

Trabajo Fin de Grado

Evaluación de tecnologías de condensadores para
generadores de pulsos para electroporación

Evaluation of capacitor technologies for pulse
generators for electroporation

Autor

Daniel Güemes Calvo

Director/es

Héctor Sarnago Andía
Óscar Lucía Gil

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Universidad de Zaragoza

Diciembre 2017



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Daniel Güemes Calvo,

con nº de DNI 73023995F en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado

Evaluación de tecnologías de condensadores para generadores de

pulsos para electroporación

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 30 de octubre de 2017

Fdo: Daniel Güemes Calvo

Gracias

*Gracias a Héctor y Óscar,
por guiarme siempre que lo he necesitado*

*Gracias a Alejandro, Borja y el resto del GEPM,
por ayudarme día a día a hacer este trabajo*

*Gracias a mis padres, hermano y abuela,
por haberme aguantado todo este tiempo*

*Y sobre todo gracias a mis compañeros de clase,
por haber caminado a mi lado todos estos años
en los buenos y en los malos momentos*

Evaluación de tecnologías de condensadores para generadores de pulsos para electroporación

RESUMEN

La electroporación se basa en aplicar pulsos de campo eléctrico de alta intensidad sobre tejidos vivos con el fin de lograr crear poros en las membranas celulares. Se distinguen dos grandes líneas de tratamiento en función de la evolución temporal de estos poros: electroporación reversible, cuando las células vuelen a su estado original, y electroporación irreversible, cuando el daño celular es permanente. Este trabajo se centrará en la electroporación irreversible (*IRE*) como método para la ablación de tumores y, más concretamente, estará orientado al diseño de los generadores para tal fin.

Teniendo en cuenta los niveles de campo eléctrico aplicado, que varían entre 0.5 - 3 kV/cm, y la superficie a tratar, los niveles de tensión y corriente necesarios pueden llegar a 10 kV (20 kV pico a pico) y más de 800 A. Esto puede suponer potencias instantáneas de 8 MW, por lo que resulta necesario un sistema de almacenamiento de energía que temporalmente sea capaz de entregar esta potencia. Para dicho almacenamiento de energía se suelen emplear condensadores, y más en concreto, condensadores de película o film. El principal problema es su elevado volumen y coste, por lo que este trabajo está orientado a evaluar otras tecnologías de condensadores para esta aplicación tan exigente en términos de potencia instantánea, energía almacenada, vida útil y densidad de potencia.

Por tanto, el trabajo consistirá en diseñar un banco de pruebas para evaluar el comportamiento de otras tecnologías de condensadores, su interconexión con un sistema de adquisición de datos, y el diseño de una carga electrónica que modele la aplicación.

Índice general

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE DE FIGURAS | XIII |
| ÍNDICE DE TABLAS | XVIII |
| LISTADO DE ACRÓNIMOS EN ORDEN ALFABÉTICO | XX |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. CONTEXTO | 1 |
| 1.2. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS | 2 |
| 1.3. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA | 2 |
| 2. ELECTROPORACIÓN..... | 5 |
| 2.1. ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.2. TIPOS DE ELECTROPORACIÓN..... | 7 |
| 2.3. LÍMITES | 9 |
| 2.4. CONTEXTO HISTÓRICO..... | 12 |
| 3. TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA | 15 |
| 3.1. CONVERTIDORES DE POTENCIA | 15 |
| 3.1.1. Generadores basados en transformador | 17 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 3.1.2. | Generadores basados en condensador | 18 |
| 3.1.3. | Generadores con guías de onda..... | 18 |
| 3.1.4. | Análisis comparativo de tecnologías de condensadores..... | 19 |
| 3.2. | CONDENSADORES | 21 |
| 3.2.1. | Condensadores electrolíticos | 23 |
| 3.2.2. | Condensadores de película o film..... | 24 |
| 3.2.3. | Condensadores cerámicos..... | 25 |
| 3.2.4. | Análisis comparativo de tecnologías de condensadores..... | 26 |
| 4. | DISEÑO | 27 |
| 4.1. | SELECCIÓN DE CAPACIDAD Y TENSIÓN..... | 27 |
| 4.2. | ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN ELEGIDA..... | 31 |
| 4.2.1. | Comparativa de energía frente a volumen | 32 |
| 4.2.2. | Comparativa de energía frente a tensión | 34 |
| 4.3. | DISEÑO, ESQUEMATIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN | 36 |
| 4.3.1. | Condensadores electrolíticos | 38 |
| 4.3.2. | Condensadores film..... | 43 |
| 4.3.3. | Condensadores cerámicos..... | 45 |
| 4.3.4. | Análisis comparativo de los condensadores elegidos | 49 |
| 5. | EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS | 53 |
| 5.1. | MONTAJE DE LOS CONDENSADORES..... | 53 |
| 5.2. | MONTAJE DEL SISTEMA COMPLETO | 56 |
| 5.2.1. | Generador | 57 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.2. | Etapa inversora | 57 |
| 5.2.3. | Transformador | 58 |
| 5.2.4. | Inversor | 58 |
| 5.2.5. | Carga | 60 |
| 5.3. | PRUEBAS Y RESULTADOS | 61 |
| 5.3.1. | Circuito de carga de condensadores | 61 |
| 5.3.2. | Resultados experimentales | 62 |
| 6. | CONCLUSIONES | 67 |
| 6.1. | CONCLUSIONES | 67 |
| 6.2. | LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO | 68 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 70 |

ANEXOS

| | | |
|----|--------------------------------|----|
| A. | CRONOLOGÍA | 76 |
| B. | HARDWARE Y SOFTWARE | 78 |
| C. | HOJAS DE CARACTERÍSTICAS | 80 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Electroporación | 6 |
| Figura 2.2: Tipos de electroporación [1]: (a) Reversible. (b) Irreversible..... | 8 |
| Figura 3.1 Pulsos de alta tensión para IRE [1]: (a) Caída exponencial. (b) Pulso cuadrado unipolar. (c) Pulso cuadrado bipolar. (c) Tren de pulsos bipolares..... | 16 |
| Figura 3.2: Esquema de un generador basado en transformador [1]. | 17 |
| Figura 3.3: Onda de salida de un generador basado en transformador [1]. (a) Ideal. (b) Caso más desfavorable..... | 17 |
| Figura 3.4: Esquema de un generador basado en condensador [1]..... | 18 |
| Figura 3.5: Ondas de salida de un generador basado en condensador: (a) Ideal. (b) Worst case. | 18 |
| Figura 3.6: Esquema de un generador con guía de onda [1]. | 19 |
| Figura 3.7: Ondas de salida de un generador con guía de onda..... | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8 Arquitectura del generador creado por el GEPM [1]..... | 20 |
| Figura 3.9: Esquema de un condensador electrolítico simple [24]. | 23 |
| Figura 3.10: Esquema de un condensador film simple. | 24 |
| Figura 3.11: Esquema de un condensador cerámico multicapa [25]. | 25 |
| Figura 4.1: Corriente necesaria para garantizar la IRE en función del diámetro de las placas utilizadas para distintas dosis de campo eléctrico..... | 28 |
| Figura 4.2: Topología tipo multinivel | 30 |
| Figura 4.3: Comparativa de densidades de energía para distintos tipos de condensador.. | 33 |
| Figura 4.4: Medición experimental de densidades de carga en los distintos tipos de condensador [26]. | 34 |
| Figura 4.5: Caída de capacidad en los condensadores cerámicos elegidos en función de la tensión. | 35 |
| Figura 4.6: Energía acumulada en función de la tensión aplicada para diferentes tecnologías de condensadores. | 35 |
| Figura 4.7: Condensador modelo 861101487034 de Wurth Electronics..... | 38 |
| Figura 4.8: Esquemático de los condensadores electrolíticos en LTspice. | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.9: Simulación en LTspice de las caídas de tensión en cada fila de condensadores electrolíticos. | 40 |
| Figura 4.10: Esquema de los condensadores electrolíticos en Altium. | 41 |
| Figura 4.11: Modelo 2D de la PCB diseñada en Altium para los condensadores electrolíticos. | 42 |
| Figura 4.12: Modelo 3D de la PCB diseñada en Altium para los condensadores electrolíticos. | 42 |
| Figura 4.13: Condensador modelo EZPE1100VDC de Panasonic. | 43 |
| Figura 4.14: Esquema de los condensadores film en Altium. | 43 |
| Figura 4.15: Modelo 2D de la PCB diseñada para los condensadores film. | 44 |
| Figura 4.16: Modelo 3D de la PCB diseñada para los condensadores film. | 45 |
| Figura 4.17: Condensador modelo C5750X6S2W225M250KA de TDK. | 46 |
| Figura 4.18: Esquema de los condensadores cerámicos en Altium. | 47 |
| Figura 4.19: Modelo 2D de la PCB diseñada para los condensadores cerámicos. | 48 |
| Figura 4.20: Modelo 3D de la PCB diseñada para los condensadores cerámicos. | 48 |
| Figura 4.21: Comparativa de densidades entre los condensadores elegidos. (a) Densidad energética. (b) Densidad de capacidad. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.22: Comparativa de precios entre los condensadores elegidos: (a) Precio unitario. (b) Precio total. | 51 |
| Figura 5.1: Vistas de la placa de condensadores electrolíticos. (a) Superior. (b) Con perspectiva. | 54 |
| Figura 5.2: Vistas de la placa de condensadores film. (a) Superior. (b) Con perspectiva. | 54 |
| Figura 5.3: Vistas de la placa de condensadores cerámicos. (a) Superior. (b) Con perspectiva. | 55 |
| Figura 5.4: Esquema general del setup utilizado. | 56 |
| Figura 5.5: Generador de continua EA PSI 9750-60 3U. | 57 |
| Figura 5.6: Etapa inversora. | 57 |
| Figura 5.7: Transformador. | 58 |
| Figura 5.8: Módulos de potencia empleados en los test: (a) IGBT de Si. (b) Módulo de potencia basado en SiC. | 59 |
| Figura 5.9: Etapa inversora. | 60 |
| Figura 5.10: Resistencia de carga. (a) Vista general. (b) Vista en detalle. | 60 |
| Figura 5.11: Principales formas de onda de la etapa de carga de condensadores. | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.12: Principales formas de onda del test 1: Tecnología de condensadores film, módulo de IGBTs y anchura de pulsos de 100 μ s..... | 62 |
| Figura 5.13: Principales formas de onda del test 1: Tecnología de condensadores electrolíticos, módulo de IGBTs y anchura de pulsos de 100 μ s..... | 63 |
| Figura 5.14: Principales formas de onda del test 2: Módulo de MOSFETs de SiC y anchura de pulsos de 100 μ s. (a) Tecnología de condensadores film. (b) Tecnología de condensadores electrolíticos. | 64 |
| Figura 5.15: Diferentes anchuras de pulso bajo test empleando el módulo de semiconductores de SiC y la tecnología de condensadores electrolíticos. (a) 10 μ s. (b) 1 μ s. (c) 500 ns. | 65 |
| Figura 5.16: Ráfaga de 100 pulsos de 1 μ s usando tecnología de condensadores electrolíticos..... | 66 |
| Figura A.1: Diagrama de Gantt | 76 |

Índice de Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1: Comparativa entre topologías de generador..... | 19 |
| Tabla 3.2: Comparativa entre tipos de condensador | 26 |
| Tabla 4.1: Densidad energética de condensadores electrolíticos..... | 32 |
| Tabla 4.2: Comparativa entre las características principales de los condensadores..... | 49 |

Listado de acrónimos en orden alfabético

| | |
|--------------|---|
| ADN | Ácido Desoxirribonucleico |
| EINA | Escuela de Ingeniería y Arquitectura |
| ESL | <i>Equivalent Series Inductance</i> (la inductancia se suele representar con 'L') |
| ESR | <i>Equivalent Series Resistance</i> |
| FPGA | <i>Field Programmable Gate Array</i> |
| GPEM | Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica |
| GND | <i>Ground</i> |
| HFIRE | <i>High Frequency IRE</i> |
| IRE | <i>Irreversible Electroporation</i> |
| I3A | Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón |
| PCB | <i>Printed Circuit Board</i> |
| PDF | <i>Portable Document Format</i> |
| RE | <i>Reversible Electroporation</i> |
| SMD | <i>Surface Mount Technology</i> |
| SPICE | <i>Simulation Program with Integrated Circuits Emphasis</i> |

TFG Trabajo de Fin de Grado

UNIZAR Universidad de Zaragoza

UPF Universidad Pompeu Fabra

Memoria

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) ha sido realizado en colaboración con el Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica (GEPM), un grupo de investigación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza (UNIZAR) y del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). Los directores de este trabajo, Héctor Sarnago y Óscar Lucía, son miembros de este grupo.

La investigación del grupo se centra en las tecnologías de electrónica de potencia y microelectrónica, utilizadas en aplicaciones electrodomésticas, industriales, de comunicaciones y biomédicas, desde las bajas/medias frecuencias (10 kHz - 1 MHz) hasta frecuencias más altas (hasta 3 GHz).

El periodo de desarrollo de este proyecto ha sido de 6 meses, desde junio hasta noviembre del año 2017.

1.2. Motivación y Objetivos

El GEPM ha investigado y patentado un generador de pulsos de alta tensión para el tratamiento de tumores sólidos mediante electroporación irreversible, una terapia más rápida y menos toxica e invasiva que la quimioterapia y otras alternativas como la ablación por radiofrecuencia o microondas [1]. Las necesidades eléctricas de este generador nos llevan a buscar un sistema de almacenamiento de energía que nos permita optimizar tanto el volumen energético almacenado como su coste total.

Para ello, se proponen como objetivos la investigación de nuevas tecnologías de condensadores para almacenamiento de energía y el diseño de un banco de pruebas para su evaluación.

En los sucesivos capítulos, nos adentraremos más profundamente en las causas y consecuencias de esta técnica.

1.3. Organización de la memoria

La memoria del trabajo se divide en 6 capítulos. En este primer capítulo se presenta el trabajo y su estructura general. A continuación, se explica el contenido de los 5 capítulos restantes:

Capítulo 2 - Electroporación: en él se hace una introducción general al fenómeno de la electroporación, origen y motivo del desarrollo de este trabajo.

Capítulo 3 - Tecnología electrónica para electroporación: si el capítulo 2 trataba sobre la parte biológica que interviene en este trabajo, en este capítulo estudiaremos todo lo que tenga que ver con el campo de la electrónica.

Capítulo 4 - Diseño: en este capítulo se presentan detalladamente todas las fases de diseño que se han llevado a cabo en el trabajo.

Capítulo 5 - Experimentación y análisis: este capítulo trata sobre el desarrollo de las fases de montaje, experimentación y recogida de resultados que se han llevado a cabo en el trabajo.

Capítulo 6 - Conclusiones: en este capítulo se recogen todos los resultados y conclusiones extraídas tras la realización de este trabajo y se plantean una serie de posibles mejoras futuras para el mismo.

Capítulo 2

Electroporación

Este capítulo se va a centrar en la técnica de la electroporación, desde los fundamentos físicos básicos hasta las aplicaciones actuales. Aunque este trabajo se aborda desde la perspectiva de la ingeniería, es necesario hacer una introducción en los fundamentos biomédicos principales que forman parte de este trabajo para su completa comprensión.

2.1. Estado del arte

La electroporación es un proceso consistente en aplicar pulsos de campo eléctrico a tejidos celulares vivos [2]. Como consecuencia de que la corriente atraviese la célula, se induce la generación de unos nanoporos en la membrana celular [3], con lo que la permeabilidad de la misma a iones y macromoléculas se incrementa y así se producen una serie de cambios, como un aumento de su conductividad eléctrica y una reducción de su permitividad.

Gracias a este fenómeno podemos desarrollar un amplio abanico de nuevas técnicas para tratamiento de alimentos, esterilización, análisis de ADN y tratamiento de tumores, entre muchos otros usos.

Esta técnica está siendo muy investigada en la actualidad en diferentes campos como la industria alimenticia y la cosmética, pero su mayor potencial se encuentra ahora en la creación de una nueva terapia médica no invasiva, ya que la generación de estos poros nos permite y facilita tanto introducir fármacos en las células como eliminarlas de forma selectiva y programada.

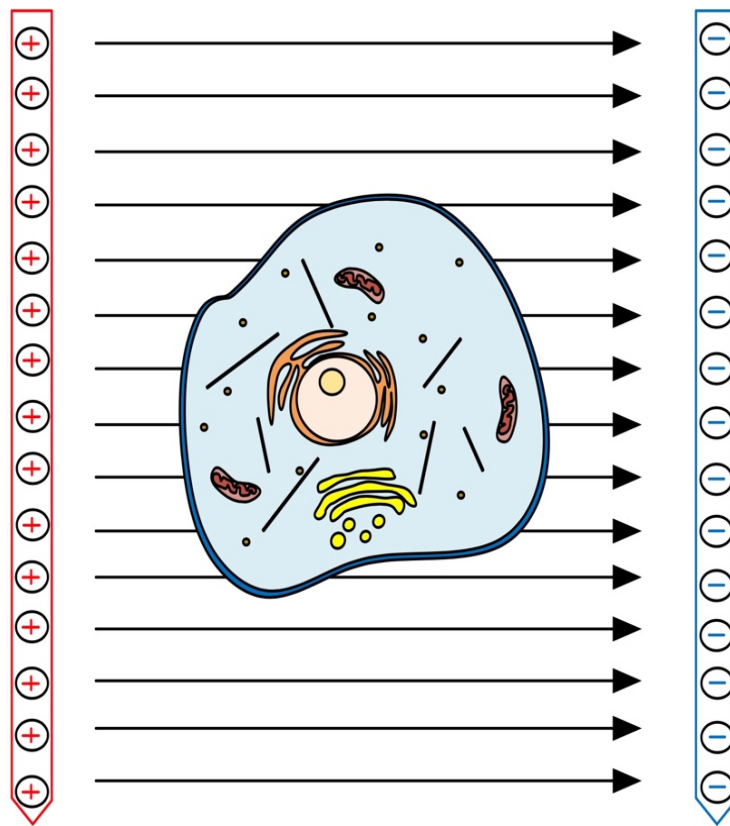


Figura 2.1: Electroporación

2.2. Tipos de electroporación

En función de las características del campo eléctrico que se aplique las células pueden llegar a presentar lesiones de distinto grado. En base a la gravedad de estas lesiones nos es posible hablar de dos tipos de electroporación:

- La electroporación **reversible** o *reversible electroporation (RE)* se caracteriza, como su nombre indica, por generar lesiones celulares de carácter reversible. Esto es, las células afectadas recobran su estado inicial transcurrido un cierto periodo temporal. Esta rama de la electroporación tiene un gran campo de aplicación en la actualidad [4]: introducción en vivo de genes en células (electrogenoterapia) [5]-[7], introducción de fármacos anticancerígenos en células indeseables (electroquimioterapia) [8], introducción de fotosensibilizadores en células tumorales para terapia fotodinámica [9], aplicaciones en la industria alimentaria [10], etc.
- En segundo lugar, tenemos la electroporación **irreversible** o *irreversible electroporation (IRE)*. Este proceso, que es el uso principal de la electroporación, se caracteriza por la aplicación de un campo eléctrico de mayor intensidad sobre el grupo celular. Las lesiones generadas en este caso tienen un carácter temporal definitivo dando lugar a la muerte de la célula

por necrosis o apoptosis en función del campo eléctrico aplicado. Si se produce una degradación suficiente de la membrana celular su muerte es inmediata y se denomina necrosis, si el daño celular infligido se produce de forma controlada se producirá una apoptosis o muerte celular programada.

Los esfuerzos se centran ahora en la utilización de la *IRE* para el desarrollo de un nuevo tratamiento de ablación tumoral [11], un tratamiento poco invasivo y con muchas ventajas sobre otros: posibilidad de tratar tumores en tejidos con alta perfusión sanguínea, ausencia de efectos secundarios debidos a alta temperatura y la posibilidad de ser un tratamiento complementario a prácticamente todos los existentes en la actualidad.

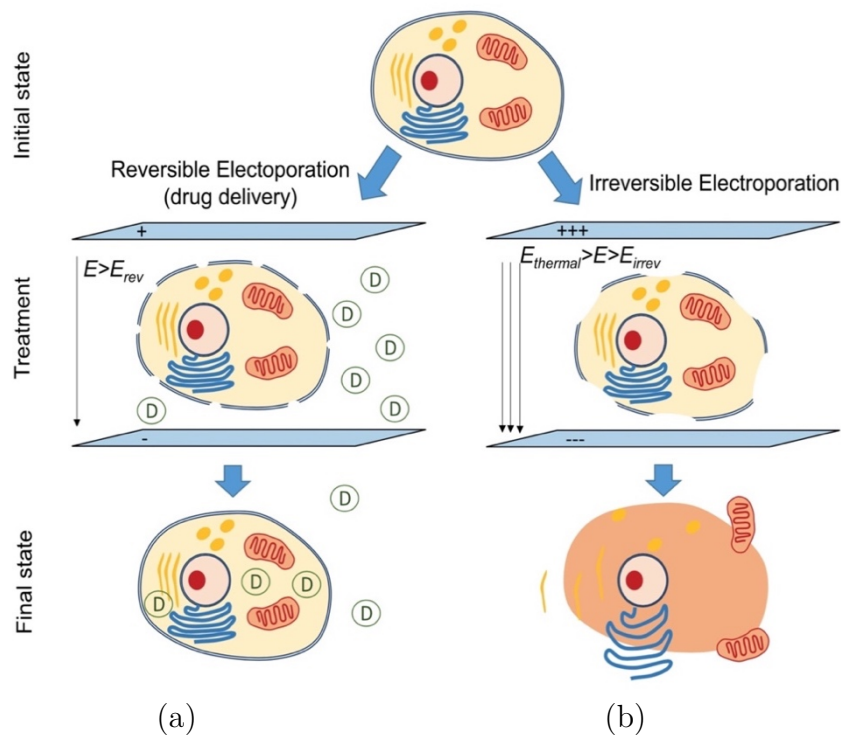


Figura 2.2: Tipos de electroporación [1]: (a) Reversible. (b) Irreversible.

2.3. Límites

La electroporación es un fenómeno que depende de directamente de la tensión de campo aplicada a la membrana celular. Para una duración y forma de impulso dada, existe un umbral de tensión transmembrana específico para la manifestación del fenómeno de electroporación (de 0,5 V a 1 V) [4].

Esto conduce a la definición de un umbral de magnitud de campo eléctrico para la electroporación (E_{rev}). Sólo las células que se encuentren dentro de las áreas donde $E \geq E_{rev}$ serán electroporadas. Si se alcanza o supera un segundo umbral (E_{irrev}), la electroporación compromete la viabilidad de las células porque pasará a ser entonces irreversible.

También se puede definir un umbral mayor ($E_{thermal}$) para la manifestación del daño térmico causado por el efecto Joule [12]. Esto es particularmente relevante en el caso de las técnicas de ablación de *IRE*: si se supera el umbral de irreversibilidad, pero no se alcanza el umbral térmico, las células se destruyen, pero se evita la destrucción del tejido y se facilita la cicatrización posterior al tratamiento.

