

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y análisis de capacitores superdieléctricos NaCl para el almacenamiento de energía eléctrica

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO:

Iñigo Calvo Antón

DIRECTORES: And

Andrés Suárez

CURSO ACADÉMICO:

2017-2018

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño y análisis de capacitores superdieléctricos NaCl para el almacenamiento de energía eléctrica

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Este trabajo es un estudio acerca de una nueva tecnología conocido como condensadores superdieléctricos, los cuales están basados en materiales superdieléctricos. Lo que busca este trabajo es analizar cuáles son las condiciones de las variables para las cuales el condensador tiene su rendimiento óptimo, tanto en energía específica, como en cuanto a potencia transmitida.

Para ello, durante el desarrollo del trabajo se precisaron las condiciones que los investigadores del trabajo estimaron que afectaban al rendimiento del condensador a las cuales se les dio un valor estándar y empleando la metodología OFAT se desarrolló el trabajo.

A continuación se pasó a la fase de toma de datos y análisis de resultados para comprobar cuáles eran las condiciones óptimas a las que se había sometido al condensador.

Por último, se ubicó la energía y potencia específicas de un condensador superdieléctrico en un diagrama de Ragone para compararlo con otras tecnologías de almacenamiento.

PALABRAS CLAVE

Superdieléctrico, capacitor, cloruro sódico, energía, OFAT, electrodo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco, primer lugar, a mis compañeros de promoción y en especial a los de mi camareta por el apoyo que sin darnos cuenta nos damos unos a otros trabajando codo con codo para lograr un objetivo común que lograremos el 16 de julio de este año.

Agradezco por último a mi familia el apoyo prestado durante estos cinco años de carrera. Su ayuda, ánimos y cariño han significado un estímulo en ese tiempo.

Agradezco al tutor del presente trabajo D. Andrés Suárez García por su incansable esfuerzo profesional que tanto me ha ayudado a la hora de realizar mi trabajo de fin de grado. Su motivación y fuente de conocimientos son un ejemplo en el que fijarse para el futuro.

Agradezco por último al Centro Universitario de la Defensa su inestimable ayuda a la hora de poner medios a nuestra disposición.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Ilustraciones	3
Índice de Tablas	5
1 Introducción y objetivos	6
2 Estado del arte	8
2.1 Introducción a la energía eléctrica.	8
2.2 Almacenamiento de energía eléctrica.	9
2.2.1 Almacenamiento mecánico	10
2.2.2 Almacenamiento químico	12
2.2.3 Almacenamiento electromagnético	14
2.3 Introducción a supercondensadores	15
2.3.1 Definición	15
2.3.2 Composición física	16
2.3.3 Materiales dieléctricos	16
2.3.4 Principio de pseudocapacitancia	17
2.3.5 Funcionamiento	17
2.4 Introducción a superdieléctricos	
2.5 Aplicación a la Armada	
3 Desarrollo del TFG	20
3.1 Montajes	20
3.1.1 Montaje del condensador	21
3.1.2 Montaje del circuito	23
3.2 Prácticas	23
3.2.1 Grosor	24
3.2.2 Voltaje	25
3.2.3 Concentración	25
3.2.4 Cambio en las resistencias	26
3.2.5 Secado	26
3.2.6 Tamaño de los electrodos	26
3.2.7 Temperatura	27
3.2.8 Porosidad	27
3.3 Problemas	
3.3.1 Problema bibliográfico	
3.3.2 Problemas en los intervalos de tiempo	29
1	

3.3.3 Problemas en los resultados	
3.3.4 Problemas con cada etapa.	
4 Resultados	
4.1 Descripción General	
4.1.1 Descripción de imágenes en formato tabla	
4.1.2 Descripción y elaboración de imágenes en formato gráfica	
4.2 Desarrollo de resultados	
4.2.1 Grosor	
4.2.2 Voltaje	
4.2.3 Concentración	
4.2.4 Cambio en las resistencias	40
4.2.5 Secado	42
4.2.6 Tamaño de los electrodos	44
4.2.7 Temperatura	46
4.2.8 Porosidad	48
4.3 Localización en el diagrama de Ragone	50
5 Conclusiones y líneas futuras	55
5.1 Condiciones óptimas	55
5.1.1 Energía específica	55
5.1.2 Potencia específica	56
5.2 Localización de experimentos en diagrama de Ragone	56
5.3 Líneas futuras	56
6 Bibliografía	58
Anexo I: Gráficas de los distintos experimentos	60
6.1 Gráficas de grosor	60
6.2 Gráficas de voltaje	63
6.3 Gráficas de concentración	65
6.4 Gráficas de resistencias	68
6.5 Gráficas de secado	70
6.6 Gráficas de tamaño del electrodo	73
6.7 Gráficas de temperatura	75
6.8 Gráficas de porosidad	78
Anexo II: Contenido del segundo anexo	79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1 Diagrama de Ragone (I)	7
Ilustración 2-1 Sistema de almacenamiento PHES [5]	10
Ilustración 2-2 Diagrama de operación de un volante de inercia [5]	12
Ilustración 2-3 Batería de flujo	13
Ilustración 2-4 Comparación entre dispositivos de almacenamiento [8]	15
Ilustración 2-5 Composición física de un supercondensador [10]	16
Ilustración 2-6 Disposición de un capacitor cargado [13]	18
Ilustración 2-7 Diagrama de Ragone (II)	19
Ilustración 3-1 Circuito empleado en las prácticas ([13])	21
Ilustración 3-2 Montaje final de circuito y condensador con las características por defecto	22
Ilustración 3-3 Condensador preliminar	22
Ilustración 3-4 Fuente de alimentación	23
Ilustración 3-5 Micrómetro empleado para medir el grosor de los filtros	25
Ilustración 3-6 Frascos con disoluciones a distintas concentraciones de NaCl	26
Ilustración 3-7 Electrodos empleados en la serie "Tamaño"	27
Ilustración 3-8 Montaje para alterar la temperatura del condensador	27
Ilustración 3-9 Instantes previos al montaje con cambio de filtro	28
Ilustración 3-10 Caída de tensión poco representada	29
Ilustración 3-11 Gráfica ln(V/Vo) errática	29
Ilustración 3-12 Regresión poco fidedigna a todos los puntos	30
Ilustración 4-1 Tendencia de E en la serie "grosor"	35
Ilustración 4-2 Tendencia de P en la serie "grosor"	36
Ilustración 4-3 Tendencia de E en la serie "voltaje"	37
Ilustración 4-4 Tendencia de P en la serie "voltaje"	38
Ilustración 4-5 Tendencia de E en la serie "concentración"	40
Ilustración 4-6 Tendencia de P en la serie "concentración"	40
Ilustración 4-7 Tendencia de E en la serie "resistencias"	42
Ilustración 4-8 Tendencia de P en la serie "resistencias"	42
Ilustración 4-9 Tendencia de E en la serie "secado"	44
Ilustración 4-10 Tendencia de P en la serie "secado"	44
Ilustración 4-11 Tendencia de E en la serie "tamaño"	46
Ilustración 4-12 Tendencia de P en la serie "tamaño"	46
Ilustración 4-13 Tendencia de E en la serie "temperatura"	48
Ilustración 4-14 Tendencia de P en la serie "temperatura"	48
2	

Ilustración 4-15 Tendencia de E en la serie "porosidad"	49
Ilustración 4-16 Tendencia de P en la serie "porosidad"	50
Ilustración 4-17 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "grosor" ubicados	50
Ilustración 4-18 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "voltaje" ubicados	51
Ilustración 4-19 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "concentración" ubicado	s51
Ilustración 4-20 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "resistencias" ubicados	52
Ilustración 4-21 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "secado" ubicados	52
Ilustración 4-22 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "tamaño" ubicados	53
Ilustración 4-23 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "temperatura" ubicados .	53
Ilustración 4-24 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "porosidad" ubicados	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Materiales dieléctricos y valores de $\boldsymbol{\varepsilon}$ [12]	17
Tabla 3-1 OFAT	20
Tabla 3-2 Comparación valores válidos y no válidos de E (kWh/l)	31
Tabla 3-3 Comparación valores válidos y no válidos de P (kW/l)	31
Tabla 4-1 Serie "grosor"	35
Tabla 4-2 Serie "voltaje"	37
Tabla 4-3 Serie "concentración"	39
Tabla 4-4 Serie "resistencias"	41
Tabla 4-5 Serie "secado"	43
Tabla 4-6 Serie "tamaño"	45
Tabla 4-7 Serie "temperatura"	47
Tabla 4-8 Serie "porosidad"	49

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los experimentos de Francisco Javier Quintero Cortes y Jonathan Phillips [1], se empleó un material superdieléctrico denominado así por el elevado valor de su constante eléctrica y gran capacidad para almacenar energía en presencia de un campo eléctrico. Dicho material está compuesto de un área de polvo de aluminio saturado con una solución de ácido bórico (pH 5) para generar condensadores. Se demostró que los condensadores creados a partir de estos materiales funcionaban como capacitores electrostáticos a baja tensión con una extraordinaria capacidad para el almacenamiento energético. Los experimentos de Francisco Javier Quintero Cortes y Jonathan Phillips [1] fueron pioneros en investigación de materiales superdieléctricos empleados para almacenar energía.

