación y ciclo de trabajo (50%) del transformador, y es la encargada de excitar un driver y éste a su vez el sistema elevador de voltaje. Dicha señal se puede ver en la figura 4.3.

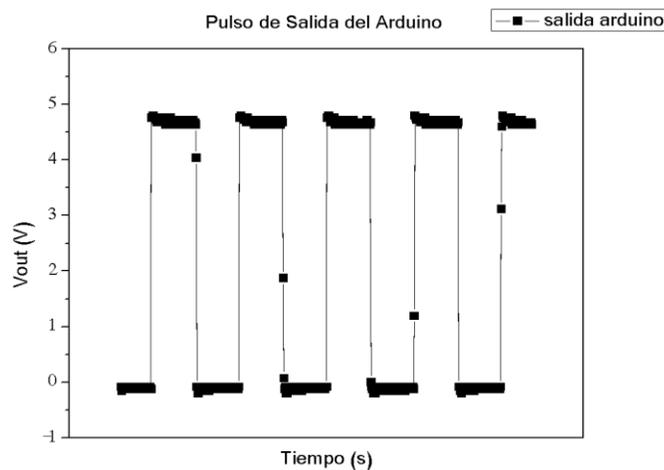


Figura 4.3. Salida pulsada del arduino [Fuente propia].

4.2. RESPUESTA DEL ELEVADOR DE VOLTAJE

La señal proveniente del arduino pasa a través de un circuito de excitación (driver), el cual amplifica la señal de su entrada para garantizar el funcionamiento del sistema de conmutación. La señal de conmutación amplificada se puede ver en la figura 4.4, se puede apreciar una diferencia con la figura anterior y esto es debido a que cuando operan los transistores no pasan directamente de la zona de corte a la de saturación, sino que toman cierto tiempo en la zona activa.

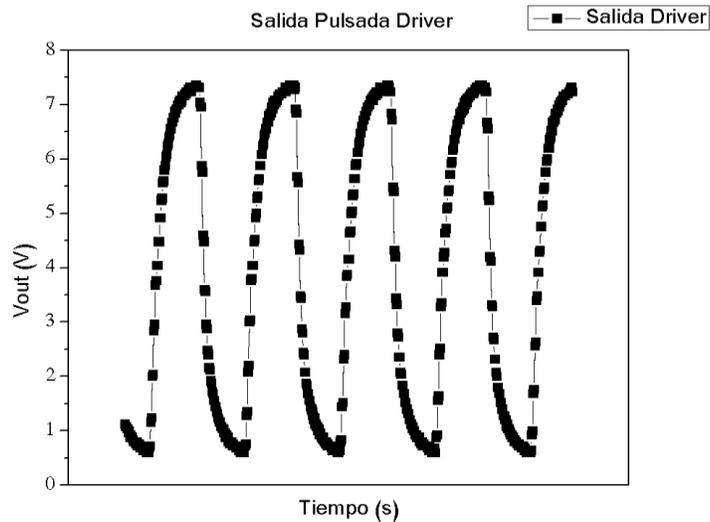


Figura 4.4. Señal de salida del circuito de excitación [Fuente propia].

Para el correcto funcionamiento del transformador flyback, éste debe ser excitado con una señal que contenga la frecuencia óptima y así evitar las frecuencias de resonancia que pueden afectar la eficiencia del actuador. Para esto se hace un barrido de frecuencias y se mide el alto voltaje de salida del transformador en función del voltaje de entrada (ver figura 4.5), el alto voltaje es medido en un voltímetro a través de una sonda de alto voltaje (High Voltage Probe HV-40) que reduce el voltaje en un factor de 1000. La ganancia del transformador depende de su frecuencia de operación, a frecuencias bajas el voltaje de salida no es lineal y posee saltos abruptos (ver figura 4.5). A medida que se aumenta la frecuencia y se acerca al valor óptimo los saltos en la ganancia van disminuyendo y se ve manifestado en un comportamiento lineal con una elevación del voltaje en un factor de 1:1000, pero una vez se supera el valor de frecuencia óptima se empieza a presentar nuevamente saltos en la ganancia del voltaje de salida.

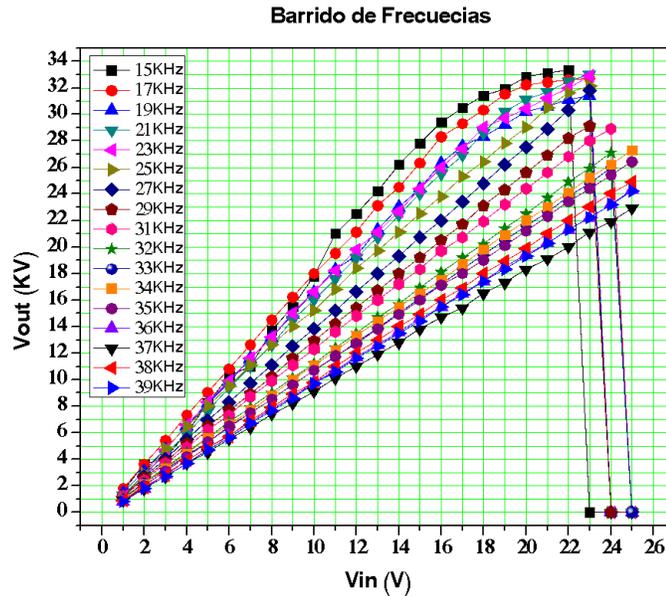


Figura 4.5. Voltaje de salida del flyback en función del voltaje de entrada para diferentes frecuencias [Fuente propia].

Se puede ver los tres valores de frecuencia que tienen el mejor comportamiento lineal, a un solo barrido de toma de datos (ver figura 4.6). Aunque el coeficiente de correlación lineal es más cercano a 1 para la frecuencia de 39 kHz, el que presenta una menor desviación en la pendiente corresponde a la frecuencia de 38 kHz, por el cual se selecciona ésta como la frecuencia óptima de trabajo.

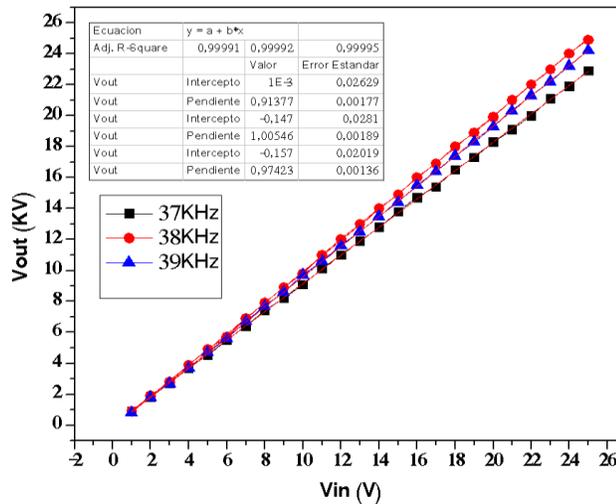


Figura 4.6. Voltaje de salida respecto a las frecuencias con el mejor comportamiento lineal [Fuente propia].

Con el fin de comprobar que la frecuencia seleccionada corresponde a la óptima se hacen medidas del alto voltaje para ver qué tan cercano está al voltaje de entrada (Ver tabla 4.1), donde se muestra el error absoluto y relativo de cada medida.

Tabla 4.1. Valores de alto voltaje, error absoluto y relativo en la frecuencia óptima de trabajo (38kHz) [Fuente propia].

Vin	Vout Promedio	Error Absoluto	Error Relativo
(V)	kV		(%)
38KHz			
1	0,92	0,08	8,33
2	1,92	0,08	4,17
3	2,88	0,12	3,89
4	3,92	0,08	2,08
5	4,92	0,08	1,67
6	5,92	0,08	1,39
7	6,93	0,07	0,95
8	7,92	0,08	1,04
9	8,93	0,07	0,74
10	9,93	0,07	0,67
11	10,95	0,05	0,45
12	11,95	0,05	0,42
13	12,93	0,07	0,51
14	13,95	0,05	0,36
15	15,02	-0,02	0,11
16	15,97	0,03	0,21
17	16,98	0,02	0,10
18	17,95	0,05	0,28
19	18,95	0,05	0,26
20	19,92	0,08	0,42
21	20,95	0,05	0,24
22	21,92	0,08	0,38
23	22,92	0,08	0,36
24	23,87	0,13	0,56
25	24,85	0,15	0,60
26	25,80	0,20	0,77
27	26,87	0,13	0,49
28	27,75	0,25	0,89
29	28,82	0,18	0,63
30	29,77	0,23	0,78

Se puede ver la gráfica correspondiente al voltaje promedio de salida (figura 4.7), en ella se corrobora la linealidad en el alto voltaje de salida y en la tabla 4.2 se puede ver las características sistemáticas de la fuente de campo eléctrico. Queda validado que la frecuencia óptima de trabajo del transformador flyback es de 38 kHz y que el voltaje de salida es aproximadamente 1000 veces el voltaje de entrada.

Tabla 4.2. Características sistemáticas de la fuente PEF [Fuente propia].

	Voltaje (V) (Entrada)	Voltaje (KV) (Salida)
Rango	[1 - 30]	[0,92 – 28,77]
Alcance	29	27,85
Ecuación línea recta	$y = 0,99668x - 0,02912$	
Coefficiente de correlación	$R^2 = 0,9999$	
Sensibilidad (Vin)	0,1 V	

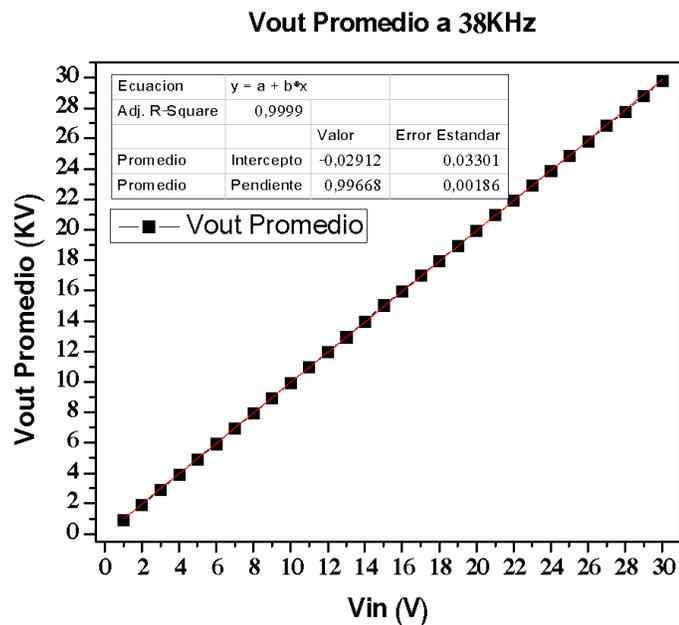


Figura 4.7. Voltaje de salida promedio en función del voltaje de entrada a frecuencia óptima [Fuente propia].

Después de validar el funcionamiento de la fuente de alto voltaje se procede a ver la estabilidad del sistema al actuar en una cámara de tratamiento que contenga un medio líquido.

4.3. PRUEBAS CON ACOPLE DE CÁMARA DE TRATAMIENTO.

El sistema está en la capacidad de proporcionar dos tipos de señales para realizar el tratamiento, una de ellas es una señal pulsada y la otra continua, la señal pulsada alterna su intensidad entre un valor máximo y un valor mínimo, los pulsos son generados mediante el encendido y el apagado del transformador flyback (orden, programada en el microcontrolador), esta señal puede ser usada tanto en tratamientos de medio continuo o estático, la señal continua a diferencia de la pulsada no presenta cambios en su intensidad, sino que siempre proporciona el valor máximo en la cual se ha ajustado el sistema, por lo general este tipo de señal es usada en tratamientos de medios continuo.

4.3.1. RESPUESTA EN CÁMARA DE TRATAMIENTO CON MEDIO LÍQUIDO, SEÑAL PULSADA.

Para ver el funcionamiento del equipo al ser acoplado a una cámara de tratamiento estática, que ya ha sido mencionada y descrita en el capítulo 3, se realizaron una serie de pruebas que buscan poder observar el comportamiento de todo el sistema, para ello se genera una variación en los pulsos a la salida del sistema de alta tensión, esto se logra modificando el código de operación, obteniendo así un control sobre el voltaje de salida, de esta manera se pueden hacer una gran cantidad de medidas y validar el correcto funcionamiento del instrumento. Las condiciones de trabajo de cada cámara de tratamiento fueron las mismas (como ya se ha mencionado se cuenta con 2 cámaras que se diferencian por su separación entre electrodos), la descripción general del proceso es la siguiente: Una vez se han llenado las cámaras con un medio líquido se conectan al generador de alto voltaje, se fija la fuente variable en el voltaje correspondiente al campo eléctrico deseado y se ejecuta el tratamiento mediante la interfaz de usuario. Las pruebas realizadas consisten en la variación del voltaje de entrada desde 5 a 25V con intervalos de 5V donde se mide el alto voltaje obtenido y la forma del pulso aplicado, este es el proceso que se lleva a cabo para la cámara de 0,5 cm y 1 cm.

Como el sistema genera un alto voltaje se requiere de elementos que estén en la capacidad de soportar valores elevados de tensión y puedan ser acoplados a instrumentos que permitan y faciliten la adquisición de datos, por ello se usa la sonda de alta tensión High Voltage Probe HV-40 que es conectada en los electrodos de la cámara de tratamiento y a su vez a un osciloscopio (Rigol DS1052E) el cual, permite la visualización de la señal que llega a las placas de la cámara de tratamiento.

Para la cámara de 0,5 cm, se mantiene la señal de voltaje en su máximo valor durante 10, 30 y 50 ms, valores que se identifican como la duración de los pulsos o tiempo de tratamiento por pulso, luego se manda la señal a 0V durante determinado

tiempo, completando así un ciclo, esto se realiza hasta llegar al número de pulsos digitado, a partir de lo anterior se obtienen la siguiente gráfica donde se muestra el alto voltaje de salida ante un voltaje de entrada de 25 V (ver figura 4.8).

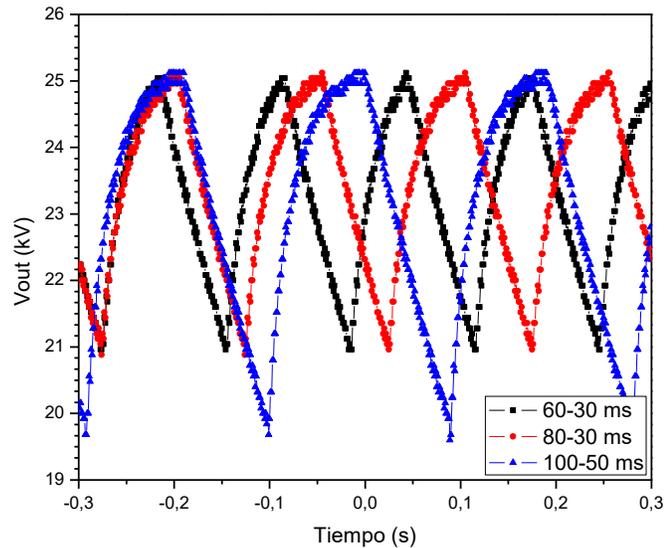


Figura 4.8. Señal de salida de alto voltaje para diferentes anchos de pulso (60, 80 y 100 ms tiempo on, 30, 30 y 50 ms tiempo off respectivos) [Fuente propia].

Luego de presentar esta serie de resultados es de suma importancia reiterar que se trabaja con tiempos de encendido y apagado en el sistema para controlar el ancho de los pulsos, del mismo modo es necesario analizar el condensador interno que posee el módulo de alta tensión (elemento que no puede ser removido), este elemento requiere un tiempo superior a 50 ms para completar su carga máxima, después de los 50 ms el periodo de tiempo que transcurre es el llamado tiempo de tratamiento (por pulso).

Como se puede ver en la figura 4.8 se tienen pulsos muy similares a los exponenciales, pero la señal no se describe en su totalidad con este comportamiento, la señal pasa rápidamente de su nivel más bajo al más alto (> 50 ms) y permanece en este valor por un tiempo que ya ha sido denominado ancho de pulso o tiempo de tratamiento, posteriormente se suspende el suministro de energía hacia el flyback y se da la transición que posee carácter netamente exponencial, el decaimiento exponencial es válido y lógico porque se da la descarga del condensador de alto voltaje y de la cámara de tratamiento que también actúa como capacitor. Por problemas de escala y muestreo el tiempo en que la señal está en su máximo nivel no es evidente en las figuras, pero gracias a valores medidos por el

osciloscopio se puede confirmar que la señal permanece en el valor máximo durante el tiempo establecido.

Para una duración de pulso mayor (150, 250 y 950 ms) se tienen los siguientes resultados, en donde se muestra el voltaje de salida en relación a un voltaje fijo de entrada (25V).

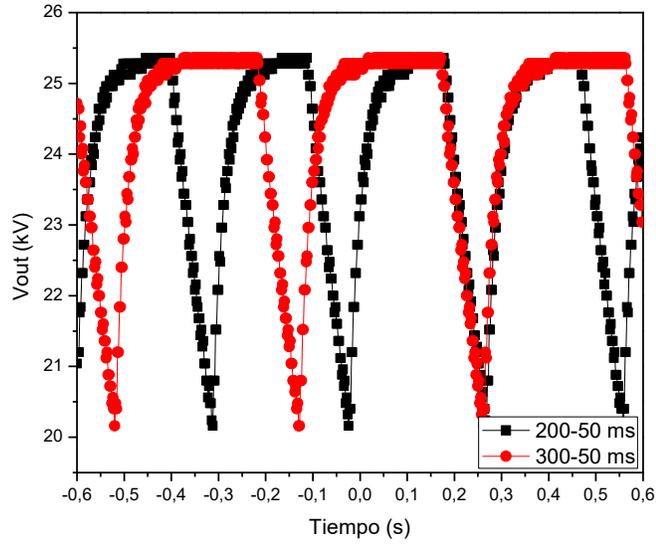


Figura 4.9. Señal de salida de alto voltaje para diferentes anchos de pulso (200 y 300 ms tiempo on y 50 ms tiempo off) [Fuente propia].

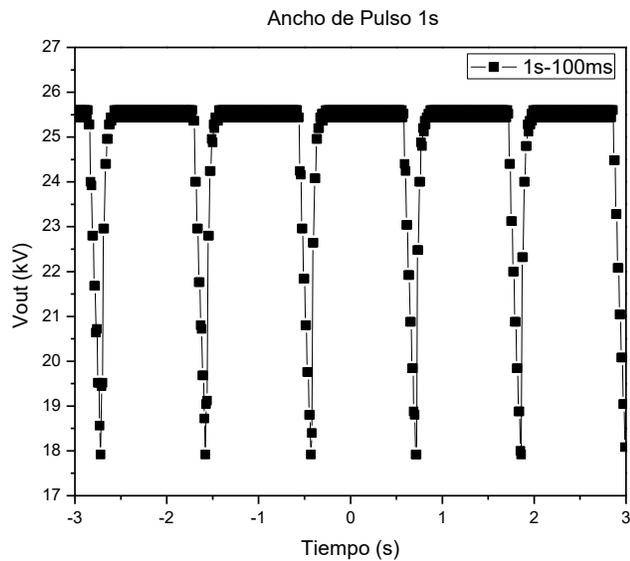


Figura 4.10. Señal de salida de alto voltaje para anchos de pulso de 1s on y 100 ms off [Fuente propia].

En este caso (ver figura 4.9 y 4.10), se presenta una duración del pulso mayor en relación con la figura 4.8, gracias a esto se hace más evidente que la señal efectivamente se encuentra en su valor máximo por un tiempo determinado y se asemeja mucho más a una señal cuadrada, esto no implica que la señal pase instantáneamente de su valor mínimo al máximo o viceversa, es claro que toma tiempo hacer estas transiciones, el comportamiento es igual al descrito en la gráfica anterior (figuras 4.8), la diferencia es el tiempo durante el cual las señales están en su valor máximo.

Se ha mencionado que el flyback proporciona el máximo valor de tensión deseado y luego se suspende su excitación para que éste deje de suministrar el alto voltaje (tiempos de encendido y apagado para controlar el ancho de los pulsos), dicho procedimiento es llevado a cabo pero no se ve reflejado en las figuras mostradas anteriormente (4.8 - 4.10), a pesar de que se puede ver claramente que el estado alto de la señal si corresponde al valor máximo, el valor mínimo no es cero sino que sigue siendo un valor de voltaje alto y se debe al capacitor mencionado con anterioridad, ya que el alto voltaje acumulado en dicho capacitor sigue actuando sobre la cámara de tratamiento durante un tiempo posterior al finalizar el suministro sobre el flyback.

4.3.1.1. Pulsos para el proceso de inactivación y campo eléctrico producido.

Considerando que el sistema se usará para procesos de inactivación bacteriana es importante analizar y tener en cuenta los criterios mencionados en capítulos anteriores (capítulo 2 y 3). Como se expuso en el capítulo 3 los pulsos de forma cuadrada presentan una mayor inactivación gracias a que se alcanza el valor máximo rápidamente y esto permite que los procesos de inactivación se lleven a cabo en valores específicos de campo eléctrico. Sin embargo, los pulsos de caída exponencial también pueden ser utilizados en los procesos de inactivación, pero involucran un análisis más exhaustivo, debido a la forma en darse las transiciones y por causa de esto no se puede establecer con certeza a qué valor de campo eléctrico se genera la inactivación. Las transiciones representan el cambio entre el valor mínimo y máximo de voltaje que se aplica entre los electrodos, que al final genera el campo eléctrico dentro de la cámara de tratamiento [14].

A continuación, se presenta la respuesta del sistema a tiempos entre pulsos de mayor duración en comparación a los mostrados en la sección anterior de pruebas, usando las cámaras de 0,5 cm y 1 cm.

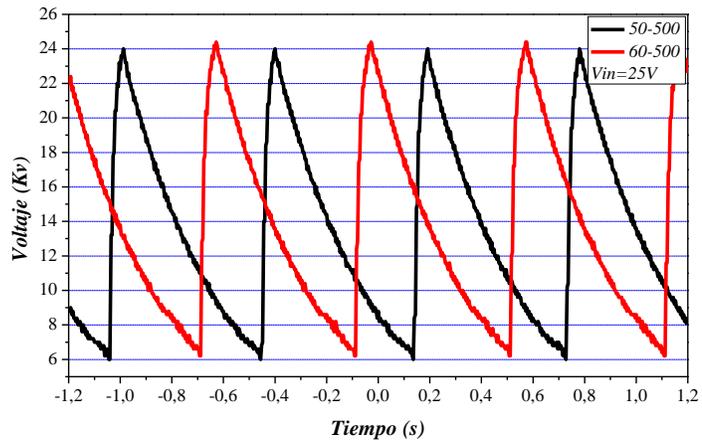


Figura 4.11. Pulso con 50-500 y 60-500 ms, cámara 1 cm [Fuente propia].