Releyendo lo anterior, es bastante obvio que resulta imprescindible un control preciso sobre el campo eléctrico que se aplica en los tejidos para las terapias de electroporación. El objetivo es generar una magnitud de campo eléctrico bastante homogénea ($E_{min} \leq E < E_{max}$) en la región de interés y una magnitud de campo eléctrico tan baja como sea posible en las regiones que no se van a tratar [4].

Nótese que hemos indicado que la magnitud del campo eléctrico en la región de interés debe estar entre E_{min} y E_{max} en lugar de E_{rev} y E_{irrev} . Las etiquetas de E_{rev} y E_{irrev} se emplean generalmente para indicar las magnitudes mínimas de campo eléctrico a las que se puede manifestar la electroporación reversible y la electroporación irreversible, pero eso no implica que todas las células experimenten una electroporación reversible o irreversible. En otras palabras, incluso si la magnitud del campo eléctrico en una determinada área es ligeramente mayor que E_{rev} , eso no garantiza que todas las células de esa área experimenten suficiente electroporación reversible.

Durante muchos años los investigadores han estado utilizando métodos numéricos como la aproximación a elementos finitos con objeto de obtener computacionalmente la magnitud de la distribución de campo magnético para así poder predecir el volumen de tejido que será electroporado de forma efectiva bajo una configuración conocida, con unos resultados positivos [13].

Estos modelos han considerado que la conductividad de los tejidos se mantiene inalterable. Sin embargo, se ha descubierto recientemente que la conductividad eléctrica de un tejido varía según la magnitud de campo eléctrico que está experimentando. Así pues, si se electropora un tejido se modificara su conductividad eléctrica, modificando así la distribución de campo eléctrico, que a su vez remodelaría la conductividad del tejido, y así sucesivamente.

Por lo tanto, si se aplica un pulso de alta tensión sobre un tejido y la electroporación tiene lugar, no se llegará a alcanzar la distribución final de campo eléctrico de forma inmediata. Esta distribución de campo eléctrico final será distinta a la calculada por métodos numéricos.

Factores múltiples como el tamaño de las células, su forma y la separación intercelular pueden modificar la tensión transmembrana inducida. Según los resultados experimentales conocidos, es posible definir un E_{target} que represente la magnitud óptima del campo eléctrico para un tratamiento específico. Entonces, también definimos una tolerancia alrededor de este valor. Es decir, en la región a tratar, la magnitud del campo eléctrico debe estar dentro de este intervalo de tolerancia para conseguir un tratamiento exitoso.

Actualmente, la optimización de la distribución del campo eléctrico durante la electroporación se realiza mediante el diseño de configuraciones óptimas de electrodos. Sin embargo, hay situaciones en las cuales solamente una configuración de electrodos no es suficiente para obtener un campo eléctrico óptimo, particularmente en situaciones como la electroporación de tejidos con forma irregular o cuando se necesita proteger un área específica de tejido.

Para optimizar la distribución de campo eléctrico en estos distintos escenarios se pueden usar geles con conductividad eléctrica conocida para ganar precisión.

2.4. Contexto histórico

Las primeras publicaciones del estudio de la aplicación de campo eléctrico sobre tejidos vivos corresponden a J. A. Nollet [14], que en 1754 dio constancia sobre la formación de “manchas rojas” en el tejido tras exponerlo a campo eléctrico. Debido a la insuficiente corriente eléctrica proporcionada por los medios de la época, se tomó la diferencia de potencial como causa del fenómeno al descartarse por la insuficiencia de potencia un posible efecto térmico. Más tarde, en el año 1898, G. W. Fuller puso en práctica la aplicación de campo eléctrico al agua para intentar lograr su potabilización mediante la destrucción bacteriana. Este avance fue finalmente llevado a cabo ignorando los efectos producidos sobre la membrana celular y sus potenciales aplicaciones.

Ya adentrados en la primera mitad del siglo XX se estableció el carácter dieléctrico de la membrana celular y la posibilidad de producir un daño eléctrico mediante la aplicación de campo eléctrico con naturaleza reversible o no reversible. En 1950 se consiguió aportar los primeros valores concretos de campo eléctrico necesario para lograr una apoptosis celular gracias a R. Stämpfli, que estableció la cifra en 500 V/cm con un potencial de membrana de 110 mV [15]. Con estos datos empezaron los primeros desarrollos en aplicaciones germicidas para el tratamiento de alimentos.

Finalmente, en el año 1970, Sale y Hamilton sentaron las primeras bases de lo que sería la *IRE*. Llegaron a la conclusión de que los campos eléctricos aplicados sobre tejidos vivos producían una serie de cambios en la estructura celular, y que la magnitud de esta serie de daños dependía de tanto de la magnitud del campo eléctrico aplicado como del tiempo total que es expuesto [16] [17].

U. Zimmerman estableció un máximo asintótico en el efecto de electroporación para un tiempo entre los 50-100 μ s y una tensión con valor entre 2.6-2.8 kV, determinando a su vez la tensión de ruptura transmembrana en 1 V [18] [19].

En el año 1982 se consiguió lograr la fusión celular y la introducción de *ADN* plasmático, hecho que supuso un gran avance en los campos de la biotecnología y la medicina. Para conseguir esto se utilizó la electroporación reversible como medio para la introducción de agentes citotóxicos en células cancerosas, denominándose este proceso **electroquimioterapia** [20] [21].

A finales de los 90 se justifica la asociación de la muerte celular con una apoptosis que conduce a la fragmentación del *ADN* cromosómico. Estudios realizados en torno a 1997 proponen ya aplicaciones para la destrucción tumoral y establecen las consecuencias de la aplicación de estos tratamientos a la reducción de la velocidad de crecimiento de los tumores [22].

En 2004, R. Dávalos y B. Rubinsky proponen el uso de *IRE* para la ablación de tejidos con alta perfusión, es decir, con proximidad a vasos sanguíneos, proponiendo la aplicación de trenes de pulsos con una duración en torno a los milisegundos. Este método se propone como contraposición a los tratamientos térmicos intentando buscar una opción menos agresiva para el tejido tratado, ya que una de las ventajas de la electroporación es que no produce calentamiento térmico y ofrece una mejor cicatrización post-tratamiento y menor afectación a tejidos colindantes al tratado [11].

Capítulo 3

Tecnología electrónica para electroporación

En este capítulo se va a realizar un análisis sobre todos los elementos electrónicos que forman parte de este trabajo. Comenzaremos con un estado del arte sobre convertidores de potencia y sus distintas topologías, continuaremos con una introducción a los condensadores como tecnología de almacenamiento de energía viendo los distintos tipos que hay y las diferencias en sus características, y finalizaremos con una selección de los requisitos de almacenamiento de energía necesarios mediante una simulación por elementos finitos.

3.1. Convertidores de potencia

Para alcanzar la *IRE* se requiere la aplicación de unos niveles muy altos de campo eléctrico sobre el tejido a tratar. La frontera entre la electroporación reversible *RE* y no reversible *IRE* se sitúa en torno a 1000 V/cm para tejido animal. El grosor y el volumen de los tejidos con los que trabajamos (por ejemplo: un hígado, un riñón, una pieza de fruta...) se suele situar en el orden de varios centímetros, lo que nos obliga a alcanzar unos niveles muy altos de tensión y corriente (por ejemplo: un

hígado de 5 cm de espesor trabajando con placas de 5 cm de diámetro puede requerir 10 kV, 20 kV de pico a pico y más de 800 A). Esto puede suponer trabajar con potencias instantáneas de más de 8 MW.

Estudios recientes sugieren que la mejor forma de aumentar la efectividad del tratamiento es aplicando pulsos bipolares de alta tensión, unidos en forma de tren y con una duración del orden de microsegundos [1].

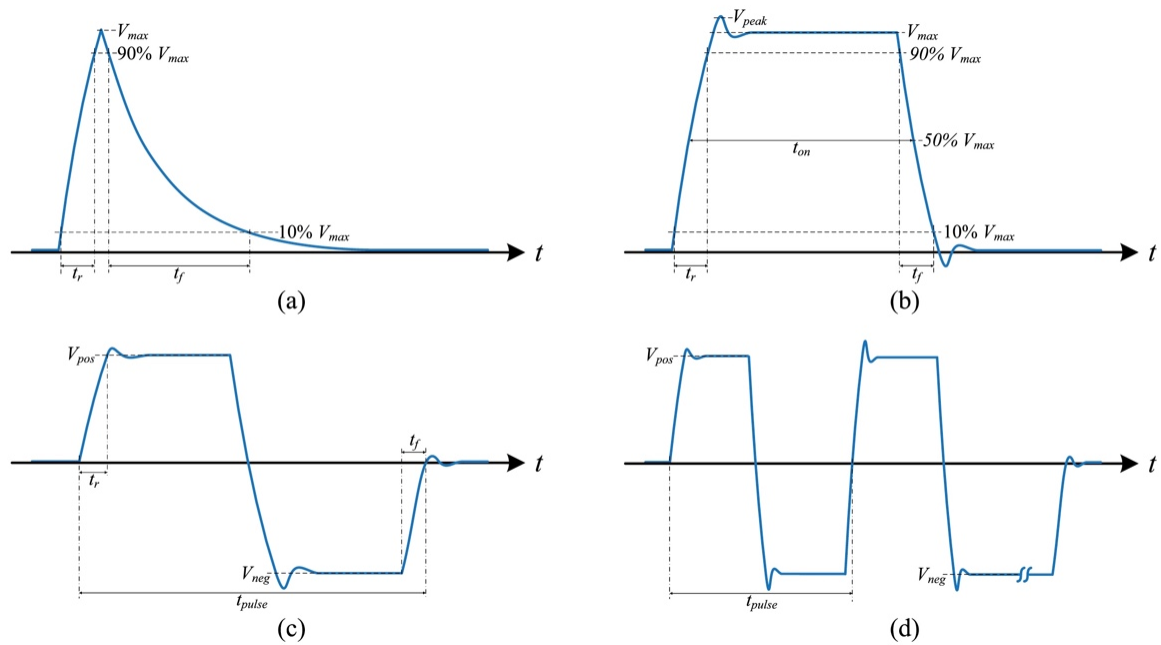


Figura 3.1 Pulsos de alta tensión para IRE [1]: (a) Caída exponencial. (b) Pulso cuadrado unipolar. (c) Pulso cuadrado bipolar. (d) Tren de pulsos bipolares.

Además, en función de la topología de convertidor de potencia que usemos tendremos que tener en cuenta la impedancia de salida del mismo.

Todas estos requisitos provocan que se nos complique la búsqueda de un generador capaz de satisfacer todas estas necesidades.

A continuación, vamos a describir y comparar los tipos de generadores básicos y enumerar sus propiedades:

3.1.1. Generadores basados en transformador

Los generadores basados en transformador se caracterizan en el uso de un transformador para elevar la tensión de salida, además de proveer aislamiento galvánico a la carga.

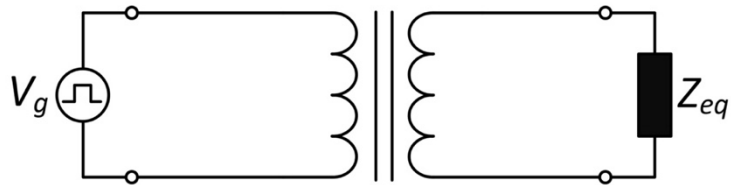


Figura 3.2: Esquema de un generador basado en transformador [1].

Estos generadores pueden suministrar una salida bipolar. Tienen una alta impedancia de salida, lo que los hacen dependientes de la carga. Sus principales restricciones aparecen por los parásitos generados por la no-idealidad del transformador, como por ejemplo la saturación magnética del mismo o las pérdidas del cobre.

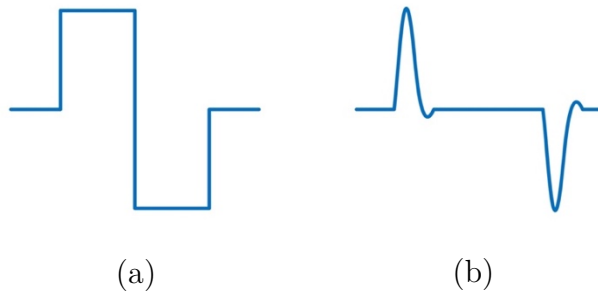


Figura 3.3: Onda de salida de un generador basado en transformador [1]. (a) Ideal. (b) Caso más desfavorable.

3.1.2. Generadores basados en condensador

Esta topología de generador se basa en la descarga de un condensador previamente cargado de forma controlada por un dispositivo.

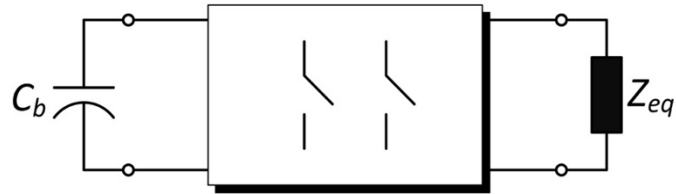


Figura 3.4: Esquema de un generador basado en condensador [1].

Esta topología es más simple, pero presenta varios problemas: requiere añadirle una etapa de aislamiento y de elevación de tensión. Además, la onda de salida es unipolar. Sin embargo, la impedancia de salida es baja, lo que nos permite no depender de la carga.



Figura 3.5: Ondas de salida de un generador basado en condensador: (a) Ideal. (b) *Worst case*.

3.1.3. Generadores con guías de onda

Este tipo de generadores están pensados para aplicaciones con anchos de pulsos muy estrechos (de duración mucho menor a los μs), donde se aprovecha el tiempo de propagación de la onda para conformar pulsos.

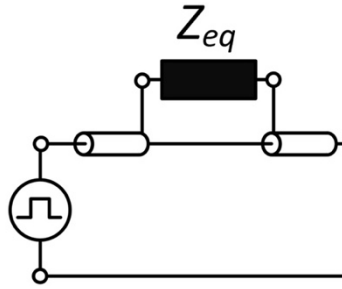


Figura 3.6: Esquema de un generador con guía de onda [1].

Esta topología de generador precisa de aislamiento y tiene una limitación en la tensión de salida. La impedancia de salida es elevada, por lo que la carga influirá en la onda de salida.

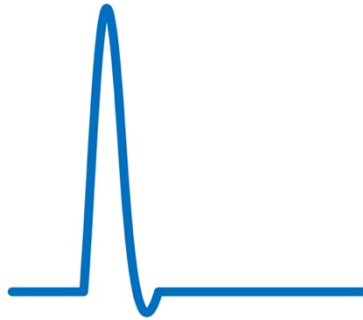


Figura 3.7: Ondas de salida de un generador con guía de onda.

3.1.4. Análisis comparativo de tecnologías de condensadores

| Topología Característica | Transformador | Condensador | Guías de onda |
|-----------------------------|---------------|-------------|---------------|
| Amplitud de tensión | +++ | +++ | ++ |
| Control | ++ | +++ | - |
| Aislamiento | +++ | - | - |
| Seguridad | +++ | + | ++ |
| Impedancia de carga | + | ++ | - |

Tabla 3.1: Comparativa entre topologías de generador

Ante esta situación, se hace necesaria la investigación de nuevas tecnologías para desarrollar nuevos equipos para poder continuar en la investigación de este tratamiento [23]. En este sentido, el GEPM ha conseguido diseñar y crear un generador con topología multinivel que nos da flexibilidad y control de tensión aplicada, forma de onda y número y anchura de pulsos, todo ello controlado mediante una *FPGA* manejada inalámbricamente por WiFi por un ordenador y totalmente aislado mediante fibra óptica [1].

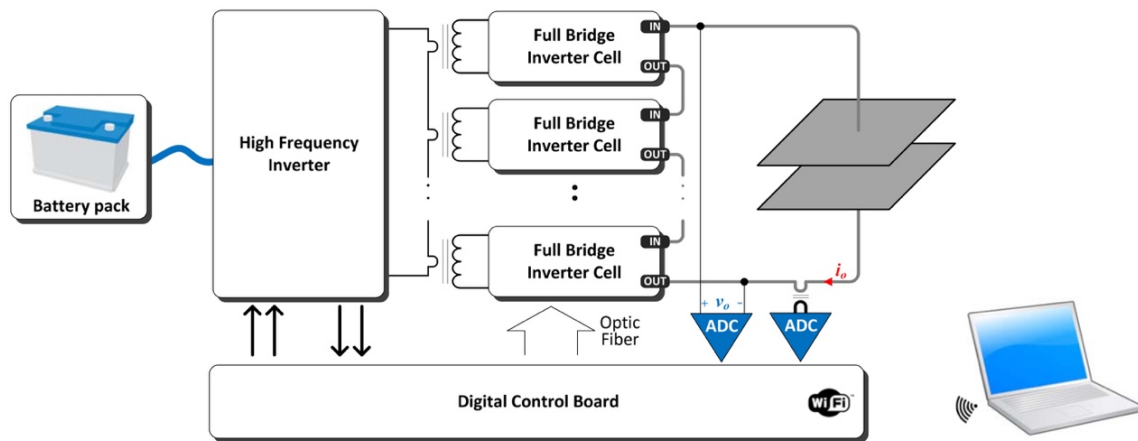


Figura 3.8 Arquitectura del generador creado por el GEPM [1].

Con este generador podemos alcanzar unas tensiones de hasta 12 kV (pico a pico) y corrientes de hasta 400 A, frente a los 3 kV y 50 A de los generadores en uso clínico actual.

3.2. Condensadores

Los **condensadores** son elementos eléctricos pasivos que han sido utilizados a lo largo de la historia para múltiples aplicaciones, como el almacenamiento de energía o el filtrado. Pueden ser fabricados en varias formas, tamaños y encapsulados, y en varios materiales.

De forma simple, se podría definir un condensador como dos superficies conductoras separadas por un material dieléctrico que almacena energía eléctrica en forma de campo eléctrico. Su capacidad se mide en Faradios (F), siendo 1 F la capacidad de un condensador en el que aplicándose una diferencia de potencial de 1 V se adquiere 1 Culombio (C) de carga eléctrica.

$$C = \frac{Q}{V}$$

C: Capacidad (F)
Q: Carga eléctrica (C)
V: Diferencia de potencial (V)

(3.1)

A lo largo de la última década, los condensadores han incrementado su **densidad energética** de forma significativa gracias a la investigación en técnicas de fabricación avanzadas y nuevos materiales, lo que los convierte en una buena solución para

almacenar altas densidades de energía. Este nivel de desarrollo alcanzado nos permite investigar el uso de condensadores como sistema de almacenamiento temporal de energía para generadores de electroporación [24].

Para dicho almacenamiento de energía se suelen emplear, en concreto, condensadores de película o film. El principal problema es su elevado volumen y coste, por lo que este trabajo está orientado a evaluar otras tecnologías de condensadores para esta aplicación tan exigente en términos de potencia instantánea, energía almacenada, vida útil y densidad de potencia.

De forma concreta, además de los mencionados condensadores de película o film, nos vamos a centrar en el estudio de los condensadores de tipo electrolítico y de tipo cerámico.

3.2.1. Condensadores electrolíticos

Este tipo de condensador consiste en un par de electrodos polarizados colocados en una solución electrolítica conductora. Su dieléctrico consiste en una capa de óxido formada a partir de la anodización de un metal soluble (aluminio, tántalo...), que hace las veces de ánodo (+) inmerso en un electrolito líquido, que a su vez será el cátodo (-).

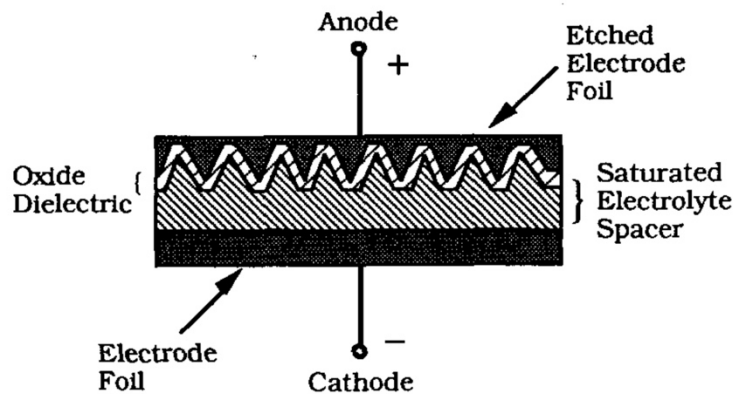


Figura 3.9: Esquema de un condensador electrolítico simple [24].

Gracias a la delgadez de la superficie del dieléctrico es posible que este sea enrollado o plegado sobre sí mismo múltiples veces antes de ser encapsulado, lo que otorga unos valores muy altos de capacidad a los condensadores electrolíticos, característica que los diferencia del resto. Esta gran capacidad hace que sean muy útiles a la hora de ser usados en circuitos de alta corriente y baja frecuencia.

Como parte negativa más destacada encontramos que este tipo de condensadores se encuentran polarizados, lo que complica en parte su uso e impide que puedan ser utilizados en aplicaciones de corriente alterna (*AC*). También es reseñable la gran variabilidad de la tolerancia respecto de la temperatura y la frecuencia, además de la degradación de la capacidad con el tiempo y a temperaturas elevadas.

3.2.2. Condensadores de película o film

Estos condensadores se caracterizan por usar un plástico aislante como dieléctrico. Se crean a partir de la unión de dos piezas de plástico cubiertas con electrodos metálicos posteriormente enrolladas y encapsuladas.

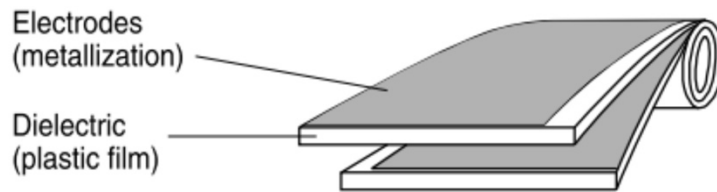


Figura 3.10: Esquema de un condensador film simple.

Sus principales ventajas son la no polarización (a diferencia de los electrolíticos) y su gran resistencia de aislamiento y frente altas temperaturas. Además, hay que destacar el bajo valor de *ESR* (resistencia serie parasita equivalente) y *ESL* (inductancia serie parasita equivalente) que ofrece y la robustez que ofrece en aplicaciones de alta tensión. Su estabilidad, durabilidad, bajos *ESL* y *ESR* y bajo coste hace que sean una muy buena solución en múltiples aplicaciones.

Entre sus desventajas podemos destacar su tamaño, más grande en proporción a su capacidad que los demás, y los bajos valores de capacidad alcanzables.

3.2.3. Condensadores cerámicos

Los condensadores cerámicos se caracterizan por usar un material cerámico como dieléctrico. Se componen de varias capas de material cerámico unidas a una capa de un metal, que actúa como electrodo.

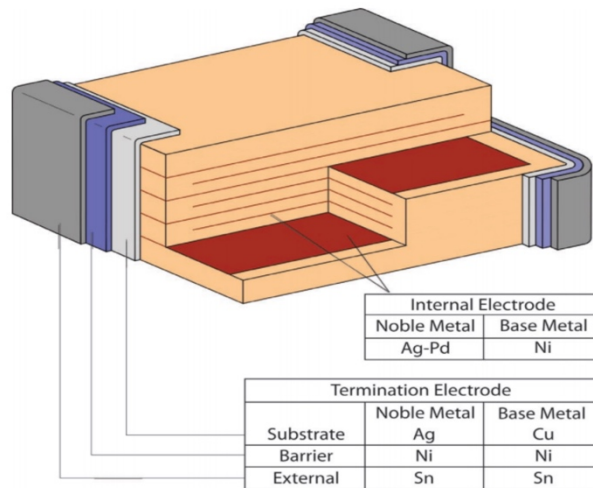


Figura 3.11: Esquema de un condensador cerámico multicapa [25].