Además establecieron una teoría que implicaba que había una familia de materiales superdieléctricos, y que alguno de los miembros de esta familia de materiales podría conseguir valores muy elevados de energía específica. La teoría afirma que cualquier material sólido no conductor con una porosidad suficiente para ser saturado con un líquido que contenga iones disueltos, es potencialmente un material superdieléctrico. Esto es debido a que, desde un punto de vista eléctrico, los iones en el líquido se mueven para formar dipolos que se polarizan contrariamente al campo aplicado. La tensión máxima a la que se pueden someter este tipo de materiales es a la tensión de ruptura de la fase líquida.

El trabajo desarrollado por de Francisco Javier Quintero Cortes y Jonathan Phillips [1] culminaba con las siguientes conclusiones:

- La constate dieléctrica puede ser aumentada modificando algunos parámetros que le afectan.
- El comportamiento superdieléctrico surge de la formación de dipolos por parte de los iones contenidos en el líquido que se alberga en los poros del material sólido y que hay una amplia familia de materiales superdieléctricos.
- Es razonable extrapolar los resultados y sugerir que la energía específica de los condensadores hechos a partir de un material superdieléctrico puede ser enorme, incluso puede llegar a sobrepasar a la generación actual de baterías de litio.

A raíz de estos resultados y de este nuevo campo que puede llegar a ser llamado para superar a las baterías de litio, surge la necesidad de analizar cuáles son los límites de estas nuevas tecnologías y por ello surge este Trabajo de Fin de Grado. Es una tecnología aún poco conocida y todo apunta a que extremadamente útil ya que según se ha experimentado hasta ahora, posee tanto una energía como una potencia específicas muy elevadas. Por ello surge la necesidad de estudiar esta tecnología y localizar sus límites.

El objetivo principal de este TFG es el de estimar la potencia específica y la energía específica de un condensador creado a base de materiales de muy bajo costo y fácil acceso y establecer, de entre unas elegidas, cuáles son las condiciones óptimas de funcionamiento del condensador y cuáles son las tendencias que sigue en su funcionamiento el condensador ante las distintas alteraciones de las condiciones previamente determinadas.

Establecidos esos objetivos, se pasó a determinar tanto las condiciones que afectasen a la carga y descarga del condensador como a los valores que tomarían dichas variables para posibilitar el estudio. Para facilitar el análisis de datos se realizaron los experimentos de manera que en cada uno sólo se veía alterada una variable, a este método se le conoce como método OFAT (One Factor At a Time).

Y así pues se llevaron a cabo las distintas prácticas con los distintos condensadores y circuitos diseñados específicamente para cada una y se obtuvieron los resultados que se muestran en la presente memoria. Y una vez obtenidos estos datos, se tratará de ubicar en un diagrama de Ragone como el que vemos en la Ilustración 1-1 al capacitor analizado en este trabajo.



Ilustración 1-1 Diagrama de Ragone (I)

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción a la energía eléctrica.

Desde que se descubriese la carga eléctrica por Benjamin Franklin en 1752, la energía eléctrica ha sido siempre objeto de estudio por los científicos a lo largo de los años. Ante ellos siempre surgía la misma dificultad, almacenarla. Ello supone un gran inconveniente en cuanto a la utilidad de este tipo de energía se refiere, ya que a lo largo de los años el uso por parte de la población mundial dela energía eléctrica ha aumentado exponencialmente.

Como se puede apreciar mirando a nuestro alrededor en cualquier momento del día, nuestra sociedad ha convertido la energía eléctrica en un bien prácticamente esencial para vivir. Los españoles usamos de media 6600 kWh, frente a lo que se usaba en 1950 de media que eran 3500 kWh aproximadamente. Según el documento publicado por el Ministerio de Energía "La energía en España 2015" [2] Este gran aumento ha ocurrido en la práctica totalidad del mundo, exceptuando algunas zonas de menor desarrollo económico y cultural.

Por ejemplo, actualmente en la práctica totalidad de los domicilios españoles se tiene aire acondicionado, electrodomésticos y otros dispositivos que consumen gran cantidad de energía eléctrica para garantizar a los usuarios el estado de confort y facilitarles algunas tareas que hace algunas décadas se realizaban a mano, como lavar la ropa. La mayor parte de esta energía ha sido transformada a energía eléctrica para alimentar los dispositivos de su energía original (química, nuclear, etcétera) en el tiempo en la que el usuario la ha requerido. Este suceso se da especialmente cuando en la población se espera un gran evento multitudinario, como puede ser un concierto; en ese caso se activan más centrales productoras de energía eléctrica para abastecer dicho evento en el momento en que este lo requiera. Es decir, esa energía no ha sido almacenada en baterías, sino que se ha transformado directamente para su uso tras, eso sí, ser modificada a los requerimientos estándar de la red eléctrica comercial (220V y 50 o 60 Hz según la zona geográfica en que se encuentre el cliente).

Este aumento en el uso de energía eléctrica supone a su vez un conflicto a las empresas proveedoras de energía que está actualmente en su mayor momento y progresa para aumentar en gran medida. Este problema es el balance económico y medioambiental. Es decir, por un lado el compromiso con el medio ambiente y por el otro el compromiso con sus clientes, los cuales cada vez demandan más energía para uso privado, tal como son los electrodomésticos, aires acondicionados, etcétera.

Ante esta problemática que ya empezaba a vislumbrarse en la década de los setenta se separaron conceptualmente las energías que generaban un impacto ambiental notable y las energías limpias, aunque entonces se llamaron "energías alternativas" por su precario desarrollo y escasa extensión, como narra el Autor Jaime González Velasco en su libro "Energías Renovables" [3]. Aún hoy, no se

ha conseguido que las poblaciones a lo largo de todo el mundo se abastezcan en su mayoría por energías renovables o limpias. Se sigue dependiendo en gran medida de energías como la energía nuclear o la energía térmica, que dan lugar a gran cantidad de residuos, como son los gases resultados de una combustión que pasan a la atmósfera y favorecen el efecto invernadero y eliminan la capa de ozono y los residuos nucleares, ya inútiles, que se entierran en cementerios nucleares.

Científicos de todo el mundo están buscando una solución a esta dependencia de energías contaminantes y entre las soluciones planteadas hay una de especial relevancia para este trabajo. Esta se refiere a abastecer ciudades grandes con energías limpias, el problema reside entonces en que con los medios actuales para obtener energía eléctrica a partir de las energías renovables, como son los molinos de viento o las centrales hidroeléctricas, no es suficiente para abastecer a las grandes poblaciones mundiales. Una posible solución a este problema sería diseñar un dispositivo a gran escala que fuera capaz de almacenar la energía producida por estos medios y de tal formar utilizarla cuando la población lo requiriera mientras los medios siguen cargando el dispositivo por su cuenta.

2.2 Almacenamiento de energía eléctrica.

Como vimos anteriormente, uno de los mayores inconvenientes de la energía eléctrica a nivel mundial es la inexistencia de dispositivos o métodos de almacenar a gran escala y de manera fiable dicho tipo de energía tan ampliamente utilizada. Esto conlleva a que toda la energía que se consume o se requiere de la red eléctrica ha de ser generada prácticamente en el momento en que el cliente la solicite. Hace varios años se empezaron a desarrollar y a implementar sistemas utilizados para almacenar energía eléctrica buscando una solución viable al problema anteriormente presentado. Las más conocidas y comercializadas de esta familia de almacenamiento de energía eléctrica son las baterías de litio. Estas emplean como electrolito una sal de litio que lleva a cabo la reacción que tiene lugar entre el ánodo y el cátodo, estas aportan capacidad energética, ligereza y sobre todo se caracterizan porque sus componentes no sufren efecto memoria, lo cual no afecta a su rendimiento a largo plazo. Ante la aparición de nuevos sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, llevó a David Ragone a establecer las diferencias entre ellos, como indica Alberto Hernández Fernández en su TFG [4] (baterías, supercondensadores, condensadores comunes, etc.) en el conocido como Diagrama de Ragone (Ilustración 1-1), en el cual se observa que, como norma general, a mayor energía específica, menor potencia específica y a menor energía específica, mayor potencia específica. Esto se observa en baterías convencionales y celdas de combustible, los cuales tienen una alta energía específica y una baja potencia específica, lo que significa que acumularán mayor energía y que en el momento de entregarla, este proceso será largo. También se observa en condensadores convencionales, los cuales, al contrario que las baterías y celdas de combustible tienen una alta potencia específica y una baja densidad energética, lo que significa que acumularán menos energía y el proceso de entrega será mucho más rápido que el de las baterías.

Dada la complejidad de almacenar energía eléctrica, se necesita seguir un alguno de los procesos que se detallan a continuación para poder almacenarla. Primero ha de ser transformada en otro tipo de energía de la que poder obtener con facilidad la energía eléctrica deseada. Esta, parte de energía eléctrica y puede pasar a ser energía mecánica, química o electromagnética. Existen varios métodos de almacenamiento de energía que se han ido desarrollando durante la historia desde aquel experimento de Benjamin Franklin que dio vida al gigante de la industria eléctrica. Todos ellos pueden ser catalogados en alguno de los tres procesos nombrados anteriormente.