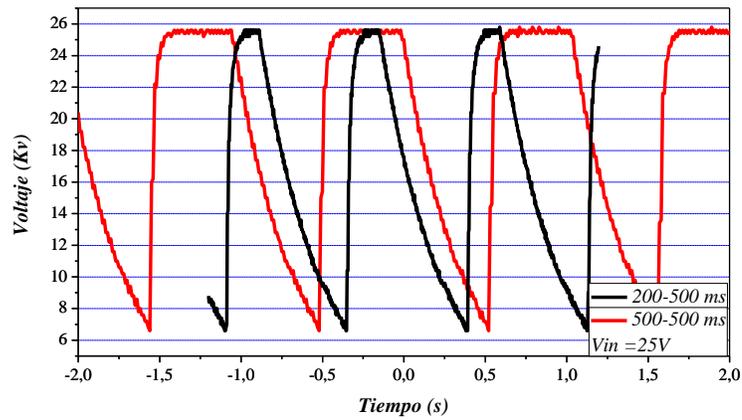


Figura 4.12. Pulso con 200-500 y 500-500 ms, cámara 1 cm [Fuente propia].

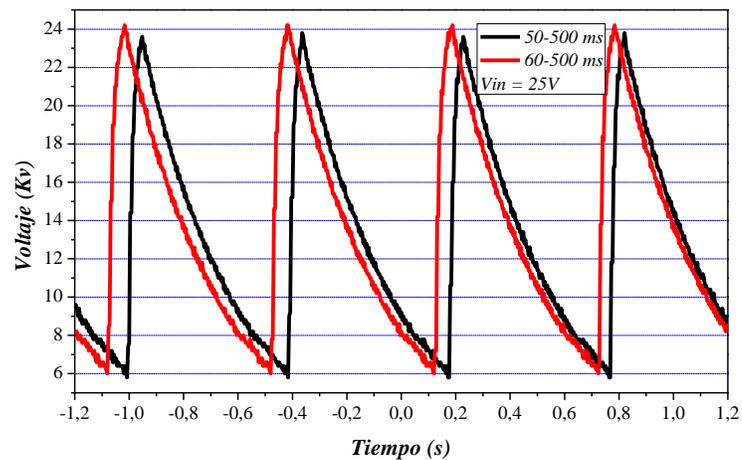


Figura 4.13. Pulso con 50-500 y 60-500 ms, cámara 0,5 cm [Fuente propia].

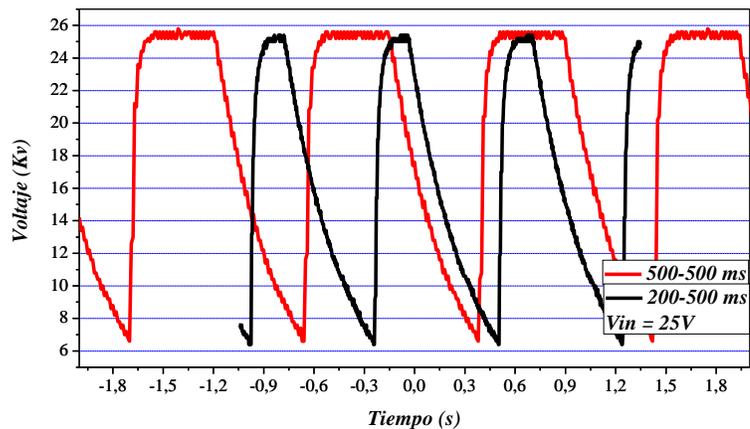


Figura 4.14. Pulso con 200-500 ms y 500-500, cámara 0,5 cm [Fuente propia].

Las figuras anteriores (4.11-4.14) representan la respuesta del sistema para una entrada de 25 volts. Las cámaras (0,5 cm y 1 cm) poseen una lámina de teflón que permite la medición del potencial que se distribuye sobre la superficie de los electrodos, impidiendo algún tipo de conducción directa entre los mismos.

Para observar el comportamiento en las cámaras se tienen inicialmente la señal en alto por un periodo de tiempo corto (ancho de pulso), pero manteniendo constante el valor entre pulsos (ver figuras 4.11, 4.13), idealmente la señal debería alcanzar mil veces el valor de la entrada, pero como es evidente no se alcanzan los 25kV que se esperan con una entrada fija de 25V este comportamiento se puede asociar con el tiempo utilizado, el cual, está cerca del límite del tiempo que necesita el condensador para alcanzar su valor máximo, como se sabe, la carga de un condensador es un proceso que no se consigue instantáneamente, al comienzo del proceso el condensador acumula rápidamente cargas en sus superficies, pero a medida que este proceso transcurre las cargas previamente ubicadas en la superficies del condensador hacen que la acumulación de las últimas cargas necesarias para completar su capacidad máxima se haga más difícil, obligando a que se necesite un poco más de tiempo y esfuerzo para alcanzar el valor deseado, por tal motivo no se logra contar con el potencial que se espera a la salida, sin embargo, el valor que se alcanza es muy cercano al deseado y es perfectamente aceptable, ya que si la separación entre placas paralelas es de 1 cm se alcanzaría idealmente campos eléctricos cercanos a los 25kV/cm que perfectamente pueden ofrecer una degeneración celular irreversible, tal como se muestra en la literatura.

También se cuenta con una duración de pulsos mucho mayor que la descrita anteriormente, pero se mantiene constante el tiempo entre pulsos (ver figuras 4.12, 4.14), se puede observar que en este caso el alto voltaje de salida corresponde al voltaje de entrada multiplicado por la ganancia del transformador (1000), esto se

debe a que el tiempo de encendido del pulso es mucho mayor relacionado con el tiempo que necesita el capacitor de alto voltaje para cargarse completamente permitiendo así suministrar el valor de tensión deseado. La señal presenta una forma similar en las dos cámaras utilizadas, tanto en los pulsos cortos como en los de larga duración, solo sobresale la diferencia de potencial que acumula el condensador interno, pero que perfectamente satisface los requerimientos (ver figura 4.15, diferencia entre pulsos de corta y larga duración).

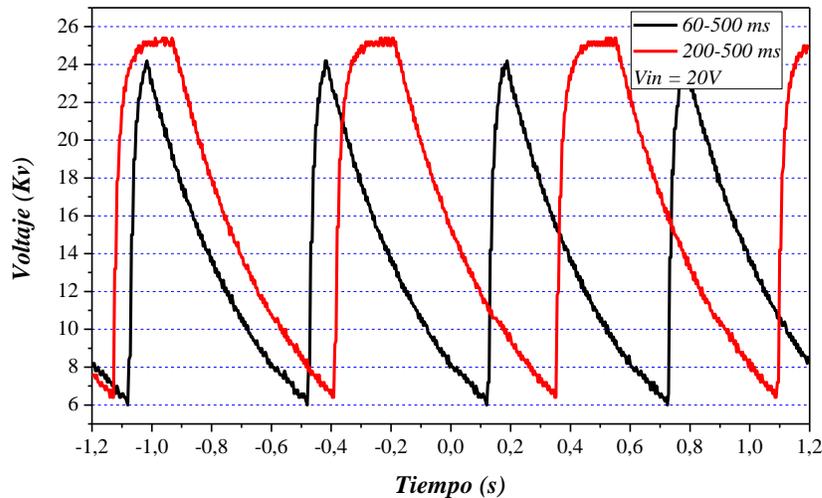


Figura 4.15. Comparación pulso 50-500 ms y 500-500, cámara 0,5 cm [Fuente propia].

Como se observó en todas las figuras desde la 4.8-4.14 la respuesta del sistema en tratamiento pulsado es de carácter exponencial, esta naturaleza es descrita por el circuito de la figura 4.16. La descarga de un capacitor normalmente es de índole exponencial, tanto el tiempo de carga como el de descarga están directamente relacionada con la capacidad y la resistencia, de forma que variando la resistencia del circuito se puede acortar o aumentar el proceso de carga y descarga del condensador [31]. La descarga no solo está siendo afectada por la resistencia propia del circuito (flyback implementado), sino que también por la resistividad de la cámara y la sonda usada para lograr medir la señal; si se realizara la prueba sin involucrar la sonda con su resistencia el cambio en la señal puede ser más rápido o más lento, pero se asume que la característica exponencial no se perdería totalmente, esto se debe a que el medio a tratar posee un valor de resistencia eléctrica y el flujo eléctrico a través de él se llevará a cabo paulatinamente y no de una manera súbita, como si fuese un corto circuito el cual descargaría casi instantáneamente el elemento.

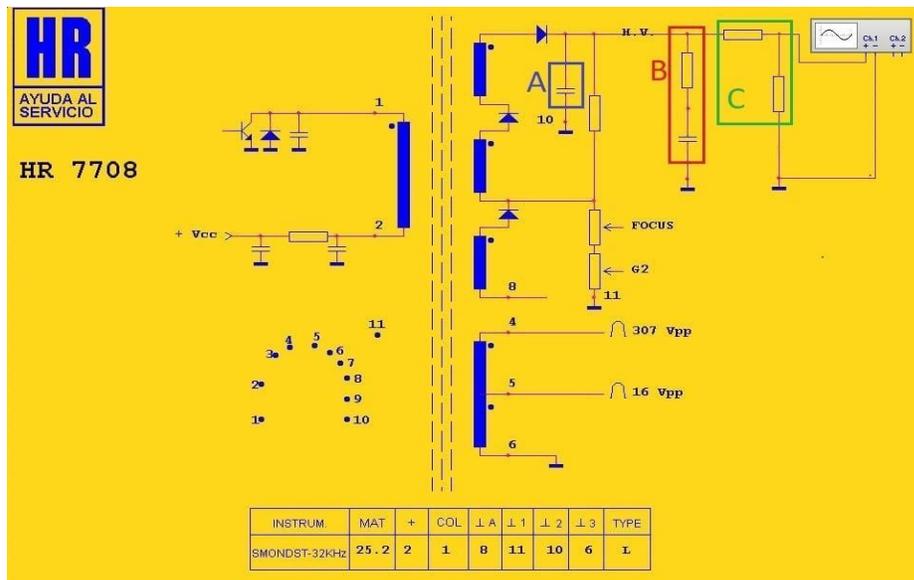


Figura 4.16. Esquema interno del elevador del voltaje y acople de la cámara de tratamiento. A: Capacitor de alto voltaje, B: Cámara de tratamiento y C: Sonda de alto voltaje [30]

Para este ítem la transición de la señal (máximo-mínimo), está instaurado en el sistema para que sea de 500 ms, que perfectamente hacen que la señal baje a un valor que oscila entre 4kV – 6kV, si se desea que la señal llegue totalmente a 0V es necesario que el tiempo de apagado sea superior a los 700 ms; por lo tanto, el ancho de pulso se incrementa y no solo se debe considerar el tiempo que la señal permanece en alto sino también el tiempo en que el pulso disminuye hasta el 37% de su valor máximo [5], de lo que si se tiene certeza en que el campo eléctrico será máximo y se mantendrá en este valor durante el tiempo que se ha definido, luego de eso no es posible definir un valor de campo eléctrico por la forma de la onda. El campo eléctrico se considera uniforme y se desprecian los efectos de borde gracias a que se trabaja con placas circulares paralelas de una separación corta, esta característica se mantiene con el fin de no tener en cuenta los efectos de borde.

4.3.1.2. Reducción en ancho de pulso

Como se ha mencionado en todo lo anterior se tuvieron ciertos problemas con la transición en el sistema, más específicamente en la transición que se da cuando se interrumpe el suministro de energía al flyback, el flyback usado posee características de funcionamiento definidas, tal como: el tiempo que tarda su condensador interno en cargarse (>50 ms), el tiempo de descarga (>500 ms), pero estas características son definidas por los elementos internos y externos con los que cuenta el elemento (figura 4.16); entendiendo que el sistema funciona en conjunto y buscando mejorar el rendimiento del prototipo se buscó anexar elementos que permitieran reducir el tiempo de carga y descarga del condensador

de alta tensión, como se sabe y se ha descrito la carga y descarga del condensador depende de su capacitancia y las resistencias que estén acopladas al mismo, un valor de resistencia bajo acoplado en paralelo al condensador permitiría un descenso en el tiempo de descarga, esto fue implementado en el sistema en donde se obtuvo un descenso en el tiempo de descarga pero afectaba notoriamente el valor de carga que podía alcanzar el condensador, a pesar de implementar diferentes elementos no fue posible describir en principio el funcionamiento de este sistema.

Se implementó otro transformador de alto voltaje (figura 4.17), para evitar confusiones el flyback utilizado en los ítems 4.3.1, 4.3.2 será llamado flyback 1 en este apartado y cuando se haga referencia al nuevo elemento se denotará como flyback 2.

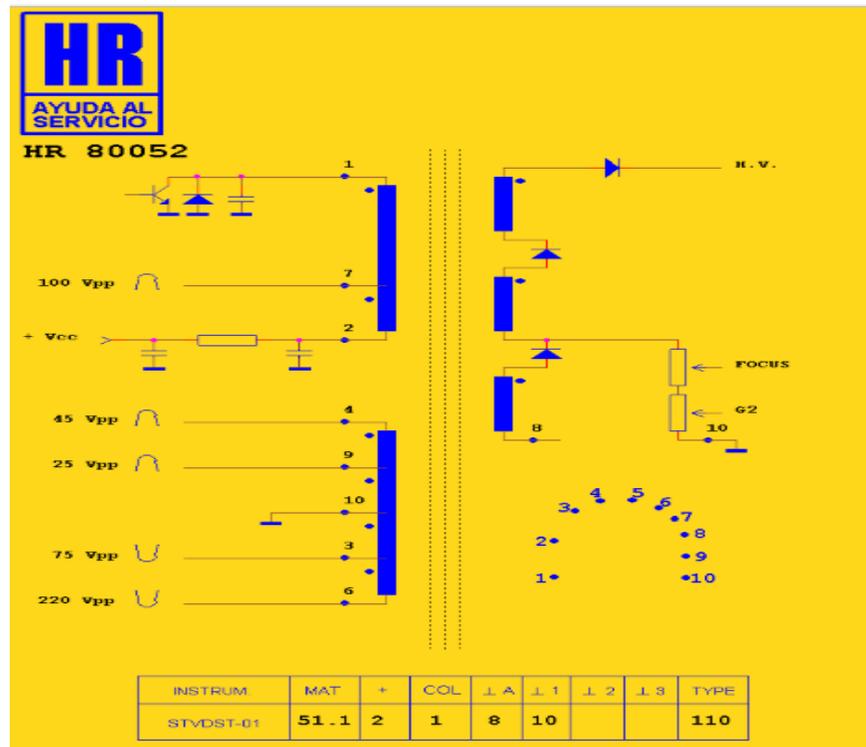


Figura 4.17. Esquema Flyback 2 [30].

El flyback 2 (figura 4.17), posee ciertas diferencias con el primer flyback utilizado (figura 4.16), pero su funcionamiento es básicamente el mismo, al complementar el sistema con la cámara de tratamiento y la sonda de alta tensión se puede modelar como el siguiente circuito (ver figura 4.18).

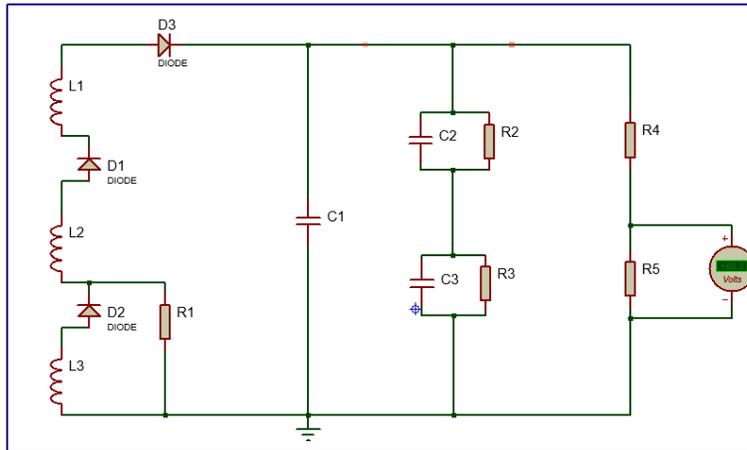


Figura 4.18. Esquema general, cámara, sonda, capacitor interno, [Fuente propia].

Se presenta la salida del sistema tomando en cuenta solo el devanado secundario (ver figura 4.18), el condensador C1 representa el condensador interno del flyback 2, los arreglos C1 || R2 y C3 || R3 son un arreglo de elementos que representan la cámara de tratamiento con la que se cuenta, C1 || R2 son el elemento que describe la lámina de teflón que recubre el electrodo, C2 || R3 son el equivalente al medio líquido (estos elementos actúan como un conjunto), R1 es un elemento resistivo en el interior del flyback 2 y R4, R5 son las resistencias de la sonda de alta tensión, este esquema también es válido para el flyback 1 utilizado en las pruebas anteriores.

Sin olvidar que en este apartado se busca exponer las etapas utilizadas para obtener una disminución en los tiempos de carga y descarga del condensador y así conseguir pulsos de forma cuadrada; se presenta en primer lugar la respuesta del sistema anterior (figura 4.18) a tiempos de 30-100, 50-50 y 500-500 estos valores representan el tiempo durante el cual se suministra la señal al flyback 2 y el tiempo donde este no recibe suministro de energía.

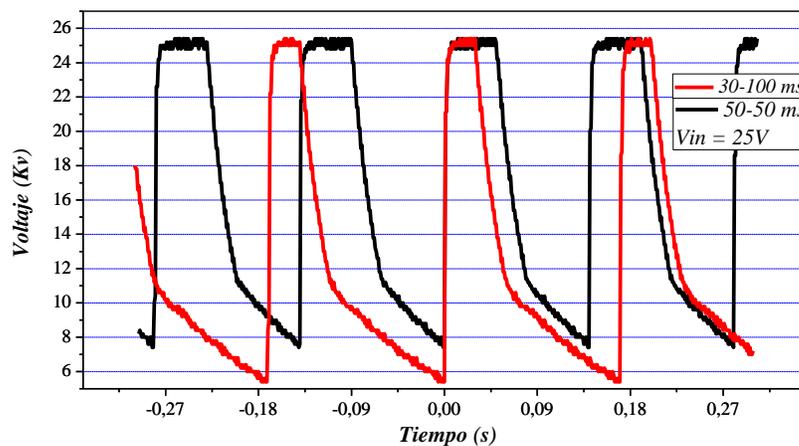


Figura 4.19. Tiempo 30-100 ms y 50-50 ms [Fuente propia].

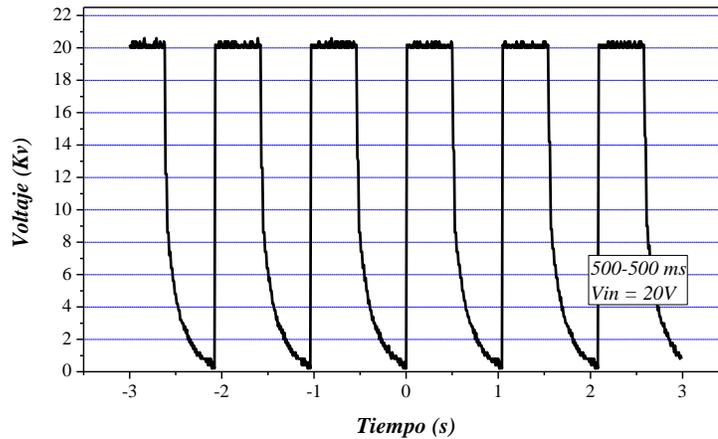


Figura 4.20. Tiempo 500-500 ms [Fuente propia].

La señal de salida que presenta el dispositivo permite observar que su tiempo de respuesta es un poco más rápido en relación al que se obtiene con el flyback 1, el dispositivo alcanza rápidamente el valor máximo (< 5 ms según instrumentos de medida), pero igual que en casos anteriores la transición de mayor a menor voltaje presenta un comportamiento exponencial (ver figuras 4.19, 4.20), durante tiempos de 100 ms y 50 ms se corta el suministro hacia el flyback 2, pero no hay una descarga total en el arreglo (ver figura 4.19), lo mismo que ocurre con el flyback 1, el conjunto que comprende el condensador interno en el módulo de alto voltaje y la cámara de tratamiento (que también está involucrada), tardan alrededor de 200 ms en descargarse totalmente según los instrumentos de medida utilizados (figura 4.20); el tiempo que dura esta transición es importante debido a que se necesita que la señal pase rápido a menos del 37% de su valor, para poder obtener pulsos de menor duración y posiblemente más efectivos, a tal punto de poder obtener una señal netamente cuadrada o muy cercana a esta, con esto en consideración el sistema se redujo de tal manera que pudiese describir el comportamiento del mismo mediante un arreglo fácil de manejar (ver figura 4.21).

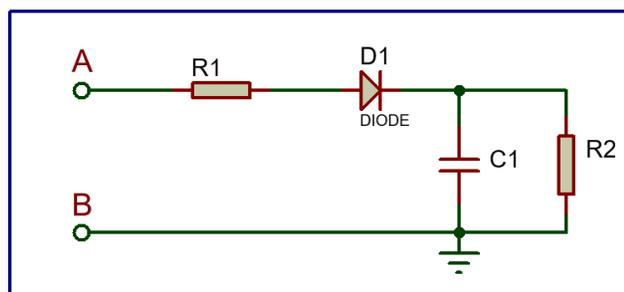


Figura 4.21. Sistema reducido, resistencia interna, capacitor de alto voltaje y sonda [Fuente propia].

La figura 4.21 es una representación del sistema donde se considera la resistencia interna que posee el flyback 2 (R_1), la capacitancia C representa el condensador interno en conjunto con la capacitancia que ofrece la cámara de tratamiento, es necesario involucrar la resistencia de la sonda ya que esta afecta la medición. Basado en lo anterior y tomando en cuenta que después de efectuarse la elevación de voltaje este llegará a los terminales A y B. Se tiene que la carga y descarga del sistema se describe por.

$$V(t) = \frac{R_2}{(R_2 + R_1)} V_F \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right) \text{ donde } \tau_1 = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} C \quad (3.1)$$

Ecuación 4.1. Carga, $V(t)$ voltaje final, V_F voltaje de salida del flyback 2.

$$V(t) = V_0 e^{\frac{-t}{\tau_2}} \text{ donde } \tau_2 = R_2 C \quad (4.2)$$

Ecuación 4.2. Descarga.