Este tipo de condensador se caracteriza principalmente por su pequeño tamaño, siendo posible su construcción para montaje superficial (*SMD*) lo que los convierte en la tecnología de condensador dominante en circuitos impresos (*PCB*). A diferencia de los electrolíticos, no son polarizados. El material cerámico que usan hace que estos condensadores tengan una de las constantes dieléctricas más alta de entre todos los tipos. Su gran estabilidad y baja inductancia parasita hace que sean muy usados en circuitos resonantes y filtros, pero al poseer gran tolerancia a altas temperaturas y alta tensión también pueden ser usados para aplicaciones de alta potencia.

Como principal punto en contra encontramos la baja capacidad de la que disponen, siendo difícil encontrar condensadores cerámicos que superen los μF en tensiones elevadas.

Los condensadores cerámicos pueden utilizar distintos tipos de dieléctrico (X6S, X7R, X5R, COG, etc.) según la aplicación para la que vaya a utilizarse.

3.2.4. Análisis comparativo de tecnologías de condensadores

Una vez expuestos y explicados los tipos de condensadores a considerar para la realización de este trabajo, vamos a comparar sus características de forma más directa en la siguiente tabla.

| Tipo Característica | Electrolíticos | Plástico o film | Cerámicos |
|------------------------|----------------|-----------------|-----------|
| Tensión | + | +++ | - |
| Capacidad | +++ | + | - |
| Tamaño | - | - | +++ |
| Polaridad | SI | NO | NO |
| Robustez | - | +++ | + |
| <i>ESR</i> | - | +++ | +++ |
| Coste | +++ | + | - |

Tabla 3.2: Comparativa entre tipos de condensador

Como hemos podido comprobar, existe un compromiso entre prestaciones, densidad de potencia y coste final alcanzable para cada tecnología. Por ello, vamos a llevar a cabo un estudio experimental comparativo de todas las tecnologías que permita validar el funcionamiento en condiciones de operación real de cada tecnología y extraer conclusiones de diseño.

Capítulo 4

Diseño

En este capítulo se abordará el diseño y la construcción de un sistema experimental para la evaluación de las diferentes tecnologías de condensador anteriormente reseñadas para la aplicación de electroporación irreversible. Comenzaremos por averiguar cuál es la capacidad equivalente que se necesita apoyándonos en un modelo de simulación por elementos finitos. Una vez definidos los requisitos, se realizará un diseño de distribución para cada tipo de condensador de forma que podamos cumplirlos.

4.1. Selección de capacidad y tensión

Tal y como se establece en la literatura, el campo eléctrico mínimo necesario para efectuar la *IRE* se sitúa ligeramente por encima de 1 kV/cm, si bien es cierto que, en la mayoría de los casos, se suelen emplear campos superiores a 1,5 kV/cm con el objetivo de garantizar la efectividad del tratamiento.

Llegados a este punto es conveniente considerar que no garantizar el 100% de eficacia en el tratamiento muy probablemente conllevara sucesivas intervenciones y, por tanto, es necesario garantizar con un elevado margen de seguridad la destrucción celular en el tejido.

Para lograr esta garantía, los ensayos *in-vivo* han revelado que es necesario aplicar campos eléctricos considerablemente superiores, en concreto, de hasta 2,5 kV/cm para garantizar la completa destrucción de todas las células bajo tratamiento. Por consecuencia, este aumento de campo eléctrico en las dosis a suministrar para garantizar la eficacia del tratamiento conllevara un incremento simultaneo de los requisitos de corriente necesarios del generador. En base a una simulación por elementos finitos, verificada tras sucesivas pruebas experimentales, se muestra en la figura 4.1 la corriente necesaria en función del diámetro de placas y para distintas dosis de campo eléctrico.

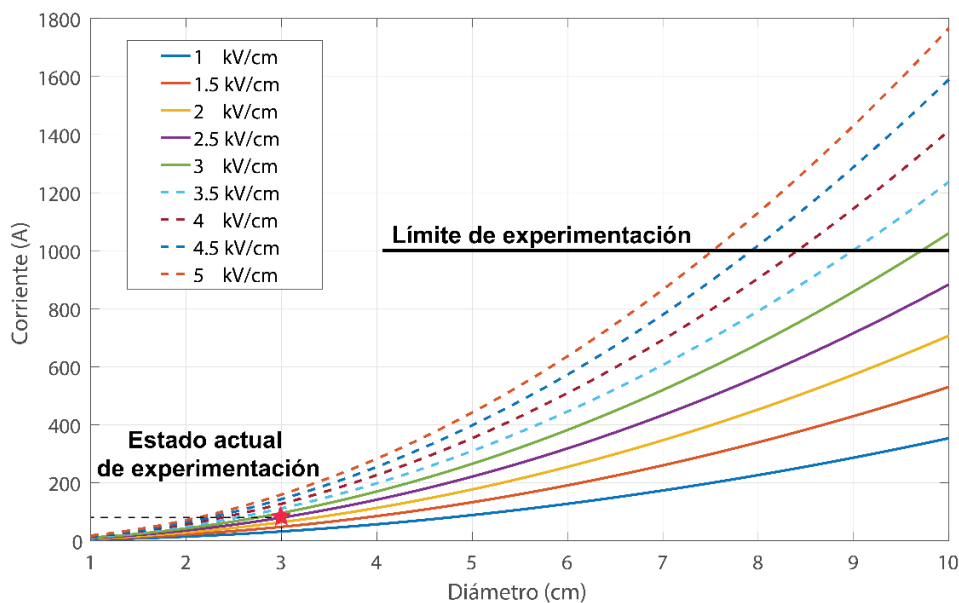


Figura 4.1: Corriente necesaria para garantizar la *IRE* en función del diámetro de las placas utilizadas para distintas dosis de campo eléctrico.

Tal y como se describe en la gráfica, los niveles de corriente necesarios para el diámetro de placas usado en la experimentación (3 cm) se encuentran por debajo del centenar de amperios.

El objetivo a corto plazo es poder experimentar con volúmenes mucho mayores, lo que implicara diámetros de placa mayores y, consecuentemente, mayor corriente. Por lo tanto, se ha decidido fijar el límite del generador en 1000 A, de manera que con niveles de campo que garanticen la efectividad de la *IRE* (mayores a 2,5 kV/cm) se puedan alcanzar diámetros de hasta 10 cm, lo que implicaría volúmenes de hasta 150 cm³.

El generador desarrollado por el GEPM presenta una topología multinivel. Este emplea dispositivos de 1700 V para poder cargar los condensadores a 1000 V con un gran margen de seguridad. Aunque existen dispositivos que pueden suministrar más tensión, superar el umbral de los 2000 V supone perder fiabilidad y robustez, quedando 1 kV como límite práctico actual. Así pues, además de asegurarnos un nivel de tensión fiable y variable, esta topología nos proporciona un diseño más compacto y económico, al minimizar el número de componentes necesarios. Podemos ver un esquema gráfico en la figura 4.2:

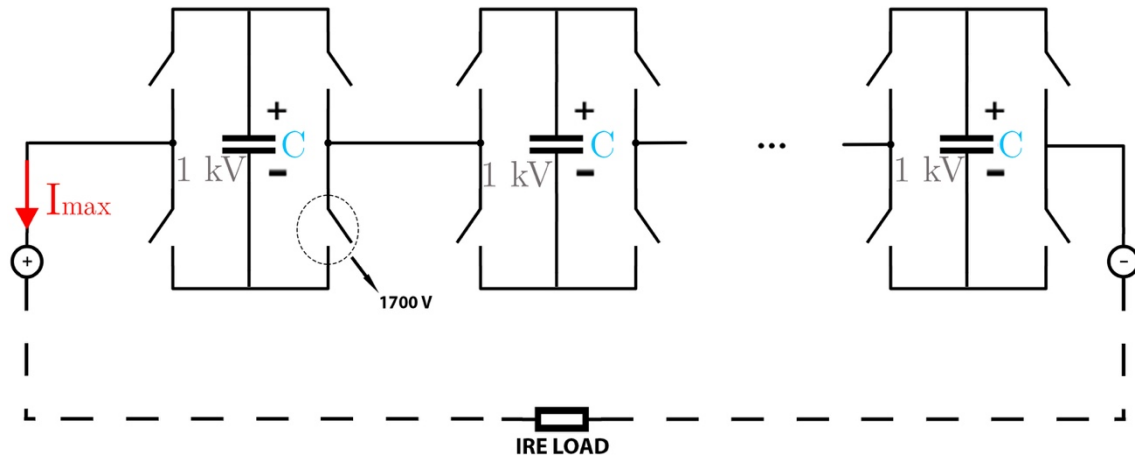


Figura 4.2: Topología tipo multinivel

Para calcular la capacidad que necesitamos para suministrar esa corriente en un intervalo temporal usaremos la fórmula (4.1):

$$Q = C \cdot V = I \cdot \Delta t$$

Q: Carga eléctrica (C)
 C: Capacidad (F)
 V: Tensión (V)
 I: Intensidad (A)
 t: Tiempo (s)

(4.1)

Si queremos aplicar una corriente de 1 kA durante un intervalo temporal del orden del centenar de μs y con un margen de seguridad del 10% respecto al voltaje que aplicamos, podemos resolver (4.1) para obtener la capacidad que necesitamos:

$$Q = 1000 \text{ A} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,1 \text{ C}$$

$$0,1 = C \cdot 0,1 \cdot 1000 \text{ V} \rightarrow C = \frac{0,1}{0,1 \cdot 1000} = 10^{-3} \text{ F} = 1 \text{ mF}$$

Así pues, podemos concluir que la capacidad que necesitaremos alcanzar será de 1000 μF .

4.2. Análisis de la configuración elegida

A la hora de diseñar nuestro sistema de almacenamiento de carga tendremos que intentar acumular la energía total que previamente hemos estimado en el menor volumen posible, es decir, conseguir la mayor **densidad de energía** posible. También hay que tener en cuenta la **energía en función de la tensión** que es capaz de almacenar cada tecnología de condensadores.

Anteriormente concluimos que necesitamos una capacidad equivalente igual o mayor a 1000 μF que pueda soportar 1000 V, aunque se tratará de diseñar con un cierto margen de seguridad (mayor al 10% del total).

Debido a las limitaciones en tensión y tras hacer una comparativa en las principales webs de venta de componentes electrónicos sobre capacidad, tensión, precio y volumen llegamos a la conclusión de que la opción más económica que maximiza nuestra densidad de carga en el caso de los condensadores electrolíticos y cerámicos es agrupando condensadores de 450 V en grupos de 3 para aguantar un total teórico de 1350 V.

4.2.1. Comparativa de energía frente a volumen

La densidad de energía la mediremos dividiendo la energía acumulada en Julios (J) por el volumen total en m^3 . El valor de la energía (E) lo podemos medir mediante la ecuación (4.2).

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (4.2)$$

Para realizar la comparativa seleccionaremos una muestra de condensadores en varias tiendas de venta electrónica ordenados de mayor a menor capacidad para cada tipo. En la siguiente se resumen los principales condensadores de tipo electrolítico válidos para la aplicación:

| Nº | Referencia | Fabricante | Datasheet | Link | Tipo | Capacidad (µF) | Horas a 85º | Radio (mm) | Longitud (mm) | Volumen (m³) | Q/V (C/m³) | Energía (J) | E/V (MJ/m³) |
|----|------------|-------------|---|---|---------------|----------------|-------------|------------|---------------|--------------|------------|-------------|-------------|
| 1 | ALS70A1634 | KEMET | http://www.kemet.com | http://es.far.com | Electrolítico | 16000 | 20000 | 45 | 194 | 0,00123 | 2625236,17 | 1620 | 1,31 |
| 2 | B43703A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 15000 | 12000 | 45 | 197 | 0,00125 | 5385,95 | 1518,75 | 1,21 |
| 3 | B43456A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 12000 | 12000 | 45,5 | 221 | 0,00144 | 3756,89 | 1215 | 0,85 |
| 4 | B43703A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 12000 | 12000 | 38,45 | 220,7 | 0,00103 | 5268,04 | 1215 | 1,19 |
| 5 | LNC2W123 | NICHICON | http://www.nichicon.com | http://es.far.com | Electrolítico | 12000 | 5000 | 45 | 185 | 0,00118 | 4588,25 | 1215 | 1,03 |
| 6 | B43712A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 12000 | 10000 | 45 | 221 | 0,00141 | 3840,84 | 1215 | 0,86 |
| 7 | B43743A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 10000 | 6000 | 45 | 221 | 0,00141 | 3200,70 | 1012,5 | 0,72 |
| 8 | LNC2W103 | NICHICON | http://www.nichicon.com | http://es.far.com | Electrolítico | 10000 | 5000 | 45 | 155 | 0,00099 | 4563,58 | 1012,5 | 1,03 |
| 9 | B43740A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 10000 | 6000 | 45,55 | 221 | 0,00144 | 3123,87 | 1012,5 | 0,70 |
| 10 | B43742A5 | EPCOS | http://www.epcos.com | http://es.far.com | Electrolítico | 10000 | 5000 | 45 | 197 | 0,00125 | 3590,64 | 1012,5 | 0,81 |
| 11 | LNC2W822 | NICHICON | http://www.nichicon.com | http://es.far.com | Electrolítico | 8200 | 5000 | 38,1 | 185 | 0,00084 | 4373,76 | 830,25 | 0,98 |
| 12 | 500C822M | CORNELL DU | http://www.cornell.edu | http://es.far.com | Electrolítico | 8200 | 5000 | 38,1 | 219,1 | 0,00100 | 3693,04 | 830,25 | 0,83 |
| 13 | ALS70A82 | KEMET | http://www.kemet.com | http://es.far.com | Electrolítico | 8200 | 20000 | 45 | 131 | 0,00083 | 4427,72 | 830,25 | 1,00 |
| 14 | LNC2W682 | NICHICON | http://www.nichicon.com | http://es.far.com | Electrolítico | 6800 | 5000 | 38,1 | 145 | 0,00066 | 4627,58 | 688,5 | 1,04 |
| 15 | LNY2W682 | NICHICON | http://www.nichicon.com | http://es.far.com | Electrolítico | 6800 | 4000 | 31,75 | 210 | 0,00067 | 4601,13 | 688,5 | 1,04 |
| 16 | MAL21021 | VISHAY | http://www.vishay.com | http://es.far.com | Electrolítico | 6800 | 10000 | 38,1 | 220 | 0,00100 | 3049,99 | 688,5 | 0,69 |
| 17 | ALS70A62 | KEMET | http://www.kemet.com | http://es.far.com | Electrolítico | 6200 | 20000 | 38,6 | 115 | 0,00054 | 5183,01 | 627,75 | 1,17 |
| 18 | LNY2W15 | NICHICON | http://es.rs-components.com | http://es.rs-components.com | Electrolítico | 15000 | 20000 | 45 | 220 | 0,00140 | 4822,88 | 1518,75 | 1,09 |
| 19 | LNK2W12 | NICHICON | http://docs.nichicon.com | http://es.rs-components.com | Electrolítico | 12000 | 5000 | 45 | 190 | 0,00121 | 4467,51 | 1215 | 1,01 |
| 20 | ERWF451 | United Chem | http://www.unitedchem.com | http://www.unitedchem.com | Electrolítico | 18000 | 5000 | 50 | 250 | 0,00196 | 4125,30 | 1822,5 | 0,93 |

Tabla 4.1: Densidad energética de condensadores electrolíticos

Tras realizar este mismo proceso con otra selección de condensadores film y cerámicos podemos obtener una gráfica de densidad energética general:

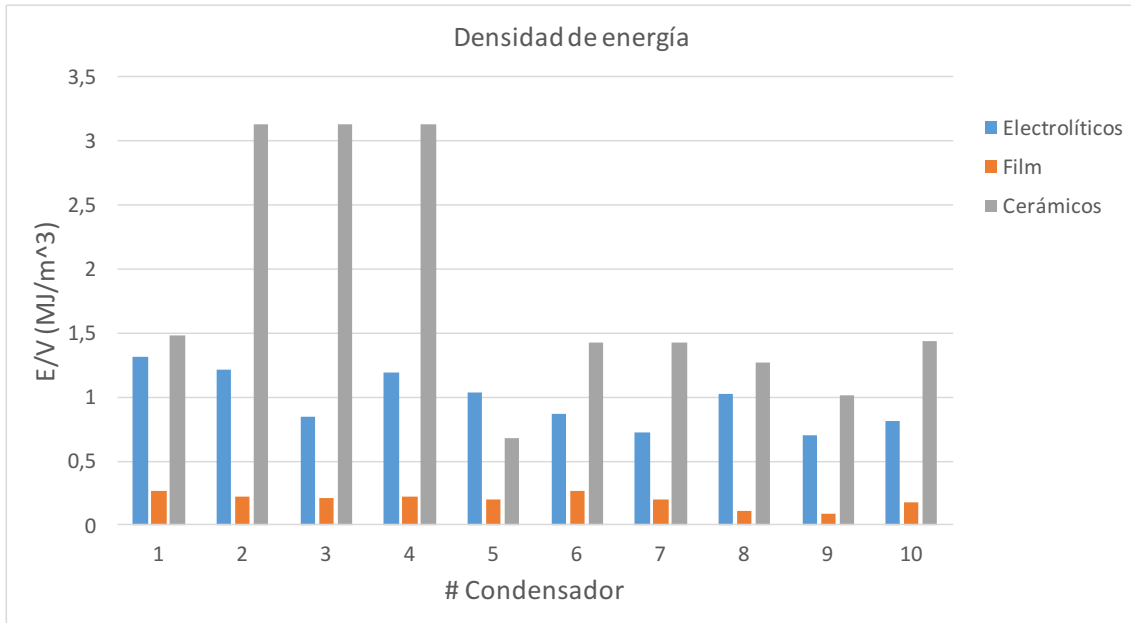


Figura 4.3: Comparativa de densidades de energía para distintos tipos de condensador

Las conclusiones que podemos sacar es que los condensadores cerámicos, a pesar de su baja capacidad en comparación a los otros 2 tipos, son los que mejor densidad de carga presentan. Los electrolíticos se colocan en segundo lugar, dejando a los film como peor opción en este sentido.

Estos resultados teóricos concuerdan con mediciones experimentales realizadas [26], que arrojan los mismos resultados y que se pueden ver en la siguiente gráfica:

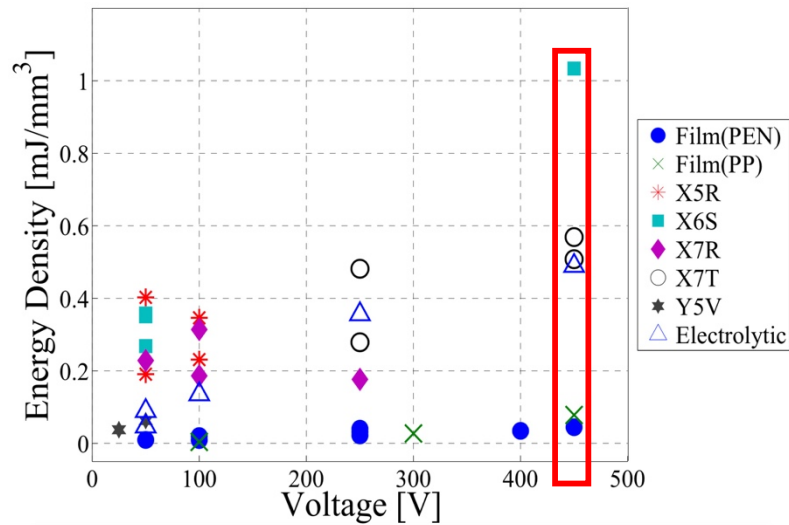


Figura 4.4: Medición experimental de densidades de carga en los distintos tipos de condensador [26].

4.2.2. Comparativa de energía frente a tensión

Para medir la energía acumulada en un condensador a partir de la tensión y su capacidad usamos la fórmula (4.1), como ya hemos visto anteriormente.

En el caso de los condensadores electrolíticos y cerámicos esta tensión será fija e igual a 450 V. En el caso de los film, la tensión será de 1100 V.

Los condensadores cerámicos elegidos tienen una caída de su capacidad en función la tensión que se les aplica. Esta caída aparece representada en una gráfica incluida en su hoja de características (Anexo C). Como se van a utilizar niveles de tensión lo suficientemente altos como para que esta caída tenga influencia en el resultado final, realizaremos una interpolación en *Matlab* para poder simular de

forma más realista la energía que podemos almacenar por tensión en estos condensadores.

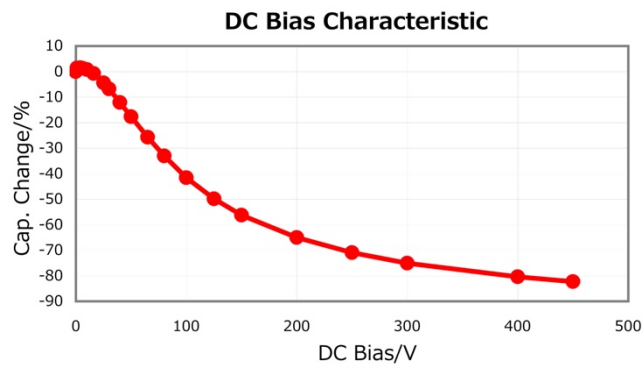


Figura 4.5: Caída de capacidad en los condensadores cerámicos elegidos en función de la tensión.

Una vez tenido en cuenta este hecho, podemos simular y obtener una gráfica que nos muestre la energía acumulada en los condensadores para cada valor de tensión hasta el límite que les corresponda (450 V en electrolíticos y cerámicos, 1000 V en film).

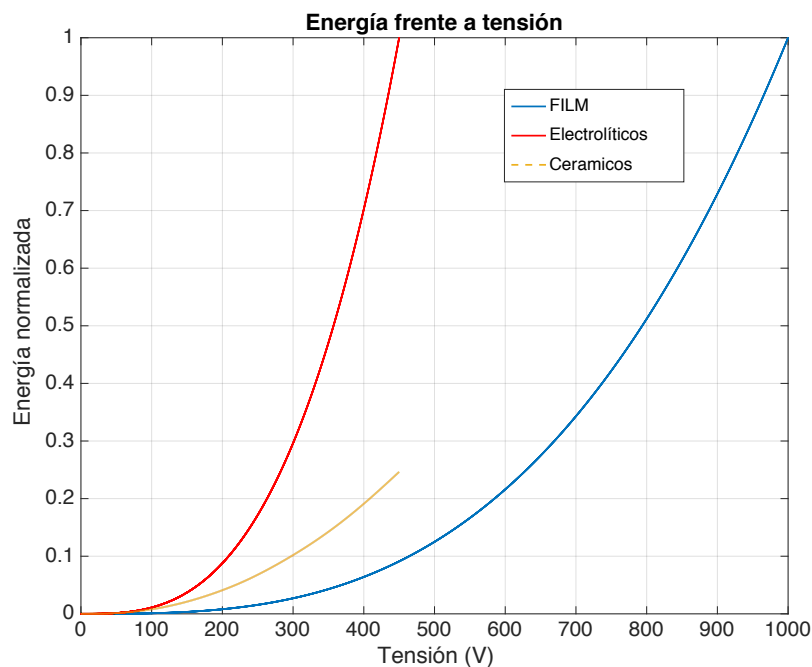


Figura 4.6: Energía acumulada en función de la tensión aplicada para diferentes tecnologías de condensadores.