2.2.1 Almacenamiento mecánico

Existen diversos tipos de almacenamiento de energía mecánica a partir de la cual obtener energía eléctrica, pero de entre ellos destacan por ser más empleados a nivel mundial, debido a su rendimiento, los siguientes:

2.2.1.1 Sistemas PHES

Los sistemas PHES (por sus siglas en inglés Pumped Hydro Energy Storage), estos sistemas posibilitan la utilización de la energía eléctrica en horas valle, para bombear agua desde un depósito inferior a otro situado a mayor altitud. Cuando el agua almacenada en el depósito superior pasa a través de una tubería hidráulica produce energía eléctrica, que puede ser inyectada a la red en las horas punta. Las principales ventajas que presenta son el bajo coste de la energía y la posibilidad de regular la frecuencia. Estos sistemas de bombeo están basados en máquinas eléctricas e hidráulicas reversibles, es decir, un generador-motor y una turbina-bomba. Los tiempos de transición completa entre el estado de generación y de acumulación han de ser breves para responder a los cambios bruscos de las necesidades de potencia de la red eléctrica.

Para evaluar la eficiencia global del sistema de almacenamiento de energía mediante el bombeo de agua, se debe considerar el ratio de energía suministrada a la red y la energía consumida mientras se bombea. La energía utilizada para bombear un volumen de agua, V, hasta una altura, h, con una eficiencia de bombeo, η_p , se puede obtener mediante la Ecuación 1, mientras que la energía suministrada a la red por el generador, de eficiencia η_g , se puede obtener mediante la segunda Ecuación 2:

Ecuación 1

$$E_{bomba} = \frac{\rho * g * h * V}{\eta_{p}}$$
Ecuación 2
$$[5]$$

$$E_{bomba} = \frac{\rho * g * h * V}{\eta_{p}}$$
^[5]

En la Ilustración 2-1, se muestra un sistema de almacenamiento de energía PHES, así como la interconexión a la red necesaria para hacer funcionar las bombas y la energía entregada por la turbina.



Ilustración 2-1 Sistema de almacenamiento PHES [5]

2.2.1.2 Sistemas CAES

Los sistema CAES (por sus siglas en inglés Compressed Air Energy Storage) este tipo de sistemas de almacenamiento de la energía con aire comprimido son semejantes al almacenamiento por bombeo. En esta tecnología el aire se comprime y se almacena en depósitos, acuíferos o cavidades subterráneas. La energía almacenada se libera durante los intervalos de demanda de puntas, expandiendo el aire a través de una turbina.

Cuando se comprime aire para almacenarlo, su temperatura sufre un incremento. El calor originado puede quedar retenido en el propio aire comprimido, o en otro medio de almacenamiento de calor, para, posteriormente, ser devuelto al aire antes su expansión en la turbina. Este método se conoce como sistema adiabático de almacenamiento y alcanza una elevada eficiencia. En este contexto, cabe tener presente que, para una determinada relación de presiones, el trabajo de la turbina es directamente proporcional a la temperatura absoluta de admisión. Si el calor generado en la compresión se pierde, se puede suministrar calor adicional al aire comprimido mediante la combustión de un combustible, constituyendo un sistema de almacenamiento híbrido.

Una de las claves para evaluar las prestaciones eléctricas de los CAES, reside en estimar la energía eléctrica que se puede generar por unidad de volumen del depósito de almacenamiento de aire. En este sentido, la energía de la turbina viene dada por la Ecuación 3:

Ecuación 3

$$E_{gen} = \mathbf{\eta}_M * \mathbf{\eta}_G \int_0^t W_{CV \, TOT} * \dot{m_T} * dt$$
^[5]

Donde: la integral representa el trabajo mecánico generado por la expansión del aire y el combustible en la turbina.

- mt: tasa de masa de aire.
- Wcv tot: trabajo mecánico por unidad de masa generado en el proceso
- t: tiempo necesario para vaciar por completo el depósito de aire a plena potencia de salida.
- η_M : eficiencia mecánica de la turbina.
- η_G : eficiencia eléctrica del generador.

Como todos los sistemas CAES hasta ahora se basan en dos etapas de expansión, la producción de trabajo se puede expresar como la suma correspondiente a las dos etapas. Para calcular el trabajo realizado por los sistemas hay que tener en cuenta, pues, ambas etapas. La primera etapa se considera como presión inicial la de entrada a la primera turbina y como presión final la de entrada a la segunda turbina. De la segunda etapa se considera la presión inicial la de entrada a la segunda turbina y como presión final la de salida de la segunda turbina, es decir la presión barométrica. La suma del trabajo realizado en ambas etapas es el trabajo total realizado en el sistema.

2.2.1.3 Sistemas FESS

Los FESS (por sus siglas en inglés Flywheel Energy Storages Systems), o volantes de inercia, que almacenan la energía provocando el giro de una masa rodante a velocidades muy elevadas. La cantidad de energía acumulada por los volantes de inercia viene dada por la Ecuación 4:

Ecuación 4

$$E = \frac{1}{2} * I * \omega^2$$
^[5]

El máximo de energía almacenada está limitada en última instancia por la resistencia a la tracción del material del volante de inercia. La máxima densidad de energía específica, E_{sp} , que puede ser almacenada en un volante de inercia depende directamente del factor de forma de dicho volante de inercia y de la máxima tensión soportada por el material que la compone e inversamente depende de la densidad de dicho material. Es decir, sigue Ecuación 5:

Ecuación 5

$$E = k_s \frac{\sigma_m}{\rho}$$
^[5]

Siendo:

- σ_m : máxima tensión soportada por el material del volante.
- *k_s*: factor de forma.
- *ρ*: densidad del material del volante.

En el contexto de la Generación Distribuida, los volantes de inercia permiten uniformizar el consumo, almacenando energía en las horas valle y devolviendo la energía a la red en las horas punta. En consecuencia, se reducen las pérdidas en el transporte y distribución y se optimiza el uso de las subestaciones existentes al obtenerse picos de consumo menores. Los volantes de inercia proporcionan una cantidad de energía en un intervalo de tiempo relativamente breve, por lo que pueden desempeñar un papel importante en la regulación primaria del control frecuencia-potencia. En la Ilustración 2-2, se muestra el diagrama de operación de un volante de inercia.



Ilustración 2-2 Diagrama de operación de un volante de inercia [5]

2.2.2 Almacenamiento químico

Estas están representadas mayormente por tecnologías relacionadas con el hidrógeno y por la familia de las baterías casi en su totalidad: litio, níquel, sulfuro de sodio, etcétera. A estos sistemas se los conoce también como sistemas BESS por sus siglas en inglés Battery Energy Storage System. Actualmente en cuanto a almacenamiento de energía, esta familia es la que está mayormente representada debido a sus buenas características en cuanto a energía y potencia específicas y por ello son los sistemas que se encuentran más extendidos dando apoyo para el balanceo de carga y regulando

voltaje y frecuencia en la red. Las baterías presentan unos parámetros propios que las caracterizan entre los cuales cabe destacar: A pesar de que existen numerosos tipos de baterías electroquímicas, las más relevantes son cuatro, que será /n expuestas a continuación.

2.2.2.1 Baterías de Li-ion

Las baterías de Li-ion o baterías de iones de litio son el tipo de baterías más extendido en el mercado, está empezando a usarse en transportes y son también montadas en los submarinos convencionales alternándose con las baterías de Ni-Cd. Las baterías Li-ion son recargables y en ellas los iones de litio se mueven de voltajes negativos a voltajes positivos durante la descarga y durante el proceso de carga realizan el movimiento contrario. El problema de este tipo de almacenador químico es que su degradación es alta ante temperaturas extremas y su vida útil se ve muy afectada por variables como ésta.

2.2.2.2 Baterías de titanio de litio

Las baterías de titanio de litio (LTO) son una variación de las conocidas Li-ion que emplean ánodos de titanato de litio combinados con cátodos de otro material diferente al carbono que se emplean en las Li-ion. Las velocidades de carga y descarga de las baterías LTO se ven aumentadas respecto a las convencionales debido al empleo de otro material pero, en contraposición, la densidad energética disminuye. Además de las ventajas ya comentadas, también hay que tener en cuenta que las baterías de titanio de litio soportan mayores rangos de temperaturas degradándose en menor medida que las baterías Li-ion. También, en contraposición cabe destacar que el costo por kWh es mayor debido a que el material activo suele ser más caro que el carbono.

2.2.2.3 Baterías de flujo

Las baterías de flujo son sistemas de gran tamaño que cuentan con dos depósitos llamados tanques en los cuales se encuentran sendos electrolitos con una o más especies electroactivas que fluyen por la celda electroquímica que convierte la energía química en energía eléctrica por medio de una reacción redox a través de una membrana, un esquema de una de ellas se muestra en la Ilustración 2-3.



Ilustración 2-3 Batería de flujo

Estas baterías se recargan con rapidez gracias al flujo de electrolito líquido entre la celda y el tanque que es bombeado por una bomba alojada en un stack. De lo cual deriva que la capacidad energética de este tipo de baterías viene determinada por el tamaño de los tanques y potencia de las bombas, siendo ambos parámetros independientes.

Existen dos tipos de baterías de flujo, las de vanadio y las de zinc-bromo. Las de vanadio, las más empleadas, emplean pares redox de vanadio disueltos en mezclas diluidas de ácido sulfúrico, esto evita la difusión de iones de un lado a otro de la membrana por lo que la vida útil del electrolito prácticamente es infinita.