La carga y la descarga son dos procesos separados, en el proceso de carga son importantes tanto R_1 como R_2 , mientras que en el proceso de descarga R_1 es deshabilitada por el diodo D_1 , por ello se tienen una constante de tiempo diferente; a partir de algunas medidas se obtuvo que R_1 (resistencia interna del flyback 2) cuenta con un valor de $11M\Omega$ y la capacitancia del conjunto está alrededor de 40 pF , para determinar la viabilidad de esta descripción se realizaron una serie de pruebas donde se variaba R_2 y se determinaba de manera teórica y práctica la variación en el voltaje final y el tiempo de descarga del conjunto, para variar R_2 sin eliminar la sonda de alto voltaje que permite la medida se ubicaban resistencias en paralelo a la cámara de tratamiento con lo que se garantiza que la cámara, la sonda y la resistencia adicional se encuentran al mismo potencial de salida del flyback 2. Es importante mencionar que un capacitor alcanza el 99% de su valor máximo en 5 veces su constante de tiempo (τ), del mismo modo su descarga se da en este mismo tiempo, si lo dicho anteriormente es correcto cuando el sistema se encuentra cargado (régimen estacionario) se tiene que:

$$V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_F \quad (4.3)$$

Donde V es el voltaje que sale del condensador de alto voltaje y llega a las placas de los electrodos, V_F es el valor que llega a los terminales A y B que se espera que sea 1000 veces el valor de la fuente variable, esto gracias a que el transformador posee una ganancia de 1000 (trabajando en su frecuencia óptima), $\frac{R_2}{R_1+R_2}$ es un

factor fuertemente ligado a la carga máxima que se puede tener en el condensador, se puede asumir como 1 siempre y cuando el valor de $R_2 \gg R_1$, si no, el voltaje que llega al condensador y sale del flyback 2 es notablemente afectado, el tiempo de carga será entonces $t = 5 * \left(\frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}\right) C$ y el tiempo de descarga solo será afectado por R_2 con lo que se tiene $t = 5 * R_2 * C$.

Validación.

A continuación, se presentan una serie de resultados con el fin de validar la descripción hecha anteriormente, en esta se trabaja variando R_2 .

$$R_1 = 11 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 166,8 \text{ M}\Omega$$

$$\text{Capacitancia } C = 40 \text{ pF}$$

$V = 0,9381 * V_F$ (Ecuación 4.3), tiempo de carga $t=2\text{ms}$ y tiempo de descarga de 33,3 ms.

Tabla 4.3. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 166,8 MΩ [Fuente propia].

Entrada (v)	Salida (v) (aproximado)	Voltaje condensador (v), teórico	Descarga condensador (ms), teórico	Voltaje condensador (v), medido	Descarga condensador (ms), medido	Voltaje mínimo (mv)	Error absoluto para voltaje	Error relativo para voltaje (%)
10	10000	9382	33,3	9440	33	32	-58	0,6
15	15000	14071	33,3	14200	27	0	-129	0,9
20	20000	18762	33,3	18600	33	60	165	0,87

$$R_1 = 11 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 200,2 \text{ M}\Omega$$

$$\text{Capacitancia } C = 40 \text{ pF}$$

$V = 0,9479 * V_F$ (Ecuación 4.3), tiempo de carga $t=2\text{ms}$ y tiempo de descarga de 40 ms.

Tabla 4.4. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 200,2 MΩ [Fuente propia].

Entrada (v)	Salida (v) (aproximado)	Voltaje condensador (v), teórico	Descarga condensador (ms), teórico	Voltaje condensador (v), medido	Descarga condensador (ms), medido	Voltaje mínimo (mv)	Error absoluto para voltaje	Error relativo para voltaje (%)
10	10000	9479	40	9360	44	-8	119	1,25
15	15000	14218	40	14200	40	-8	18	0,12
20	20000	18950	40	19000	40	-8	-50	0,26

$R_1 = 11 \text{ M}\Omega$

$R_2 = 1000 \text{ M}\Omega$

Capacitancia $C = 40 \text{ pF}$

$V = 0,989 * V_F$ (Ecuación 4.3), tiempo de carga $t=2\text{ms}$ y tiempo de descarga de 200 ms.

Tabla 4.5. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 1000 $\text{M}\Omega$ [Fuente propia].

Entrada (v)	Salida (v) (aproximado)	Voltaje condensador (v),teórico	Descarga condensador (ms), teórico	Voltaje condensador (v), medido	Descarga condensador (ms), medido	Voltaje mínimo (mv)	Error absoluto para voltaje	Error relativo para voltaje (%)
10	10000	≈ 9900	200	9920	172	40	-20	0,2
15	15000	≈ 14850	200	15000	180	20	-150	1
20	20000	≈ 19800	200	20000	164	80	-200	1

$R_1 = 11 \text{ M}\Omega$

$R_2 = 115,04 \text{ M}\Omega$

Capacitancia $C = 40 \text{ pF}$

$V = 0,9127 * V_F$ (Ecuación 4.3), tiempo de carga $t=2\text{ms}$ y tiempo de descarga de 23 ms.

Tabla 4.6. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 115,04 $\text{M}\Omega$ [Fuente propia].

Entrada (v)	Salida (v) (aproximado)	Voltaje condensador (v),teórico	Descarga condensador (ms), teórico	Voltaje condensador (v), medido	Descarga condensador (ms), medido	Voltaje mínimo (mv)	Error absoluto para voltaje	Error relativo para voltaje (%)
15	15000	13690	23	13600	26	-10	90	0,6
20	20000	18250	23	18200	25	-20	50	0,27
25	25000	22817	23	23000	27	0	-183	0,8

Como se aprecia en las tablas 4.3-4.6, la descripción arroja valores con porcentajes de error bajos en relación con las medidas trabajadas, por ello se considera que la descripción es válida y satisface las necesidades que presenta el dispositivo, gráficamente también se puede observar el comportamiento que el sistema tiene con valores de resistencia diferentes.

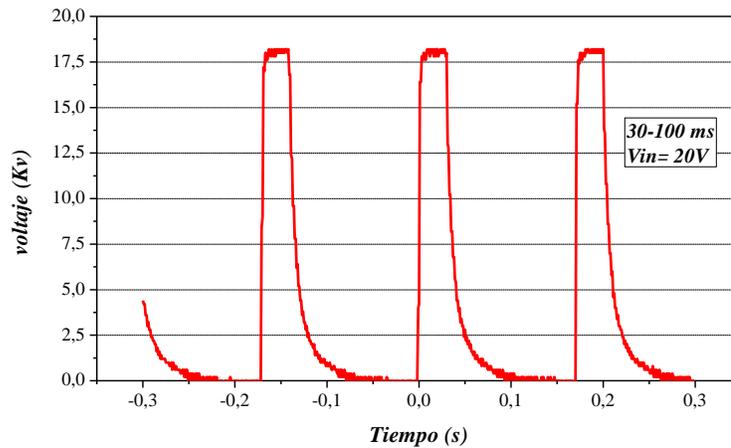


Figura 4.22. Señal con un factor de carga de 0,9127 (91% de la entrada), [Fuente propia].

El sistema alcanza el cero rápidamente (ver figura 4.22), como se aprecia en la tabla 4.6 este valor es de 25 ms, aunque se afecta el valor máximo de voltaje se consigue un mayor control en el ancho de los pulsos y las transiciones que poseen, en este caso la señal de entrada es de 20V al tener un factor de 1000 en el transformador este genera 20 kV aproximadamente pero la señal no alcanza este valor a la salida del condensador de alto voltaje por los valores de resistencia que se posee (ecuación 4.3), sin embargo la ecuación 4.3 permite determinar qué voltaje se requiere para alcanzar los 20 kV si fuese el caso; para ello se necesitan 22V a la entrada que al ser multiplicados por el factor del transformador arrojan 22 kV que al interactuar con las resistencias y el condensador arrojan los 20 kV que llegan a los electrodos (ver figura 4.23).

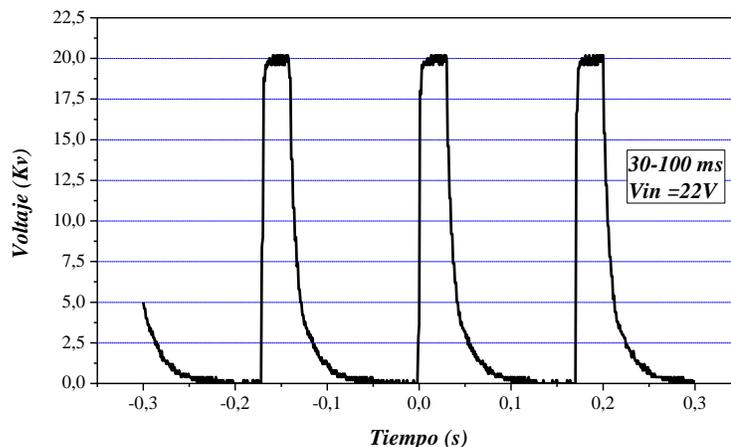


Figura 4.23. Señal de 20 kV con 25 ms para llegar a cero [Fuente propia].

Como última prueba para validar los valores que se obtienen a partir de las ecuaciones 1 y 2 se tiene lo siguiente:

$$R_1 = 11 \text{ M}\Omega$$

$$R_2 = 212,75 \text{ M}\Omega$$

$$\text{Capacitancia } C = 40 \text{ pF}$$

$V = 0,953 \cdot V_F$ (Ecuación 4.3), tiempo de carga $t < 2 \text{ ms}$ y tiempo de descarga de 42 ms.

Tabla 4.7. Respuesta general del sistema frente a una resistencia externa de 212,7 M Ω [Fuente propia].

Entrada (v)	Salida (v) (aproximado)	Voltaje condensador (v),teórico	Descarga condensador (ms), teórico	Voltaje condensador (v), medido	Descarga condensador (ms), medido	Voltaje mínimo (mv)	Error absoluto para voltaje	Error relativo para voltaje (%)
15	15000	14295	42	14400	39	0	-105	0,7
20	20000	19060	42	19000	39	-10	60	0,3
25	25000	23825	42	23600	39	0	225	0,94

Para un valor de 20V el transformador arroja 20 kV, pero debido a las resistencias utilizadas solo llegará 0,953 de este valor a los electrodos de la cámara, cerca del 95% (ver tabla 4.7), sin embargo, la señal perfectamente puede alcanzar 20kV al fijar la fuente en 21V (ver figura 4.24), valor deducible teniendo en cuenta la ecuación 4.3 y la ganancia del transformador.

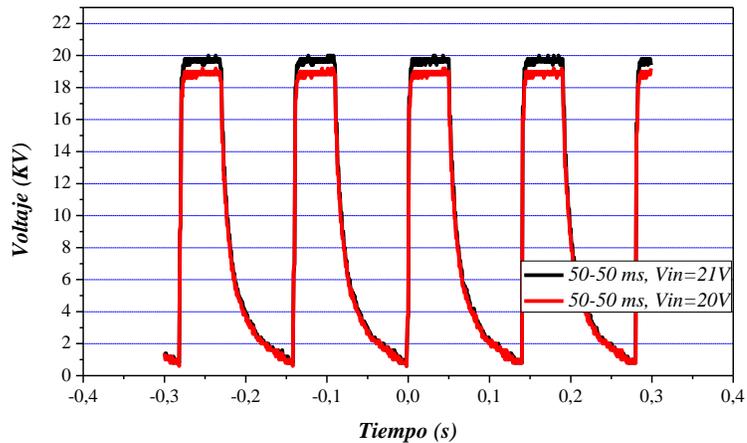


Figura 4.24. Señal con el 95% de 20 kV y 20kV al fijar la fuente en 21V, [Fuente propia].

Con los gráficos y tablas presentados anteriormente se puede ver como las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 permiten obtener valores de suma importancia como lo son el potencial que produce el campo eléctrico, el tiempo que tarda la señal en

llegar a los electrodos y el tiempo que tarda en descargarse todo el sistema. Lograr producir pulsos de menor duración es un factor importante y dependerá del valor de resistencia que se trabaje, por el momento se pueden trabajar con pulsos de 5ms o incluso menos (valor deducible a partir de la ecuación 4.1 al considerar el tiempo de carga $\tau_1 = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} C$), involucrar el tiempo que tarda la señal en alcanzar el 37% de su valor máximo se hace menos relevante (si se desea una señal cuadrada) gracias al corto periodo de que necesita la señal para descender a su mínimo valor (algunos cálculos permiten saber que la señal alcanza el 37% en valores menores a 10 ms), todo esto es posible con valores apropiados de R_2 .

Al intentar realizar este tipo de modificaciones al flyback 1, utilizado en las primeras medidas, se notaban cambios significativos en el potencial eléctrico que se podía conseguir, del mismo modo la reducción en el tiempo en el cual, la señal realiza sus cambios no fue lo suficientemente importante como para buscar afectar las características internas del flyback 1 por medio de la utilización de elementos externos, lo que sí es importante mencionar, es que los dos elementos utilizados permitieron conseguir valores de salida con una ganancia de 1000 veces el valor de entrada, el primer flyback utilizado posee una estructura interna más compleja en comparación con el flyback 2, razón por la cual también se descartó buscar reducciones de tiempo con este elemento.

Al final se tienen pulsos de caída exponencial y de forma cuadrada, ambos resultados pueden ser utilizados para realizar pruebas y verificar su efectividad en la inactivación de bacterias (figuras 4.25 y 4.26, señal flyback 1 y flyback 2), la diferencia en las señales obtenidas es el tiempo que tardan en pasar de un valor máximo a un menor valor de tensión, en el flyback 1 las transiciones son más lentas y la señal es principalmente exponencial, aunque se podrían realizar modificaciones para obtener una señal cuadrada (modificaciones que no se realizaron, la razón ya se mencionó anteriormente), el flyback 2 permite obtener señales de tipo exponencial y de forma cuadrada, pero al obtener una señal de forma cuadrada se pierde en la transferencia de potencial sobre la cámara, es importante resaltar que la forma en las señales depende del valor de resistencia en la cámara y en el instrumento de medida (sonda de alta tensión) y su modificación es la que permite obtener pulsos de menor o mayor duración.

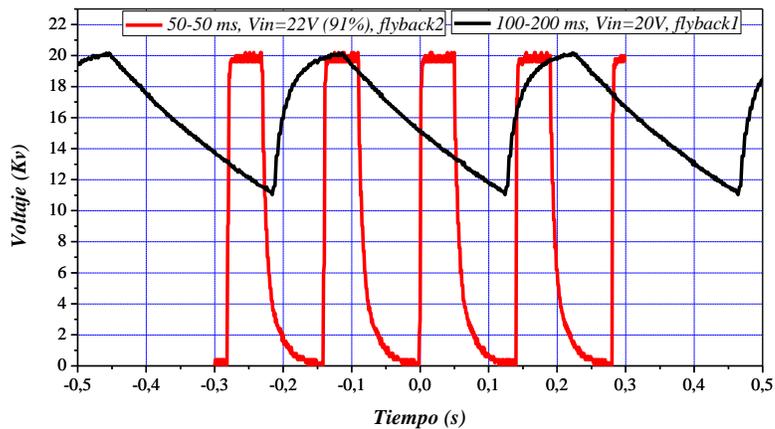


Figura 4.25. Comparación en la forma de la señal en flyback 1y flyback 2 [Fuente propia].

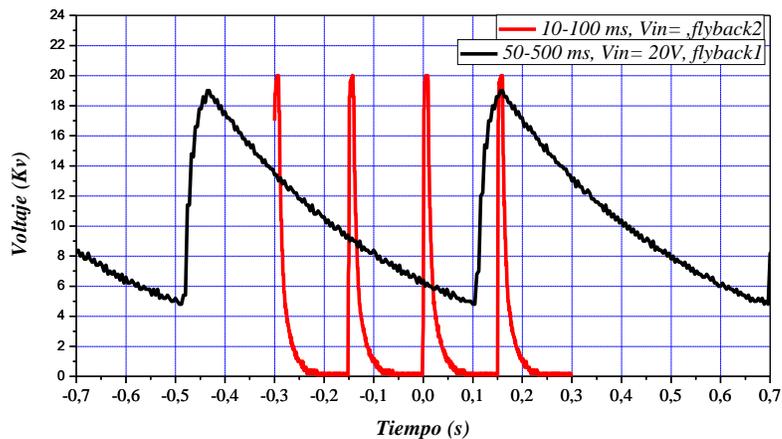


Figura 4.26. Comparación en la forma de la señal en flyback 1y flyback 2 [Fuente propia].

4.3.2. RESPUESTA EN CÁMARA DE TRATAMIENTO CON MEDIO LÍQUIDO, SEÑAL CONTINUA.

Para el tratamiento de un medio líquido con señal continua los parámetros fundamentales son la intensidad del campo eléctrico y el tiempo de tratamiento. Se hace una variación del voltaje de 1-30V y se mide su valor de salida de alto voltaje, este procedimiento se lleva a cabo con las dos cámaras de tratamiento implementadas.

Las figuras 4.27 y 4.28 son las respuestas del tratamiento continuo en cada una de las cámaras, en donde se puede notar como los datos están sobre la línea de tendencia y que realmente el elevador de voltaje multiplica aproximadamente mil veces el voltaje de entrada.

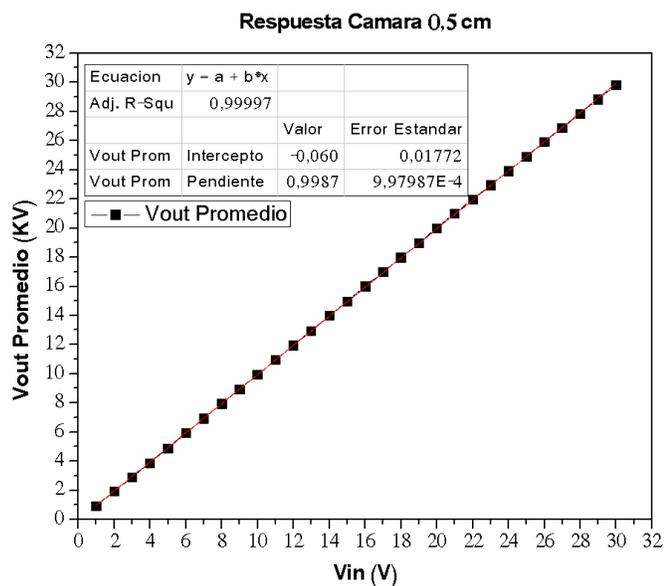


Figura 4.27. Resultado del voltaje de salida del tratamiento continuo en cámara de 0,5 cm [Fuente propia].

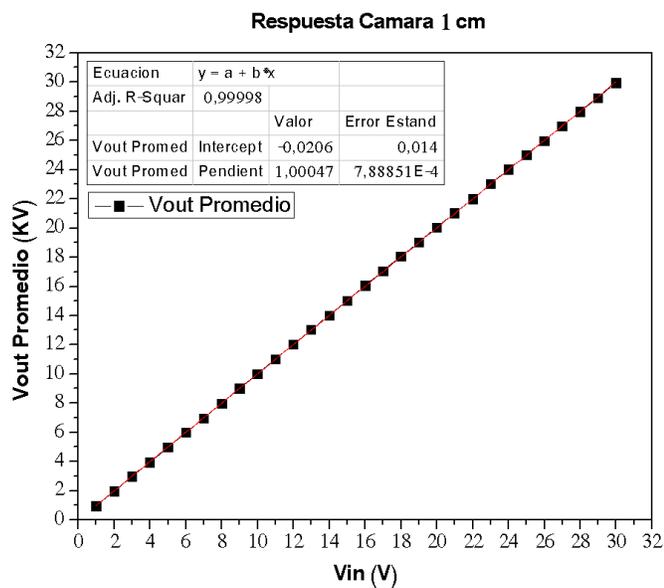


Figura 4.28. Resultado del voltaje de salida del tratamiento continuo en cámara de 1 cm [Fuente propia].

Este tipo de tratamiento permite la implementación de otro diseño de cámaras en donde el medio pueda tener un movimiento constante, este tipo de cámara se han denominado continuas, al implementar sistemas de este tipo se consigue generar pulsos virtuales, los pulsos virtuales poseerán un ancho de pulso y un tiempo de tratamiento igual que en una cámara estática, solo que estos parámetros se relacionan con las propiedades que posee un líquido en movimiento, por ejemplo, densidad, velocidad y viscosidad entre otras. Normalmente en este tipo de procesos se busca que el medio en movimiento posee un flujo laminar [9], este tipo de procesos representan una alternativa útil gracias a que no se hace necesario generar alternancias en el sistema para producir el campo eléctrico, solo se requiere que el campo se encuentre fijo a un determinado valor, mientras que el líquido circula por la zona donde se establece el campo eléctrico, pero esta última parte depende de las características que posee el conducto que transporta el medio líquido, normalmente se utiliza este tipo de tratamiento con cámaras coaxiales.

CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una fuente de campo eléctrico pulsado para aplicación en tratamientos de pasteurización de medios líquidos. La fuente está en la capacidad de producir tratamientos con señal continua y pulsada. Su rango de tensión es 1-30 kV, y en conjunto con las cámaras de tratamiento se puede obtener el campo eléctrico expuesto en los requerimientos de diseño.
- Los pulsos poseen forma de señal cuadrada y exponencial, la duración de estos pulsos está sujeta a los elementos conectados al módulo de alto voltaje, lo que permite contar con la posibilidad de generar diversas variaciones en su duración y poder así tener numerosos valores para estudiar la inactivación de bacterias en el futuro.
- La interfaz de usuario implementada permite elegir entre el tratamiento de señal continua o pulsada, así como también el tiempo de duración del tratamiento o el número de pulsos a aplicar al líquido de prueba.
- Los materiales y los componentes usados para la construcción del equipo son de bajo costo, fácil obtención y manejo. Adicionalmente, el microcontrolador implementado es reprogramable lo que permite modificar o crear una nueva serie de tratamientos.
- En la etapa de pruebas de la señal continúa actuando en las cámaras de tratamiento, se presentaron algunos problemas, unos componentes electrónicos sufrieron daños debido al contacto directo del potencial entre electrodos, por lo que es valioso el uso de un dieléctrico para aislar uno de los electrodos.
- El tiempo en el que permanece la señal pulsada en alto influye sobre la amplitud, ya que, si el tiempo programado en el firmware es menor al tiempo en que tarda el condensador de alto voltaje en alcanzar su carga completa, afectará la intensidad del campo eléctrico y será de mayor o menor magnitud dependiendo de qué tan lejos o cerca esté del tiempo de carga de dicho capacitor.
- El tipo de elevador de voltaje implementado proporciona una baja corriente y sumado el aislamiento de uno de los electrodos para que no haya contacto con el medio líquido, no se produce calentamiento de la muestra, siendo un resultado muy atractivo para esta técnica de pasteurización no térmica.