Viendo esta gráfica se puede concluir que, para una misma capacidad y tensión de operación, mientras que las tecnologías de film y electrolíticos se comportan de manera ideal, en el caso de los condensadores cerámicos la energía almacenada es mucho menor.

En cuanto a volumen, el ganador indiscutible es el condensador cerámico. Sin embargo, si hablamos de precio, los cerámicos resultan los más caros, seguidos de los film. Los condensadores electrolíticos resultan los más baratos del grupo.

4.3. Diseño, esquematización y simulación de la distribución

Antes de diseñar y construir las placas donde soldaremos y probaremos los condensadores es necesario realizar una serie de esquemas y pruebas para ver cuál es su configuración más idónea. También será necesario realizar simulaciones del circuito eléctrico equivalente mediante software de simulación (*spice*) para ver si el comportamiento del conjunto es el correcto.

A la hora de elegir los modelos de condensador tenemos que tener en cuenta las posibles combinaciones de tensiones y capacidad que se nos presentan. Además de esto, hay que tener en cuenta las siguientes **propiedades**:

- La asociación de n condensadores en **serie** de capacidad C y tensión V es equivalente a sustituirlos por un único condensador con capacidad equivalente (C_{eq}) y tensión equivalente (V_{eq}) calculables mediante las fórmulas (4.3) y (4.4).

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.3)$$

$$V_{\text{eq}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \quad (4.4)$$

- La asociación de n condensadores en **paralelo** de capacidad C y tensión V es equivalente a sustituirlos por un único condensador con C_{eq} calculable mediante la fórmula (4.5) y V_{eq} igual a V .

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (4.5)$$

Al estar trabajando con agrupaciones de condensadores con misma tensión y capacidad el cálculo de la capacidad equivalente serie se simplificará bastante: al poner n condensadores en serie la capacidad será la del condensador dividida por n .

4.3.1. Condensadores electrolíticos

El modelo de condensador electrolítico elegido finalmente ha sido el 861101487034 de *Würth Electronics*. Su capacidad es de $820 \mu\text{F}$ con una tolerancia del 20%, y su tensión máxima es de 450 V. Sus dimensiones son 40 mm de diámetro por 57 mm de longitud. En el anexo C se encuentra el *datasheet* completo de este condensador.



Figura 4.7: Condensador modelo 861101487034 de *Würth Electronics*.

Para poder alcanzar los 1000 V de tensión tendremos que poner 3 de estos condensadores en serie para alcanzar en total una tensión límite teórica de 1350 V, con lo que conseguimos un margen de seguridad de varios centenares de voltios. Sin embargo, al hacer esto dividimos la capacidad equivalente entre 3, con lo que tendremos que poner en paralelo 4 grupos de 3 condensadores en serie, resultando una matriz de 12 condensadores electrolíticos en formato 4x3 con un V_{eq} en torno a los 1350 V y una C_{eq} en torno a los $1093, \bar{3} \mu\text{F}$.

Un detalle que hay que tener en cuenta sobre este modelo es la tolerancia del 20% sobre su capacidad total. Para detectar posibles sobrecargas simulamos el circuito en *LTspice* poniéndonos en el peor caso posible o *worst case*: que un grupo de condensadores tengan un 20% más de capacidad y otro grupo tenga un 20% menos y esto genere un desbalanceo de tensión:

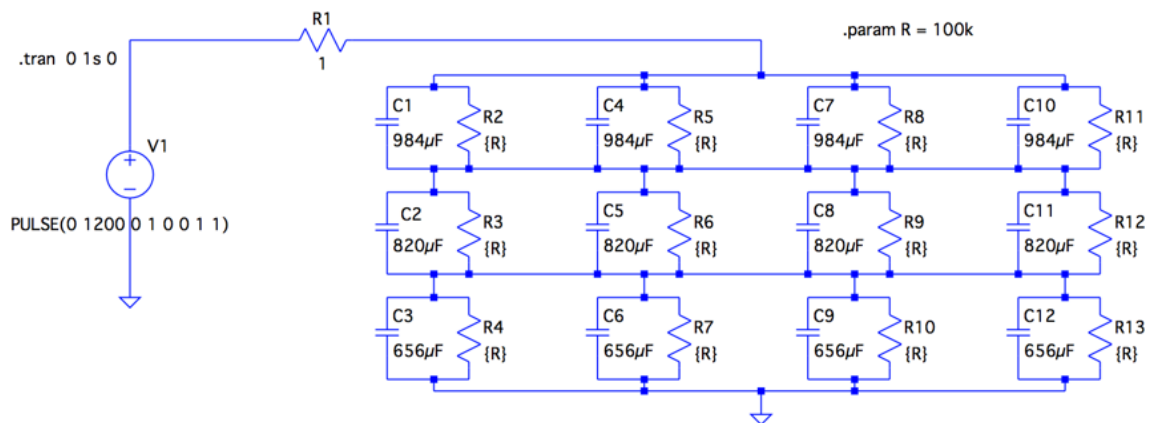


Figura 4.8: Esquemático de los condensadores electrolíticos en *LTspice*.

Se ha colocado una resistencia de 100 kΩ en serie con cada condensador para que cada una de ellas disipe unos 2 W. Esto se puede comprobar con la fórmula (4.6):

$$P = V \cdot I = V \cdot \frac{V}{R} \quad (4.6)$$

$$450 \text{ V} \cdot \frac{450 \text{ V}}{100 \text{ k}\Omega} = 2,025 \approx 2 \text{ W}$$

A su vez se ha unido el polo negativo de cada condensador (recordemos, los condensadores electrolíticos tienen polaridad) con los de sus correspondientes en

balanceo, ya que mediante simulación se ha demostrado que esto ayuda al balanceo general repartiendo las caídas de tensión en cada condensador.

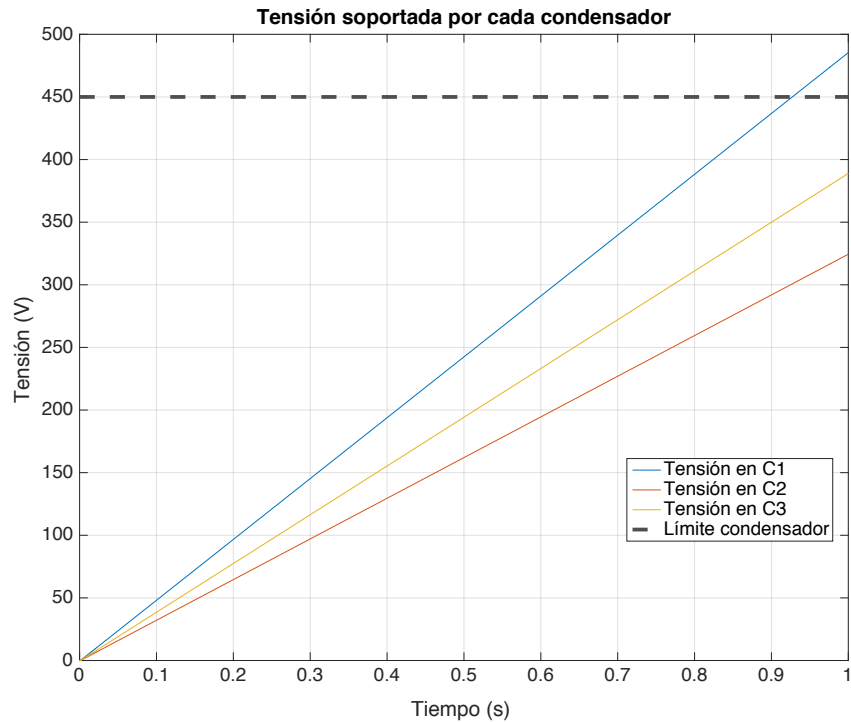


Figura 4.9: Simulación en *LTspice* de las caídas de tensión en cada fila de condensadores electrolíticos.

Los cálculos teóricos hechos en (4.4) nos dicen que al ser todos los condensadores de igual capacidad si aplicamos una tensión de 1200 V cada uno de ellos soportara en torno a 400 V, el tercio de la tensión total, lo que no excedería su tensión límite de 450 V. Sin embargo, como podemos ver en la figura 4.9, la caída de tensión en la primera fila de condensadores supera sus 450 V de límite.

Aunque las probabilidades de que ocurra este hecho son extremadamente bajas, esto nos obliga a crear una red de carga a fin de aplicar la tensión de forma controlada a cada fila de condensadores de forma independiente. De este modo, aseguraremos que no se excede su límite.

En la figura 4.10 podemos ver el esquema propuesto para los condensadores electrolíticos. De él se puede destacar la inclusión de la red de carga individual para cada fila de condensadores.

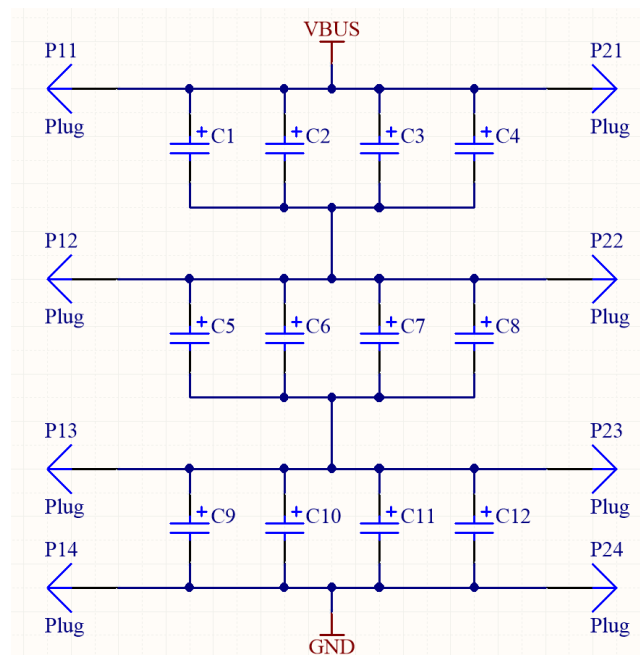


Figura 4.10: Esquema de los condensadores electrolíticos en Aluminium.

Una vez tenemos claro el esquemático pasamos diseñar la *PCB* correspondiente.

Podemos ver los resultados en las figuras 4.11 y 4.12:

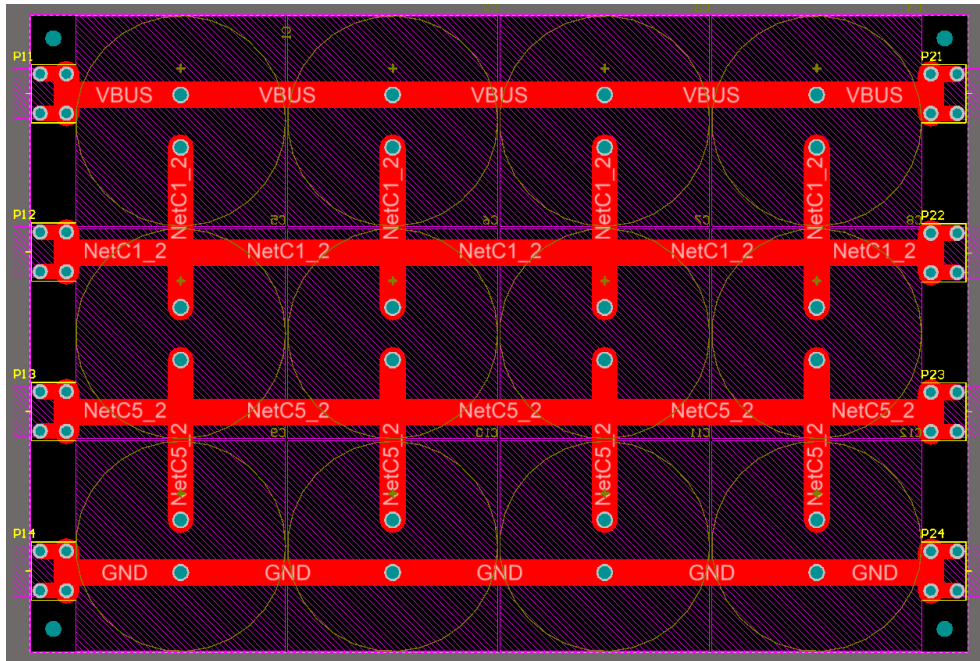


Figura 4.11: Modelo 2D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores electrolíticos.

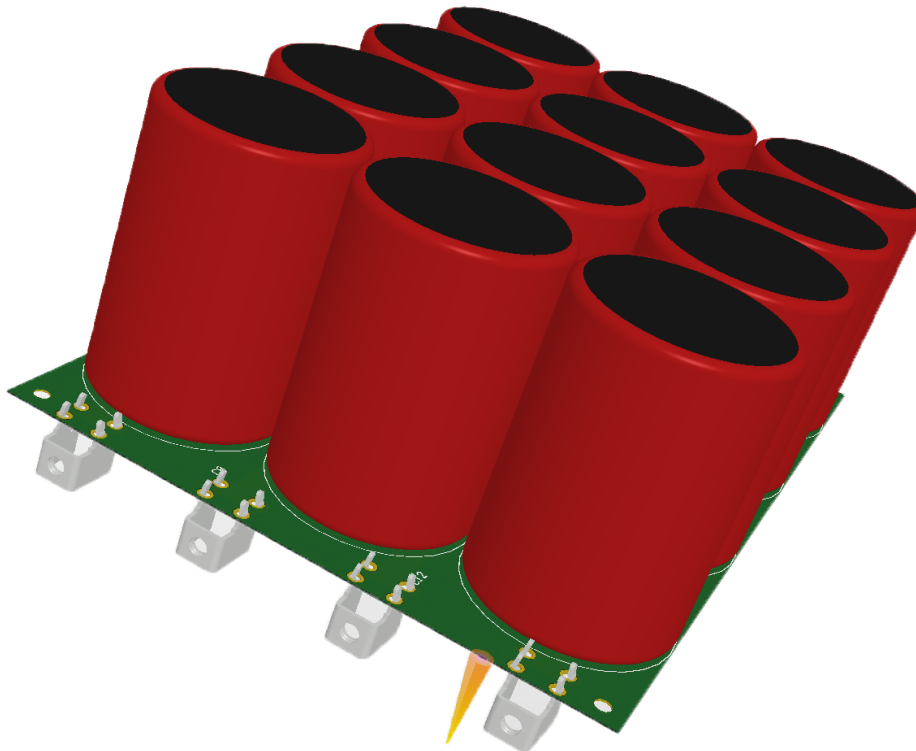


Figura 4.12: Modelo 3D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores electrolíticos.

4.3.2. Condensadores film

El modelo de condensador film escogido ha sido el EZP-E1B406MTA de Panasonic, al tratarse de un modelo ampliamente usado en este tipo de aplicaciones. Al ser un condensador film es bastante estable y robusto, su capacidad cambia poco o nada ante variaciones de temperatura y/o tensión aplicado. Su tensión máxima es de 1100 V, lo que nos da uno 10% de margen de seguridad, y su capacidad es de 40 μF . El *datasheet* completo de este condensador se puede encontrar en el anexo C.



Figura 4.13: Condensador modelo EZPE1100VDC de Panasonic.

Al tener una tensión límite de 1100 V no nos será necesario colocar agrupaciones de ellos en serie, ya que cumplen en tensión. Sin embargo, su baja capacidad nos obliga a colocar 25 de ellos en paralelo para conseguir una C_{eq} de 1000 μF . El esquema propuesto es el siguiente:

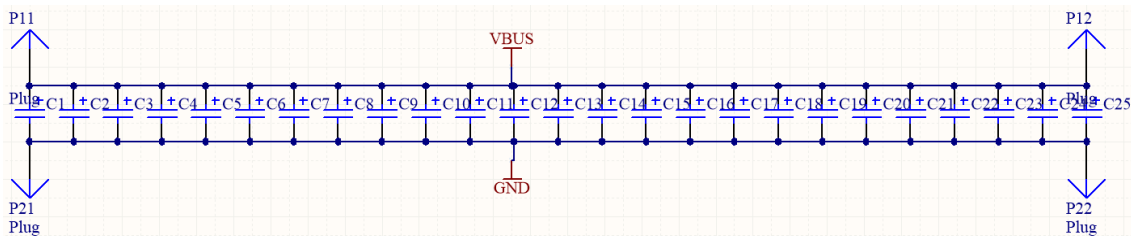


Figura 4.14: Esquema de los condensadores film en Altium.

El diseño de la *PCB* se simplifica al tratarse de una distribución simple de varios condensadores no polarizados en paralelo. En vez de usar vías se diseñarán dos planos de masa, uno de tensión de entrada (*VBUS*) y otro a tierra (*GND*). La *PCB* quedara entonces así:

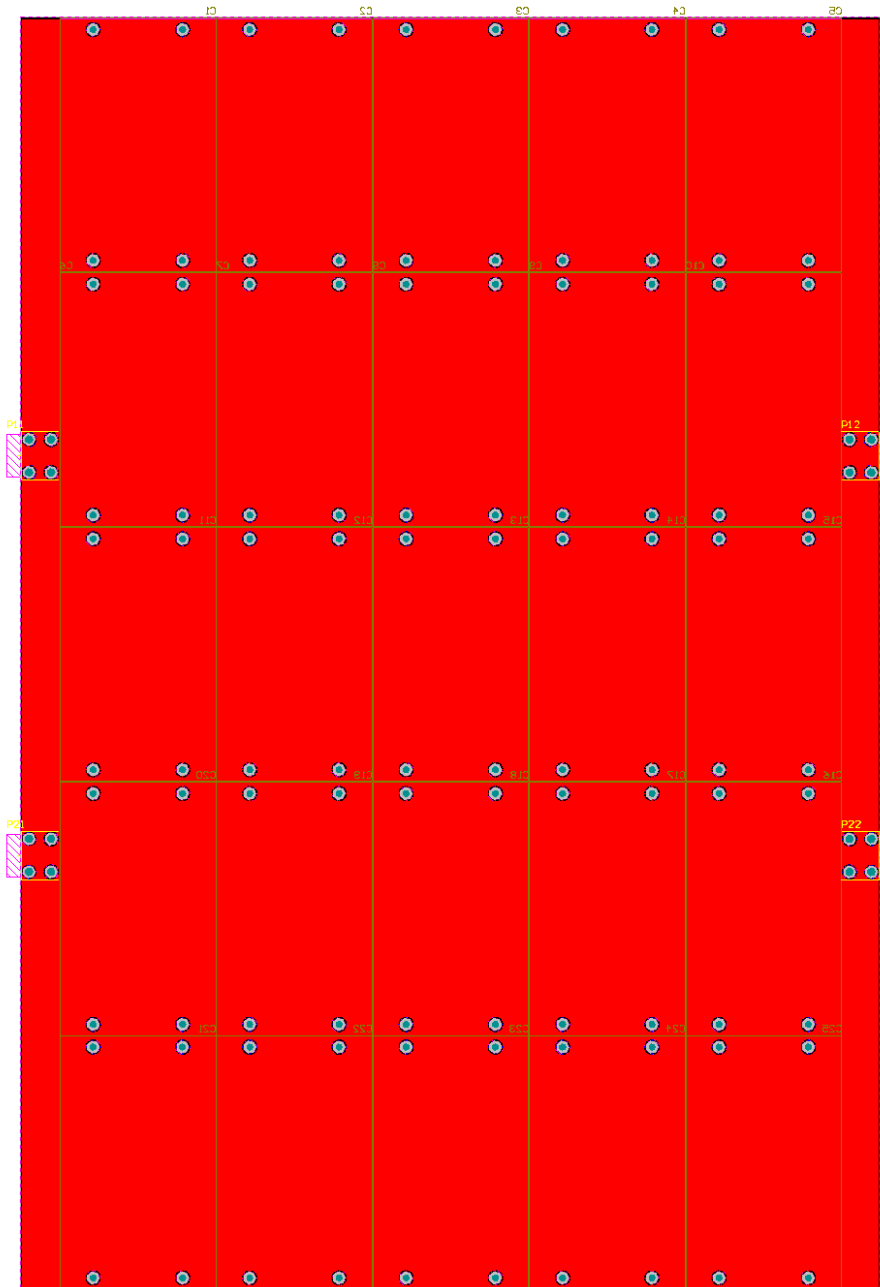


Figura 4.15: Modelo 2D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores film.

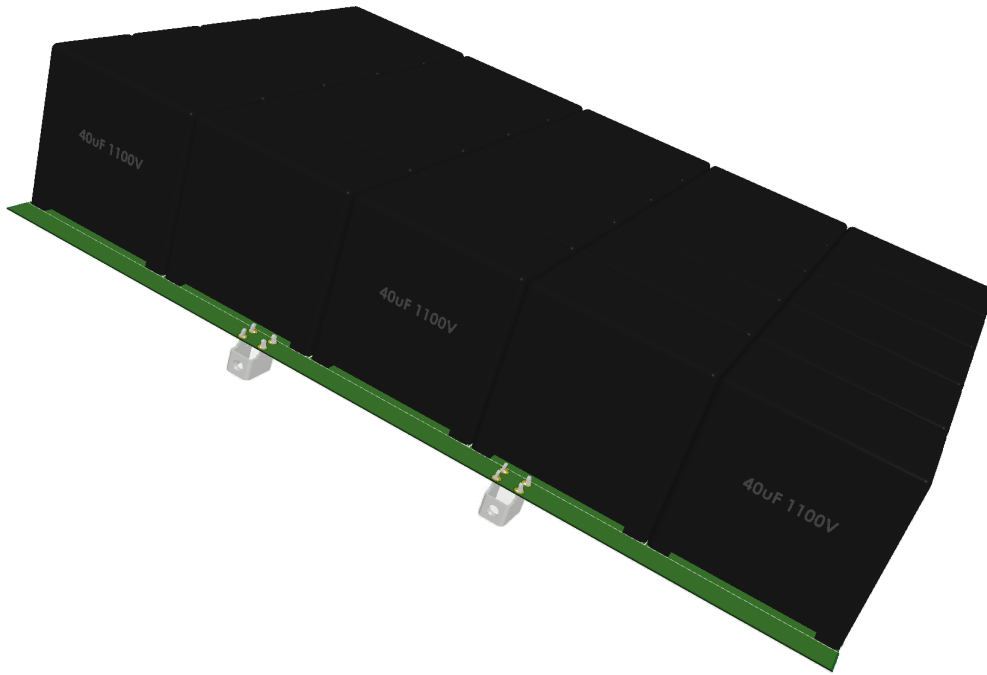


Figura 4.16: Modelo 3D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores film.