2.2.2.4 Baterías de plomo-carbono

Las baterías de plomo-carbono son el sistema electroquímico más empleado tras las baterías de litio. Sin embargo, hay dos grandes inconvenientes que reducen su atractivo frente a sus competencias. El primero es que tanto su potencia como su densidad energética son limitadas, así como su resistencia al ciclado, y en segundo lugar está el gran inconveniente que apesadumbra su existencia que es su impacto medioambiental debido al plomo. Se entiende pues, que la razón por la cual son tan empleadas es gracias a su muy bajo coste.

Las baterías convencionales de plomo-ácido tienen baja resistencia al ciclado, lo que significa que aguantan pocos ciclos carga-descarga, entre los 500 y 2000 ciclos, aunque con el uso del carbono este número se puede elevar entre un 100 y un200 por ciento, según Mauricio Jiménez Pijoan en su trabajo de fin de grado [6].

2.2.3 Almacenamiento electromagnético

De este tipo de almacenamiento se destacan especialmente las siguientes:

2.2.3.1 Sistemas SMES

SMES: (por sus siglas en inglés Superconducting Magnetic Energy Storage) almacenamiento de energía electromagnética por superconducción, la cual basa su funcionamiento en la creación de campos magnéticos con gran intensidad de campo (B), mediante el uso de imanes superconductores para almacenar energía. Esta energía viene dada por la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$E = \frac{1}{2} * L * I^2$$
^[7]

Donde L es el coeficiente de autoinducción y la I la intensidad.

Un SMES típicamente incluye tres partes, una bobina superconductora, un sistema electrónico de potencia y enfriador criogénico. El funcionamiento es simple, la bobina es enfriada a una temperatura más baja que su temperatura crítica y con ello muestra su propiedad superconductora. El principio básico de este tipo de almacenadores es que una vez cargada la bobina la energía puede ser almacenada indefinidamente, pues esta no decae. Para entregar la energía, la corriente que circula por la bobina se detiene cerrando y abriendo un conmutador sólido del sistema de potencia.

Estos sistemas pueden llegar a dar picos de potencia elevados en intervalos de tiempo realmente pequeños (menores de un segundo). Esto supone una gran eficiencia, debido a que las bobinas superconductoras apenas tienen pérdidas por efecto Joule, por lo que sólo se consideran las pérdidas del convertidor electrónico.

Debido al consumo de energía por parte del refrigerador y al coste de los materiales superconductores, estas tecnologías de almacenamiento se emplean a corta duración. La aplicación

más extendida de los sistemas SMES es la mejora en distribución de energía por parte de redes públicas, evitando picos y valles de tensión.

2.2.3.2 Supercondensadores

-SC: supercondensadores, conocidos también como EDLC (Electric Double-Layer Capacitor), es una nueva tecnología de almacenamiento de energía. Son dispositivos que tienen un principio de operación similar a los condensadores tradicionales, sin embargo su corriente de descarga y su capacidad es mayor y por ellos se emplean como unidades de almacenamiento de energía en sistemas de potencia, vehículos, etc. La diferencia principal entre ellos es que almacenan la energía en la interfase entre un electrodo conductor poroso y un electrolito líquido iónico conductor y, por otra parte, que la superficie aumenta debido a que la porosidad es muy elevada. Los supercondensadores serán explicados con mayor detenimiento en el apartado 2.3.

Los supercondensadores, volviendo al diagrama de Ragone, se encuentran entre dos aguas entre baterías y condensadores convencionales. Esto implica que tendrán una gran energía y potencia específicas, con valores moderadamente superiores en potencia específica que en energía, sin perder su condición de capacitor.

2.3 Introducción a supercondensadores

2.3.1 Definición

Los supercondensadores o EDLC (Electrochemical Double Layer Capacitor) son los dispositivos de retención de energía eléctrica que, como vimos anteriormente, tienen un mejor compromiso entre potencia específica y energía específica, la mejora que supone frente a los condensadores tradicionales es que aporta mucha mayor energía específica, es decir, es capaz de acumular mayor energía soltándola en un, también, largo espacio de tiempo. Los supercondensadores presentan una capacidad miles de veces mayor que los condensadores electrolíticos de alta capacidad. Los EDLC comerciales que mayor tamaño y por tanto capacidad tienen son de hasta 5000 Faradios, con densidades energéticas también altamente elevadas. La Ilustración 2-4 es una comparación entre condensadores y supercondensadores para comprobar las diferencias que estos tienen y además se incluyen las baterías de litio.

		Batería de Litio	Supercondensador	Condensador Convencional
Tiempo de ca	ga	6-8 horas	0,3-30 s	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶ s
Energía		110-160 Wh/kg	1-10 Wh/kg	<1 Wh/kg
Potencia		<1 kW/kg	<10 kW/kg	<100 kW/kg
Eficiencia		70-85%	85-98%	95%
Rango de Temperatura	s	Sensibles*	-40 a 65°C	-20 a 65°C

*Máximo rendimiento entre 15-25°C. Peligro de explosión a altas temperaturas

Ilustración 2-4 Comparación entre dispositivos de almacenamiento [8]

El primer supercondensador del que se tiene registro fue diseñado y patentado por H. E. Becker, que trabajaba en General Electrics, en 1957. La primera vez que se superó el faradio de capacidad fue a final de los años ochenta para que, diez años después, una compañía rusa superase los cien faradios. [9].

2.3.2 Composición física

Los supercondensadores, al igual que los condensadores convencionales están formados por dos electrodos de material conductor, a los cuales se les aplica una diferencia de potencial y entre ellos un material aislante que evita que ambos estén en cortocircuito. Es este material aislante el que va a almacenar la energía, ya que sus partículas se polarizarán según se aplique la diferencia de potencial y quedarán las cargas positivas de estas más cercanas al electrodo cargado negativamente y las cargas positivas al electrodo cargado positivamente. La Ilustración 2-5 muestra gráficamente la composición de un supercondensador.



Ilustración 2-5 Composición física de un supercondensador [10]

2.3.3 Materiales dieléctricos

Se denomina dieléctrico a un material con una baja conductividad eléctrica, es decir, un aislante, el cual es capaz de formar dipolos eléctricos en su interior cuando son sometidos a una fuerza de campo eléctrico. Los dieléctricos son aislantes con una cualidad especial, pues.

Los más utilizados son el aire y el papel, el dieléctrico aplicado al supercondensador de este trabajo tiene un afecto atenuante sobre el campo eléctrico, disminuye la diferencia de potencial entre las placas del supercondensador y aumenta la diferencia máxima que el condensador es capaz de resistir cuando aumenta el número de capas de este material aislante. Los dieléctricos tienen un valor llamado rigidez dieléctrica, que supone la tensión máxima que pueden soportar antes de pasar a ser conductores, esto sucede cuando por culpa de un voltaje alto se rompe el dieléctrico del material y entonces pasa corriente como si fuera un material conductor.

Esta propiedad de los materiales es la que permite el funcionamiento de los condensadores, de los cuales se obtiene el valor de su capacitancia calculando el cociente entre la carga almacenada en las placas del condensador medida en culombios y la diferencia de potencial que ha de ser siempre menor que la rigidez dieléctrica medida en voltios.

Además de esa rigidez dieléctrica, todos los dieléctricos tienen una constante física conocida como permitividad relativa o constante dieléctrica la cual se describe como la capacidad de un material para reducir el campo eléctrico en su interior al ser expuesto a un campo externo [11]. A continuación, en la Tabla 2-1 se muestran diversos dieléctricos conocidos y el valor de sus constantes dieléctricas ε mínimas y máximas.

Material	E mínima	<i>ɛ</i> máxima
Aire	1	1
Ámbar	2.6	2.7
Papel	4	4
Plexiglás	2.6	3.5
Poliamida	3.4	3.5
Porcelana	5	6.5

Tabla 2-1 Materiales dieléctricos y valores de ε [12]

2.3.4 Principio de pseudocapacitancia

El almacenamiento de energía eléctrica en la capacitancia común, la que utilizan los condensadores normales, está asociado a la acumulación de carga eléctrica entre las láminas del condensador debido al medio aislante que se alberga entre dichas láminas, el material. En cambio, los supercapacitores no almacenan energía mediante acumulación de carga eléctrica, sino que lo hacen por medio de la pseudocapacitancia. Este fenómeno depende de la tensión, con lo que es variable, no así la capacitancia de condensadores comunes.

Al ser modificable esta capacitancia y depender de la tensión, resulta que para valores altos de capacitancia, se pueden manejar como condensadores convencionales. La capacitancia de este tipo de condensadores varía también en función del material dieléctrico que tenga entre ambas placas de carbono, en el caso de este proyecto, como ya vimos se va a utilizar papel de filtro como elemento aislante.

Tras varias pruebas con estos miembros de la familia de los capacitores, se llegó a la conclusión empírica de que para aumentar la capacitancia del condensador, la variable que más influía en los resultados al ser modificada era tanto la concentración de electrolitos como la naturaleza de los electrodos y el material aislante entre capas. También se concluyó en esta serie de pruebas que los electrolitos que más favorecen la pseudocapacitancia son los hidróxidos de sodio y de potasio, razón por la cual son los más empleados a la hora de construir supercondensadores. Por otro lado, estos electrolitos son también los que en mayor medida aumentan la resistencia interna del dispositivo evitando que entre una placa y otra caiga la tensión deseada, sino un poco menos.