- Es posible un mayor control sobre la duración de los pulsos, siempre y cuando se pueda obtener la forma en que el sistema de alto voltaje responda a cada elemento conectado (modelo), sin embargo, un mayor control en la duración y ancho de los pulsos ocasiona pérdidas en el momento de obtener valores específicos de tensión, por ello es de suma importancia tener en cuenta ambos aspectos con el fin de obtener el mejor rendimiento del equipo.
- Generar variaciones en la salida del sistema mediante el uso de elementos externos, permiten suprimir o no darle importancia a parámetros que afectarían notoriamente el funcionamiento del equipo, al poder omitir ciertos factores se puede aumentar la efectividad en los tratamientos y disminuir reacciones no deseadas en el mismo.

RECOMENDACIONES

- Una opción para futuros trabajos de investigación es probar la efectividad de la intensidad del campo eléctrico generado por este equipo, mediante la inactivación de bacterias.
- Desarrollar un sistema que permita el tratamiento de un fluido continuo, para ello, es necesario el diseño y construcción de una cámara de tratamiento en donde el medio líquido experimente la misma acción que se obtienen con cámaras estáticas y pulsos.
- Implementar un sistema elevador de voltaje que proporcione una mayor corriente, este factor es importante si se está trabajando con materiales de una conductividad relativamente alta, debido a que este tipo de elementos exigen un mayor suministro de energía en equipos de este tipo.
- Se recomienda cambiar el transformador implementado en la fuente variable, debido a que este sufre un calentamiento que puede perjudicar la vida útil y correcto funcionamiento del equipo. El transformador fue extraído de un microondas y modificado para que responda a los requerimientos de la fuente variable, pero sus características básicas ocasionan que éste experimente un aumento de temperatura cuando está en funcionamiento por un tiempo prolongado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] T. G. Cerón-Carrilo, E. Palou y A. López-Malo. “Pulsos eléctricos: fundamentos y aplicaciones en alimentos”. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos* 4-1, pp. 9-26, (2010).
- [2] J. E. Zapata M, O. L. Martinez, B. C. Salazar, G. Moreno, F. Gallego, “Conservación de los alimentos por campos eléctricos pulsados de alto voltaje”, *Vitae* pp 11-18, (1999).
- [3] D. Sosa. “Pulsos eléctricos de alta tensión para conservación de alimentos y esterilización médica”. XIV Seminario de Ing. Biomédica– Facultades de Medicina e Ingeniería – Univ. De la Rep. Oriental del Uruguay, 2006, pp 1-6.
- [4] Francesca De Vito. “Application of pulsed electric field (PEF) techniques in food processing”. (Ph.D. Course in Chemical Engineering). Universidad de Salerno, Salerno-Italia.
- [5] I. Álvarez Lanzarote, J Raso Pueyo. “Aplicaciones de los pulsos eléctricos de alto voltaje en la industria alimentaria”. *Nuevas tecnologías en la conservación y transformación de los alimentos*, pp. 94-110. Recuperado de:
http://www.institutotomas Pascualsanz.com/descargas/formacion/publi/Libro_Conse rva_Transforma_Alimentos.pdf
- [6] J. J. Fernández-Molina, G. V. Barbosa-Cánovas, B. G. Swanson. “Tecnologías emergentes para la conservación de alimentos sin calor”. *Arbor* CLXVIII, 661, pp 155-170, enero 2001.
- [7] A. F. Guerrero Guerrero, “Aportaciones al Diseño de Fuentes de Alta Tensión Pulsadas”. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales, (2013).
- [8] A. Casp y J. Abril, “Procesos de conservación de alimentos”. *Colección Tecnología de alimentos; Panorama Histórico de la conservación de alimentos*, pp 19-32, (1999).
- [9] J. A. Gonzáles Sosa, “Plataforma experimental para la esterilización industrial de agua mediante electroporación”. (Tesis). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, (2011).
- [10] J. C. Alvarez, J. E. Molina y R. Sarmiento, “Diseño y construcción de una fuente de descargas pulsadas de alto voltaje para estudio espectral de gases nobles

ionizados”. Revista de la Sociedad Colombiana de Física, ISSN 0120-2650, Vol. 38, N^o. 2, pags. 834-837, 2006.

[11] K.H. Schoenbach, S. Katsuki, R.H. Stark, E.S. Buescher, S.J. Beebe, “Bioelectrics - New applications for pulsed power technology”. IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 30, no. 1, february 2002.

[12] Departamento Nacional de Planeación DNP, “Pérdida y Desperdicio de Alimentos en Colombia”. Estudio de la Dirección de Seguimiento y Evaluación de Políticas Públicas. Bogotá, D. C., Colombia, (2016).

[13] J. E. Eirez Izquierdo, F. Rodríguez González, S. Pavoni Oliver. “Diseño de una Fuente de Alto Voltaje”. RIELAC, Vol.XXXIV 3/2013 p.22-31.

[14] A. Rivas Soler, “Aplicación de Pulsos Eléctricos de Alta Intensidad en una bebida mezcla de zumo de naranja y leche: Efectos sobre Escherichia coli, Saccharomyces cerevisiae, componentes nutricionales y calidad”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España, (2012).

[15] M. G. Méndez Ramos, “Estudio del efecto del campo eléctrico sobre las vitaminas C, E y A del aguacate”. (Tesis de maestría), Instituto Politécnico Nacional Centro De Investigación En Biotecnología Aplicada, (2010).

[16] A. A. Lopez Licon, “Diseño de un sistema y construcción de una cámara estática de tratamiento para la conservación de alimentos utilizando campos eléctricos de alta intensidad”. (Tesis pregrado), Universidad tecnológica de la mixteca, México, (2004).

[17] Toro. H. Toro Llanos, “Prototipo Electrónico Generador de Campo Eléctrico para la Rotura de la Pared Celular de las Microalgas”. (Tesis de pregrado). Universidad de San Buenaventura, Cali, (2016).

[18] Federal Mogul. “Información completa sobre las bobinas de encendido”, Información técnica n. 07.

[19] J. Posada, “Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación”. Universidad Autónoma de Occidente, Cali (Colombia), (2005).

[20] Arduino, (2018). [Online] Obtenido de: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

[21] D. I. Carrillo Ampudia, “Estudio de Reducción de Carga Microbiana Inicial de Leche Cruda Entera Aplicando Pulsos Eléctricos de Alto Voltaje”. (Tesis de pregrado). Universidad Técnica de Ambato, Ambato– Ecuador, (2010).

[22] J. E. Zapata M, O. L. Martinez, B. C. Salazar, G. Moreno, F. Gallego, “Inhibición del Crecimiento de Escherichia Coli por Aplicación de Campos Eléctricos Pulsados de Alta Intensidad”. VOL. 25 N° 8, Interciencia, pp 391-397, (2000).

[23] Fincan, M. “Pulsed Electric Field Treatment of Plant Tissue”. Mustafa Fincan (Mustafa.Fincan@ofir.dk), or Dept of Food engineering, Lund University, or The library; UB, Lund University, (2003). Recuperado de:

[http://portal.research.lu.se/portal/en/publications/pulsed-electric-field-treatment-of-plant-tissue\(a3702af5-8091-4201-9fd4-76262fb54df8\).html](http://portal.research.lu.se/portal/en/publications/pulsed-electric-field-treatment-of-plant-tissue(a3702af5-8091-4201-9fd4-76262fb54df8).html)

[24] H. Hernández-Sánchez, “Aplicación de tecnologías no térmicas en el procesamiento de leche y derivados”. En Ramírez-Ortiz, M.E. (Ed.). Tendencias de innovación en la ingeniería de alimentos. Barcelona, España: OmniaScience. 73-89. (2015).

[25] Gustavo V. Barbosa-Canovas, Merle D. Pierson, Q, Howard Zhang, And Donald W. Schaffner. “Pulsed Electric Field - Supplement: Kinetics of microbial inactivation for alternative food processing technologies”. Farkas, D & Hoover, D. (2000). Journal of Food Science. V 65. Pp 65-79. Recuperado de:

<https://www.fda.gov/downloads/food/foodborneillnesscontaminants/ucm545175.pdf>

[26] Arduino Uno Rev3, (2018). [Online] Obtenido de: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>

[27] “Características técnicas del Arduino Uno”. [Online] Obtenido de: <http://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/ralvgon/files/2013/05/Características-Arduino.pdf>

[28] “Introducción a la Electrónica De Potencia”. pp 204-212, 226. [Online] Obtenido de: https://issuu.com/hgomezpalencia/docs/introducci_n_de_la_electr_nica_de

[29] Aceroscol, “Aceros inoxidables austeníticos”. SAE 316. (2015). [Online] Obtenido de: <http://www.aceroscol.com/?p=b10603>

[30] Electronic Components, HR 7708. [Online] Editado de: <http://www.hrdiemen.com/reparation/flyback/scheme/7708>

[31] RTR Energía. Condensadores Eléctricos. [Online] Obtenido de: http://www.rtrenergia.es/downloads/condensadores_2012.pdf

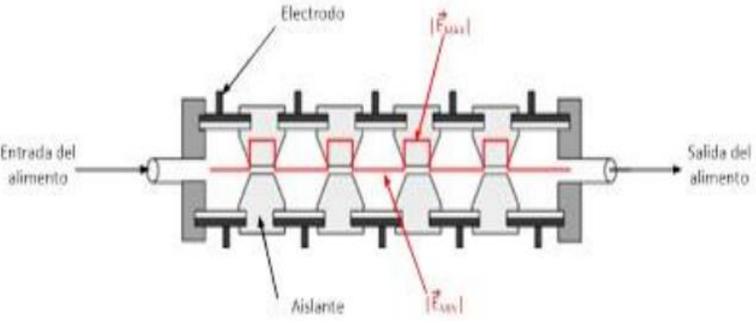
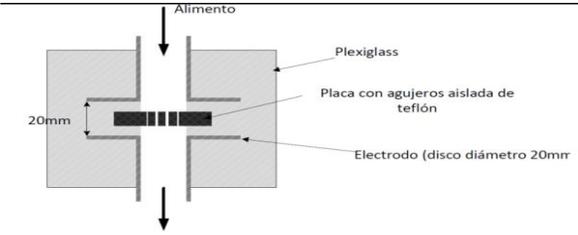
ANEXO A. TABLAS

Tabla A1. Cámaras estáticas [9].

Inventor	Año	Características	Imagen
Sale y Hamilton	1967	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Separador de polietileno en forma de U entre los electrodos. ✓ Electrodo de carbón soportados con placas de latón. ✓ Alimentación variable según la distancia entre separadores. ✓ Control de temperatura por circulación de agua a través de placas de latón. ✓ Campo eléctrico aplicado: máx. 30 kV/cm. ✓ Pulsos cuadrados de amplitud de 2 y 20µs. ✓ Velocidad de repetición de 1 pul/segundo. 	<p>Corte de una vista lateral de la cámara</p> <p>Forma de U del espaciador y la conexión del refrigerante.</p>
Dunn y Pearlman	1987	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Exclusivamente diseñada para alimentos líquidos. ✓ Los electrodos son de acero inoxidable y presenta un separador cilíndrico de nylon. ✓ Banco de seis condensadores (capacidad de 0,4 µF, cada condensador), dos resistencias de 400 kΩ, un conmutador, un relé de descarga, un monitor de corriente y una sonda de tensión. ✓ Alimentación a través del orificio de uno de los electrodos. 	<p>Corte de una sección de la cámara estática diseñada por Dunn y Pearlman</p>
Matsumoto	1991	<p>Alambre-cilindro</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Diámetro de entrada del cilindro 20 mm. ✓ Diámetro del alambre 1 mm, en total presentaba una longitud de 110 mm. ✓ Presenta una capacidad de 38 cm³. ✓ Los electrodos estaban sujetos por Plexiglás, ver figura de la derecha. 	<p>Gorro de Plexiglás</p> <p>Electrodo cilíndrico de aluminio de 20mm de diámetro</p> <p>Alambre 1 mm diámetro</p> <p>Goma de Silicona</p> <p>Rotor</p> <p>11 mm</p>

Matsumoto	1991	<p>Varilla-varilla</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Diámetro de los electodos (Varillas) 4 mm, con la forma de semiesfera en la punta y una distancia entre ellos de 3 mm. ✓ La película de nylon estaba separada 15 mm del punto de descarga. ✓ El diámetro de entrada era de 15 mm. 	
Qin	1994	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Electrodo de placas paralelas, hechos de acero inoxidable en forma de discos pulidos y separados por un aislante de polisulfona. ✓ Distancia entre electodos de 0,51 o 0,91 cm, con un área efectiva de 27cm²y volumen de tratamiento de 12,5 o 25 m³. ✓ Sistema de enfriamiento por camisas internas en los electodos por donde circula agua o refrigerante. Alimentación por orificio en los electodos. 	
Amiali	2004	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presenta dos electodos de acero inoxidable y espaciadores de polipropileno. ✓ Una separación entre electodos de 0.15 cm. ✓ Área de superficial de los electodos 1.53 cm². ✓ Presentaba sistema de enfriamiento para mantener la temperatura constante durante todo el tratamiento. 	
Zhang	2005	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Volumen de la cámara 60x60x3 mm³. ✓ Presenta dos electodos paralelos de acero inoxidable con un grosor de 1 mm. ✓ Se utilizó un material resistente a las altas temperaturas PTFE (Teflón). ✓ Era una cámara herméticamente cerrada, las muestras del alimento procesado solo se podían extraer con jeringuillas. 	

Tabla A2. Cámaras continuas [9].

Inventor	Año	Características	Imagen
Dunn y Pearlman	1987	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presenta dos electrodos de placas paralelas, con un espaciador dieléctrico. ✓ Los electrodos no están en contacto directo con el alimento, sino que están recubiertos de membranas permeables de conducción iónica. ✓ Un electrolito produce la conducción iónica entre el electrodo y la membrana, y permite eliminar los productos originados por la electrólisis. ✓ El equipo consta de un sistema de calentamiento y enfriamiento del alimento, y un sistema de desgasificación para eliminar burbujas de aire antes de entrar a la cámara. ✓ Existe una variación de esta cámara, con diversas zonas de depósitos entre electrodos aislados por espaciadores dieléctricos que hacen reducir y aumentar el diámetro de paso, de manera que en las zonas donde se reduce el diámetro el campo aplicado es muy alto, mientras que cuando estamos en las zonas de mayor diámetro el campo aplicado es más bajo 	
Matsumoto	1991	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Este diseño que genera un campo eléctrico superior en un volumen pequeño sin incrementar la tensión aplicada en los electrodos. ✓ Presenta una placa de teflón entre los dos electrodos de grosor 10 mm, que tenía orificios. Diámetro interior del recipiente de 20 mm. ✓ Electrodos de acero inoxidable con una separación entre ellos de 20 mm. ✓ Tenía como inconveniente que presentaba zonas de estancamiento, en las esquinas que formaban 90°, donde podían desarrollarse microorganismos, y el líquido se podía sobrecalentar innecesariamente, pudiendo causar la ruptura del dieléctrico, según reporta Alkhafaji y Farid (2006) 	
Zhang	1995	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Es una modificación de la cámara estática de electrodos de placas paralelas de la WSU con canales que permiten la alimentación continua del fluido. ✓ Electrodos de acero inoxidable en forma de discos separados por polisulfona. 	

		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Volumen de la cámara de 8 o 20 cm³, distancia entre electrodos de 0.51 o 0.9 cm, caudal volumétrico de alimento de 600 o 2.000 cm³/min. ✓ campo eléctrico tiene una intensidad de entre 35 y 70 kV/cm, ancho de pulso de 2-15 μs y una velocidad de repetición de pulsos de 1 Hz 	<p>Pulsos de alta tensión, Zona de tratamiento, Entrada alimento, Salida alimento, Tierra, Vista lateral de la cámara, Vista superior</p>
Sensoy	1997	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La zona de tratamiento se encontraba en la intersección de los dos volúmenes cónicos. Por lo que era más pequeño en comparación a los anteriores diseños. ✓ Estaba diseñado para poder aplicar 25-40 kV/cm ✓ La forma cónica que presentaba fue pensada para eliminar las burbujas en la zona de tratamiento 	<p>Entrada enfriamiento por agua, Salida alimento, Salida enfriamiento por agua, Aislamiento, Electrodo, Entrada alimento, Entrada enfriamiento por agua, Salida enfriamiento por agua</p>
Morshuis	2002	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los electrodos se encontraban equiespaciados y aislados entre ellos, ver figura. ✓ El alimento fluía, por el medio de la tubería, haciendo que el campo fuera bastante uniforme. ✓ No presentaba el riesgo de las otras cámaras conocidas pero podía acumular bacterias 	<p>Electrodos, Entrada alimento</p>
Alkhafaji and Farid	2007	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Presentaba dos mallas de acero inoxidable, aisladas entre ellas. ✓ Fue diseñada para un flujo de 2.5 cm³/s. ✓ Con tiempo de estancia del líquido en la zona de tratamiento de 26 ms. ✓ Con este diseño se resolvió el problema de estancamiento donde los microbios podían crecer. ✓ Se dio solución al sobrecalentamiento del líquido en la zona de tratamiento. 	<p>Zona de tratamiento, Salida alimento, Entrada alimento</p>

Tabla A3. Datos bibliográficos de tratamientos y ciclos de descenso estudiados [21].

Microorganism	Log ₁₀ reductions	Food	Φ	Cell shape	E	n	Type	T	Reference
<i>E. coli</i>	4.0	SMUF ^a	1.0	Rod	16	50	Gram negative	30	Pothakamury <i>et al.</i> , 1995
<i>S. aureus</i>	3.0	SMUF ^a	0.9	Spherical	16	50	Gram negative	30	Pothakamury <i>et al.</i> , 1995
<i>E. coli</i>	3.5	SMUF ^a	1.0	Rod	60	10	Gram negative	40	Qin <i>et al.</i> , 1998
<i>S. aureus</i>	2.5	SMUF ^a	0.9	Spherical	36	10	Gram positive	40	Qin <i>et al.</i> , 1998
<i>E. coli</i>	3.4	Skim milk	1.0	Rod	41	35	Gram negative	37	Dutruex <i>et al.</i> , 2000
<i>L. innocua</i>	2.3	Skim milk	0.8	Rod	41	35	Gram positive	37	Dutruex <i>et al.</i> , 2000

E: electric field strength (kV/cm)

n: number of pulses

T: treatment temperature (°C)

^a SMUF : simulate milk ultrafiltrated

Φ : cellular diameter (μm)

Fuente: Mosqueda (2007)

Tabla A4. Datos bibliográficos de características generales de microorganismos patógenos comunes en alimentos [21].

Characteristics	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>Listeria</i> <i>monocytogenes</i>	<i>Salmonella</i> spp.	<i>S. aureus</i>	<i>Bacillus</i> <i>cereus</i>	<i>C. jejuni</i>	<i>Yersinia</i> <i>enterocolitica</i>
Shape	Rod	Short rod	Rod	Spherical	Rod	Spiral rod	Rod
Diameter (μm)	0.9 to 1.5	0.5 to 0.8	1.0	0.5 to 1.0	1.0 to 2.0	0.2 to 0.9	0.5 to 1.0
Length (μm)	2.0 to 6.0	1.0 to 2.0	4.0	-	3.0 to 5.0	0.5 to 5.0	1.0 to 2.0
Type	Gram-negative	Gram-positive	Gram-negative	Gram-positive	Gram-positive	Gram-negative	Gram-negative
Temperature ¹ (°C)	7 to 46 37*	-1.5 to 45 37*	2 to 50 37*	7 to 48 37*	4 to 55 35*	30.5 to 45 42*	4 to 44 29*
Oxygen conditions	Aerobic or facultatively anaerobic	Facultatively anaerobic	Aerobic or facultatively anaerobic				
pH ²	4.0 to 9.0 7.0*	4.3 to 9.6 7.0*	3.6 to 9.6 7.0*	4.2 to 9.5 7.0*	4.3 to 9.3 7.0*	4.9 to 9.0 7.0*	4 to 10 7.3*
Water activity ³	0.95	0.92	0.93	0.86	0.912	0.987	0.95
Spore-forming	Not	Not	Not	Not	Yes	Not	Not

¹ Growth temperature range

² Growth pH range

³ Minimal water activity of growth

* Optimum values of growth

Fuente: Mosqueda (2007)

Tabla A5. Cinética de inactivación de microorganismos y enzimas por campos eléctricos pulsados PEF [25]