4.3.3. Condensadores cerámicos

Este subcapítulo merece una mención aparte, ya que la elección del modelo de condensador cerámico fue bastante difícil. Como anteriormente se ha explicado en el capítulo 3.2.3, los condensadores cerámicos disponen de muy baja capacidad en relación con los otros condensadores con los que estamos tratando (film y electrolíticos).

El condensador elegido finalmente fue el C5750X6S2W225M250KA de TDK. Es un condensador *SMD* de $2.2 \mu\text{F}$ de capacidad con 450 V de tensión límite. Está encapsulado en el estándar *SMD* 2220. Su *datasheet* completo se encuentra en el anexo C.



Figura 4.17: Condensador modelo C5750X6S2W225M250KA de TDK.

Para paliar la desventaja de tener poca capacidad en cada condensador intentamos aprovechar la ventaja de que cada uno de ellos tenga un volumen mínimo fabricando ‘tarjetas’ con estos condensadores. Esto es: un conjunto de 260 condensadores en total distribuidos en paralelo soldados en ambos lados de una *PCB* de tamaño próximo a una tarjeta estándar.

Además, se le introducirá a cada *PCB* un par de tiras de pines para poder facilitar la interconexión entre varias de estas tarjetas para poder ganar en capacidad y/o tensión, ya que una sola de estas tarjetas no cumple con nuestros requisitos. Así, lograremos un condensador con capacidad y tensión equivalentes variables.

El esquema diseñado en Altium es el siguiente:



Figura 4.18: Esquema de los condensadores cerámicos en Altium.

Para el diseño de la *PCB* se decidió hacer una distribución simétrica, teniendo en cuenta el esquema propuesto y la necesidad de ocupar el menor espacio posible. Una de las tiras de pines ira conectada a la entrada de tensión *VBUS* y la otra, a la entrada de tierra *GND*. De cada una de estas tiras saldrán unas vías en forma de peine alternándose con la otra vía, entre cada ‘filamento’ de este peine irá colocado cada condensador. El diseño final se puede ver en las figuras 4.19 y 4.20:

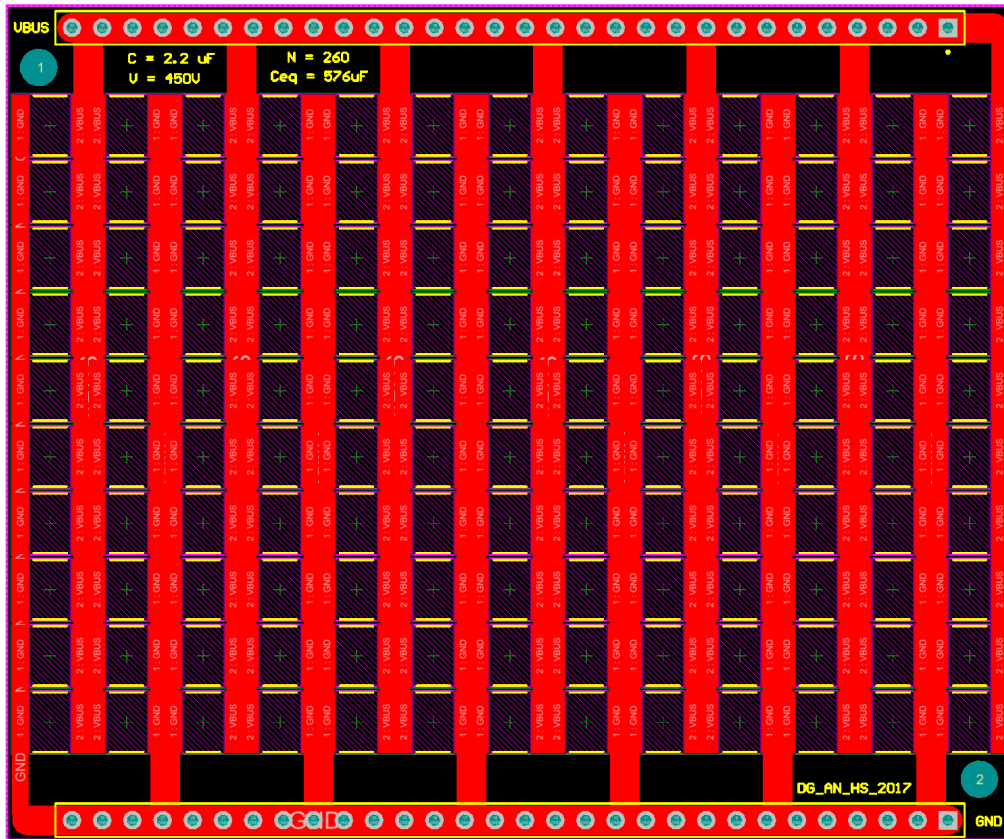


Figura 4.19: Modelo 2D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores cerámicos.

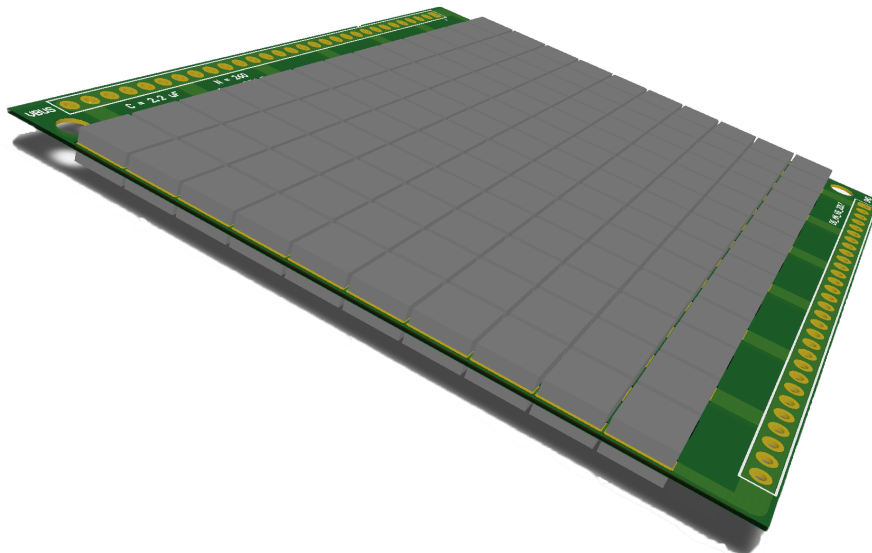


Figura 4.20: Modelo 3D de la *PCB* diseñada en Altium para los condensadores cerámicos.

4.3.4. Análisis comparativo de los condensadores elegidos

Para complementar el presente capítulo se va a realizar una comparativa de las principales características de los modelos de condensadores elegidos. En la siguiente tabla podemos verlo de forma numérica:

| Tipo | C (μF) | Tensión (V) | Precio/u (€) | Nº | Precio total (€) | V (m^3) | V total (m^3) | C/V (F/m^3) | E/V (J/m^3) |
|----------------|---------------------|-------------|--------------|------|------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Electrolíticos | 820 | 450 | 20,61 | 12 | 247,32 | 7,163E-05 | 0,00086 | 11,448 | 83,025 |
| Film | 40 | 1100 | 19,61 | 25 | 490,25 | 0,0000635 | 0,00159 | 0,630 | 24,2 |
| Cerámicos | 2,2 | 450 | 1,61 | 4680 | 7534,8 | 7,125E-08 | 0,00033 | 30,877 | 0,223 |

Tabla 4.2: Comparativa entre las características principales de los condensadores elegidos.

En términos energéticos el ganador es el condensador electrolítico, ya que es el que mayor densidad energética posee con mucha diferencia frente al resto. Le sigue el condensador film, que a pesar de tener una tensión límite mayor le perjudica sobremanera el hecho de tener una capacidad menor. En último lugar queda el condensador cerámico, que con su pequeño volumen es el que mayor densidad de capacidad tiene, pero a pesar de esto su inferior capacidad hace que posea muy poca densidad energética en comparación.

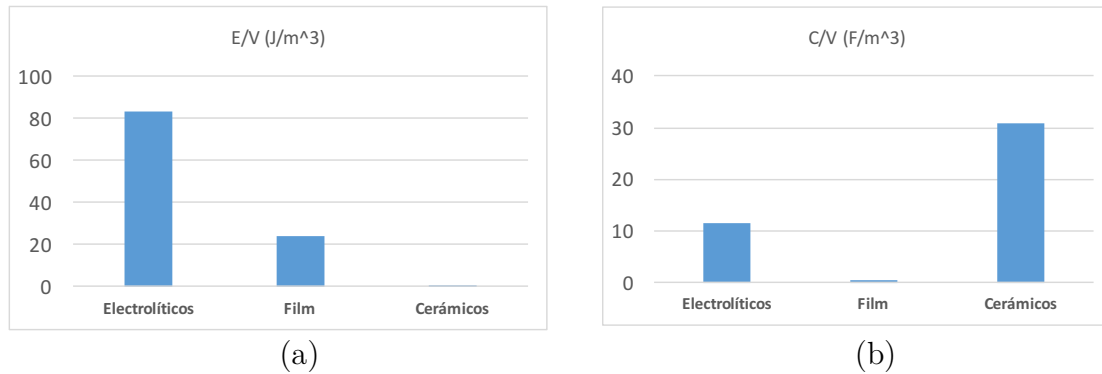


Figura 4.21: Comparativa de densidades entre los condensadores elegidos. (a) Densidad energética (J/m^3). (b) Densidad de capacidad (F/m^3).

En términos de presupuesto podemos ver como el condensador más caro por unidad es el electrolítico. Le sigue de cerca el film, quedando muy lejos el condensador cerámico. La causa de esto es que este último se vende en formato *SMD* en tiradas de muchos centenares de ellos, lo que provoca que se abarate su precio.

Sin embargo, la gran cantidad de condensadores cerámicos necesarios para cumplir con nuestros requisitos provoca que se dispare su precio total a más de 7000 €.

Esto es debido a que en una *PCB* de condensadores cerámicos tenemos un V_{eq} de 450 V y una C_{eq} de aproximadamente 572 μF . Para conseguir más de 1000 V necesitaremos juntar en serie 3 de estas placas, logrando así un V_{eq} teórico de 1350 V, pero esto provocará a su vez que se reduzca nuestra C_{eq} hasta un tercio de su capacidad inicial. Para poder compensar esta caída necesitaremos juntar 6 de este conjunto de 3 tarjetas en serie consiguiendo 1000 μF teóricos de C_{eq} .

La cuenta total sería 18 *PCBs* de 260 condensadores cada una, resultando 4680 condensadores en total. A esto habría que añadirle el precio de fabricación de todas las placas, además de que para compensar posibles pérdidas de capacidad y/o tensión habría que añadir alguna ‘tarjeta’ más. Esto deja a los condensadores cerámicos como la tercera opción en términos económicos.

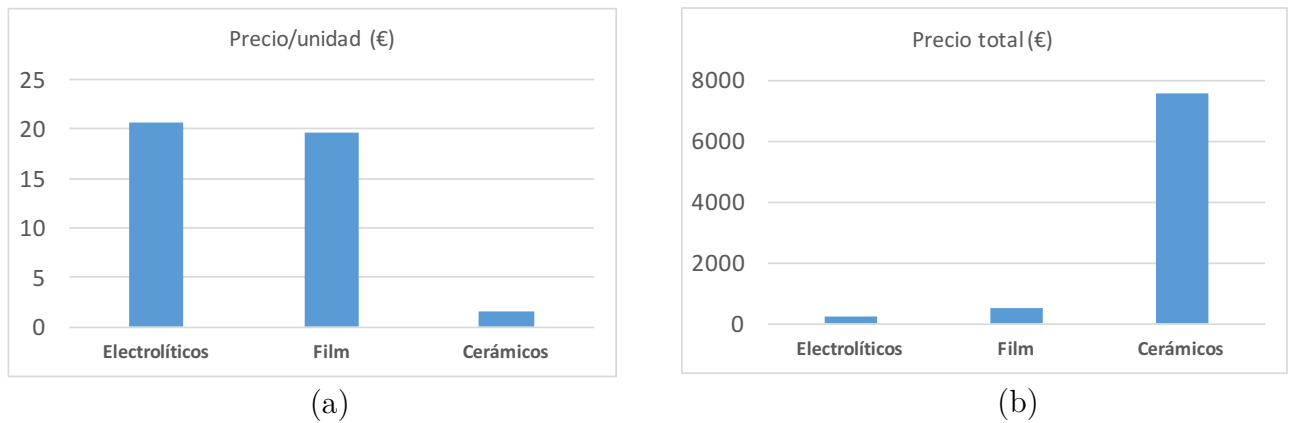


Figura 4.22: Comparativa de precios entre los condensadores elegidos: (a) Precio unitario. (b) Precio total.

El valor en € de los condensadores se ha obtenido de la web de venta electrónica *Mouser*, teniendo en cuenta la variación del mismo según la cantidad de condensadores que se compre en una vez y escogiendo el valor apropiado para la cantidad de condensadores de cada tipo necesarios.

Capítulo 5

Experimentación y resultados

Tras completar todas las fases de diseño, en este capítulo hablaremos sobre la fase que viene inmediatamente después: el montaje de las placas y el setup de análisis, las pruebas realizadas a cada una de las configuraciones y, por último, el análisis de los resultados.

5.1. Montaje de los condensadores

Tras verificar los diseños realizados de las *PCB* correspondientes a cada configuración de condensadores, se enviaron a fabricar a la empresa de circuitos impresos 2CISA (ubicada en Montcada i Reixac) en una configuración de 2 capas/35 μm de espesor de Cu y 1,44 mm de grosor total de *PCB*.

De forma análoga, realizamos los pedidos de los condensadores a la web de venta de componentes electrónicos correspondientes. Los condensadores cerámicos se compraron a posteriori porque en un primer momento no era seguro que se fueran a incluir en este trabajo, debido a su elevado coste y cantidad requerida.

Tras recibir tanto los condensadores como sus placas correspondientes procedimos a su comprobación y montaje. Todo esto se realizó en el laboratorio 4.10 del edificio Ada Byron de la EINA. En las figuras siguientes se puede ver el resultado final:

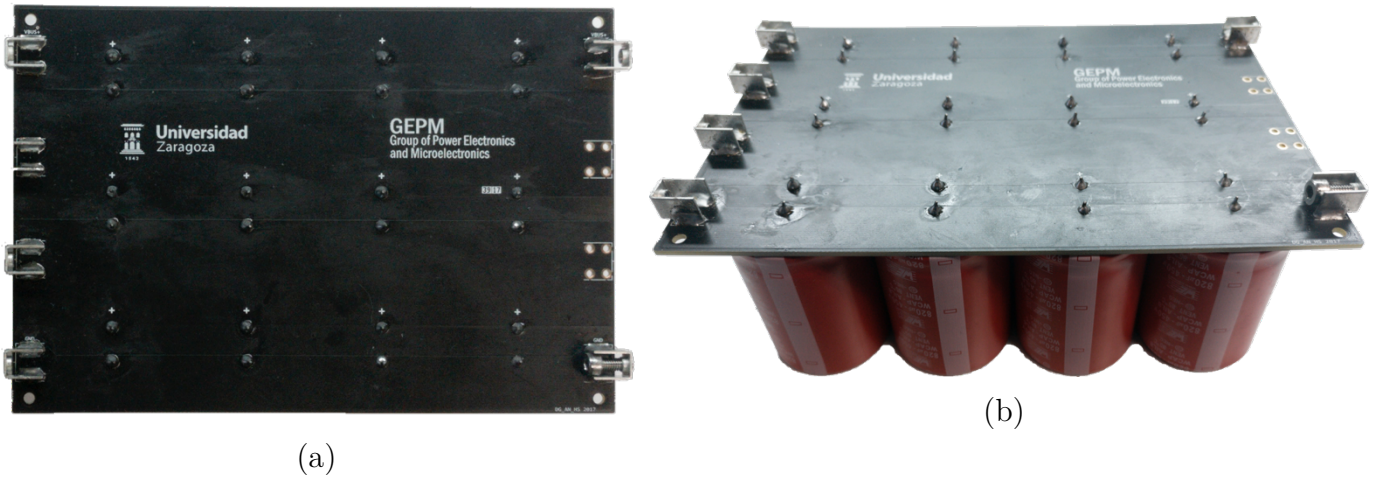


Figura 5.1: Vistas de la placa de condensadores electrolíticos. (a) Superior. (b) Con perspectiva.

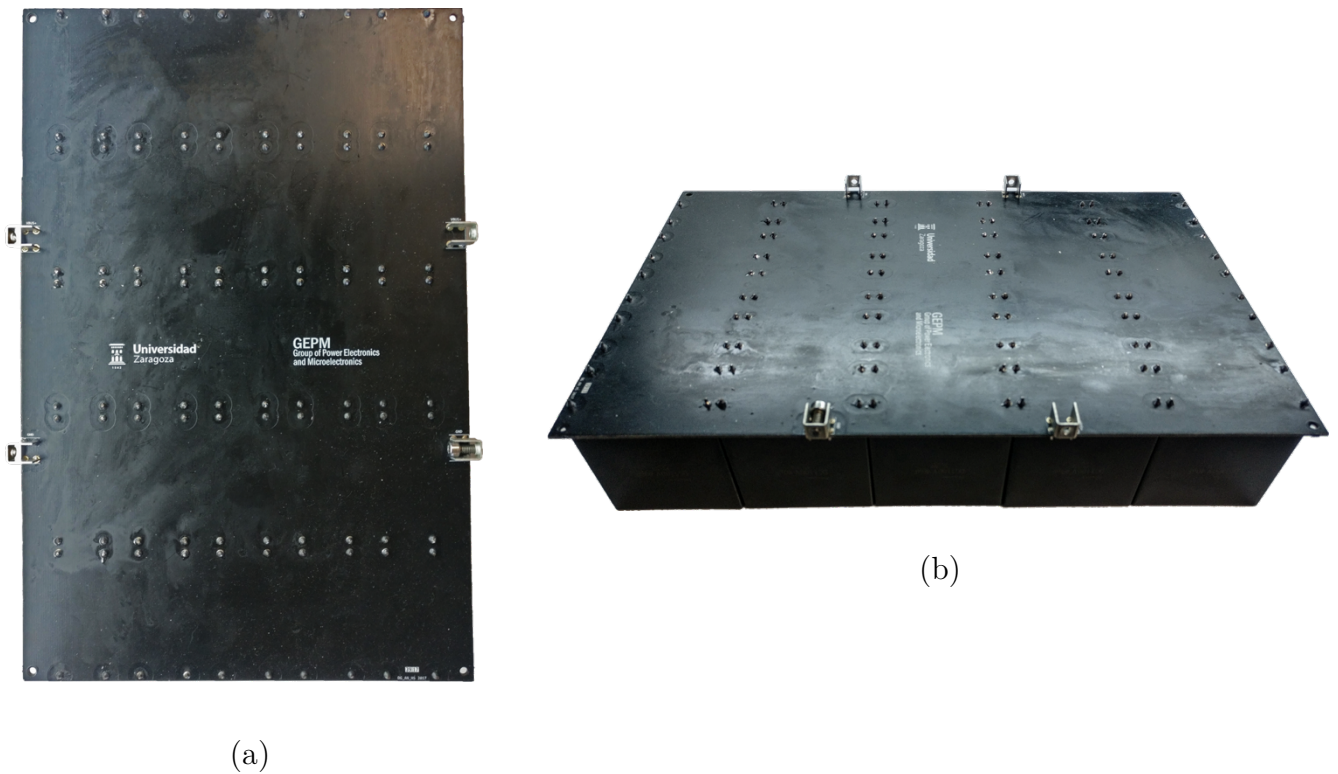
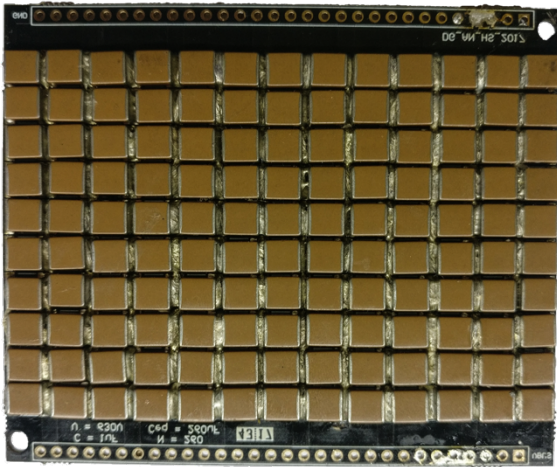
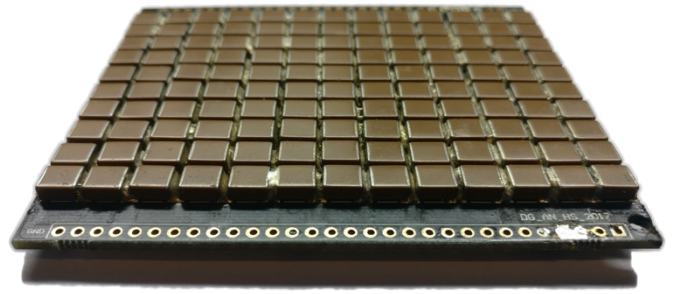


Figura 5.2: Vistas de la placa de condensadores film. (a) Superior. (b) Con perspectiva.



(a)



(b)

Figura 5.3: Vistas de la placa de condensadores cerámicos. (a) Superior. (b) Con perspectiva.

5.2. Montaje del sistema completo

En la figura 5.7 podemos ver el esquema completo del setup. Este se compone principalmente de una fuente de tensión continua, una etapa inversora controlada por fibra óptica por un *PC*, un tanque resonante LC serie, un trafo con un primario y tres secundarios con igual número de vueltas, un rectificador de onda completa y finalmente la placa de condensadores correspondiente.