2.3.5 Funcionamiento

El funcionamiento de los supercapacitores se basa en la constante dieléctrica del material aislante que se encuentre separando los electrodos. Pues en función de esta constante dieléctrica serán capaces de almacenar más o menos energía.

Al aplicar la carga en los electrodos, como podemos ver en Ilustración 2-6, estos tomarán cada uno una carga igual en módulo per de signo contrario, quedando entonces un electrodo cargado positivamente con la carga que se vaya a emplear en el experimento y el otro cargado negativamente con dicha carga. Esa carga debida a la diferencia de potencial aplicada será la que atraiga a los iones positivos del material dieléctrico la carga negativa y a los negativos la carga positiva. Quedarán entonces todos los iones del dieléctrico polarizados. En función a la constante dieléctrica del material será mayor o menor el número de iones que queden polarizados y por tanto mayor o menos la energía específica acumulada por dicho condensador.



Ilustración 2-6 Disposición de un capacitor cargado [13]

Es en el momento de retirar la diferencia de potencial a la que están sometidos los electrodos cuando la carga acumulada por los iones del dieléctrico empieza a liberarse del mismo, yendo hacia las zonas de menor potencial, es decir, continuando con el circuito en el que se encuentre montado el capacitor. Así mientras el dieléctrico se descarga, sus iones vuelven a posicionarse aleatoriamente por el material y quedando listo el capacitor para ser cargado de nuevo.

2.4 Introducción a superdieléctricos

Como se ha explicado anteriormente, hay una amplia familia de materiales que cumplen con las características propias de un material superdieléctrico, y estos materiales lo cumplen a frecuencias bajas y con tensiones de ruptura bajas también, pero en cambio son capaces de almacenar una gran cantidad de energía.

Como enunciaron Phillips y Quintero [1] en un postulado de su teoría, cualquier material sólido no conductor con porosidad suficiente para albergar un material líquido que tenga iones libres en su seno, es potencialmente un material superdieléctrico. Esto es debido al comportamiento superdieléctrico, en el cual los iones libres del líquido forman dipolos ante la presencia de una caída de tensión entre los extremos del sólido y es así como se acumula la energía. Es necesario que sea a una baja tensión, ya que del líquido que contiene los iones depende la tensión máxima a aplicar para lograr el comportamiento superdieléctrico, por ello ha de ser menor a su tensión de ruptura.

2.5 Aplicación a la Armada

Actualmente, el cien por ciento de los submarinos que existen en la Armada española son convencionales, es decir, además de su menor tamaño con respecto a los nucleares que tienen países como Francia y Estados Unidos, se diferencian por el combustible que emplean. Siendo así, que los submarinos convencionales emplean gasoil. A diferencia de otros vehículos, el motor diésel que consume ese gasoil no es el motor encargado de convertir la energía química que posee el gasoil en energía cinética que transmite directamente al eje acoplado a la hélice, no es un motor de propulsión. En el caso de los submarinos no se usan los motores diésel como motores de propulsión por razones tácticas, como evitar el ruido del motor propulsor empleado en inmersión perdiendo la ventaja táctica

del submarino de que el buque enemigo no sepa con facilidad donde está y por razones de habitabilidad ya que los motores al funcionar consumen una gran cantidad de oxígeno, ya escaso en el interior del buque, y desprenden una gran cantidad de gases de combustión que, de usarlo en inmersión, sería notoriamente perjudiciales para la salud de los tripulantes. Por estas razones, el submarino realiza una maniobra llamada snorkel esencial para su funcionamiento. Durante el snorkel, el submarino alcanza una cota periscópica, sube a profundidad un tubo de exhaustación de gases al que le debe su nombre la maniobra, snorkel, y es el motor diésel el que con su funcionamiento moverá una turbina que transformará la energía cinética de dicho motor obtenida del combustible en energía eléctrica que se almacenará en unas baterías llamadas baterías principales. Estas baterías se emplearán para el funcionamiento de todo el barco, es decir, alimentarán los equipos vitales del buque, como congeladores o neveras, se emplearán también para hacer funcionar otros equipos como los propios de un submarino de guerra electrónica, plóteres de navegación, etcétera y como función principal tienen la de transmitir su energía eléctrica a un motor eléctrico que será el que desplace, con el sigilo propio de este tipo de motores, a la hélice que propulsará el barco.

En los últimos años, en los arsenales de Navantia Cartagena, se está desarrollando una nueva tecnología para la propulsión de submarinos conocida como AIP, el funcionamiento de esta tecnología permite al submarino mantenerse hasta dos semanas en inmersión, frente a los de cuatro a cinco días de inmersión debido a la limitada capacidad de las baterías frente al elevado consumo de la propulsión, ya que éste es notoriamente superior al consumo por parte del resto de equipos a bordo del submarino.

Como se ha visto en anteriores apartados, como en la Ilustración 2-7, los supercondensadores tienen una potencia de entrega mayor a las baterías de litio como las que emplean estos submarinos, por ello, en submarinos convencionales no, ya que permanecer el máximo tiempo posible es fundamental, pero en submarinos como por ejemplo en los SDV, por sus siglas en inglés Swimmer Delivery Vehicles, un tipo de submarinos convencionales de menor tamaño sin casco presurizado, cuya permanencia es muy limitada dado que su misión es el ataque rápido, este tipo de almacenadores podría ser útil para proveer a los submarinos de gran potencia, lo que se traduce en gran velocidad tanto para aproximación, como para retirada.

A mayores, si la tecnología de condensadores creados a base de materiales superdieléctricos resultara ser tan capaz como se estima en los primeros estudios [1], se podría incluso barajar la opción de incluir esta tecnología a modo de baterías de submarinos convencionales para aumentar su permanencia sin hacer superficie y su velocidad máxima, condición en la que los submarinos actuales están muy flojos.



Ilustración 2-7 Diagrama de Ragone (II)

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Montajes

El trabajo realizado que en el presente documento se detalla, tenía como fin el montaje de un capacitor empleando como material aislante, entre ambos electrodos, un superdieléctrico y el análisis de cómo diversas variables afectan ante su potencia específica y energía específica. Estas dos cualidades de nuestro capacitor son las que indican la capacitancia del condensador, y son estas las que ante las variables toman distintos valores dando lugar a distintas capacitancias.

Para comenzar el trabajo había que establecer las variables que pudieran alterar la descarga del condensador y comprobar en qué manera lo hacen. Para determinar cada factor por separado se definieron unas condiciones estándar de tamaño temperatura, etcétera que se emplearían como condiciones por defecto. A partir de aquí se empleó el método OFAT (One Factor At a Time) que consiste en realizar varias pruebas manteniendo constantes todas las variables excepto la variable la cual se quiere analizar, como explica gráficamente la Tabla 3-1. En esta imagen se puede observar como la primera prueba, se realiza con todas las variables (a, b y c) en valor uno y para identificar en qué medida afectan estas al resultado final, en la prueba dos se cambia el valor de la variable "a", en la prueba tres se devuelve a "a" a valor 1 y se le da a "b" valor 2 y en la cuarta prueba todas las variables en valor 1 excepto "c" que toma valor 2. En este caso las cualidades que queríamos analizar cómo variaban eran la energía específica y la potencia específica y para ello, las variables determinadas fueron: el voltaje inicial, la superficie de los electrodos, la distancia entre electrodos, la concentración de NaCl, la temperatura, la masa de agua absorbida por el material dieléctrico, el propio material dieléctrico y las resistencias por las que debía pasar la corriente una vez desconectado de la fuente, más adelante se comenta en detalle la forma en que se alteraron dichas características del condensador y en el apartado 4 se explicará con detenimiento como afecta cada factor a la potencia y energía específicas del condensador.

	a	b	С	
Prueba 1	1	1	1	
Prueba 2	2	1	1	
Prueba 3	1	2	1	
Prueba 4	1	1	2	
Tabla 3-1 OFAT				

Para llevar este estudio, el primer paso era pensar en qué circuito haría posible el estudio de las variables del capacitor. El circuito debía cumplir, pues, que si el capacitor estaba conectado a una fuente de energía éste debía cargarse, y una vez esta se desconectase o apagase, el circuito debía continuar disipando diferencia de potencial mediante unas resistencias. Esta diferencia de potencial que disipasen las resistencias debía tener como origen la carga almacenada del condensador, el cual empezaría a liberar energía una vez no tuviese conexión alguna con la fuente. El circuito que se diseñó fue el que se muestra en la Ilustración 3-1.



Ilustración 3-1 Circuito empleado en las prácticas ([13])

Como se puede observar, una vez se enciende la fuente, en bornes del condensador se crea una diferencia de potencial que como se vio en apartados anteriores polariza a los iones del elemento dieléctrico que conforma el condensador. Es así como este se carga y al desconectar la fuente, los bornes continúan con la diferencia de potencial, que se reduce, en función de las condiciones a las que esté sometida, con mayor o menor celeridad. Esta reducción tiene lugar hasta quedar sin diferencia de potencial, ahí consideraremos que el condensador se ha descargado por completo.