Source	Microorganisms	Suspension media	Log reduct ion (max)	Treatment Vessel ^a	Process conditions ^b
Fernandez-Molina and others (1999)	<i>Listeria innocua</i>	Raw skim milk (0.2% milkfat)	2.6	C, coaxial, 29 ml. d = 0.63,	15 to 28 °C, 0.51/min 100 pulses, 50 kV/cm 0.5 μF, 2μs, 3.5 Hz Exponential decay
Fernandez-Molina and others (1999)	<i>Pseudomonas fluorescens</i>	Raw skim milk (0.2% milkfat)	2.7	C, coaxial, 29 ml, d = 0.63,	15 to 28 °C, 0.51/min 30 pulses, 50 kV/cm 0.5 μF, 2μs, 4.0 Hz Exponential decay
Reina and others (1998)	<i>Listeria monocytogenes</i> (scott A)	Pasteurized whole milk (3.5% milkfat) 2% milk (2% milkfat) skim milk (0.2%)	3.0-4.0	C, cofield flow, 20 ml,	10 to 50 °C, 0.071/s 30 kV/cm 1.5μs, 1,700 Hz bipolar pulses t = 600μS
Calderon-Miranda (1998)	<i>L. innocua</i>	Raw Skim milk	2.4	C, continuous, 29 ml d = 0.6 cm	22 to 34 °C, 0.51/min 2 μS, 3.5 Hz 32 pulses, 50 kV/cm Exponential decay
Calderon-Miranda (1998)	<i>L. innocua</i>	Liquid whole egg (LWE)	3.4	C, continuous, 29 ml, 2 d = 0.6 cm	6 to 36 °C, 0.51/min 32 pulses, 50 kV/cm 2μs, 3.5 Hz Exponential decay
Hulshager and others (1983)	<i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC27736	Phosphate buffer	3.0	B, 4 ml, d = 0.5 cm, parallel plates	2.0 V/μm, 36 μ sec, 30 pulses, exponential decay, t= 1080μs
Sensoy and others (1997)	<i>Salmonella</i> Dublin	Skim milk	3.0	C, continuous, cofield	10 to 50 °C, 15-40 kv/cm, 12-127 μS
Lubicki and Jayaram (1997)	<i>Yersinia enterocolitica</i>	NaCl solution pH= 7.0	6.0-7.0	B, Parallel electrodes	2 to 3 °C, 75 kV, 150-200 pulses 500-1300 ns
Hulshager and others (1983)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Phosphate buffer	3.5	B, 4 ml, d = 0.5 cm	2.0 V/μm, 36 m sec, 30 pulses, exponential decay, t= 1080μs
Hulshager and others (1983)	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 25923)	Phosphate buffer	3.0	B, 4 ml, d = 0.5 cm	2.0 V/μm, 36 m sec, 30 pulses, exponential decay, t= 1080μs
Hulshager and others (1983)	<i>Listeria monocytogenes</i>	Phosphate buffer	2.0	B, 4 ml, d = 0.5 cm	2.0 V/μm, 36 m sec, 30 pulses, exponential decay, t= 1080μs
Hulshager and others (1983)	<i>Candida albicans</i>	Phosphate buffer	4.5	B, 4 ml, d = 0.5 cm	2.0 V/μm, 36 m sec, 30 pulses, exponential decay, t= 1080μs
Dunn and Pearlman (1987)	<i>Salmonella</i> Dublin	Milk	4.0	B, parallel plates	63 °C, 3.67 V/μm, 36μs, 40 pulses
Dunn and Pearlman (1987)	<i>Lactobacillus brevis</i>	Yogurt	2.0	B, parallel plates	50 °C, 1.8 V/μm
Gupta and Murray (1989)	<i>Salmonella</i> Typhimurium	NaCl	5.0	B, d= 6.35 mm	1μs, 20 pulses, exponential, 83 kV/cm
Gupta and (1989)	<i>Pseudomonas fragi</i>	Milk	4.5	B, d= 6.35 mm	9.0 V/μm, 1μs, 10 of Murray 6.8 V/μm + 1

						of 7.5 V/ μ m + 1 of 8.3 V/ μ m + 5 of 9.0 V/ μ m
Jayaram and others (1992)	<i>L. brevis</i>	NaH ₂ P04 / Na ₂ HP04HO	9.0	B, parallel plate, 0.5ml, d = 0.2cm		60 °C, 2.5 V/ μ m, 46 μ s, 200 pulses, t= 10,000 μ s
Pothakamury (1995)	<i>Lactobacillus delbrueckii</i> ATCC 11842	SMUF	4.0-5.0	B, 1 ml, d= 0.1cm		<30 °C, 1.6V/ μ m, 200-300 μ s 40 pules exponential decay, t=10,000 μ s
Pothakamury (1995)	<i>Bacillus subtilis</i> spores ATCC9372	SMUF	4.0-5.0	B, parallel plate, 1 ml, d=0.1cm		<30 °C, 1.6 V/ μ m, 200-300 μ s 50 pulses, exponential decay, t= 12,500 μ s
Pothakamury and others (1995)	<i>S. aureus</i>	SMUF	3.0-4.0	B, parallel plate, 1 ml, d=0.1 cm		<30 °C, 1.6 V/ μ m, 200-300 μ s 60 pulses, exponential decay
Vega-Mercado and others (1996a)	<i>B. subtilis</i> spores ATCC9372	Pea soup	5.3	C., coaxial, 0.51 / min		<5.5 °C, 3.3 V/ μ m, 2 μ s, 0.5 mF, 4.3 Hz, 30 pulses, exponential decay
Ho and others (1995)	<i>P. fluorescens</i>	Distilled water, 10-35% sucrose 0.1 and 0.5% xanthan 0.1 and 0.5 % sodium chloride	> 6.0	B, 49.5, 99.1, 148.6 ml d = 0.3		20 °C, 2.5 V/ μ m, 2 μ ec, 10-20 pulses, t = 2sec, reverse polarity
Qin and others (1994)	<i>B. subtilis</i>	SMUF	4.5	B. parallel plate, 100 μ l, d=0.1cm		1.6 V/ μ m, monopolar. 180 μ s, 13 pulses
Qin and others (1994)	<i>B. subtilis</i>	SMUF	5.5	B. parallel plate, 100 μ l, d=0.1cm		1.6 V/ μ m, bipolar, 180 μ s, 13 pulses
Keith and others (1997)	Aerobic Plate Count	Basil, dill, onion	0.30	B, chamber, 10 ml d = 5 mm, 200 ml d=9mm		10-25 kV/cm, 1-10180 μ s.sec, 200-320 ms, bipolar pulses
Castro (1994)	Alkaline Phosphatase	Raw milk, 2% milk Non-fat milk, SMUF	65%	B, Cuvette, d = 0.1 cm		22 to 49 °c. 18 to 22 kV/cm, 70 pulses, 0.7-0.8 μ s
Vega-Mercado and others (1995)	Plasmin	SMUF	90%	C, parallel plate		150 °C, 30-40 kV/cm, 50 pulses, 0.1 Hz, 2 μ s
Ho and others (1997)	Lipase, glucose Oxidase, α -amylase Peroxidase, Phenol oxidase	Buffer solutions	70-85% 30-40%	B, circular chamber, 148ml		13-87 kV/cm, 30 instant charge reversal pulses, 2 μ s, 2 sec. 0.12 μ F

^a B. batch. C, continuous, d, gap between electrodes

^b Temperature, peak electric field, pulse width, number of pulses and shape, and t, total treatment time (sec).

Tabla A6. Resumen, de la inactivación de *Saccharomyces cerevisiae* con PEF [25]

Source	Suspension media	Log reduction (max)	Treatment Vessel ^a	Process conditions ^b
Jacob and others (1981)	0.9%NaCl	1.3	B, 3 ml, d= 0.5 cm	3.5 V/ μ m, 20 μ s, 4 pulses
Dunn and Pearlman (1987)	Yogurt	3	B	55 °C, 1.8 V/ μ m
Hulshager and others (1983)	Phosphate buffer, PH 7.0	3 stationary cells, 4 Logarithmic cells	B, 4ml, d= 0.5 cm	2.0 V/ μ m, 36 μ s, 30 pulses t= 1080 μ S
Mizuno and Hori (1988)	Deionized water	6	0.77 cal/cm ³ /pulse, B, Parallel plate, 0.5 cm ³ , d= 0.8 cm	2.0 V/ μ m, 160 μ s, 175 pulses exponential decay
Matsumoto and others (1991)	Phosphate buffer	5	B	3.0 V/ μ m
Yonemoto and others (1993)	0.85%	2	B, parallel plate, 2 ml, d= 0.55 cm	0.54 V/ μ m, 90 μ s, 10 pulses
Zhang and others (1994b)	Potato dextrose agar	5.5	62 J/ml, B, 14 ml	15 \pm 1-c. 4.0 V/ μ m, 3 μ s, 16 Pulses
Qin and others (1994)	Apple juice	4	270 J/pulse, B, parallel plate	<30 °c, 1.2 V/ μ m, 20 pulses, Exponential decay
Qin and others (1994)	Apple juice	4.2	270 J/pulse, B, parallel plate	<30 °c, 1.2 V/ μ m, 20 pulses, Square wave
Zhang and others (1994a)	Apple juice	4	260 J/pulse, B, parallel plate,	4-10 °C, 1.2 V/ μ m, 90 μ s, 6 pulses, exponential decay
Zhang and others (1994a)	Apple juice	3.5	260 J/pulse, B, Parallel plate, 25 ml, d= 0.95 cm	4-10 °C, 1.2 V/ μ m, 60 μ s, 6 pulses, square wave
Zhang and others (1994a)	Apple juice	3-4	558 J/pulse, B, Parallel plate, 25.7 ml, d= 0.95 cm d= 0.95 cm	<25 °C. 2.5 V/ μ m, 5 pulses
Qin and others (1995a)	Apple juice	7	C, coaxial, 29 ml, d= 0.6 cm, 0.2 μ F, 1 Hz	<30 °C, 2.5 V/ μ m, 2-20 μ s, \pm 150 pulses, exponential decay
Qin and others (1995a)	Apple juice	6	28 J/ml, C, coaxial, 30 ml, 2-10 1/min	22-29.6 °C, 5.0 V/ μ m, 2.5 μ s, 2 pulses
Grahl and others (1992)	Orange juice	5	B, 25 ml, d= 0.5 cm,	0.675 V/ μ m, 5 pulses
Grahl and Markl (1996)			E _c =4.7	

^a From Barbosa-Canovas and others (1999).

^b B, batch; C, continuous.

^c Temperature, peak electric field, pulse width, number and shape, and total treatment time (t).

Tabla A7. Propiedades y características del acero inoxidable 316L [29].

SAE 316 AUSTENÍTICO	COMPOSICIÓN QUÍMICA								PROPIEDADES MECÁNICAS					
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Estado de suministro	Resistencia a la tracción Kg/mm ²	Límite elástico Kg/mm ²	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza Brinell
	0.08 max.	2.00 max.	0.05 max.	0.03 max.	1.00	16.00 / 18.00	10.00 / 14.00	2.00 / 3.00	Hipertemple	59	25	35	40	140/160
TRATAMIENTO TÉRMICO														
TRATAMIENTO								TEMPERATURA °C				ENFRIAMIENTO		
Hipertemple								1040-1120°C				Agua		
Normalizado								No Normalizado						
CARACTERÍSTICAS Y APLICACIONES														
<p>CARACTERÍSTICAS: Es un Acero de alta ductibilidad y baja dureza en estado hipertemple resistente a altas temperaturas, es no magnético en estado recocido y es de poca exigencia mecánica. Presenta muy buena resistencia a la oxidación entre 870°C y 930°C.</p> <p>APLICACIONES: Partes y piezas de la industria alimenticia, química y refinería, equipos hospitalarios quirúrgicos, industria de celulosa, textiles, ejes de hélices, acoples, equipos para el desarrollo de fotografía. Soldadura: AWS 316L, 3LB.</p>														
NORMAS EQUIVALENTES														
Afnor(Fr)...27 CND17.11.02 - 09 - Bs(Ing) 316S31 - Din(Alem) 14401 - Jls(Jap) SUS 316 - Uni(Ital)... X5CrNi17-12 - AISI/SAE INOX316														
PERFILES USUALES			De 4.7mm hasta 152mm (3/16" a 6")											
			Láminas de 1mm a 6mm en acabado 2B y No. 1											
			Tubos SCH 40 de 3/4 a 4"											

TABLA A8. Costos prototipado mecánico [Fuente propia].

Componentes	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Electrodos x3 in	2	\$ 28.333	\$ 56.666
Cámara de tratamiento	3	\$ 40.000	\$ 120.000
Tapón en teflón	2	\$ 5.000	\$ 10.000
Tapas PVC	4	\$ 2.500	\$ 10.000
Tubo PVC x4 in	2	\$ 1.000	\$ 2.000
Tornillo + Tuerca y Arandela	30	\$ 250	\$ 7.500
Tornillo de nivel	4	\$ 1.500	\$ 6.000
Ángulos 20x20x3 mm (3312 mm)	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Pánel interfaz acrílico	2	\$ 6.500	\$ 13.000
Lámina de polietileno	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Lámina de acero inoxidable	5	\$ 2.000	\$ 10.000
		Total	\$ 250.166

TABLA A9. Costos prototipado mecánico [Fuente propia].

Componentes	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
Arduino Uno	1	\$ 40.000	\$ 40.000
PCB arduino	1	\$ 20.781	\$ 20.781
PCB fuente variable	1	\$ 20.781	\$ 20.781
Voltiamperímetro digital	1	\$ 28.000	\$ 28.000
Teclado 4x4	1	\$ 15.000	\$ 15.000
LCD + Módulo I2C	1	\$ 16.000	\$ 16.000
Transformador microondas	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Transformador flyback	2	\$ 2.500	\$ 5.000
Disipador	2	\$ 5.000	\$ 10.000
Ventilador 12V	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Transistor TIP35C	2	\$ 4.000	\$ 8.000
Transistor IRFP260N	2	\$ 13.000	\$ 26.000
Puente de diodos 25A	1	\$ 6.000	\$ 6.000
Regulador 5V	1	\$ 1.300	\$ 1.300
Regulador 15V	1	\$ 1.300	\$ 1.300
Lm338K	1	\$ 7.500	\$ 7.500
Cargador de PC	1	\$ 0	\$ 0
Optoacoplador PC817	1	\$ 1.500	\$ 1.500
Transistor 2N2222	1	\$ 200	\$ 200
Transistor 2N3906	1	\$ 200	\$ 200
Diodo 1N4148	1	\$ 50	\$ 50
Diodo 6A10	4	\$ 700	\$ 2.800
Diodo 1N4007	4	\$ 100	\$ 400

Resistencia de 5W 0,1Ω	6	\$ 400	\$ 2.400
Resistencia de 20W 10Ω	1	\$ 1.200	\$ 1.200
Borneras azules	12	\$ 600	\$ 7.200
Conectores Molex	5	\$ 450	\$ 2.250
Fusibles	4	\$ 300	\$ 1.200
Porta fusible	4	\$ 1.400	\$ 5.600
Interruptores	4	\$ 1.700	\$ 6.800
Potenciómetro 5 KΩ	1	\$ 600	\$ 600
Perilla potenciómetro	2	\$ 500	\$ 1.000
Potenciómetro 1 KΩ	1	\$ 600	\$ 600
Capacitor electrolítico 10,000 uF	1	\$ 11.000	\$ 11.000
Capacitor electrolítico 4,700 uF	1	\$ 2.700	\$ 2.700
Capacitor 12 nF	1	\$ 200	\$ 200
Capacitor electrolítico 100 uF	1	\$ 200	\$ 200
Bornera fuente	9	\$ 600	\$ 5.400
Boton de reinicio	1	\$ 500	\$ 500
Pasa cable	2	\$ 300	\$ 600
Gastos varios			\$ 50.000
		Total	\$ 319.262

TABLA A10. Costos mano de obra [Fuente propia].

Concepto	Nro de Hora	Precio Hora	Precio Total
Ensamble	120	\$ 6.500	\$ 780.000
Diseño	500	\$ 6.500	\$ 3.250.000
		Total	\$ 4.030.000

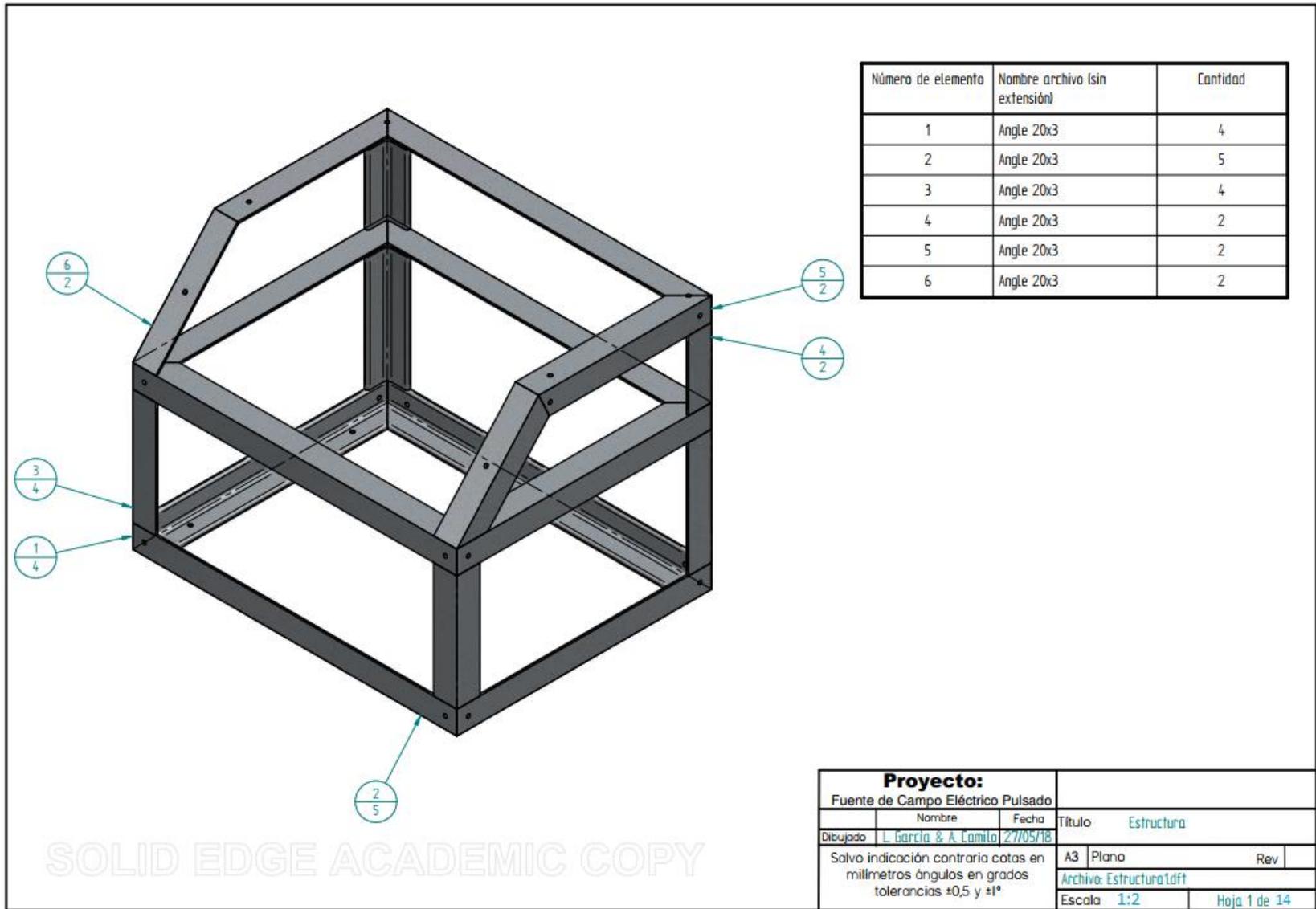
TABLA A11. Especificaciones técnicas del equipo PEF [Fuente propia].

	Valores	Unidad	
Fuente variable	1-30	V	
Flyback1 Vout	1-25	kV	
Flyback2 Vout	1-30	kV	
Máximo valores de entrada que soportan algunos componentes			
Flyback1 (Pmáx)	75	W	
Flyback2 (Pmáx)	90	W	
Arduino	5	V	
	480	mA	
	2,5	W	
LCD	25	mA	
	5	V	
	125	mW	
Voltiamperímetro	20	mA	
	12	V	
	240	mW	
Teclado 4x4	30	mA	
	5	V	
	0,15	W	
Ventilador 1 y 2	140	mA	
	12	V	
	1,68	W	
Dimensiones del Equipo PEF	Anexo B1		
Especificaciones técnicas de los elementos de medida			
Voltiamperímetro	Sensibilidad	0,1	V
	Medida de tensión DC	0-100	V
	Medida de corriente DC	0-10	A
	Resolución de Tensión	0.1	V
	Resolución de Corriente	0.01	A
Sonda HV-40	Máximo voltaje de entrada		
	Voltaje DC	40	kV
	Voltaje AC (0 a 300 Hz)	28	kV RMS
	Exactitud		
	Voltaje DC (1 kV a 20 kV)	±5	%
	Voltaje DC (1 kV a 20 kV)	±6	%
	Voltaje AC a 60 Hz	±5	%
	Resistencia de entrada	1000	MΩ
	Relación de División		
	Con acople de 10 MΩ	1000:1	-
Con acople de 1 MΩ	2000:1	-	
Osciloscopio Rigol DS1052E	Impedancia de entrada	1 MΩ ± 2% 15pF ± 3pF	
	Sensibilidad Vertical	2 mV/div to 10 V/div	
	Resolución Vertical	8	Bits
	Máximo voltaje de entrada	300	V RMS
	Tiempo de retardo, canal	500	ps
	Máxima frecuencia IN	500	MHz

ANEXO B. FIGURAS

ANEXO B1 DISEÑO CAD PROTOTIPADO MECÁNICO

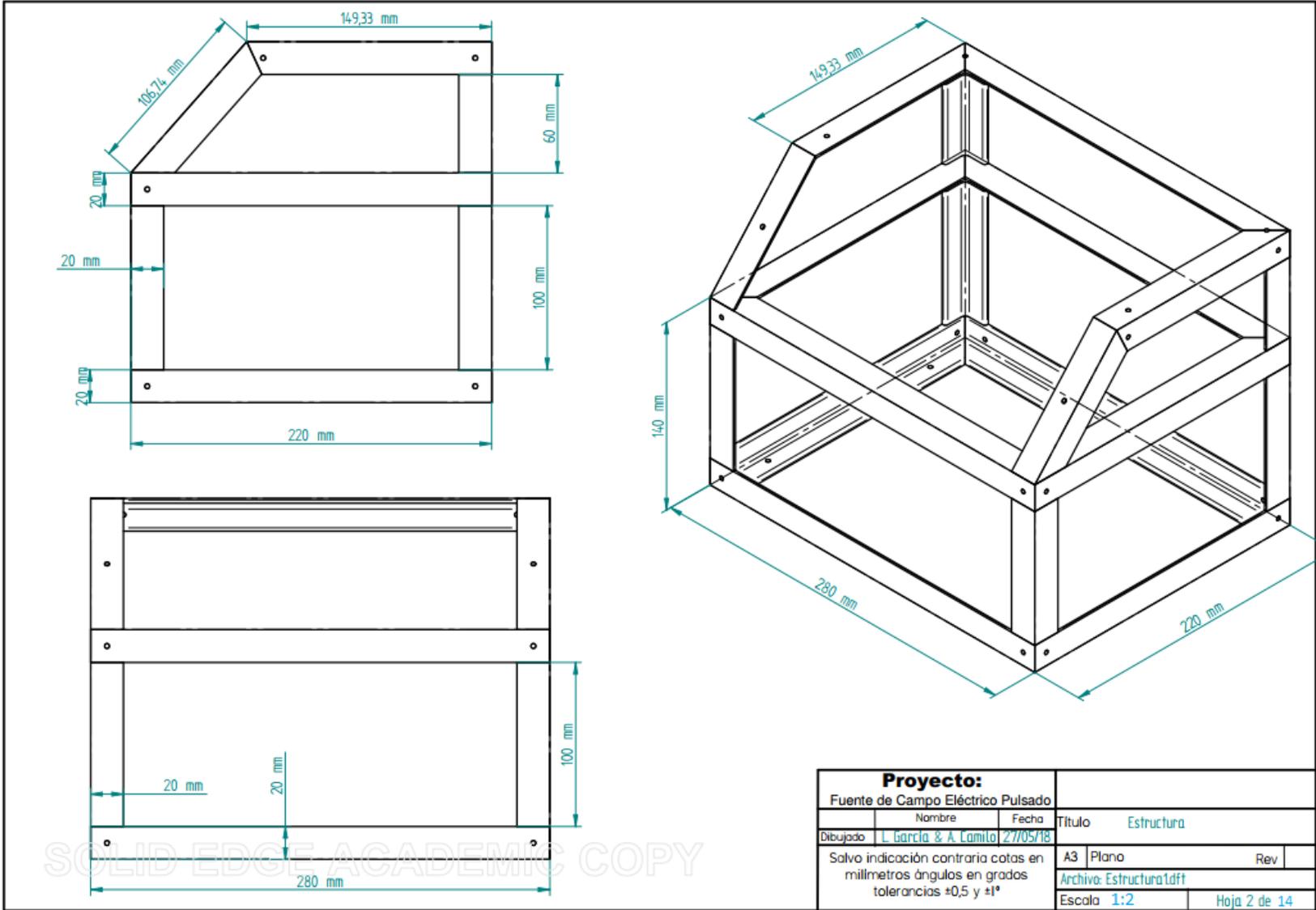
ANEXO B1.1. DISEÑO CAD DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO.