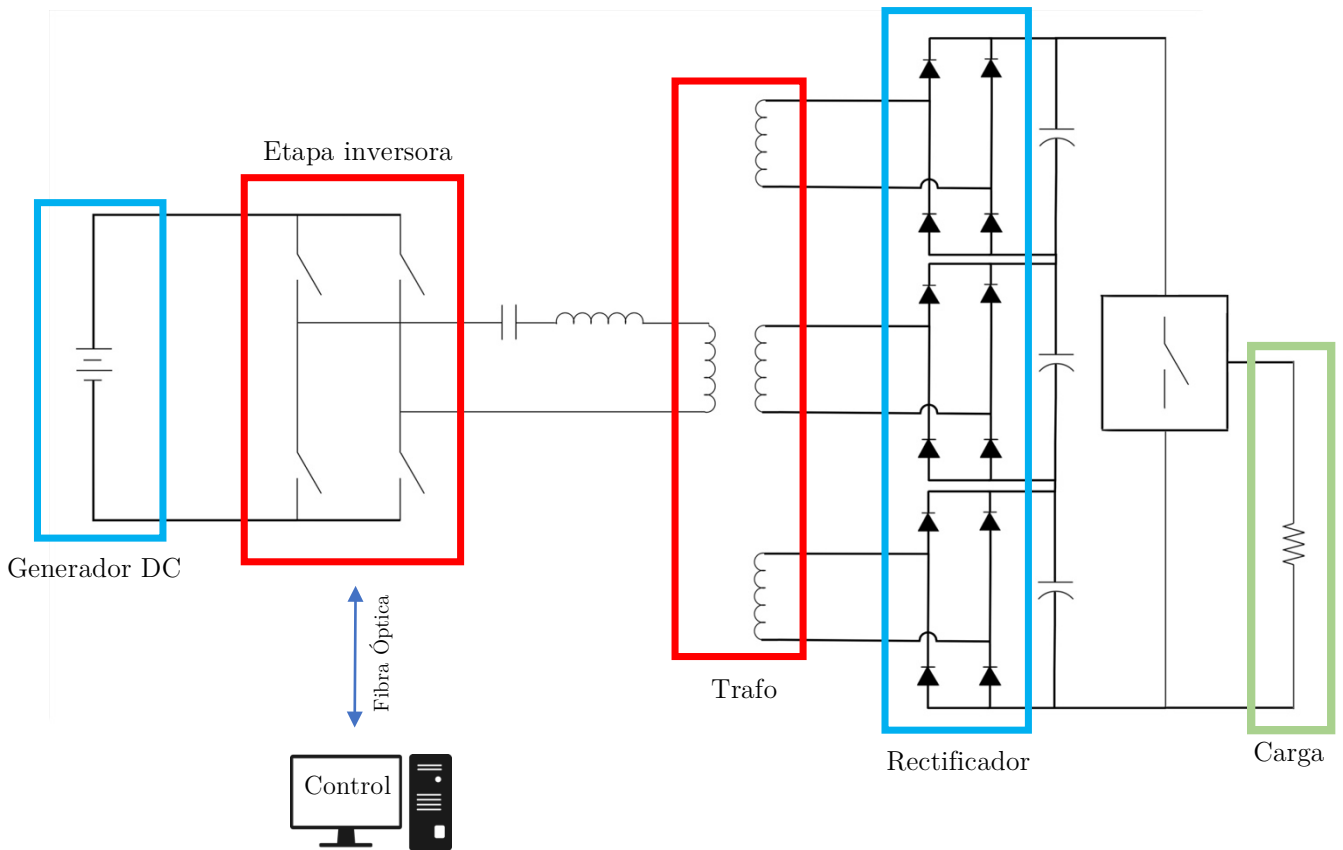


Figura 5.4: Esquema general del setup utilizado.

Para ganar en profundidad, en los sucesivos apartados vamos a hacer un análisis en detalle de cada una de las subpartes que componen este esquema general.

5.2.1. Generador

El generador de tensión continua utilizado es el PSI 9750-60 3U de EA.



Figura 5.5: Generador de continua EA PSI 9750-60 3U.

5.2.2. Etapa inversora

La etapa inversora fue desarrollada en el GEPM, como parte de otro proyecto de investigación. Está compuesta por módulos de GaN de 650 V, controlados mediante una *FPGA*.

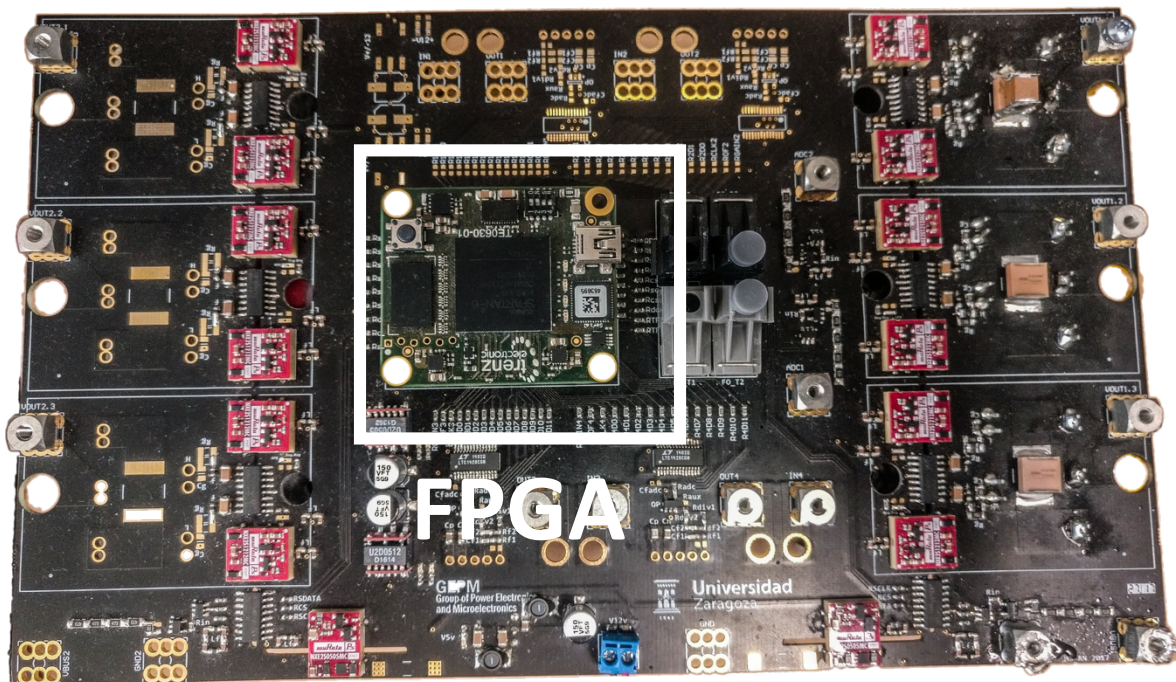


Figura 5.6: Etapa inversora.

5.2.3. Transformador

El transformador fue construido con una relación 1:1 y 3 salidas para, en el caso de los condensadores electrolíticos, poder asegurarnos que repartiríamos la tensión de entrada por igual en las tres salidas de las que consta.



Figura 5.7: Transformador.

5.2.4. Inversor

Finalmente se creó una etapa inversora, especialmente diseñada para la aplicación de electroporación. Consta de un módulo inversor basado en un semipunte y toda la circuitería necesaria para su correcto funcionamiento. Las señales de activación son transmitidas mediante fibras ópticas para garantizar el nivel de aislamiento. La etapa está diseñada para alimentar un módulo inversor en configuración semipunte con un encapsulado típico de 62 mm. Esto nos permitirá evaluar el comportamiento de los condensadores con distintas tecnologías de semiconductores, en concreto, con IGBTs de silicio de 1700 V (FF300R17KE3) y módulos de potencia basados en carburo de silicio (SiC), en este caso, MOSFETs de 1700 V (CAS300M17BM2). Ambos se muestran en la figura 5.8:



Figura 5.8: Módulos de potencia empleados en los test: (a) IGBT de Si. (b) Módulo de potencia basado en SiC.

Mientras que los módulos basados en IGBTs de silicio ofrecen unas prestaciones elevadas en términos de robustez y coste, sus elevados tiempos de conmutación no permiten generar modulaciones de alta frecuencia (este tipo de modulaciones son denominadas *High Frequency IRE* o *HFIRE*, y permiten minimizar al máximo la estimulación muscular involuntaria durante el tratamiento).

Debido al gran potencial de este tipo de tratamientos, se han estudiado las características de los condensadores con los módulos de SiC, que permiten obtener estas modulaciones debido a sus reducidos tiempos de conmutación.

Finalmente, esta placa se conecta directamente con los distintos bloques de condensadores, y permite evaluar las prestaciones de cada tecnología.

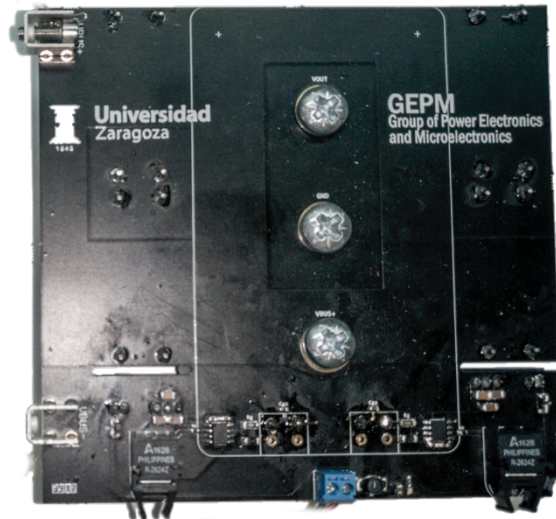


Figura 5.9: Etapa inversora.

5.2.5. Carga

La carga a la que se le aplicarán los pulsos consistirá en una agrupación de 5 resistencias de potencia de $4,7 \Omega$, que resultarán en una resistencia equivalente de $0,94 \Omega$ (aproximadamente, 1Ω). Se trata de resistencias especialmente pensadas para la aplicación, basadas en tecnología cerámica, permitiendo soportar elevadas energías instantáneas. En concreto, estas pueden soportar hasta 1628 V.

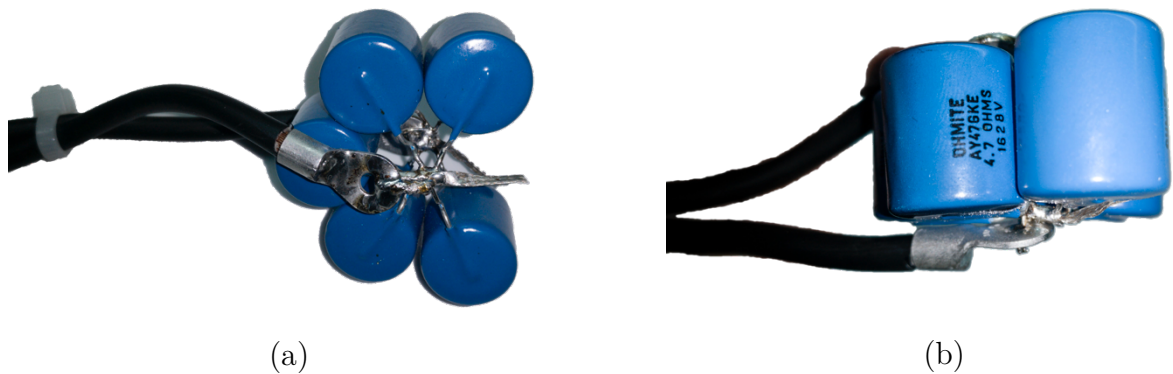


Figura 5.10: Resistencia de carga. (a) Vista general. (b) Vista en detalle.

5.3. Pruebas y resultados

5.3.1. Circuito de carga de condensadores

En la figura 5.11 se muestran las principales formas de onda del circuito auxiliar de carga de los condensadores de tecnología film y electrolíticos. Dado que como hemos visto antes la relación de transformación es unitaria (10:10) y que el convertidor se opera en un punto cerca de resonancia, la tensión empleada para alimentar la etapa de carga es la misma que se aplica a cada uno de los tres bloques de condensadores. De esta manera, nos es posible controlar de manera sencilla la tensión de carga total (ya que será tres veces la unitaria).

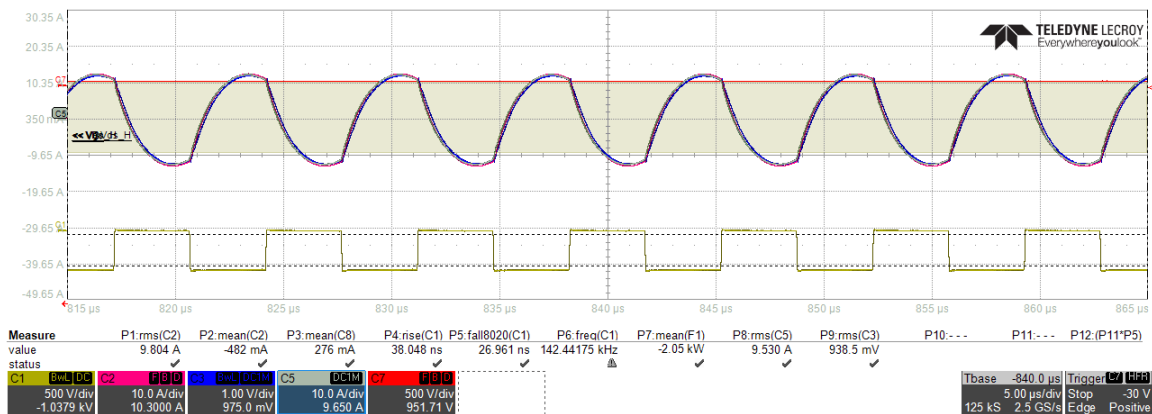


Figura 5.11: Principales formas de onda de la etapa de carga de condensadores.

La traza 1 de la figura muestra la tensión de salida del inversor, operando a una frecuencia cercana a 150 kHz, mientras que las trazas 2, 3 y 5 muestran las corrientes por cada secundario. Finalmente, la tensión de uno de los bloques de condensadores se muestra en la traza 7.

El mismo test se ha repetido variando la tecnología de condensadores, en este caso, con electrolíticos, y el resultado se muestra en la figura 5.13. La principal diferencia radica en la diferencia de tensión entre la tensión de carga inicial del banco de condensadores y la tensión finalmente aplicada. Esto es debido a la elevada inductancia que presenta esta tecnología.

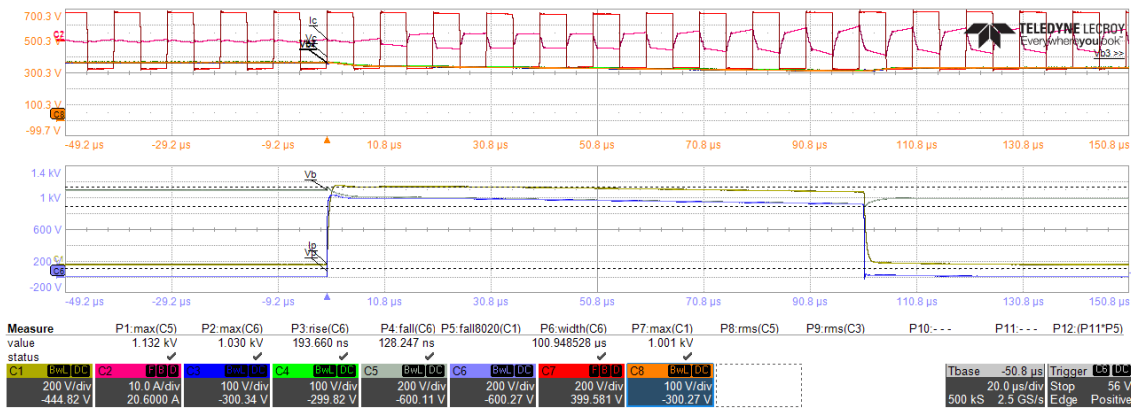
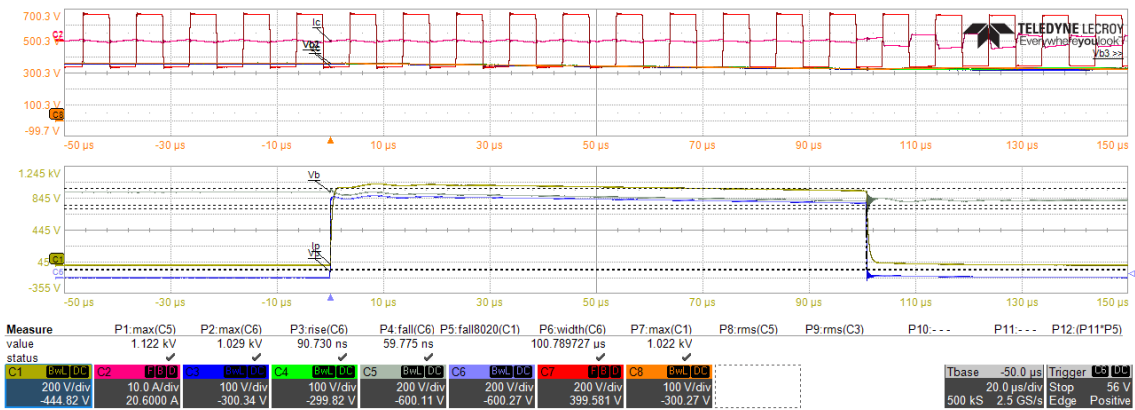


Figura 5.13: Principales formas de onda del test 1: Tecnología de condensadores electrolíticos, módulo de IGBTs y anchura de pulsos de 100 µs.

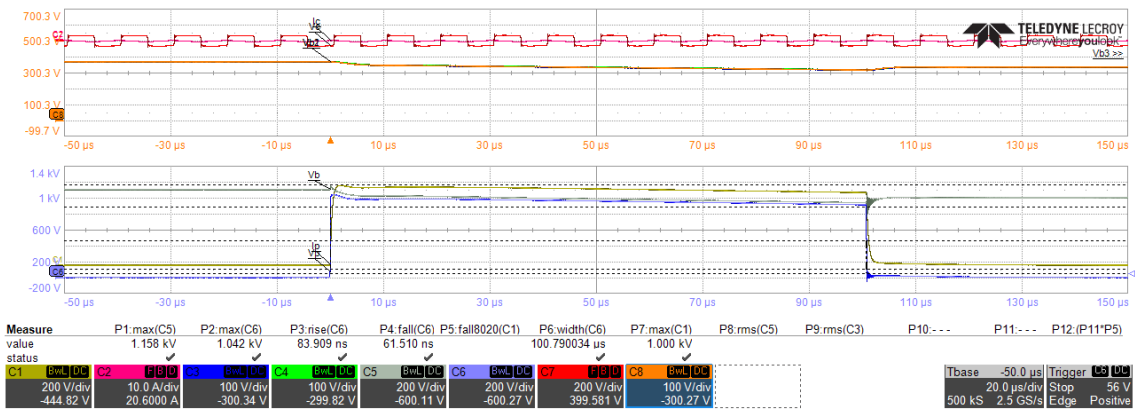
El mismo efecto, pero de manera opuesta, se aprecia al finalizar el pulso. La tensión vuelve a incrementarse debido al efecto parásito de las inductancias. Este fenómeno obliga a cargar el banco de condensadores a una tensión superior a la deseada para garantizar que se aplica la tensión mínima deseada.

Finalmente, el porcentaje de caída de tensión a lo largo del pulso se encuentra acorde a lo deseado, siendo inferior al 10% y, por lo tanto, validando esta tecnología de condensadores para la aplicación.

El siguiente test realizado ha consistido en sustituir la tecnología de semiconductor, en este caso, el módulo originalmente evaluado de IGBTs de Si, por un módulo de MOSFETs de SiC. Tal y como se puede apreciar en las medidas mostradas en las figuras anteriores, los tiempos de subida y bajada de tensión son cercanos a los 200 ns/130 ns, mientras que los tiempos medidos en la figura 5.14 son considerablemente menores, 90/60 ns respectivamente. De nuevo los test se han realizado con ambas tecnologías de condensadores, film (a) y electrolíticos (b).



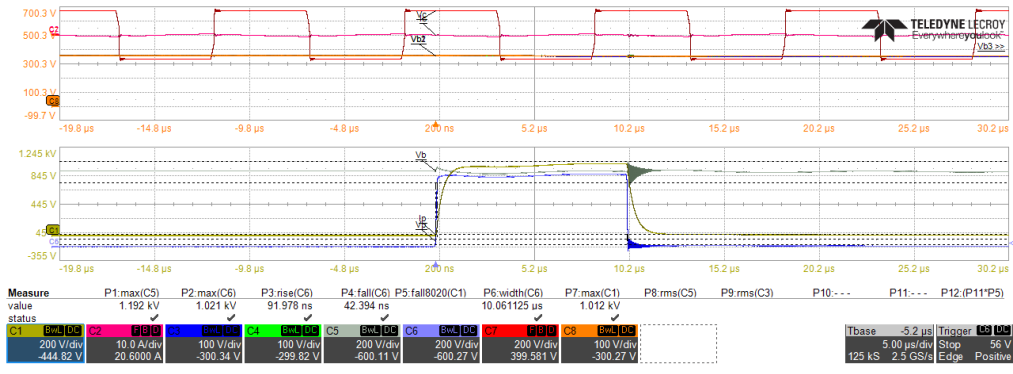
(a)



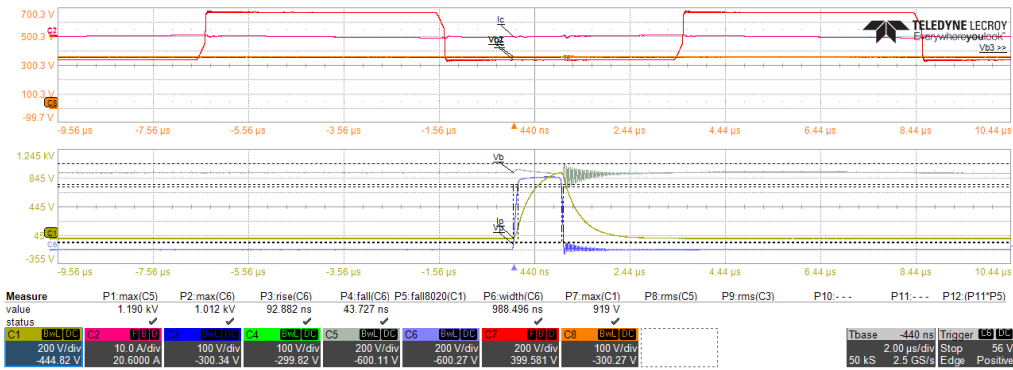
(b)

Figura 5.14: Principales formas de onda del test 2: Módulo de MOSFETs de SiC y anchura de pulsos de 100 μ s. (a) Tecnología de condensadores film. (b) Tecnología de condensadores electrolíticos.

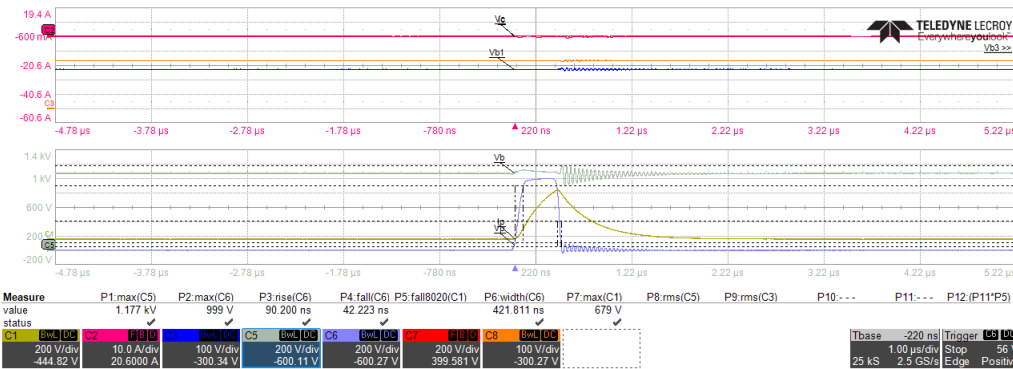
El resultado obtenido es bastante similar: independientemente de la tecnología de condensadores escogida, los tiempos de subida y bajada alcanzados son muy reducidos. Esto permite poder aplicar pulsos de menor duración, tal y como se muestra en la figura 5.15, para anchos de pulsos de 10 μs , 1 μs y 500 ns.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.15: Diferentes anchuras de pulso bajo test empleando el módulo de semiconductores de SiC y la tecnología de condensadores electrolíticos. (a) 10 μs . (b) 1 μs . (c) 500 ns.