3.1.1 Montaje del condensador

Para realizar el montaje del condensador se utilizaron como electrodos dos láminas de grafito, cuya medida estándar era de diez por diez centímetros, aunque una de las variables a estudiar es el área de los electrodos, eso implica que un factor a modificar frente al resto de condiciones estándar son las medidas de dichas láminas de grafito. A cada uno de las láminas cuadradas de grafito se adhirieron dos rectángulos cuya finalidad era únicamente la de conectar tanto los extremos del arduino como los de la fuente de alimentación para cargarlo y tomar la caída de tensión en ambos bornes.

Además de estas láminas, el condensador está compuesto por un elemento superdieléctrico, que es el papel de filtro empapado en una disolución de agua con cloruro sódico (NaCl, sal común).este papel de filtro empapado tiene un grosor de 0,13 milímetros, lo que supone que dicha distancia es la de separación entre ambos electrodos. Finalmente el montaje del condensador a utilizar en este proyecto es que se puede observar en la Ilustración 3-2.



Ilustración 3-2 Montaje final de circuito y condensador con las características por defecto

En unas primeras pruebas se emplearon materiales de peor calidad: las láminas de grafito sustituyeron a unas primeras láminas de papel de aluminio y el papel de filtro sustituyó al papel de cocina, de porosidad desconocida, empleado en estas cuyo único fin era comprobar la validez del montaje y aprender los procedimientos por parte de los presentes autores del estudio. En la Ilustración 3-3 se muestra el montaje preliminar del condensador con los materiales de menor calidad. Así pues, para la realización de este no se tomaron medidas ni de dimensiones del papel de plata ni del grosor del papel de cocinar empleado como dieléctrico, incluso las conexiones a los electrodos se hicieron con papel de celofán que no garantizaba con seguridad el contacto con ellos, ya que, como se ha dicho, el objetivo era simplemente aprender procedimientos y comprobar el funcionamiento del montaje, lo que se realizó con éxito rotundo.



Ilustración 3-3 Condensador preliminar

3.1.2 Montaje del circuito

Ya se ha mostrado previamente el circuito empleado para realizar este trabajo. La puesta a punto del circuito se realizó en una protoboard. Hizo falta también un juego de cables para conectar los elementos conectados a la protoboard, un juego de resistencias de varios valores, mínimo de 100 Ω , 220 Ω y 1000 Ω . Además de estos elementos fue necesario un Arduino. El arduino se empleó a modo de voltímetro, existía la posibilidad de emplear un voltímetro convencional, pero el arduino ofrecía varias ventajas. Entre estas ventajas se dan: el arduino registra valores cada uno o diez segundos sin errores temporales, los valores de voltaje y tiempo quedan registrados automáticamente lo que evitan también errores en la transcripción de los valores y asimismo aceleran el proceso de la introducción de los datos en la hoja de Excel.

Además de estos elementos era necesario emplear una fuente de alimentación en las pruebas con los materiales de baja calidad se empleó primeramente una pila AA de 1,5V. Esta presentaba limitaciones debido a la dificultad de mantenerla conectada el tiempo suficiente para cargar el condensador hasta el valor estándar de 1V, también por su escaso valor de voltaje, que en prácticas como la de aumentar el valor de las resistencias, o la de aumentar el valor del voltaje, la pila quedaba justa. Por estas razones, la pila se sustituyó por una fuente de alimentación como la que muestra la Ilustración 3-4. La cual presenta cocodrilos que muerden os electrodos de grafito así como los cables que cierran el circuito y es mucho más versátil que la pila en cuanto a valores de voltaje.



Ilustración 3-4 Fuente de alimentación

3.2 Prácticas

Con el fin de entender mejor el comportamiento del condensador hecho a base de un material superdieléctrico como elemento de almacenamiento de energía, se deben realizar pruebas para comprobar cómo se comportan y entender en qué manera varía sus tasas de carga y descarga. El objetivo de este análisis, es pues, estudiar la energía específica y potencia específica que tiene el condensador creado por el redactor de este documento. Para ello, se debía determinar las variables que pudieran verse afectadas para modificar así el nuevo valor de la capacitancia del condensador.

La capacitancia del condensador se obtiene con una fórmula que depende de un valor τ , dicho valor τ , a su vez es un valor empírico, ya que se obtiene a partir de los datos, estos se grafican y de dicha gráfica se obtiene la función que representa la descarga del condensador. Esa función es una función exponencial en la cual el tau es el exponente al que se eleva dicha Ecuación 7.

Ecuación 7

$$\tau = R * C \tag{1}$$

Esta fórmula es empleada, también, para los estudios modernos de los condensadores convencionales.

Los pasos a seguir para el estudio llevado a cabo empiezan por cargar el condensador durante un periodo determinado de tiempo, después, apagar la fuente de alimentación y desde el comienzo del proceso, el arduino debe estar tomando valores de voltaje y quedando éstos registrados. La caída de potencial en el circuito viene determinada por la Ecuación 8:

Ecuación 8

$$V(t) = V_o * e^{\frac{-t}{RC}}$$
⁽²⁾

Donde V (t) es el voltaje en un tiempo dado, Vo es el voltaje inicial, t representa el tiempo de descarga, R la resistencia total y C es la incógnita, la capacitancia desconocida. Después, usando la geometría del capacitor y la resistencia se calcula la constante dieléctrica del material se calcula con la Ecuación 9:

Ecuación 9

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_R \frac{A}{d} \tag{3}$$

Donde C es la capacitancia del condensador, ε_o es la constante dieléctrica del vacío, ε_R es la contante dieléctrica del material, A es el área de los electrodos y d la distancia entre electrodos, es decir, el grosor del material dieléctrico empleado en cada caso.

Los experimentos fueron llevados a cabo primero para examinar si el material superdieléctrico tenía la capacidad de funcionar como un condensador, esto se realizó con las piezas de menor calidad mencionadas anteriormente. Siguiendo el mismo esquema pero con los materiales de mejor calidad se creó el condensador definitivo con las condiciones estándar, para ser modificado próximamente. El circuito empleado es el que se muestra en la Ilustración 3-1. A partir de los datos obtenidos, se compara cuáles son los estados de cada variable en que el condensador mejora su rendimiento, energía específica y potencia específica. Es decir, con qué condiciones el funcionamiento del condensador es óptimo, para ello, teniendo en cuenta la progresión seguida por cada serie, se obtiene la condición óptima.

Como se ha comentado anteriormente, las prácticas se hicieron siguiendo el método OFAT, así que a continuación veremos más detalladamente en qué forma se alteró cada una de las variables, siempre alterando una única variable en cada serie, tomando valores distintos en cada práctica y manteniendo las demás constantes.

3.2.1 Grosor

Para variar el grosor del material dieléctrico, lo único que hubo de hacerse fue añadir mayor número de capas de papel empapado en la disolución, cada capa consiste en un papel de filtro que se empapa en la disolución realizada en el laboratorio de NaCl disuelto en agua. Para conocer el grosor del papel se empleó un micrómetro como el que se observa en la Ilustración 3-5. Este proceso de medición se realizó con cada una de las capas empleadas, para evitar errores por aproximaciones o evitar que la medida tomada en el primer papel hubiese sido errónea. El valor de dicho grosor, tras,

tres mediciones a cada papel de filtro es de en torno a 13 micrómetros, por lo que es este el valor de la separación por defecto que se ha tomado para los cálculos de capacitancia.



Ilustración 3-5 Micrómetro empleado para medir el grosor de los filtros

3.2.2 Voltaje

El voltaje es una de las variables más simples para variar, ya que consiste simplemente en variar el voltaje inicial en bornes del condensador. Cabe destacar que los voltajes reseñados en el apartado de resultados de esta memoria no son los que se introducían en la fuente de energía, si no que se introducían valores mayores para conseguir compensar la caída de tensión en la resistencia de seguridad y que en los bornes del condensador quedase la tensión deseada para cada caso, siendo la tensión por defecto 1V.

3.2.3 Concentración

Para cambiar la concentración de la disolución en la cual se empapa el papel, lo que se necesito fue: cloruro sódico, agua, varios vasos medidores y una báscula de precisión 5 mg.

Al igual que con las anteriores se preparó la disolución al treinta por ciento en peso, es decir, por cada cien gramos de agua, se añadían 30 gramos de cloruro sódico. La diferencia es que en esta serie de las pruebas, se prepararon también cuatro disoluciones más (Ilustración 3-6): una al diez por ciento en peso, otra al veinte por ciento, otra al cuarenta por ciento y, por último, una al cincuenta por ciento en peso. Debido a que la solubilidad máxima de sal en el agua es alrededor de cuarenta por ciento en peso, a partir de la cuarta disolución, en los vasos medidores se podía apreciar cloruro sódico en estado sólido en forma de precipitado en el fondo del recipiente.



Ilustración 3-6 Frascos con disoluciones a distintas concentraciones de NaCl

3.2.4 Cambio en las resistencias

Al contrario que los demás que modificaban partes del condensador, para la realización de esta serie se mantuvo intacto el condensador a costa de modificarse partes del circuito como son las resistencias. En este caso, tomamos los valores de resistencias comprendidos entre 100 Ω (valor mínimo de resistencias del que se disponía en el laboratorio) y 1 k Ω (correspondiente al valor máximo), en la serie se emplearon resistencias de varios valores distintos (100, 200, 220 y de 330 Ω). El cambio supuso una ralentización en la descarga del condensador con su correspondiente reducción de la potencia específica.