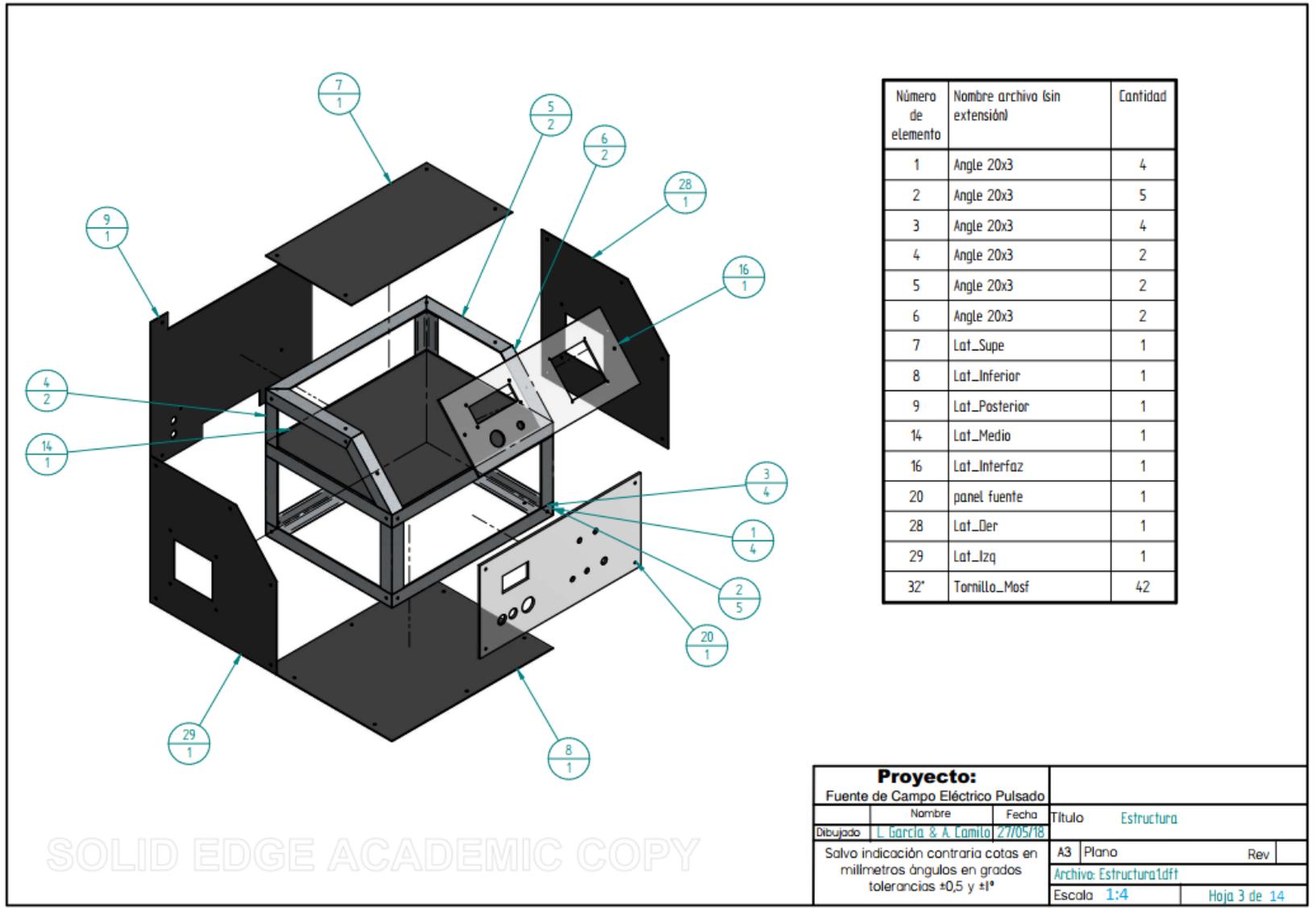


Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
1	Angle 20x3	4
2	Angle 20x3	5
3	Angle 20x3	4
4	Angle 20x3	2
5	Angle 20x3	2
6	Angle 20x3	2

Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado			Estructura	
Nombre	Fecha	Título		
L. García & A. Camilo	27/05/18	Estructura		
Dibujado		A3	Plano	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Archivo: Estructura1.dwg		
Escala		1:2	Hoja 1 de 14	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY



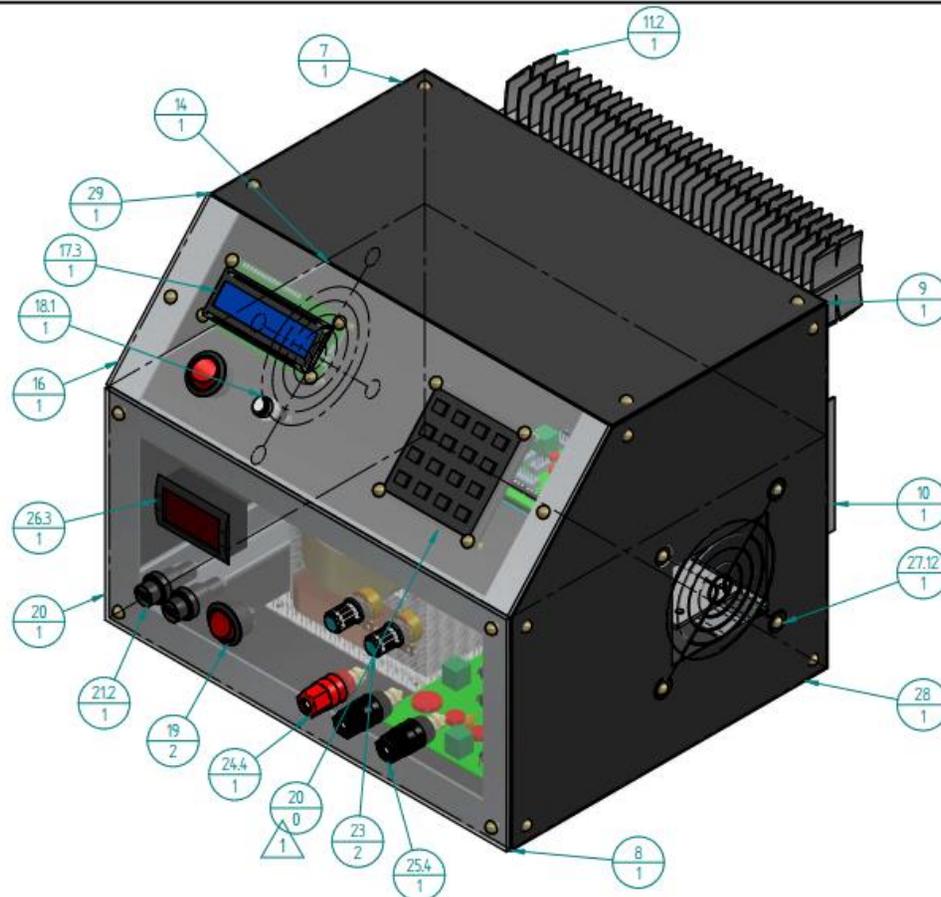


Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
1	Angle 20x3	4
2	Angle 20x3	5
3	Angle 20x3	4
4	Angle 20x3	2
5	Angle 20x3	2
6	Angle 20x3	2
7	Lat_Supe	1
8	Lat_Inferior	1
9	Lat_Posterior	1
14	Lat_Medio	1
16	Lat_Interfaz	1
20	panel fuente	1
28	Lat_Der	1
29	Lat_Izq	1
32"	Tornillo_Mosf	42

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

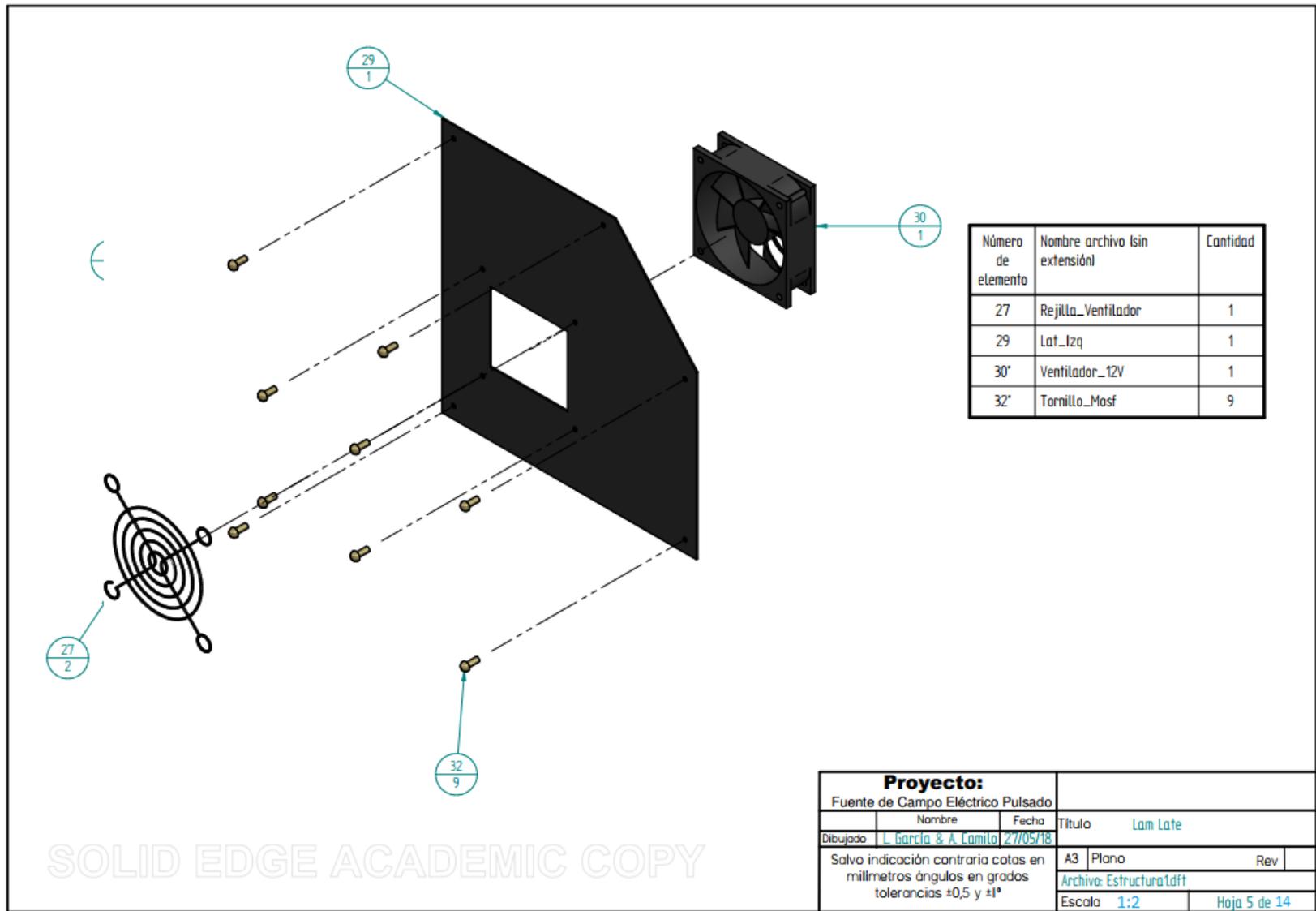
Proyecto:			
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado			
Nombre	Fecha	Título Estructura	
Dibujado L. García & A. Lamiño	27/05/18		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A3	Plano Rev
		Archivo: Estructura1.dft	
		Escala 1:4	Hoja 3 de 14

Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
7	Lat_Supe	1
8	Lat_Inferior	1
9	Lat_Posterior	1
10	Disipador_Fuente	1
11	Disip_Mosf	1
12'	Transformador_Microondas	1
13'	Arduino UNO	1
14	Lat_Medio	1
15'	Fuente_Variable_5	1
16	Lat_Interfaz	1
17	LCD	1
18	ensamble pulsador	1
19	Switch 250V 12A	2
20	panel fuente	1
21	ensamble fusible	2
22	POTENCIOMETRO B10K	2
23	KNOB	2
24	Banana simple_rojo	1
25	Banana simple_Negro	2
26	Voltiamperimetro	1
27	Rejilla_Ventilador	2
28	Lat_Der	1
29	Lat_Izq	1
30'	Ventilador_12V	1
31	keypad_LG	1
32'	Tornillo_Mosf	42



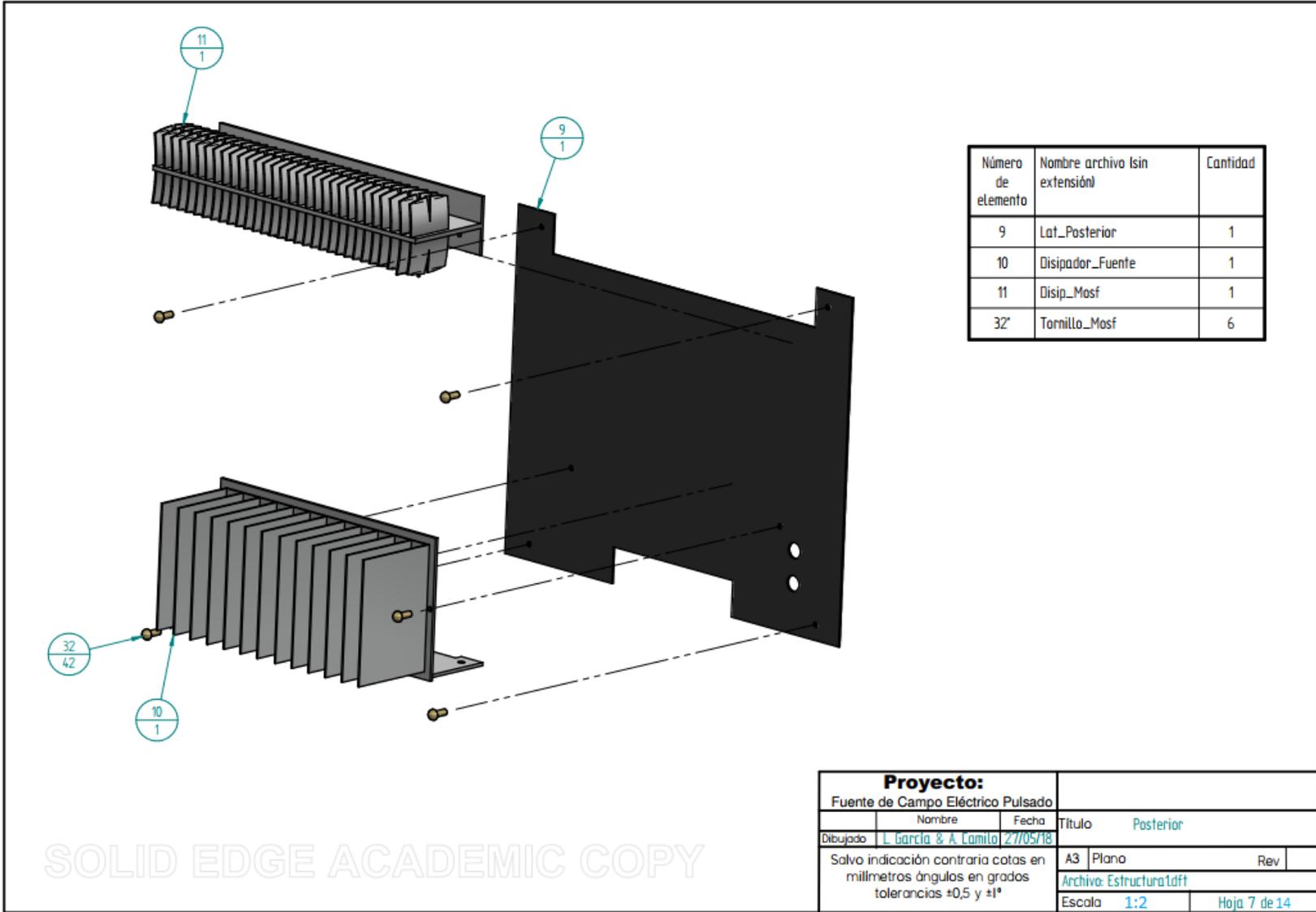
Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado				
Nombre		Fecha	Título	
L. Garcia & A. Lamito		27/05/18	Equipo PEF	
Dibujado			Rev	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0,5 y ±1°			A3 Plano	
			Archivo: Estructura1.dft	
Escala			Hoja 4 de 14	
1:2				

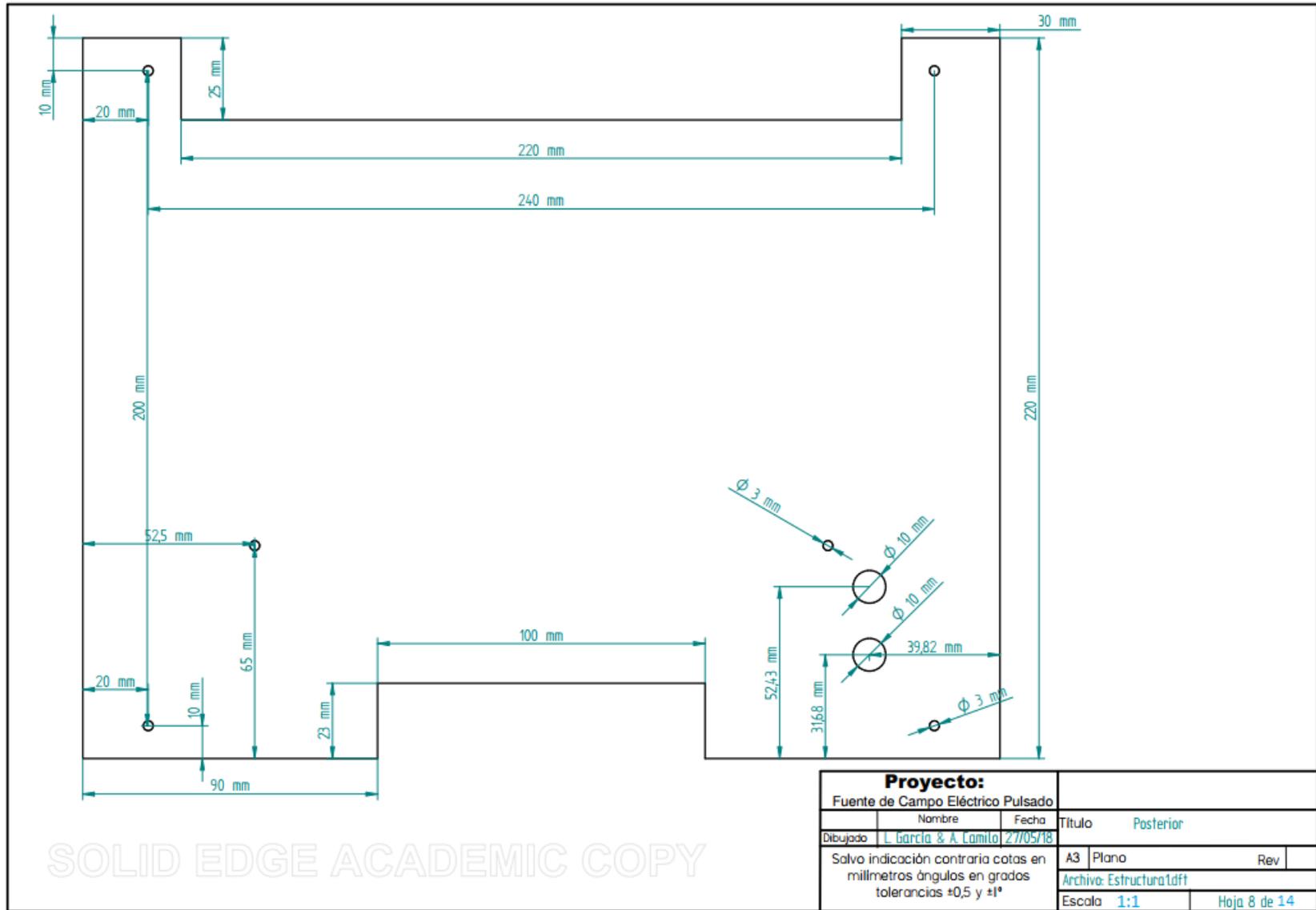
SOLUCIONES ACADÉMICAS ACADEMIC COPY



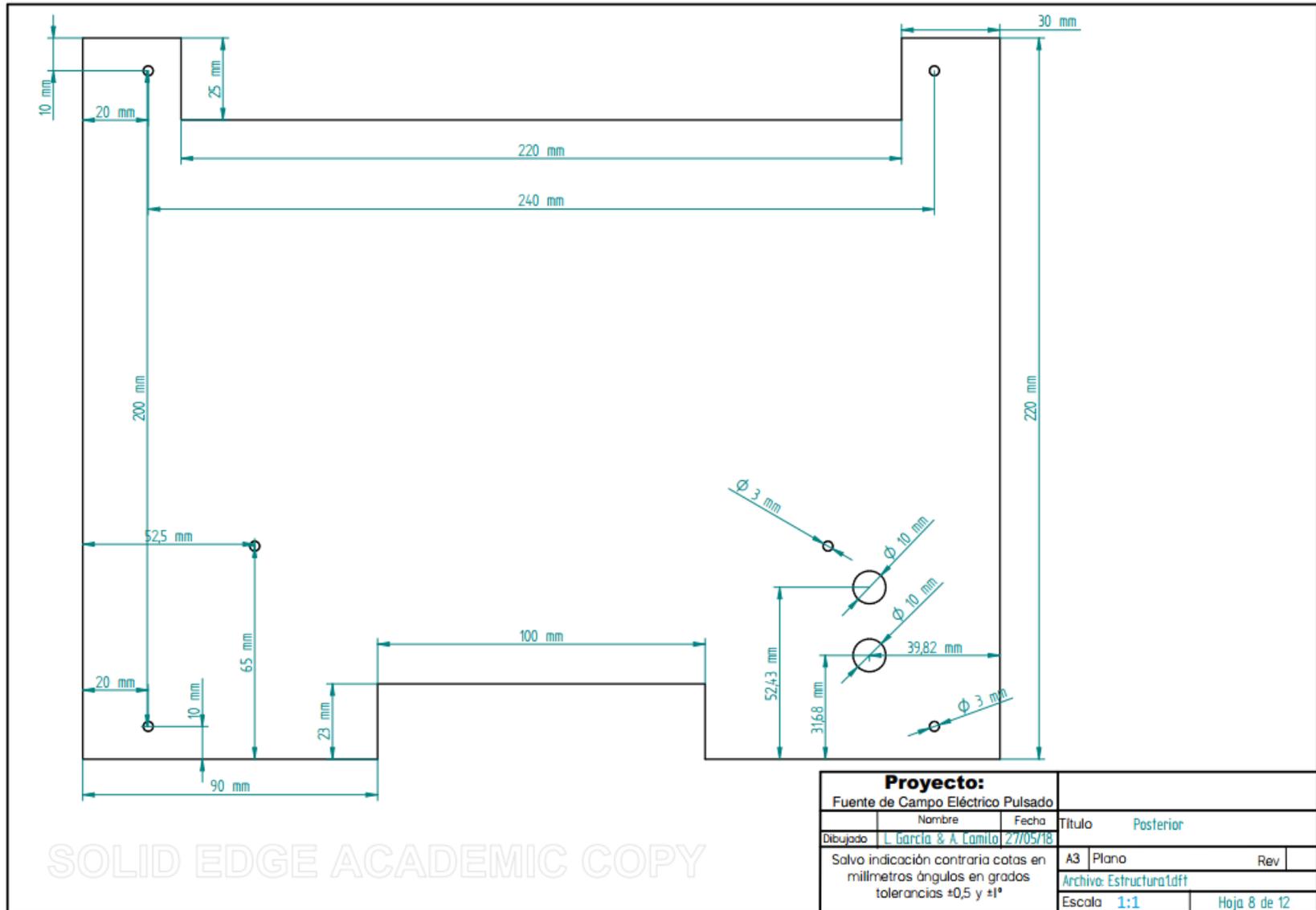
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