Capítulo 6

Conclusiones

Como conclusión final de este TFG se incluye el presente capítulo. En él se expone una breve descripción de los resultados obtenidos en la experimentación y una valoración crítica del trabajo realizado.

6.1. Conclusiones

El principal objetivo de este TFG es la evaluación de tecnologías de condensadores para complementar el trabajo que está llevando a cabo el GEPM en la línea de investigación de la electroporación como método para la ablación de tumores. Tras la obtención de los requisitos eléctricos mediante una simulación por elementos finitos, se realizó una búsqueda de la mejor combinación de condensadores posible teniendo en cuenta factores como la tecnología, el precio, el tamaño y el volumen energético. Posteriormente a esto, se diseñó una placa de pruebas para cada tipo de condensador y se les sometió a distintas pruebas para comprobar si efectivamente eran opciones validas de uso.

Tras concluir este estudio, se puede validar el uso de la tecnología de condensadores electrolíticos como una alternativa económica en sustitución de la actual, basada en film. Aunque las prestaciones en términos de caída de tensión causadas por las inductancias parásitas degradan las prestaciones de esta tecnología de almacenamiento, puede existir un nicho de aplicaciones (aplicaciones industriales, como las alimentarias) en las que tenga cabida. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta el incremento de complejidad debido a la red de balanceo y carga, requerida en las tecnologías de condensadores cerámicos y electrolíticos.

6.2. Líneas futuras de trabajo

Las principales líneas futuras de trabajo que se nos abren son las siguientes:

- Implantar de forma definitiva este nuevo sistema de almacenamiento de energía en una nueva versión del generador de electroporación del GEPM.
- Validar la robustez y ciclo de vida útil del sistema mediante una sucesión de pruebas (para ello es necesario una carga refrigerada).
- Ahondar en el diseño del circuito de carga para buscar e implementar posibles mejoras.
- Incluir un sistema de descarga para proteger el sistema ante posibles peligros de electrocución.

Bibliografía

- [1] Sarnago, H., Lucía, Ó., Naval, A., Burdío, J. M., Castellví, Q., & Ivorra, A. (2016). A Versatile Multilevel Converter Platform for Cancer Treatment Using Irreversible Electroporation. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 4(1), 236-242.
- [2] Jiang, C., Davalos, R. V., & Bischof, J. C. (2015). A review of basic to clinical studies of irreversible electroporation therapy. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(1), 4-20.
- [3] Ivorra, A., & Rubinsky, B. (2010). Historical review of irreversible electroporation in medicine. *Irreversible Electroporation*, 1-21.
- [4] Ivorra, A., & Rubinsky, B. (2007). Electric field modulation in tissue electroporation with electrolytic and non-electrolytic additives. *Bioelectrochemistry*, 70(2), 551-560.
- [5] Jaroszeski, M. J., Gilbert, R., Nicolau, C., & Heller, R. (1999). In vivo gene delivery by electroporation. *Advanced drug delivery reviews*, 35(1), 131-137.
- [6] Mir, L. M. (2001). Therapeutic perspectives of in vivo cell electropermeabilization. *Bioelectrochemistry*, 53(1), 1-10.
- [7] Gehl, J. (2003). Electroporation: theory and methods, perspectives for drug delivery, gene therapy and research. *Acta Physiologica*, 177(4), 437-447.
- [8] Okino, M., & Mohri, H. (1987). Effects of a high-voltage electrical impulse and an anticancer drug on in vivo growing tumors. *Japanese Journal of Cancer Research GANN*, 78(12), 1319-1321.
- [9] Labanauskiene, J., Gehl, J., & Didziapetriene, J. (2007). Evaluation of cytotoxic effect of photodynamic therapy in combination with electroporation in vitro. *Bioelectrochemistry*, 70(1), 78-82.

- [10] Saulis, G. (2010). Electroporation of cell membranes: the fundamental effects of pulsed electric fields in food processing. *Food Engineering Reviews*, 2(2), 52-73.
- [11] Davalos, R. V., Mir, L. M., & Rubinsky, B. (2005). Tissue ablation with irreversible electroporation. *Annals of biomedical engineering*, 33(2), 223-231.
- [12] Davalos, R. V., Rubinsky, B., & Mir, L. M. (2003). Theoretical analysis of the thermal effects during in vivo tissue electroporation. *Bioelectrochemistry*, 61(1), 99-107.
- [13] Sel, D., Mazeres, S., Teissie, J., & Miklavcic, D. (2003). Finite-element modeling of needle electrodes in tissue from the perspective of frequent model computation. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 50(11), 1221-1232.
- [14] Nollet, J. A. (1749). *Recherches sur les causes particulieres des phénomènes électriques, et sur les effets nuisibles ou avantageux qu'on peut en attendre. Par M. l'abbé Nollet..* chez les freres Guerin, rue S. Jacques, à S. Thomas d'Aquin.
- [15] Stämpfli, R., & Willi, M. (1957). Membrane potential of a Ranvier node measured after electrical destruction of its membrane. *Experientia*, 13(7), 297-298.
- [16] Hamilton, W. A., & Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 148(3), 789-800.
- [17] Sale, A. J. H., & Hamilton, W. A. (1968). Effects of high electric fields on microorganisms. 3. Lysis of erythrocytes and protoplasts. *Biochimica et Biophysica Acta*, 163(37).
- [18] Zimmermann, U., Pilwat, G., & Riemann, F. (1974). Dielectric breakdown of cell membranes. *Biophysical journal*, 14(11), 881-899.
- [19] Riemann, F., Zimmermann, U., & Pilwat, G. (1975). Release and uptake of haemoglobin and ions in red blood cells induced by dielectric breakdown. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Biomembranes*, 394(3), 449-462.
- [20] Neumann, E., Schaefer-Ridder, M., Wang, Y., & Hofschneider, P. H. (1982). Gene transfer into mouse lyoma cells by electroporation in high electric fields. *The EMBO journal*, 1(7), 841.

- [21] Mir, L. M., Orłowski, S., Belehradek, J., & Paoletti, C. (1991). Electrochemotherapy potentiation of antitumour effect of bleomycin by local electric pulses. *European Journal of Cancer and Clinical Oncology*, 27(1), 68-72.
- [22] Pinero, J., Lopez-Baena, M., Ortiz, T., & Cortes, F. (1997). Apoptotic and necrotic cell death are both induced by electroporation in HL60 human promyeloid leukaemia cells. *Apoptosis*, 2(3), 330-336.
- [23] Bernal, C., Lucía, Ó., Sarnago, H., Burdío, J. M., Ivorra, A., & Castellví, Q. (2015, November). A review of pulse generation topologies for clinical electroporation. In *Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st Annual Conference of the IEEE* (pp. 000625-000630). IEEE.
- [24] Harris, K. W., McDuff, G., & Burkes, T. R. (1991). Evaluation of electrolytic capacitors for high peak current pulse duty. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 38(4), 758-766.
- [25] Pan, M. J., & Randall, C. A. (2010). A brief introduction to ceramic capacitors. *IEEE electrical insulation magazine*, 26(3).
- [26] Barth, C. B., Moon, I., Lei, Y., Qin, S., & Robert, C. N. (2015, September). Experimental evaluation of capacitors for power buffering in single-phase power converters. In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015 IEEE* (pp. 6269-6276). IEEE.

Anexos

Anexo A

Cronología

En la figura A.1 podemos ver las fases de trabajo de este TFG representadas mediante un diagrama de Gantt.

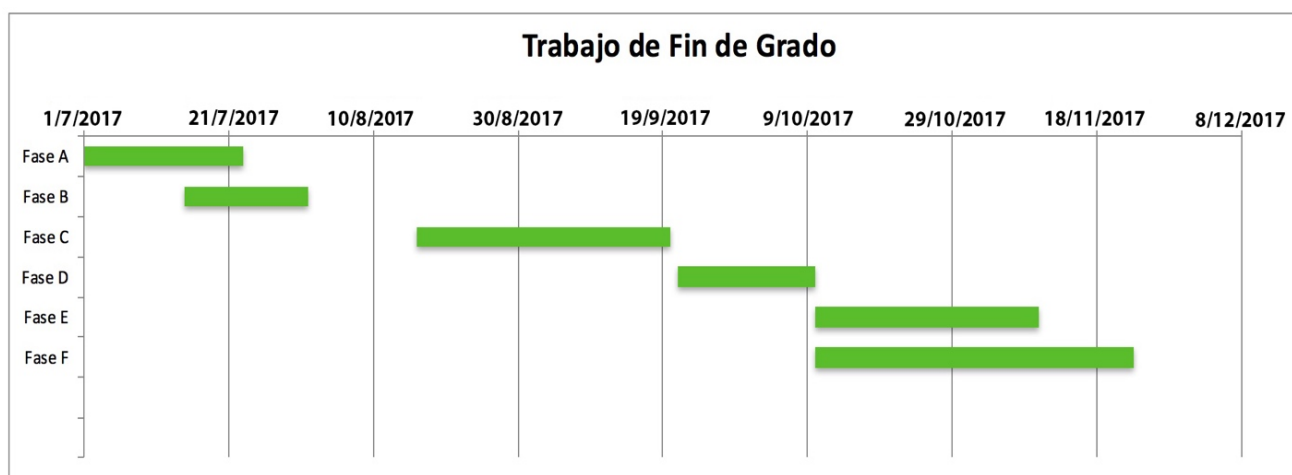


Figura A.1: Diagrama de Gantt

Cada una de las fases se refiere a las siguientes tareas:

- **Fase 1:** Estudio general del estado del arte sobre la técnica de electroporación.
- **Fase 2:** Estudio general del estado del arte sobre los convertidores de potencia y condensadores.
- **Fase 3:** Diseño de las placas de montaje.
- **Fase 4:** Montaje, experimentación y recogida de datos.
- **Fase 5:** Extracción de conclusiones.
- **Fase 6:** Redacción de la memoria.

Habría que destacar aquí que el diseño y pruebas de la placa de condensadores cerámicos se realizó a posteriori puesto que se decidió introducir esta tecnología en el presente TFG una vez las otras placas ya estaban fabricadas.

Anexo B

Hardware y software utilizado en el trabajo

De forma general, se ha usado el siguiente software en el presente trabajo:

- **Matlab**: herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.
- **Altium**: software de diseño de *PCBs*.
- **LTspice**: potente simulador *freeware* de *spice*.
- **Microsoft Word**: programa informático orientado al procesamiento de textos.
- **Microsoft Excel**: aplicación de hojas de cálculo.
- **Adobe Photoshop**: editor de gráficos rasterizados.
- **Adobe Illustrator**: editor de gráficos vectoriales.
- **Adobe Acrobat**: lector y editor de archivos *pdf*.
- **Dropbox**: servicio de alojamiento de archivos multiplataforma en la nube.
- **VMware Fusion**: simulador de máquinas virtuales para Mac.

Anexo C

Hojas de características de los condensadores utilizados

En las siguientes páginas se encuentran las hojas de características de los condensadores electrolíticos, film y cerámicos elegidos, en ese orden.

I Cautions and Warnings:

The following conditions apply to all goods within the product series of WCAP-All8 of Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG:



1.1 Polarity

An Aluminum Electrolytic Capacitor has a polarity. In operation this polarity needs to be considered and adhered. Reverse voltage can damage or destroy an Aluminum Electrolytic Capacitor. This can finally lead to a malfunction. If the polarity in a circuit will be switched or possibly can be reversed, the usage of a non-polar capacitor shall be applied. The polarity of an Electrolytic Capacitor is for Snap-In types marked like following:
A minus sign on one of the claw fasteners indicates the negative terminal.
On the sleeve the negative terminal is marked with a color band and thereon are minus signs given.

1.2 Overvoltage

Avoid any overvoltage and do not apply a continuous overvoltage. If an overvoltage is applied to the capacitor, the leakage current can increase drastically. The applied working voltage is not allowed to exceed the rated working voltage of the specific capacitor.

1.3 Operating Temperature

The capacitor shall not be operated above the operating temperature, which is stated within this datasheet of the specific capacitor. The achievable lifetime of the capacitor is correlating to the applied temperature. In order to achieve the maximum lifetime, the capacitor should be operated by the lowest possible temperature conditions within the application.

1.4 Ripple Current

The applied ripple current shall not exceed the specified maximum ripple current of the capacitor. If a higher ripple current is applied as permitted, it can cause excessive heat generation and higher temperature inside the capacitor. This happens due to pole change effects, if ripple current is applied to the capacitor. This can result in damage or lifetime shortage of the capacitor and may cause deterioration.

Electrolytic capacitors are regularly not designed for usage in AC applications and ripple current is applied / based due to parasitic effects on DC signal.

Please see electrical specification within this datasheet for maximum allowed ripple current.

1.5 Charge and Discharge

Frequent and quick charge / discharge cycles may generate heat inside the capacitor. In worst case this can cause a decrease of capacitance, an increase of leakage current or breakdown.

Applications with rapid charge and discharge cycles should be avoided. For assistance with your application please consult our technical support.

1.6 Vent

On most Aluminum Electrolytic types, a predetermined breaking point is given on the top of the component, which is the so called vent. The vent is there to assure a possible pressure relief and to avoid that the capacitor can explode due to internal pressure, which can occur by applying reverse voltage or a too high ripple current.
A space of at least 3mm above the vent is recommended. In order to assure the full function of the vent. If less space is present the vent may be cannot operate correctly / completely.

1.7 Sleeve

The sleeve material consists of PVC (polyvinyl-chloride). If excessive heat is applied to the sleeve (e.g. soldering process, etc.) the sleeve may crack or deform.

If the capacitor will be exposed to xylene, toluene or likewise and will be afterwards heated, the sleeve may crack or deform. The sleeve does not assure any electrical insulation. It is to avoid to use / place the product on a spot where electrical insulation is needed. To assure electrical insulation, especially to the case of capacitor, further actions need to be taken.

1.8 Storage Conditions

The storage conditions for a capacitor are recommended to be 5 °C up to 35 °C and less than 75 % rel. humidity. Do not expose the capacitor to environments with hazardous gas, ozone, ultraviolet rays or any kind of radiation. Avoid any contact of the capacitor with direct sunshine, saltwater, spray of water or types of oil during storage.

If a capacitor is stored for a long time without applying voltage or storage conditions of 35 °C or above and more than 75 % relative humidity, the leakage current may increase.

The leakage current will return to normal level when applying the rated voltage to the capacitor before use. If the capacitor was stored for more than 6 months, it is recommended to apply DC working voltage to the capacitor for 30 minutes through a 1 kΩ protective series resistor. All products shall be used before the end of the period of 12 months based on the product date code, if not a 100 % solderability cannot be guaranteed. The capacitance tolerance as specified within the datasheet is only valid on the date of delivery.

1.9 Wave Soldering

The detailed soldering instruction is given within Soldering Specification in this datasheet.

During wave soldering only the pins / terminals should have contact with hot solder bath / wave. Assure that no direct contact of capacitor body with hot solder bath / wave or any other component will happen. Soldering must be done from the opposite PCB side where capacitor body is placed.

| | | | | | | | | | | | |
|-----|------------|-----|---------|-----|--|--|---|---|-----------------------------------|--|------------|
| | | | | | | | Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenbuch Germany Tel: +49 (0) 79 42 945 - 0 www.we-online.com eiSos@we-online.com | DESCRIPTION WCAP-All8 Aluminum Electrolytic Capacitors | Order- No. 861101487034 | | SIZE A4 |
| 1.0 | 2014-11-11 | SSI | PSL | REV | | | | | | | |
| REV | DATE | BY | CHECKED | | | | | | | | |

This electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. This product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network etc. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design-in stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electronic component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

I Cautions and Warnings (2):

The following conditions apply to all goods within the product series of WCAP-AL8 of Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG:



1.10 Hand Soldering

Take care that the tip of solder iron will only contact pins or leadframe of the capacitor to avoid any possible damage of the capacitor.

1.11 Cleaning

Do not wash the assembled capacitors with the following cleaning agents:

- petroleum system solvents: may cause degeneration of the rubber seal material
- alkal system solvents: may cause corrosion and dissolve of the aluminum case
- halogenated solvents: may cause corrosion and failure of the capacitor
- acetone: component marking may be erased
- xylene: may cause deterioration of the rubber seal material

Verify the following points when washing is are applied to capacitors:

- Please monitor conductivity, pH-value, specific gravity and the water content of cleaning agents. Contamination adversely affects these characteristics.
 - Be sure to not expose the capacitors under solvent rich conditions or keep capacitors inside a closed container. In addition, please dry the solvents on the PCB and the capacitor sufficiently with an air knife (temperature should be less than the maximum rated category temperature of the capacitor) for 10 minutes.
 - Capacitors can be characteristically and catastrophically damaged by halogen ions, particularly by chlorine ions. The degree of the damage mainly depends upon the characteristics of the electrolyte and rubber seal material. When halogen ions come into contact with the inside of the capacitors, the foil may corrode, when a voltage is applied. This corrosion causes an extremely high leakage current, which results in venting and an open circuit defect.
- All other cleaning processes and cleaning agents are not approved by Würth Elektronik eiSos. All cleaning methods need to be tested and validated by the customer.

1.12 Adhesives and Coating Materials

The usage of any adhesive or coating material, which is containing halogenated solvents, is not allowed.

Before applying adhesives or coating materials, make sure that the following points are fulfilled:

- Take care that the surface and capacitor is dry and clean before applying adhesive or coating, to avoid any contamination with flux residues or cleaning solvents.
- Assume that no flux residue or spot is left between the rubber seal material of the capacitor and the PCB.
- Do not fully cover the entire rubber seal surface with adhesive, coating or molding materials. Otherwise the covering of the full rubber seal surface may restrain the natural diffusion of hydrogen gas. Block maximum 80% of the sealed section of a capacitor.
- If the used adhesive, coating or molding material is containing halogen ions in a large amount, the halogen ions can diffuse and creep into

the capacitor and can damage the capacitor. Both above explained circumstances can result in serious failures.

- Follow the specified heating and curing instructions given by supplier of the used adhesive or coating material. Avoid excessive pressure or heat on the capacitor by applying coating or adhesive.
- Take care that hardening of adhesive, coating material was correctly done, so that no solvents do remain.
- Be aware, that used solvents within adhesive and coating materials can damage the sleeve of the capacitor and can result in changes (the appearance of the sleeve (color, shine and marking).

1.13 Mechanical Stress on lead wire and terminal

Do not stress the capacitor with the following actions:

- Applying any excessive force to the lead wire or terminal.
- Move or turn the capacitor after soldering to the PCB.
- Bending pins after soldering.
- Carrying the PCB by picking / holding the board via a capacitor.

1.14 Operation and Usage of the Capacitor

In operation and usage take care about the following points.

- Do not use the capacitor within the following environmental conditions:
 - Environment with high mechanical stress / shocks or vibration (please see this specific datasheet for permitted limits).
 - Environment with high amount of damp condensation, water or types of oil.
 - Direct sunlight, ozone, any kind of radiation or ultraviolet rays.
 - Toxic gases (e.g. ammonium, chlorine and compounds, bromine and compounds, hydrogen sulfide, sulfuric acid).
- User should never touch the terminals of the capacitor directly.
- Avoid short circuit between terminals with any kind of conductive material (e.g. metal, fluid, acid, alkaline solution).

1.15 Maintenance

For industrial applications it is recommended to perform periodic inspections. Power supplies shall be turned off before inspection to discharge the capacitor. Check the following points in case of an inspection:

- Visual inspection of the capacitor to see, if the vent operated for pressure relief and if any leakage of electrolyte has taken place.
 - Measurement of electrical characteristics of the capacitor (according to datasheet, especially leakage current, capacitance and dissipation factor).
- In case of deviation or failure according to the specified characteristics, take care to start appropriate actions (e.g. replacement of capacitor).

| | | | | | |
|--|------------|-----|---------|------------------------------------|---|
| REV | DATE | BY | CHECKED | | Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany Tel. +49 (0) 79 42 945 - 0 www.we-online.com eiSos@we-online.com |
| 1.0 | 2014-11-11 | SSt | PSL | | |
| DESCRIPTION WCAP-AL8 Aluminium Electrolytic Capacitors | | | | Order - No. 861101487034 | |
| Size: 40.0 X 57.0 | | | | | |
| | | | | SIZE | A4 |

This electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. The product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), disaster prevention, medical, public information network etc. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design-in stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electronic component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

J Important Notes:

The following conditions apply to all goods within the product range of Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG:

1. General Customer Responsibility

Some goods within the product range of Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG contain statements regarding general suitability for certain application areas. These statements about suitability are based on our knowledge and experience of typical requirements concerning the areas, serve as general guidance and cannot be estimated as binding statements about the suitability for a customer application. The responsibility for the applicability and use in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate, where appropriate to investigate and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

2. Customer Responsibility related to Specific, in particular Safety-Related Applications

It has to be clearly pointed out that the possibility of a malfunction of electronic components or failure before the end of the usual lifetime cannot be completely eliminated in the current state of the art, even if the products are operated within the range of the specifications.

In certain customer applications requiring a very high level of safety and especially in customer applications in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health it must be ensured by most advanced technological aid of suitable design of the customer application that no injury or damage is caused to third parties in the event of malfunction or failure of an electronic component.

Therefore, customer is cautioned to verify that data sheets are current before placing orders. The current data sheets can be downloaded at www.we-online.com.

3. Best Care and Attention

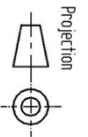


Any product-specific notes, cautions and warnings must be strictly observed. Any disregard will result in the loss of warranty.

4. Customer Support for Product Specifications

Some products within the product range may contain substances which are subject to restrictions in certain jurisdictions in order to serve specific technical requirements. Necessary information is available on request. In this case the field sales engineer or the internal sales person in charge should be contacted who will be happy to support in this matter.

5. Product R&D

Due to constant product improvement product specifications may change from time to time. As a standard reporting procedure of the Product Change Notification (PCN) according to the JEDEC-Standard Inform about minor and major changes. In case of further queries regarding the PCN, the field sales engineer or the internal sales person in charge should be contacted. The basic responsibility of the customer as per Section 1 and 2 remains unaffected.

| | | | | | | | | | |
|---|------------|---|---------|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 1.0 | 2014-11-11 | SS1 | PSL | | | | | | |
| REV | DATE | BY | CHECKED | | | | | | |
| | | | |  | | | | | |
| | | | | Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG EMC & Inductive Solutions Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany Tel.: +49 (0) 79 42 945 - 0 www.we-online.com eiSos@we-online.com | | | | | |
| DESCRIPTION WCAP-AL8 Aluminum Electrolytic Capacitors | | | | | | | | | |
| Order - No. | | 861101487034 | | | | | | | |
| Size: 40.0 X 57.0 | |  | | | | | | | |
| | |  | | | | | | | |
| SIZE | | A4 | | | | | | | |



6. Product Life Cycle

Due to technical progress and economical evaluation we also reserve the right to discontinue production and delivery of products. As a standard reporting procedure of the Product Termination Notification (PTN) according to the JEDEC-Standard we will inform at an early stage about inevitable product discontinuance. According to this we cannot guarantee that all products within our product range will always be available. Therefore it needs to be verified with the field sales engineer or the internal sales person in charge about the current product availability; expectancy before or when the product for application design-in/disposal is considered. The approach named above does not apply in the case of individual agreements deviating from the foregoing for customer-specific products.