3.2.5 Secado

El objetivo de este nivel era el de comprobar cómo afecta a la descarga del condensador el secado del agua absorbida previamente. Para ello, lo primero que se hizo era pesar el papel de filtro en seco, a continuación se empapó dicho papel hasta absorber toda la disolución de cloruro sódico en agua que pudiera. Una vez mojado se volvió a pesar para comprobar la masa de agua que había absorbido teniendo en cuenta que el treinta por ciento de esa diferencia de pesos era sal. En estas condiciones (estándar) se cargó y descargó una vez el condensador, después para conservar la sal pero reducir la cantidad de agua, ese mismo papel se secó con un secador, volvió a ser pesado y se repitió el ciclo de carga y descarga, así en cuatro ocasiones.

3.2.6 Tamaño de los electrodos

Esta serie se basó en realizar cinco condensadores distintos y realizar un ciclo de carga y descarga a cada uno para comprobar cómo afecta el tamaño del condensador a la potencia específica y energía específica que tiene un condensador de estas condiciones. Los condensadores diseñados en esta fase era incluían al condensador de tamaño estándar de 10x10 cm y además se hizo uno de 14x14 cm, otro de 12x12 cm, otro de 7x7 cm y el último de 5x5 cm. En la Ilustración 3-7 se pueden observar tres de los electrodos empleados para esta serie, siendo el estándar de 10x10 cm el situado en el centro de la imagen, a la izquierda el de 14x14 cm y a la derecha de la imagen el de 7x7 cm.



Ilustración 3-7 Electrodos empleados en la serie "Tamaño"

3.2.7 Temperatura

El objetivo de esta serie era comprobar en qué medida afecta la temperatura a la que se encuentren los elementos que componen el condensador a la carga y descarga de este. Para conseguir tener el condensador a la temperatura deseada, se tomaron bolsas de frío y calor y se pusieron a las temperaturas deseadas por medio de un microondas y de agua con hielo. El montaje se modificó ligeramente, el condensador se mantenía igual pero se añadieron dos elementos nuevos para llevar el seguimiento también de la temperatura. El esquema que se utilizó para esta serie es el que se muestra en la Ilustración 3-8.



Ilustración 3-8 Montaje para alterar la temperatura del condensador

3.2.8 Porosidad

El objetivo de esta serie era el de comprobar en qué medida afecta la porosidad del material dieléctrico al rendimiento del condensador. Para ello se seleccionó un material de un grosor aproximado al del material de filtro pero con porosidad diferente. El problema fue a la hora de hacer el montaje, ya que los nuevos papeles de filtro eran redondos y había que hacer una capa de una forma lo más cercana posible a un rectángulo, de tal forma que cubriese por completo, por lo que se presupone

un error ya que en algunas zonas en vez de haber solo una capa como sería deseable hay dos para así hacer que los filtros mantuvieran aislado a un electrodo del otro. La disposición de estos filtros se muestra en la Ilustración 3-9.



Ilustración 3-9 Instantes previos al montaje con cambio de filtro

3.3 Problemas

A continuación se narraran los problemas que han acontecido durante el desarrollo de este TFG, tanto en la fase de montaje del condensador como en la fase de análisis en el cambio de variables. Así como de la búsqueda de información en lo referente a condensadores creados a partir de materiales supe dieléctricos.

3.3.1 Problema bibliográfico

Para empezar, uno de los grandes inconvenientes de este trabajo, en esencia, es que los condensadores creados con materiales supe dieléctricos como dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica es una tecnología bastante reciente que apareció hace pocos años, lo que eso implica irrefutablemente que se dispone de bibliografía limitada, en la que probablemente no se recogen todos los problemas que pudieran surgir durante el estudio de cualidades de dispositivos como el que se ha analizado en este proyecto.
3.3.2 Problemas en los intervalos de tiempo

Otra problemática general antes de pasar a los problemas propios de cada serie, fue la indecisión a la hora de decidir el tiempo que debía durar cada intervalo en la toma de valores por el arduino. Los valores empezaron tomándose cada diez segundos, pero existía un problema, y era que la caída inicial quedaba menos representada de lo que sería deseable, como se observa en la Ilustración 3-10.



Ilustración 3-10 Caída de tensión poco representada

Para evitar que esta caída pasase casi inadvertida, se optó por tomar valores en intervalos de un segundo. Con este nuevo intervalo, la caída inicial quedaba lo suficientemente representada con un número mayor de puntos, pero surgía otro problema, a la hora de realizar la gráfica ln(V/Vo)-tiempo, la representación era errática sin seguir una tendencia debido al error del arduino, el cual algunos valores de voltaje del condensador los calculaba más elevados que el anterior lo cual es imposible ya que significaría que el condensador se está auto cargando. Debido a este error del arduino, la gráfica quedaría como muestra la Ilustración 3-11, en la cual se puede observar como muchos de los valores



Ilustración 3-11 Gráfica ln(V/Vo) errática

A mayores de este inconveniente, y ante el hecho de que la descarga del condensador en función al tiempo sigue una tendencia exponencial, surge un nuevo inconveniente en las prácticas en las que se empleó el intervalo de un segundo para tomar valores. Como muestra la Ilustración 3-12, en los valores más bajos de voltaje, debido a la tendencia de descarga, se obtiene un número mucho mayor de medidas que en los voltajes altos, es decir, la densidad de medidas tomadas en valores entre 0,3 V y 0V es notablemente superior a la densidad de medidas tomadas en los valores de voltaje comprendidos entre 1Vy 0,3V. Esto supone un problema para software del tipo de hoja de cálculo, como puede ser Excel, a la hora de calcular la línea de tendencia de la gráfica representada, ya que dándoles el mismo valor a todos los puntos, se centra en la zona de mayor número de valores en detrimento de los voltajes más elevados.



Ilustración 3-12 Regresión poco fidedigna a todos los puntos

Para superar estos dos problemas derivados del intervalo de tiempo a elegir se optó por realizar las medidas en el intervalo de diez segundos pero se estudiaron los casos con un software de programación llamado Pyton. Este proceso se explica en mayor detalle en el anexo I.

3.3.3 Problemas en los resultados

Una vez se hubieron realizado todas las pruebas de todas las series, se dispusieron los datos en una hoja Excel, en ella se calculó tanto energía específica como potencia específica. En algunas de las series, los resultados a los que se llegó estaban de acuerdo con los resultados que se esperaban, pero otros tantos no sólo no mostraban lo que se esperaba de ellos sino que además mostraban un comportamiento errático ante las características variadas en el condensador, como ejemplo están las Tabla 3-2 y la Tabla 3-3 en la cuales se compara para detallar mejor esta contrariedad. En las tablas se observan tres columnas, siendo el ejemplo mostrado el correspondiente a la serie de cambio de voltaje, en la primera columna se observan los distintos valores del voltaje que se dieron y las dos siguientes columnas muestran una comparación entre los valores que tomó la energía específica (E) en kWh/l y entre los valores que tomó la potencia específica (P) en kW/l.

Razonando las fórmulas, es de esperar que a mayor voltaje haya mayor energía específica, ya que a mayor voltaje se polarizarán más los iones sueltos de la disolución de agua, pero los resultados obtenidos tras la primera realización de los experimentos fue que aumentaba y decrecía sin seguir ningún patrón, lo cual se entendió como resultado de un proceso imperfecto de pruebas. Ante esta suposición se repitieron los experimentos con resultados incongruentes incidiendo en la precisión a la hora tanto de montar el condensador como de cargarlo.

Tras la segunda ronda de experimentos, los resultados obtenidos fueron los esperados y tras comprobar con las fórmulas si eran congruentes, se estableció con seguridad que esa era la ley de modificación de energía específica que se obtenía tras la modificación realizada en cada nivel.

	valores valuos de E (Kvvil/1)	
518	27	-
1747	65	
27	112	
518	518	
1747	1747	
	518 1747 27 518 1747	518 27 1747 65 27 112 518 518 1747 1747

Valor de V Valores no válidos de E (kWh/l) Valores válidos de E (kWh/l)

Tabla 3-2 Comparación valores válidos y no válidos de E (kWh/l)

valor ue v	valores no vanuos de r (kw/l)	valores valuos de r (kvv/l)	
0,5V	2588	214	
0,75V	5717	338	
1V	205	485	
1,25V	2070	1725	
1,5V	3699	3699	

Valor de V Valores no válidos de P (kW/l) Valores válidos de P (kW/l)

Tabla 3-3 Comparación valores válidos y no válidos de P (kW/l)

3.3.4 Problemas con cada etapa.

Una de las series en las cuales hubo problemas a la hora de llevar a cabo el estudio sobre ellas fue la del secado por la dificultad de tomar con precisión los valores de masa de agua que había que dejar en el papel para hacer esta serie, así que los valores no se tomaron como los demás, según lo estipulado previamente, si no que tras someter al papel a calor durante un tiempo, se pesaba y se medía la cantidad de agua perdida. El problema real era que muchas veces se pasaba de los valores útiles para realizar hasta 5 medidas así es que se tuvo que realizar esta prueba hasta en 4 ocasiones, ya que no se podían emplear distintos papeles de filtro en la misma y cada papel de filtro sólo se puede emplear una vez ya que al secarse retiene la sal y de volver a ser empapado aumentaría mucho la concentración del agua impregnada en el papel.