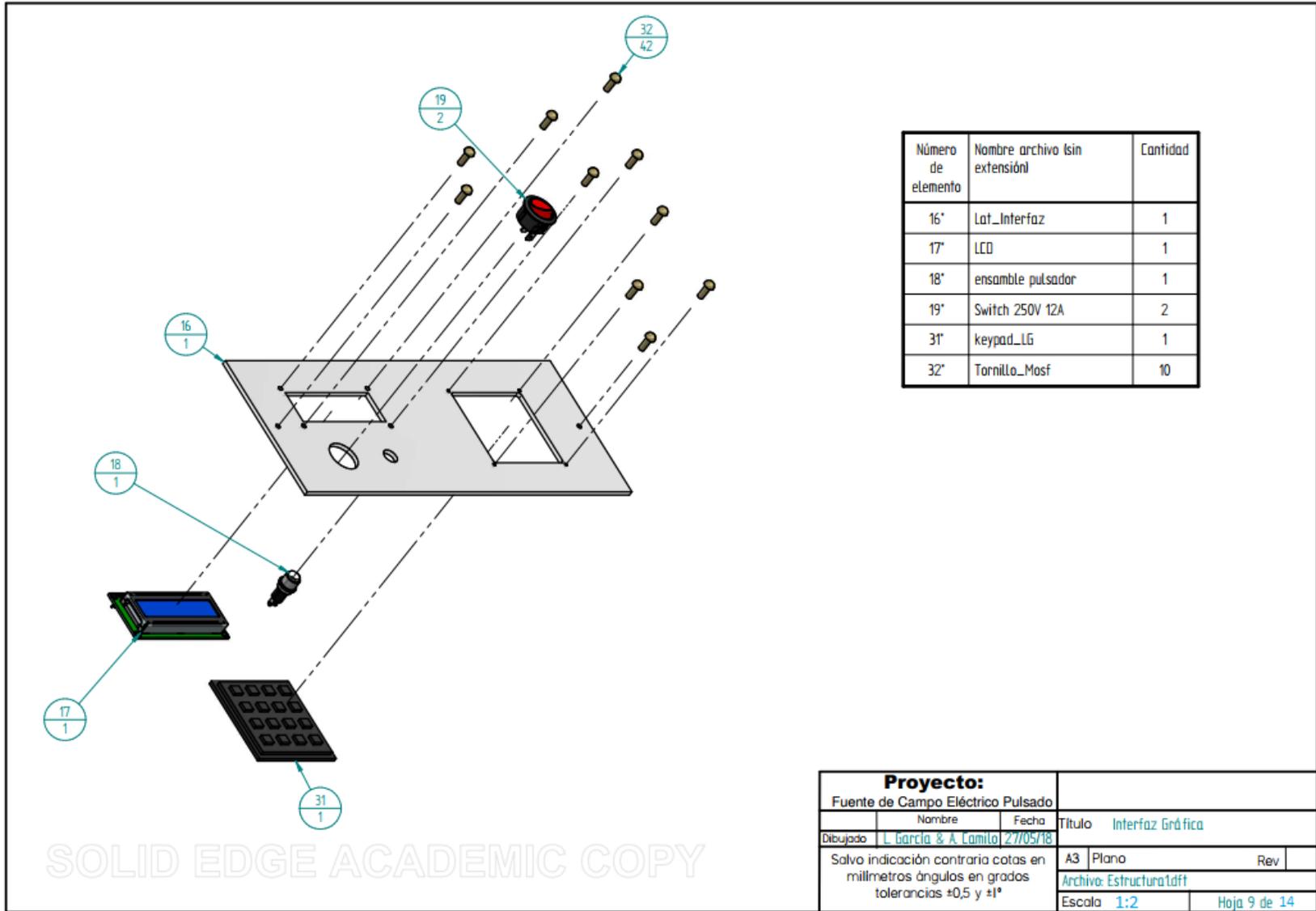
Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado				
Nombre	Fecha	Título Lam Late		
Dibujado L. García & A. Camilo	27/05/18			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A3	Plano	Rev
		Archivo: Estructura1.dft		
		Escala 1:2	Hoja 5 de 14	





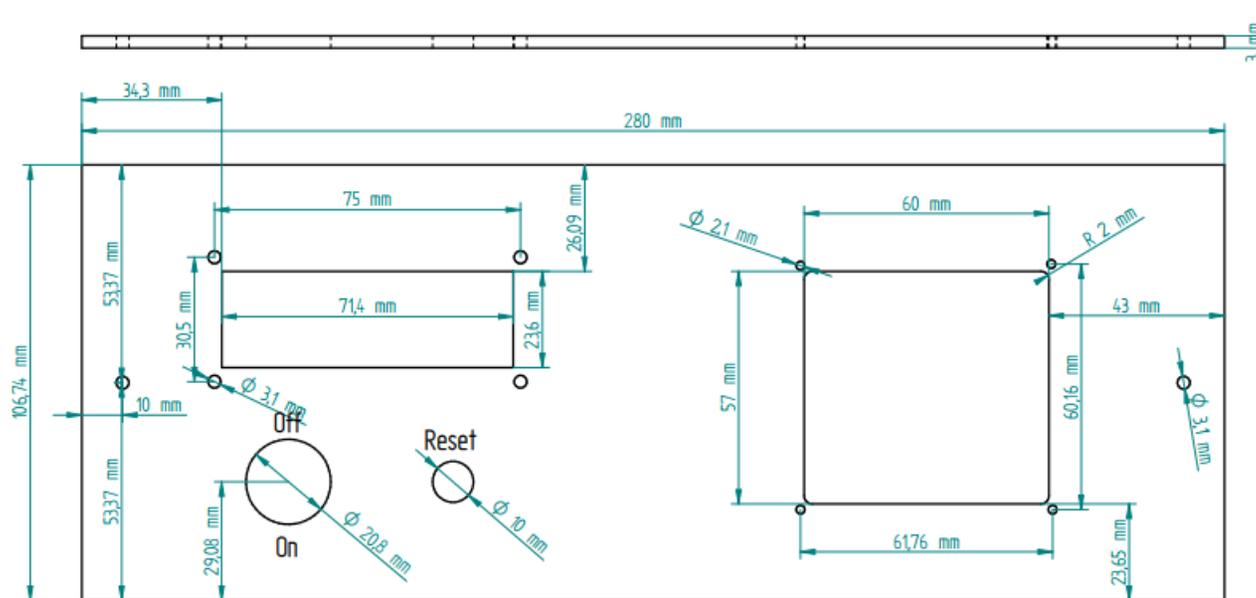
SOLID EDGE ACADEMIC COPY





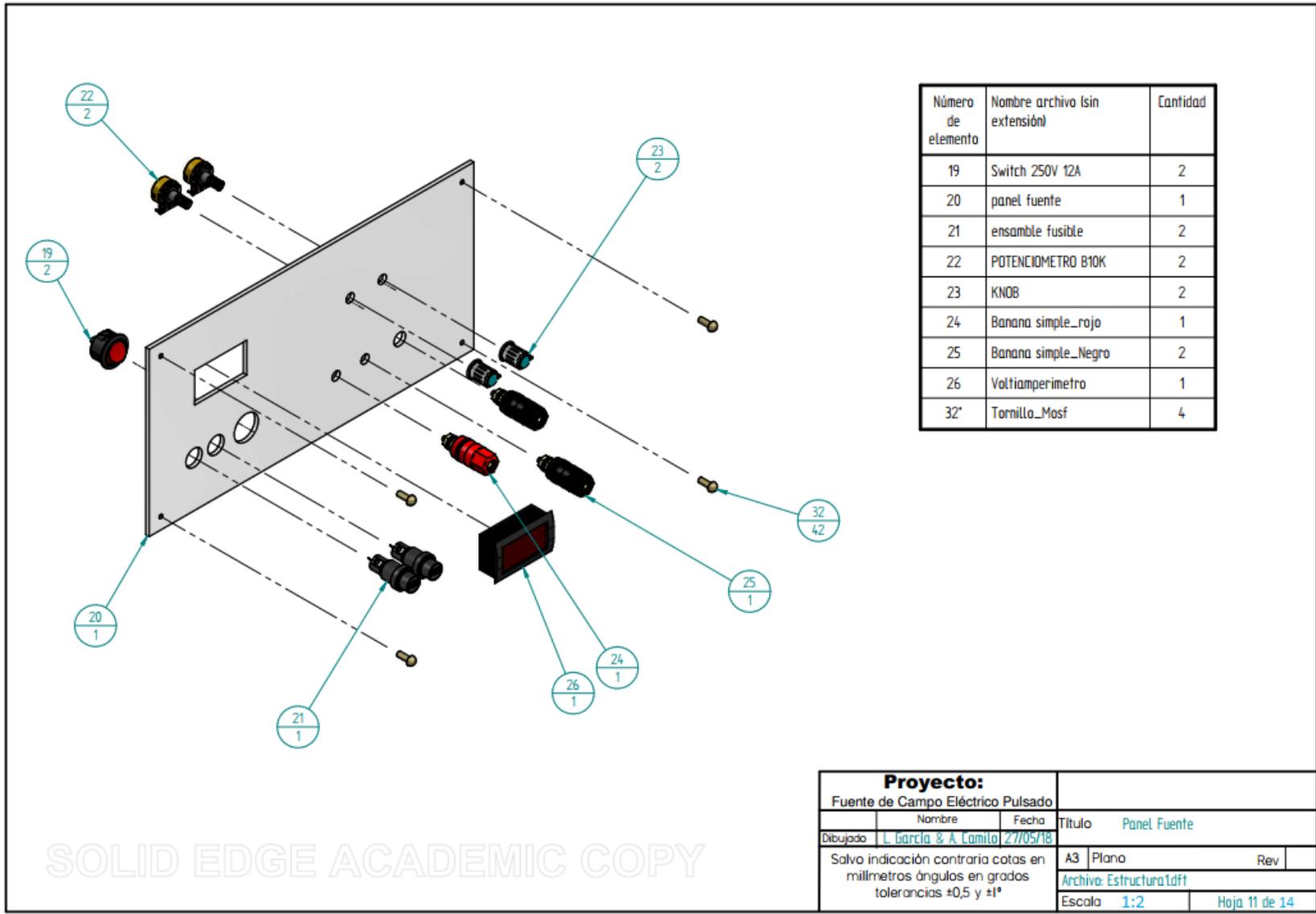
Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
16*	Lat_Interfaz	1
17*	LCD	1
18*	ensamble pulsador	1
19*	Switch 250V 12A	2
31*	keypad_L6	1
32*	Tornillo_Mosf	10

Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado				
	Nombre	Fecha	Título Interfaz Gráfica	
Dibujado	L. Garcia & A. Camilo	27/05/18		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			A3	Plano
			Rev	
			Archivo: Estructura1.dft	
			Escala 1:2	Hoja 9 de 14



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

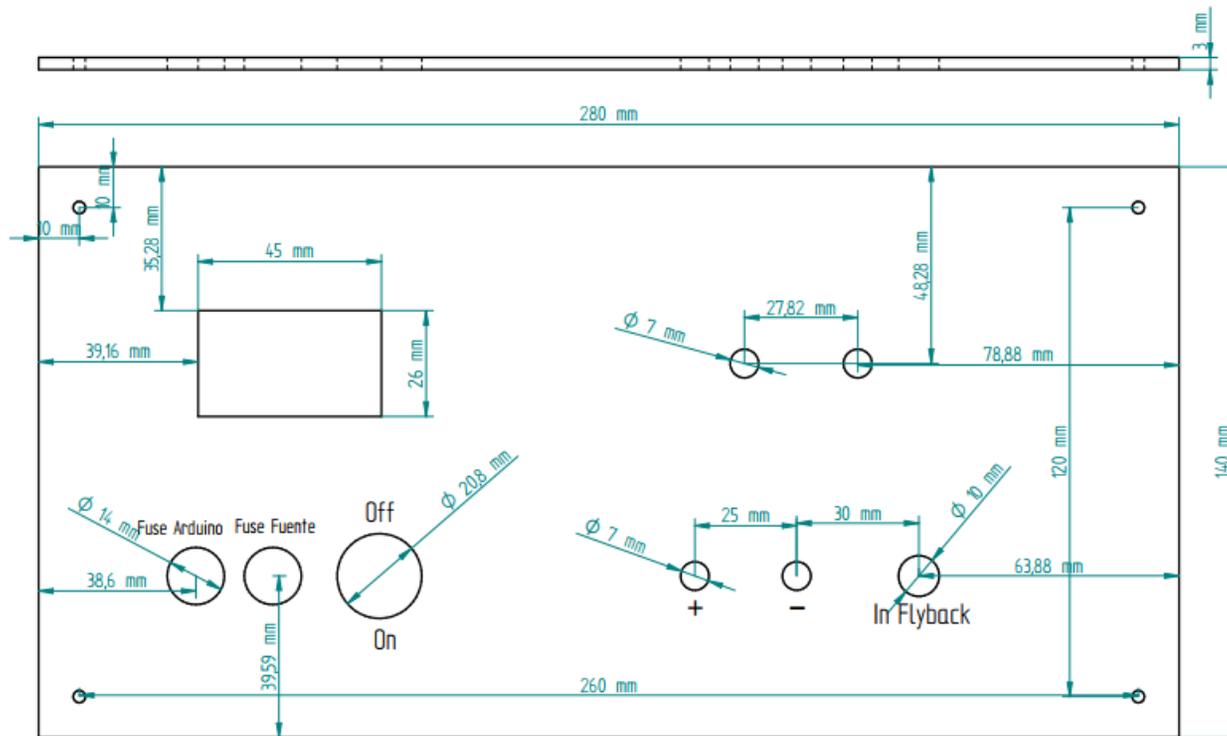
Proyecto:			
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado		Titulo Interfaz Gráfica	
Nombre	Fecha	Rev	
Dibujado L. Garcia & A. Lamilo	27/05/18	A3 Plano	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Archivo: Estructura1d.f1	
Escala 1:1		Hoja 10 de 14	



Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
19	Switch 250V 12A	2
20	panel fuente	1
21	ensamble fusible	2
22	POTENCIOMETRO B10K	2
23	KNOB	2
24	Banana simple_rojo	1
25	Banana simple_Negro	2
26	Voltiampermetro	1
32	Tornillo_Mosf	4

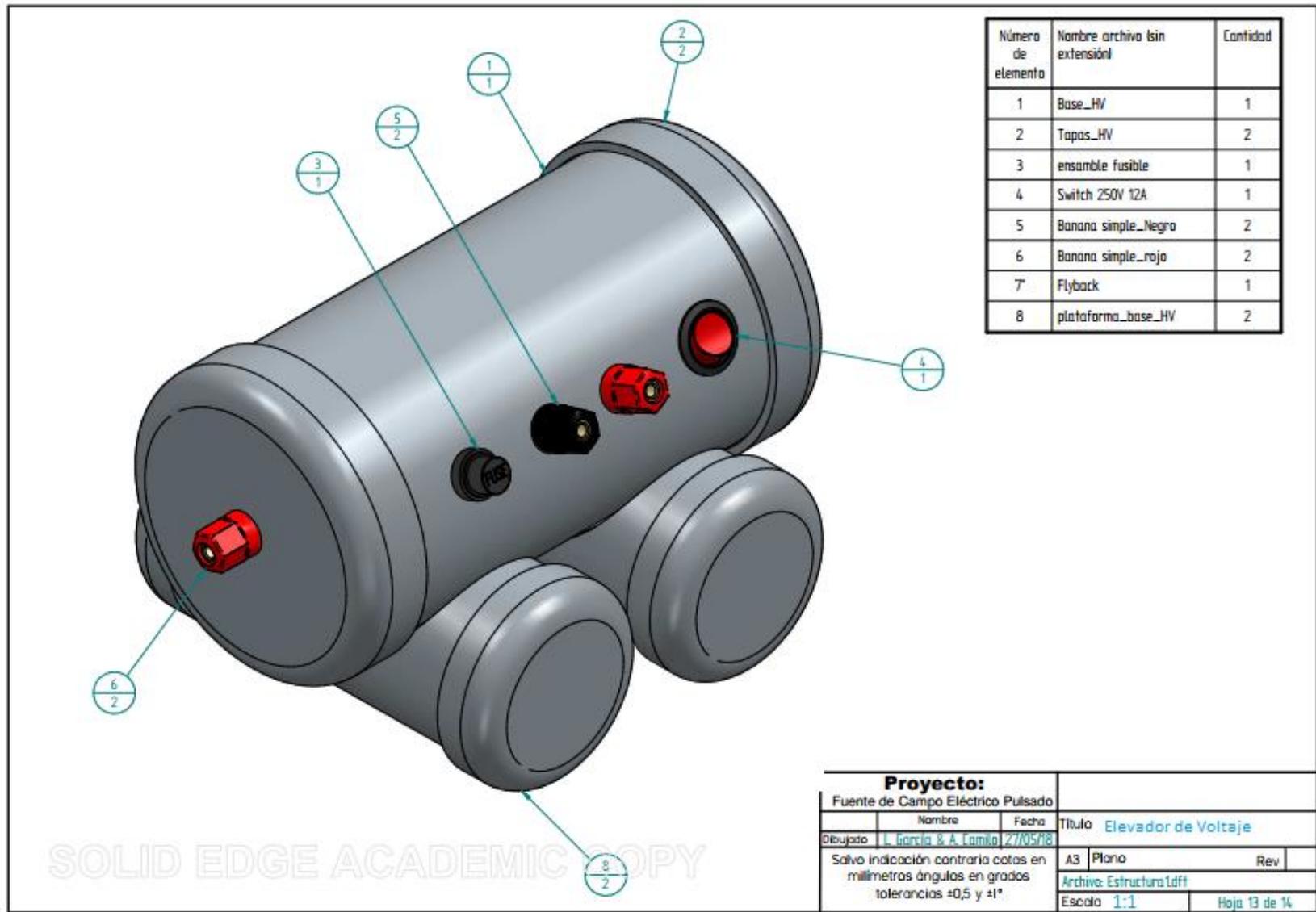
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado			Título Panel Fuente	
Nombre	Fecha			
L. Garcia & A. Camilo	27/05/18			
Dibujado			A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°			Rev	
			Archivo: Estructura1d.flt	
Escala			1:2	Hoja 11 de 14



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Proyecto:			
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado			
Nombre	Fecha	Título Panel Fuente	
Dibujado	L. Garcia & A. Lamito	27/05/18	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A3	Plano Rev
		Archivo: Estructura1.dft	
Escala 1:1		Hoja 12 de 14	

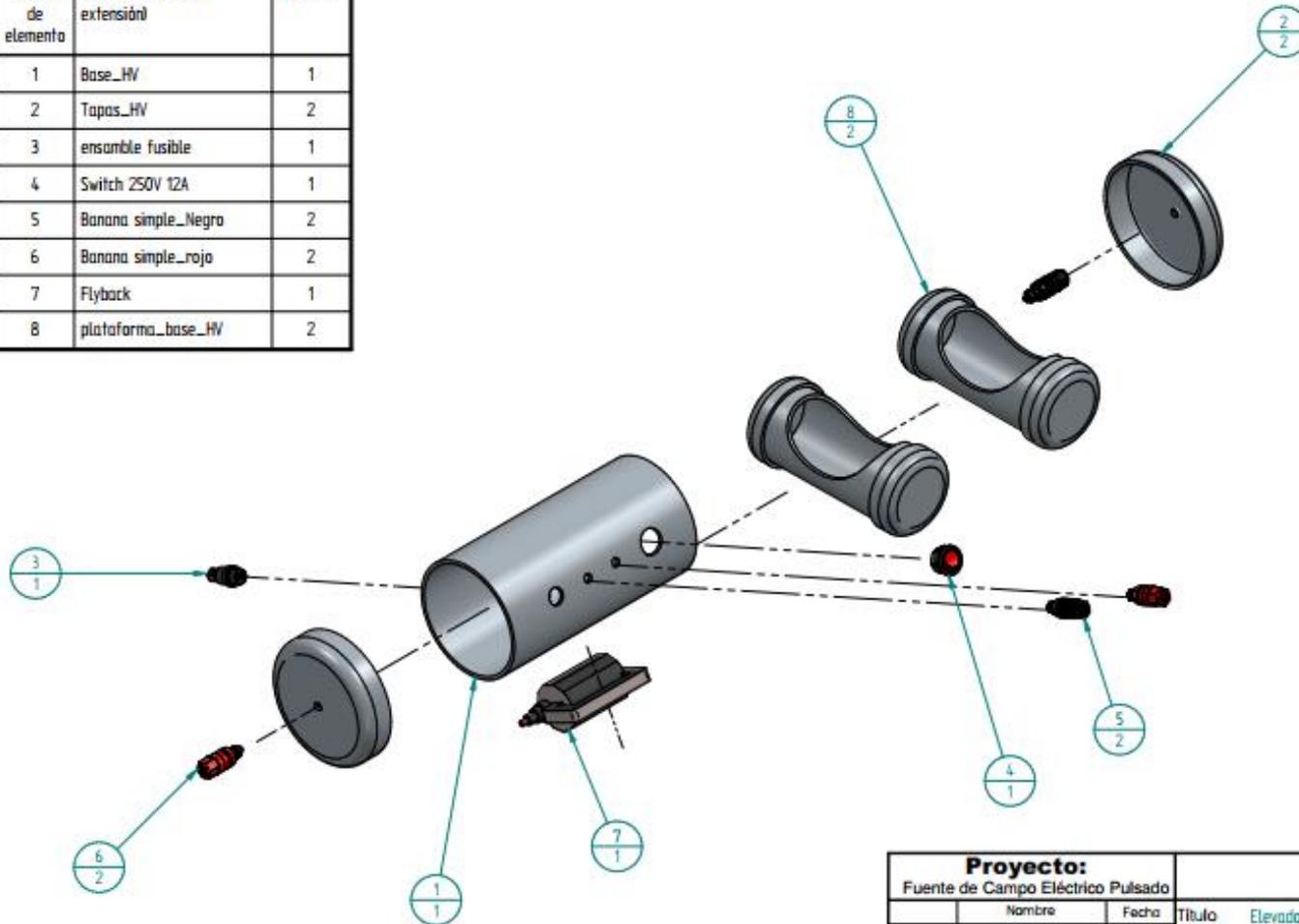


Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
1	Base_HV	1
2	Tapas_HV	2
3	ensamble fusible	1
4	Switch 250V 12A	1
5	Banana simple_Negro	2
6	Banana simple_rojo	2
7	Flyback	1
8	plataforma_base_HV	2

Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado				
Nombre	Fecha	Título Elevador de Voltaje		
L. García & A. Lamió	27/05/18			
Dibujado		A3 Plano Rev		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias +0,5 y +1*		Archivo: Estructura1.dft		
Escala 1:1		Hoja 13 de 14		

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Número de elemento	Nombre archivo (sin extensión)	Cantidad
1	Base_HV	1
2	Tapas_HV	2
3	ensamble fusible	1
4	Switch 250V 12A	1
5	Banana simple_Negro	2
6	Banana simple_rojo	2
7	Flyback	1
8	plataforma_base_HV	2

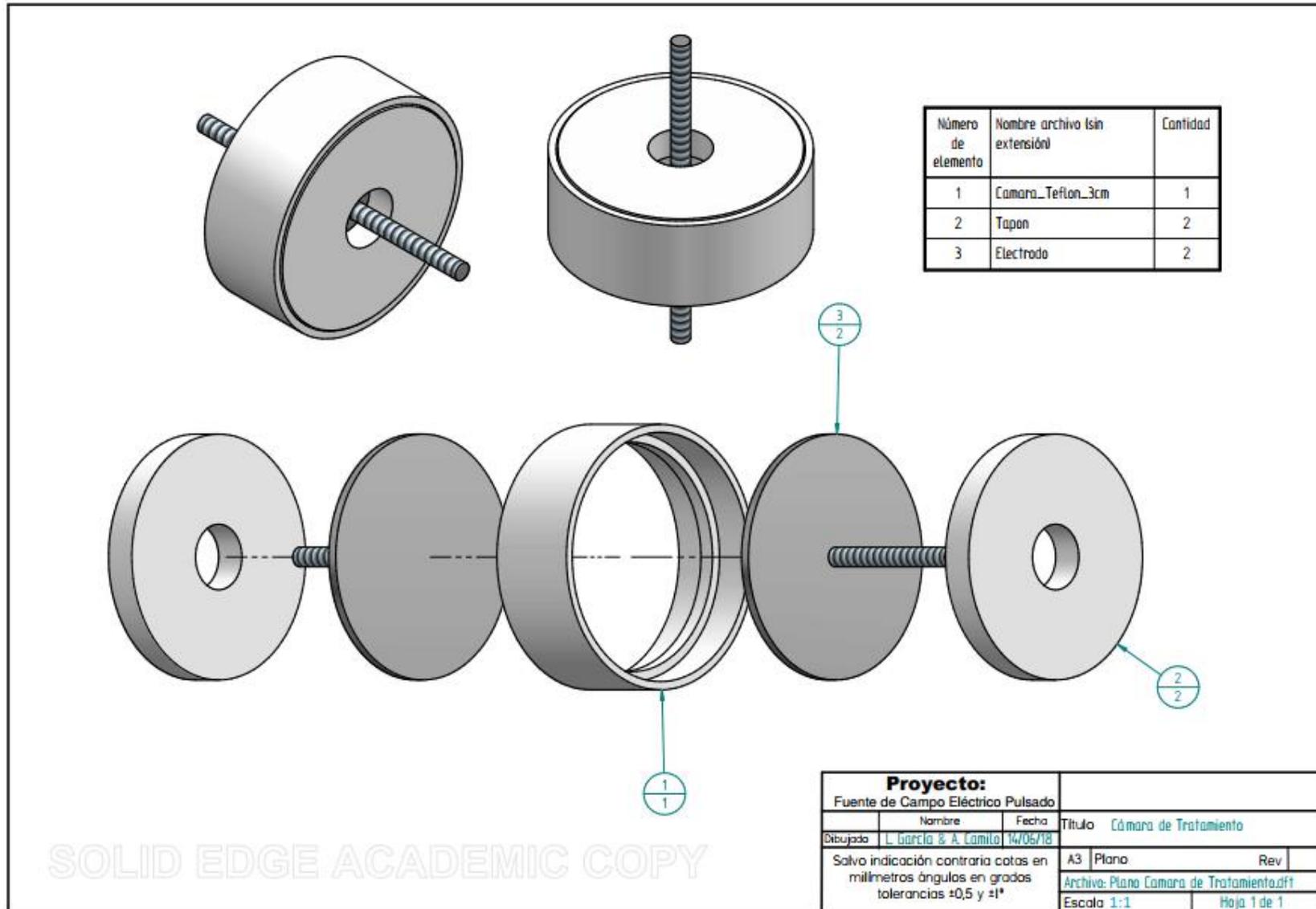


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Proyecto:				
Fuente de Campo Eléctrico Pulsado				
Nombre	Fecha	Titulo Elevador de Voltaje		
Dibujado L. Garcia & A. Camilo	27/05/18			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		A3 Plano	Rev	
		Archivo: Estructura1.dft		
		Escala 1:3	Hoja 14 de 14	

ANEXO B1.2. CÁMARA DE TRATAMIENTO

ANEXO B1.2. CÁMARA DE TRATAMIENTO



ANEXO B2. PROTOTIPO ELÉCTRÓNICO

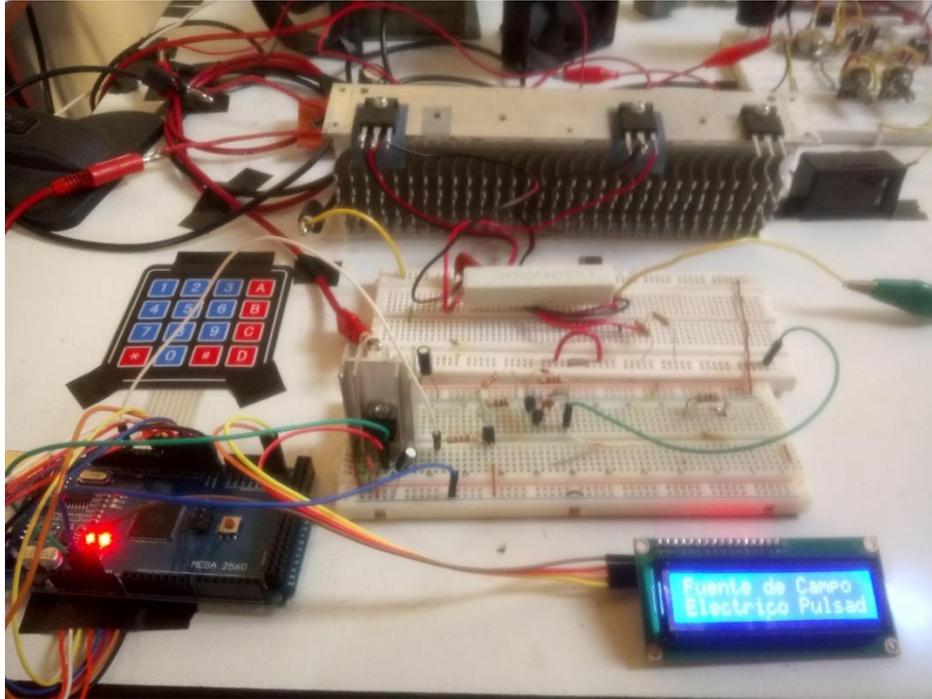


Figura B2.1. Prototipo del módulo de baja potencia [Fuente propia]

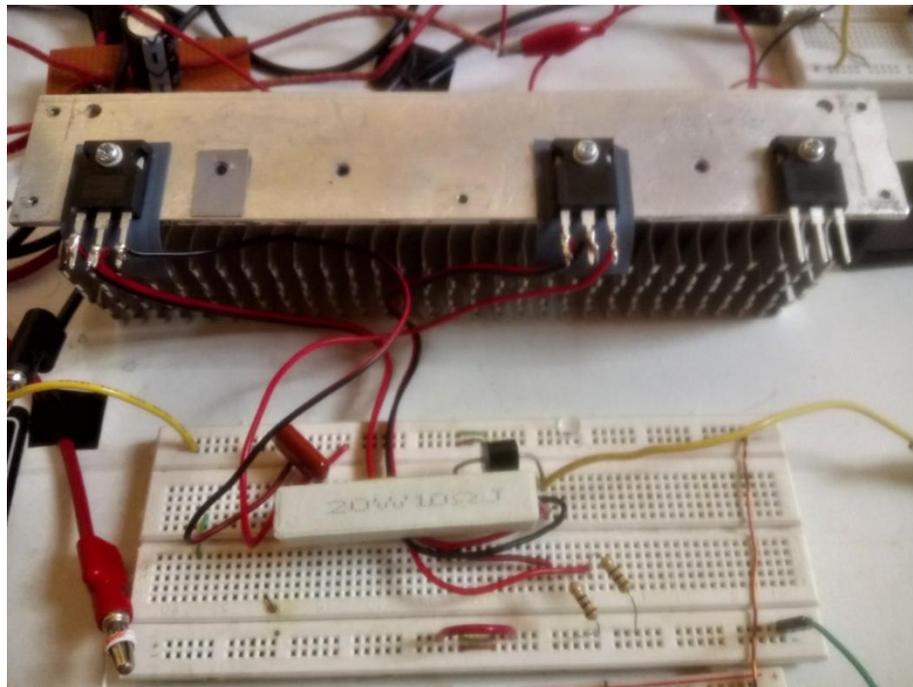


Figura B2.2. Prototipo del sistema de conmutación [Fuente propia]

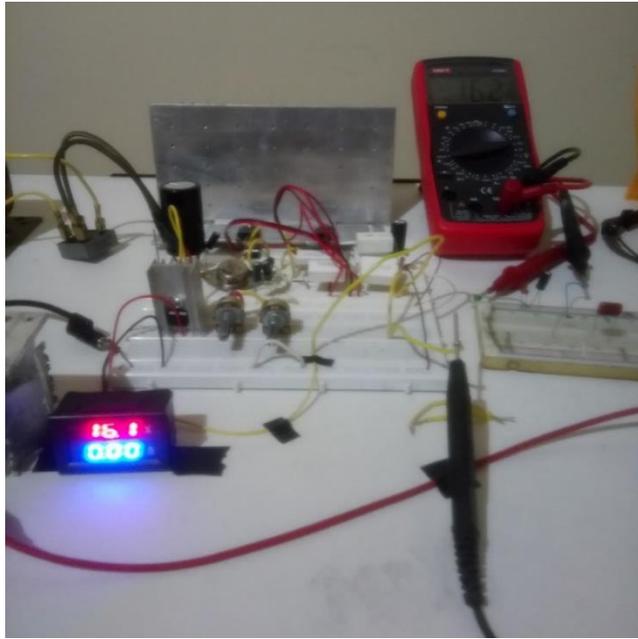


Figura B2.3. Prototipo de la fuente variable [Fuente propia]



Figura B2.4. Generador de alto voltaje [Fuente propia]

ANEXO B3. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA PEF



Figura B3.1. Soldado del armazón del sistema PEF [Fuente propia]



Figura B3.2. Corte de láminas de acero inoxidable por cizalla [Fuente propia]



Figura B3.3. Armazón terminado [Fuente propia]



Figura B3.4. Proceso de ensamble de la estructura [Fuente propia]

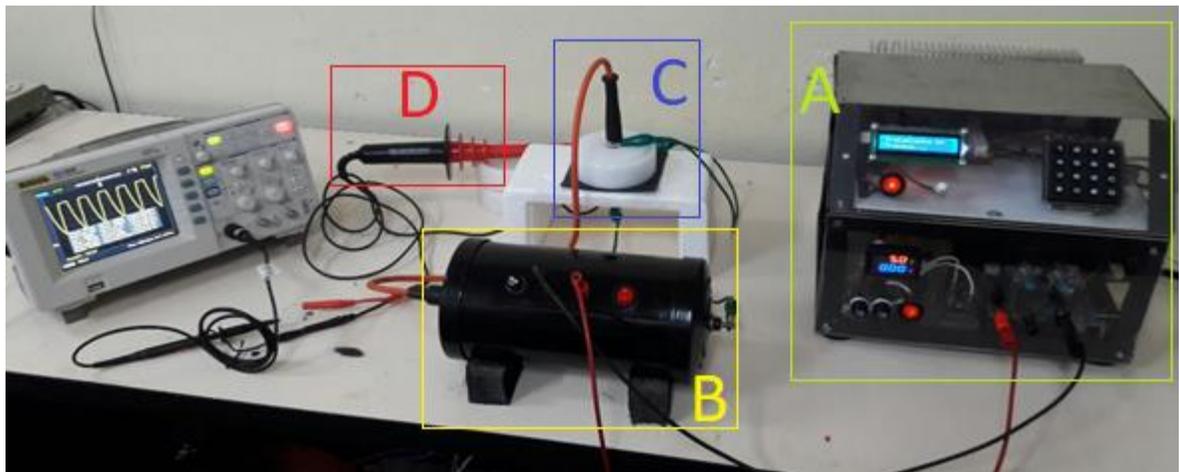


Figura B3.5. Sistema de campo eléctrico pulsado completo. A: Fuente PEF, B: Elevador de voltaje, C: Cámara de tratamiento, D: Sonda de alto voltaje [Fuente propia].

ANEXO B4. MANUAL DE USUARIO DE LA FUENTE DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO

En este apartado se precisan cada una de las partes del sistema de campo eléctrico pulsado, así como los pasos para la conexión de cada módulo (Fuente, elevador de voltaje y cámara de tratamiento) y los procesos para ejecutar el tratamiento.

B4.1. PARTES Y CONEXIÓN DEL SISTEMA DE CAMPO ELÉCTRICO PULSADO

El sistema completo está compuesto por tres módulos: El primero corresponde a la fuente PEF. El segundo es el módulo elevador de voltaje. El tercero y último corresponde a la cámara de tratamiento.

B4.1.1. FUENTE PEF

La fuente de campo eléctrico cuenta con una división que separa el sistema de control (e interfaz, parte superior) de la fuente variable (parte inferior). Tanto la parte inferior como superior se deben conectar a la red eléctrica.



Figura B4.1. Partes de la fuente de campo eléctrico pulsado [Fuente propia].

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Botón de encendido del sistema de control | 6. Voltiamperímetro |
| 2. Pantalla LCD | 7. Perrillas para ajuste del voltaje |
| 3. Teclado | 8. Borneras del elevador de voltaje |
| 4. Botón de reinicio | 9. Tierra de la fuente variable |
| 5. Botón de encendido de la fuente variable | f1. Fusible del sistema de control |
| | f2. Fusible de la fuente variable |

B4.1.2. ELEVADOR DE VOLTAJE

El elevador de voltaje es excitado a través de las borneras señaladas como parte N° 2 (en este ítem) y debe ser conectado a la fuente PEF a través de las borneras N°8, en sus respectivos colores. Las borneras 3 y 4 corresponde a la salida del alto voltaje (1-30 kV), e irán conectadas a los electrodos de la cámara de tratamiento.

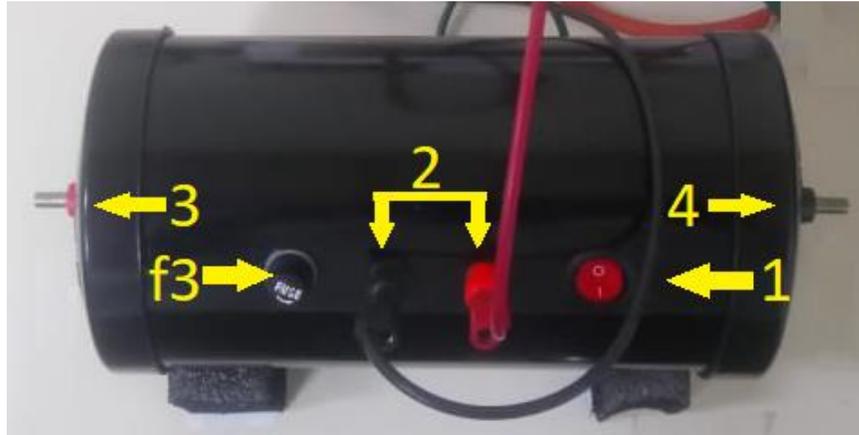


Figura B4.2. Partes del elevador de voltaje [Fuente propia].

1. Botón de encendido
2. Borneras de alimentación del elevador
3. Bornera roja, salida de alto voltaje
4. Bornera negra, tierra de alto voltaje
- f3. Fusible del elevador

B4.1.3. CÁMARA DE TRATAMIENTO

Los cables de alto voltaje conectados en los terminales 3 y 4 del elevador se acoplan a los electrodos de la cámara de tratamiento, tal como se muestra en la figura B4.3. Se recomienda conectar el terminal positivo al electro que está en contacto con el medio líquido.

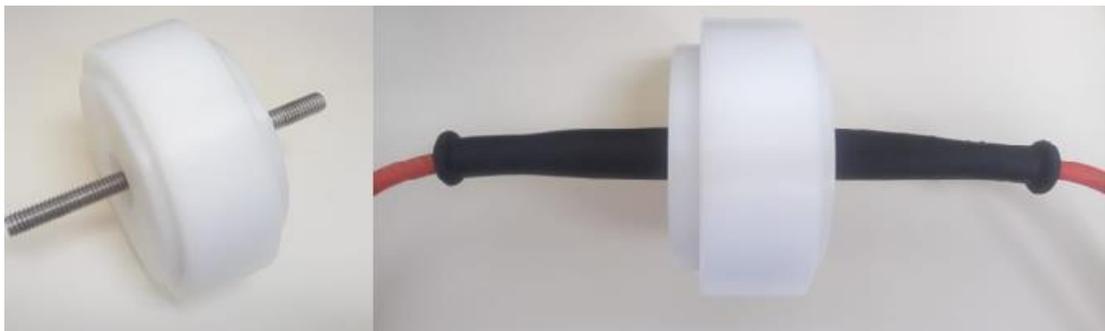


Figura B4.3. Conexión cámara de tratamiento [Fuente propia].

B4.2. PRECUACIONES NECESARIAS

Las precauciones siguientes son necesarias para evitar posibles daños al equipo, así como también lecciones personales al operador del sistema.

1. Antes de conectar el equipo a la red eléctrica verificar que todos los botones de encendido estén en off y poner las perillas del ajuste de voltaje en el mínimo valor.
2. Una vez conectado el equipo a la red eléctrica, con los respectivos botones de encendido activar primero el sistema de control a través del componente N°1 (figura B4.1) y en segundo lugar encender la fuente variable mediante el componente N° 5 (figura B4.1).
3. Una vez establecidos las condiciones del tratamiento, se pone en on el botón de encendido del elevador de voltaje y se procede a iniciar el proceso. Mientras que el tratamiento esté en proceso, tomar distancia del módulo de alto voltaje para evitar posibles descargas.
4. Terminado el tratamiento esperar un segundo y apagar el elevador de voltaje, seguido de la fuente variable y por último el sistema de control.

B4.3. PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN DE TRATAMIENTO

Primero encender el sistema de control, al hacerlo se desplegará un mensaje de inicio



Segundo, encender fuente variable y fijar en el voltaje correspondiente al campo eléctrico deseado mediante las perillas de ajuste (figura B4.1).



Menú de selección de tratamiento:

- A: Continuo
- B: Pulsado



Si la opción es A (Tratamiento de señal continua), seleccionar cuantos dígitos tendrá el tiempo de tratamiento a ejecutar (de 1-3), recordar que el tiempo de tratamiento está en segundos.



Ingresar el tiempo de tratamiento dependiendo del número de dígitos seleccionado



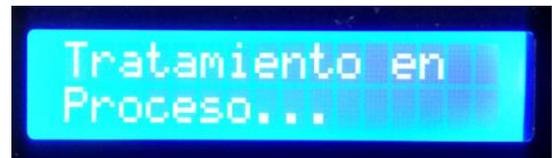
Menú de inicio del proceso de tratamiento: Muestra el tiempo digitado

A: Iniciar. Inicio de tratamiento

C: Corregir. Vuelve al menú de selección de tratamiento



Durante la duración del tratamiento, tomar distancia del elevador de voltaje.



Tratamiento terminado



Si la opción es B (Tratamiento pulsado) seleccionar cuantos dígitos tendrá el número de pulsos



Digitar el número de pulsos deseados para el tratamiento



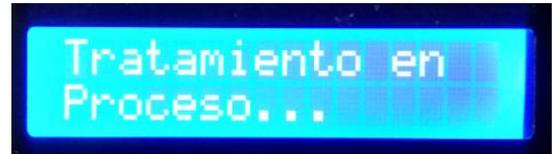
Menú de inicio del proceso de tratamiento: Muestra el número de pulsos digitado

A: Iniciar. Inicio de tratamiento

C: Corregir. Vuelve al menú de selección de tratamiento



Durante la duración del tratamiento, tomar distancia del elevador de voltaje.



Tratamiento terminado



Terminado el tratamiento se volverá a desplegar el menú de selección del tipo de tratamiento. Para extraer el líquido tratado, apagar el sistema; empezando por elevador de voltaje seguido de la fuente variables y por último el sistema de control.