7. Property Rights

All the rights for contractual products produced by Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG on the basis of ideas, development contracts as well as models or templates that are subject to copyright, patent or commercial protection supplied to the customer will remain with Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG.

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG does not warrant or represent that any license, either expressed or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, application, or process in which Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG components or services are used.

8. General Terms and Conditions

Unless otherwise agreed in individual contracts, all orders are subject to the current version of the "General Terms and Conditions of Würth Elektronik eiSos Group", last version available at www.we-online.com.

This electronic component has been designed and developed for usage in general electronic equipment only. This product is not authorized for use in equipment where a higher safety standard and reliability standard is especially required or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death, unless the parties have executed an agreement specifically governing such use. Moreover Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network etc.. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG must be informed about the intent of such usage before the design-in stage. In addition, sufficient reliability evaluation checks for safety must be performed on every electronic component which is used in electrical circuits that require high safety and reliability functions or performance.

Metallized Polypropylene Film Capacitors

Type: **MKP for DC-link EZPE 1100VDC Series**

Non-inductive construction using metallized polypropylene film with flame retardant epoxy resin and case.



■ Features

- High safety, Self-healing and Self-protecting function built-in
- Long product life, High reliability
- Low loss, Low ESR
- Flame retardant (Case and sealing resin)
- RoHS directive compliant

■ Recommended Applications

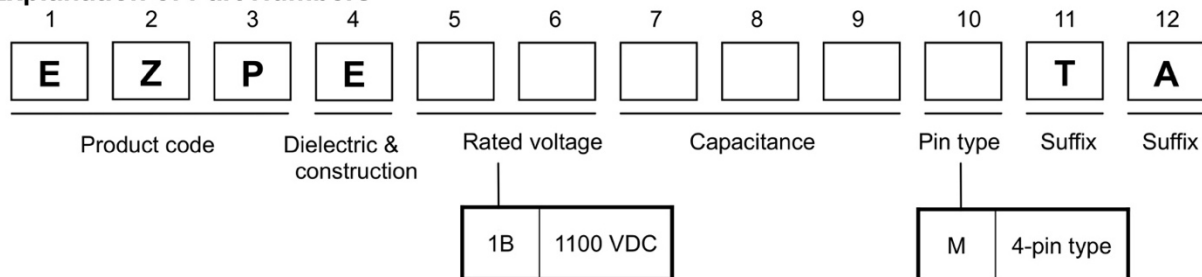
For DC filtering, DC link circuit

- Solar inverters
- Wind power generation
- Industrial power supplies
- Inverter circuit in appliances (Air Conditioners etc.)

■ Construction

- Dielectric : Polypropylene film
- Electrodes : Metallized dielectric with segmented pattern
- Plastic case : UL94 V-0
- Sealing : UL94 V-0
- Terminals : Tinned wires, 4-pin versions

■ Explanation of Part Numbers



■ Specifications

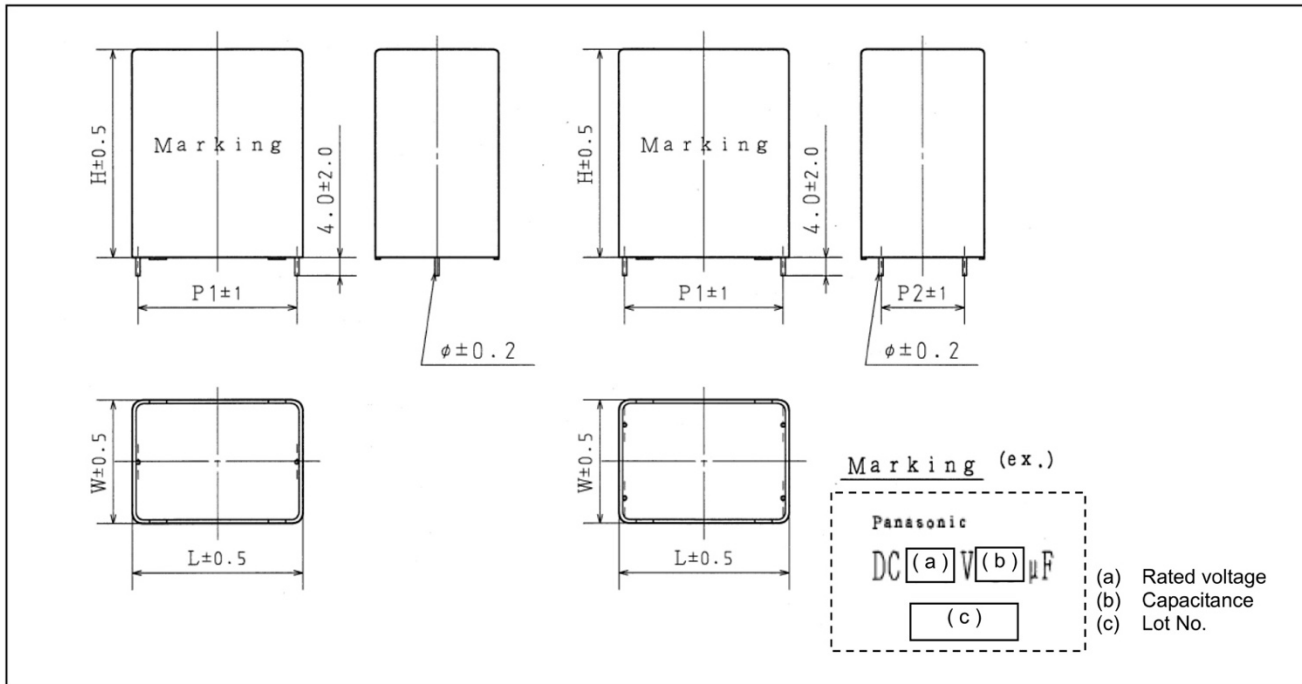
| | |
|---|--|
| Category temperature range (T_C) (*1) | − 40 °C to + 85 °C |
| Rated voltage (V_R) (*2) | 1100 VDC (920 VDC at 85 °C ; Derating of rated voltage at more than 70 °C (*3)) |
| Rated capacitance (C_R) | 10 μ F to 40 μ F |
| Capacitance tolerance | \pm 10 % |
| Withstanding DC voltage | Between terminals : Rated voltage (VDC) \times 150 % 10 s Terminal to case : 2110 VAC (50 Hz or 60 Hz) 10 s |
| Insulation resistance (CR) | $CR \geq 10,000 \Omega \cdot F$ (20 °C, 500 VDC, 60 s) |

*1 : The temperature of capacitor surface (case)

*2 : Use for DC voltage only

*3 : Refer to the page of " DC voltage derating "

■Dimensions in mm (not to scale)



■Rating, Dimensions & Quantity / Ammo Box

●Type EZPE Rated voltage : 1100 VDC at 70 °C (920VDC at 85 °C)

| Part Number | C_R [μ F] | Dimensions [mm] | | | | | | dv/dt [V/ μ s] | Permissible current | | ESR _{typ} [m Ω] (*3) | tan δ [%] (*4) | Mass [g] | MOQ [pcs] (*5) |
|--------------|---------------------|-----------------|----|------|------|------|--------|-----------------------|--|--|---|-----------------------------|-------------|----------------------|
| | | W | H | L | P1 | P2 | ϕ | | Peak Current [A _{cp}] (*1) | RMS Current [A _{rms}] (*2) | | | | |
| EZPE1B106MTA | 10 | 20 | 42 | 41.5 | 37.5 | 10.2 | 1.2 | 54 | 540 | 7.0 | 12.3 | 0.20 | 43 | 600 |
| EZPE1B156MTA | 15 | 30 | 51 | 41.5 | 37.5 | 10.2 | 1.2 | 54 | 810 | 8.5 | 8.2 | 0.20 | 80 | 400 |
| EZPE1B206MTA | 20 | 30 | 51 | 41.5 | 37.5 | 20.3 | 1.2 | 54 | 1080 | 10.0 | 6.3 | 0.20 | 76 | 400 |
| EZPE1B256MTA | 25 | 30 | 51 | 57.5 | 52.5 | 10.2 | 1.2 | 35 | 875 | 8.0 | 10.7 | 0.28 | 107 | 200 |
| EZPE1B306MTA | 30 | 30 | 51 | 57.5 | 52.5 | 20.3 | 1.2 | 35 | 1050 | 9.0 | 8.5 | 0.28 | 103 | 200 |
| EZPE1B356MTA | 35 | 35 | 56 | 57.5 | 52.5 | 20.3 | 1.2 | 35 | 1225 | 10.0 | 7.2 | 0.28 | 137 | 200 |
| EZPE1B406MTA | 40 | 35 | 56 | 57.5 | 52.5 | 20.3 | 1.2 | 35 | 1400 | 11.0 | 6.5 | 0.28 | 134 | 200 |

*1 : When rising temperature of capacitor surface by continuous peak current (included pulse current), use within limit specified for temperature of capacitor surface and self heating temperature rise.

*2 : Maximum RMS current @ 70 °C, 10 kHz
Use within limit for self heating temperature rise at capacitor surface.

*3 : Typical values @ 20°C, 10 kHz
ESR : less than $2.5 \times ESR_{typ}$

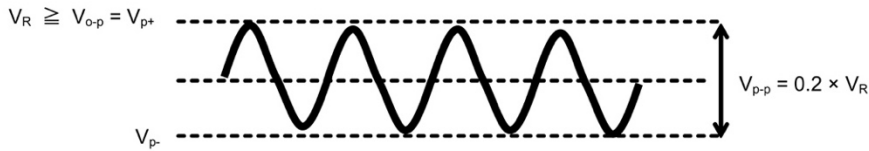
*4 : Maximum dissipation factor @20°C, 1 kHz

*5 : Minimum order quantity consists of 4 packing units.

■ Permissible Conditions

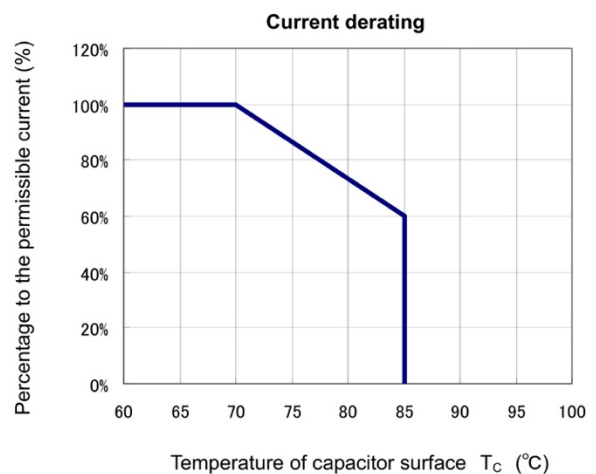
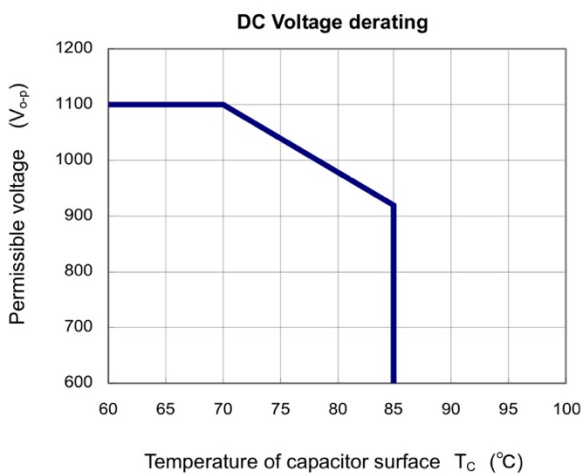
● Permissible Voltage

- These capacitors are designed only for DC voltage, so should not be used for AC line.
- Use the peak voltage (V_{o-p}) within the rated voltage.
- Use the peak to peak voltage (V_{p-p}) within $0.2 \times V_R$.



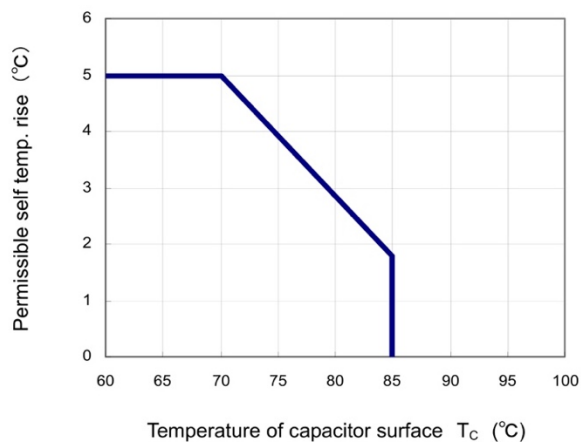
● DC Voltage, Peak current and RMS current derating

Derating of voltage (V_{o-p}), RMS current (A_{rms}), and peak current (A_{o-p}) according to the following diagram when the temperature of the capacitor surface exceeds 70 °C.



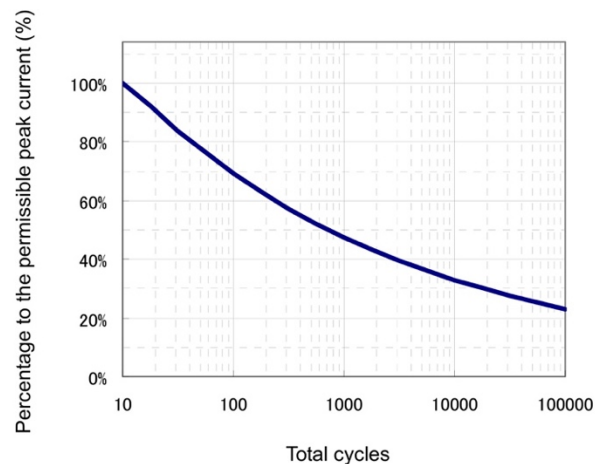
● Permissible self heating temperature rise

Permissible self heating temperature rise is within following diagram when the temperature of the capacitor surface exceeds 70 °C.



● Total cycles applied peak current

Total cycles applied peak current (A_{o-p}) (including pulse current) are within following diagram.

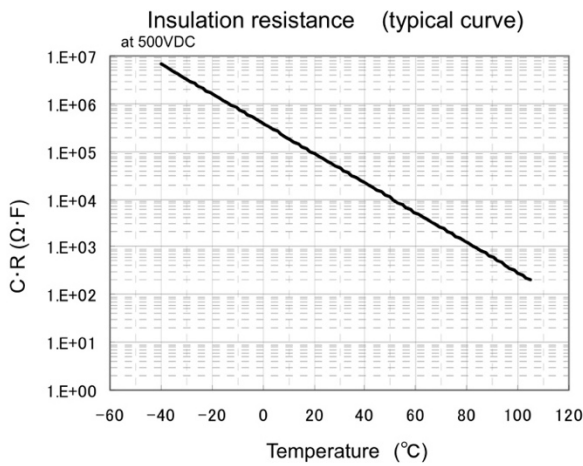
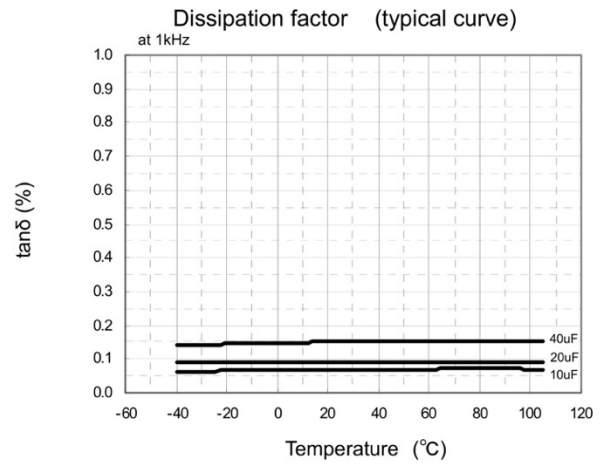
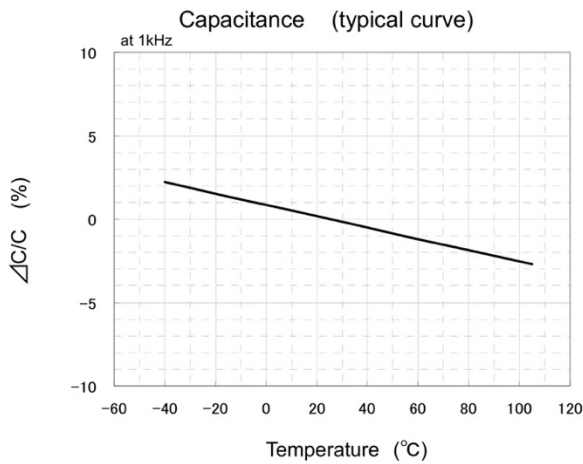


Please consult Panasonic if your condition exceeds the above spec.

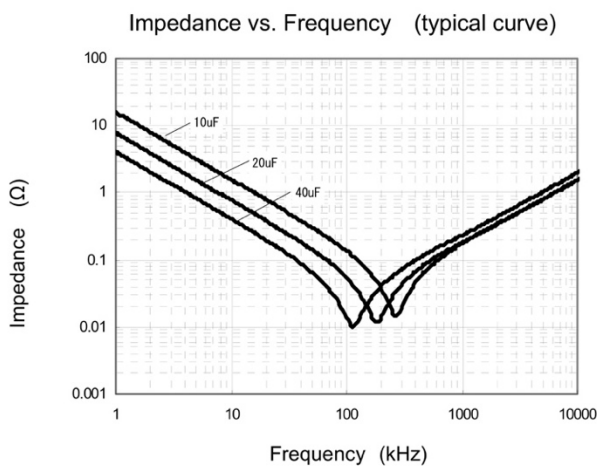
Design, Specifications are subject to change without notice. Ask factory for technical specifications before purchase and/or use. Whenever a doubt about safety arises from this product, please inform us immediately for technical consultation without fail.

■ Characteristics <Reference>

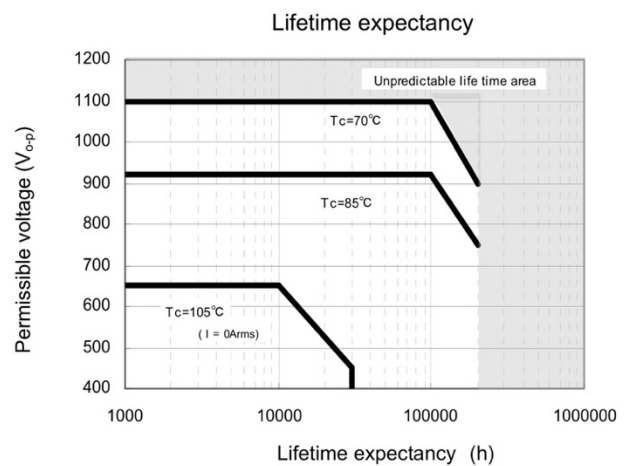
● Temperature Characteristics



● Frequency Characteristics



● Lifetime expectancy



* Life time : reach $\Delta C/C = -10\%$, Judgement of Panasonic

C5750X6S2W225M250KA

TDK Item Description : C5750X6S2W225M1*

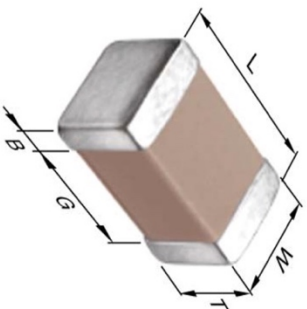


Application & Main Feature

Commercial Grade (Mid Voltage (100 to 630V))

Series

C5750 [EIA CC2220]



Dimensions

- L 5.70mm +/-0.4mm
- W 5.00mm +/-0.4mm
- T 2.50mm +/-0.3mm
- B 0.20mm Min.
- G

Temperature Characteristic

X6S (-55 to 105 degC +/-22%)

Rated Voltage

2W (450Vdc)

Capacitance

2.2uF

Capacitance Tolerance

M (+/-20%)

Dissipation Factor

2.5% Max.

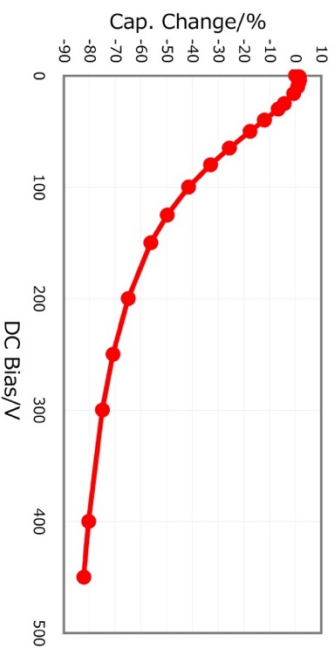
Insulation Resistance

227Mohm Min.

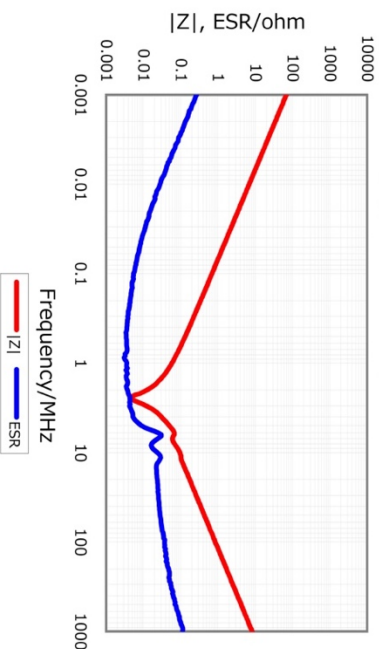
AEC-Q200

Not Applicable

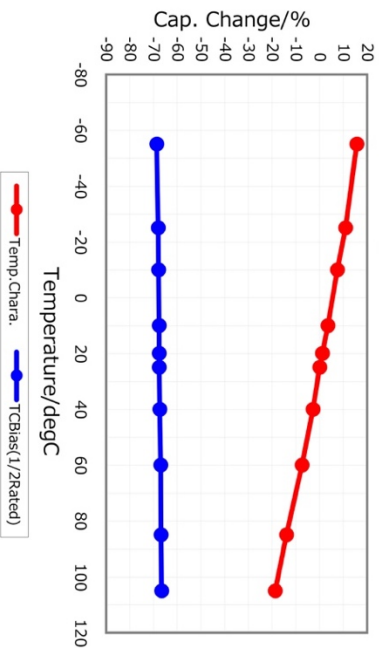
DC Bias Characteristic



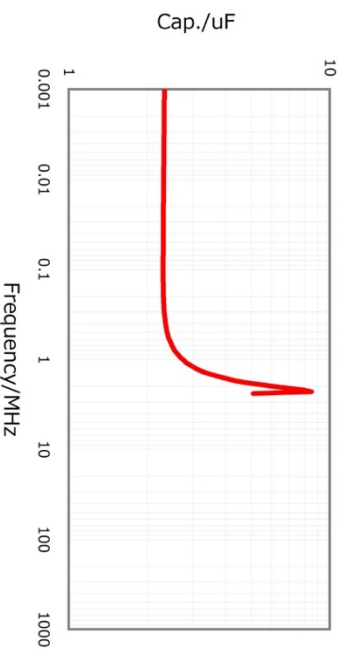
|Z|, ESR vs. Freq. Characteristics



Temperature Characteristic



Cap. vs. Freq. Characteristic



Ripple Temperature Rise Characteristics