Para la temperatura, como ya vimos, es muy difícil mantener la temperatura constante sin medios electrónicos para ello, por eso la temperatura reseñada en los resultados no es exacta, si no que se trata de una media entre las temperaturas marcadas por la sonda, si bien es cierto que no varió mucho, pero esa variación debía ser representada. Para ello se fueron registrando los distintos valores que marcaba la sonda cada quince segundos y de estos valores se calculó la media y redondeada, es la que se consideró como temperatura de descarga.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción General

4.1.1 Descripción de imágenes en formato tabla

Una vez se hubieron realizado todos los experimentos arriba mencionados y explicados se pasó a la fase de análisis y discriminación de datos. Tras haberlos realizados todos se descubrió que algunos daban resultados erróneos o incongruentes debido, seguramente, a errores en la ejecución del montaje del condensador en esa práctica en cuestión, por lo que los que no dieron un resultado aparentemente razonables se repitieron con mayor minuciosidad, si cabe, y en esa segunda ronda de experimentos, en la que se repetía únicamente los experimentos fallidos, de todos se obtuvo resultados con sentido. Los resultados obtenidos se muestran a continuación serie por serie.

Para cada serie se adjunta una imagen que muestra los resultados obtenidos en cada una de las prácticas distintas propias de cada serie. Para explicarlo completamente se explican a continuación, columna a columna:

-Descriptor: en esta columna se explica brevemente cual es la cualidad que se ha variado en esta serie e indica, en cada fila, cuál es el valor que ha tomado dicha variable.

-NaCl/H2O (w/w): indica el porcentaje en peso en que el cloruro sódico se encuentra disuelto en la disolución de agua, siendo el valor por defecto 0,3%.

-Electrodo: indica el material del que está compuesto el electrodo empleado en cada práctica, solo varía para las iniciales, que como se ha explicado, no se han tenido en cuenta para los resultados, sino que eran meramente orientativas. En estas el electrodo era papel de plata, mientras que en las válidas el electrodo está compuesto de grafito.

-Dieléctrico: esta columna nos muestra cual ha sido el electrodo utilizado, que en este caso para todas es papel de filtro excepto en una práctica de la serie "porosidad".

-A (cm²): indica el área que abarca cada electrodo de cada práctica. Se indica en centímetros cuadrados, pero como ya vimos son cuadradas así que la raíz de dicho valor es el lado del electrodo empleado en cada práctica.

-d (μ m): indica la distancia que hay entre los dos electrodos durante el desarrollo de la práctica. Como se vio anteriormente, la distancia que hay entre ambos es el grosor del dieléctrico así que se encuentre en medio del condensador, así pues distancia entre electrodos y grosor del dieléctrico son el mismo valor.

-R1 (Ω) y R2 (Ω): son los valores de las resistencias empleadas en cada práctica, éste valor, además de venir dado por el fabricante se midió con un polímetro. Para realizar esta medida con

precisión se realizaron 5 medidas de cada resistencia empleada en todo el trabajo y se realizó la media de las cinco medidas y se empleó ese valor como valor real de la resistencia.

-Rs (Ω): es la resistencia de seguridad colocada en el positivo de la fuente de alimentación para evitar picos de intensidad, que sin ella se alcanzaban hasta 0,9 V y evitar así que la alta intensidad dañe al arduino, al igual que R1 y R2, se tomaron cinco medidas dl valor de la misma y se tomó como valor de la resistencia la media de los cinco valores.

 $-1/\tau$ (s⁻¹): en este caso el valor aquí introducido es el que se obtiene de la gráfica que se obtiene a partir de los valores de la práctica, también se adjunta una foto de cada gráfica en los anexos del trabajo. Este valor es el valor que multiplica a la incógnita en el exponente del número *e* de la fórmula.

-C (mF): es el valor de la capacitancia del condensador dada en milifaradios y calculada a partir de la fórmula $\tau = R * C$, despejando la C y siendo R el resultado de las dos resistencias R1 y R2 en serie y siendo τ el inverso del valor de la columna anterior.

- ϵ (en la columna aparece como eps): es la constante dieléctrica del material dieléctrico empleado y en las condiciones en las que se ha desarrollado cada práctica. Ésta constante va a determinar el voltaje máximo a la que cada material superdieléctrico se puede someter, ya que de ella depende el voltaje de ruptura.

-Vo: dado también por la ecuación de la línea de tendencia, es la base de la potencia.

-Tiempo (h): es el tiempo total que ha tardado el condensador en variar su tensión desde el valor de tensión inicial hasta quedar completamente descargado, es decir, tensión igual a 0. Viene expresado en horas, por lo que el valor que nos daba el arduino como tiempo de descarga se ha dividido entre 3600 como factor de conversión y el resultado es el que se muestra en la columna.

-E: (incluye las tres columnas que expresan esta variable variando las unidades empleadas) es la energía específica, es decir, la cantidad de energía que hay por unidad de volumen. Este valor indica la energía captada por el condensador durante el proceso de carga. Así, comienza a cargarse en cuanto se conecta la fuente de alimentación y finaliza este proceso cuando se llega al voltaje requerido (valor estándar de 1 V) y se desconecta la fuente. En el primer caso la unidad de energía empleada es el julio y la unidad de volumen empleada es el centímetro cúbico. Para calcular el valor de la primera columna se empleó la Ecuación 10:

Ecuación 10

$$E = \frac{\frac{1}{2} * C^2}{d^2 * \varepsilon_R}$$

Y para calcular el valor para las otras dos columnas se obtuvo simplemente mediante un cambio de unidades a partir de la primera se obtuvo la segunda y a partir de la segunda la tercera.

-P: (incluye las tres columnas que expresan esta variable variando las unidades empleadas) es la potencia entregada por el condensador a partir del momento en el que se llega al voltaje deseado y se desconecta la fuente. Influye la cantidad de energía captada en el proceso previo y se calcula con el tiempo que ha necesitado para descargar toda la energía, así, a mayor tiempo descargando, menor será la potencia del condensador.

4.1.2 Descripción y elaboración de imágenes en formato gráfica

Además de las imágenes descritas en el apartado anterior, en el desarrollo de resultados de cada serie de experimentos se muestra otro tipo de imágenes que son dobles gráficas. La primera de ellas, la de la izquierda de ambas, muestra la tendencia del valor de la energía específica en función a la variable alterada y la segunda de ellas muestra la potencia específica del condensador de cada experimento frente a la variable alterada en cada caso con su valor.

Para comprobar cuál era la tendencia real de cada serie, siempre sujeta la incertidumbre que deriva del limitado número de datos, ya que sólo hay cinco de cada serie, se calculó la R para las líneas de tendencia logarítmica, exponencial y lineal y la que mayor R presentara era la que se consideraba como tendencia que seguía esa serie.

4.2 Desarrollo de resultados

4.2.1 Grosor

Como se explicó en el apartado 3.2.1, para realizar esta serie se añadía una capa por cada número de experimento, lo que se obtuvo tras realizar la prueba de descarga con cada una de las condiciones fue lo que se muestra en la Tabla 4-1

En dicha imagen podemos observar abajo a la derecha, en las dos últimas columnas la energía del capacitor por unidad de volumen y potencia entregada por el capacitor en las cinco prácticas de esta serie los valores de energía específica son sensiblemente parecidos, esto es debido a que la densidad energética es la cantidad de energía contenida en una unidad de volumen de un condensador. Ya que no afecta el volumen del condensador a este valor y lo único que se cambia en estas series es el volumen añadiendo más capas, esta densidad no se ve afectada. Por supuesto que afecta a la energía total acumulada por el condensador, la cual aumenta conforme aumenta el volumen de material dieléctrico, ya que habrá un mayor número de iones polarizados cuanto mayor sea el volumen de material que contiene los iones. La razón por la cual no se obtiene exactamente el mismo valor es porque además de los errores mencionados en los apartados 3.3.2 y 3.3.3, el software Excel, a la hora de dar la ecuación de la línea exponencial que siguen los puntos dados por el arduino, en el exponente de esa ecuación da un máximo de tres decimales, lo cual limita mucho el margen de valores que nosotros podemos calcular, pero a pesar de esas circunstancias, se puede observar como la tendencia de esta serie es la de mantenerse alrededor de 120 kWh/l que es aproximadamente el valor de la energía específica en la práctica realizada con los valores estándar, en este caso una sola capa de papel de filtro bañada en disolución.

La potencia específica, aunque con mayor rango de error, ya que se tomaba el primer cero en los valores dados por el arduino como final de la descarga. Debido al error del arduino, a veces el cero que nos daba no significaba que el condensador estuviera a cero, lo que suponía que se detuviera la descarga unos segundos antes de que se descargara por completo. Este error hay que sumarlo a la acumulación de errores anterior y por eso, los valores de la potencia muestran mayor rango de error. A pesar de estos errores, la potencia en esta serie muestra una tendencia lineal descendente, como se muestra en la Ilustración 4-1 y en la Ilustración 4-2.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
1 capa	0.3	100	170	98
2 capas	0.3	100	340	98
3 capas	0.3	100	510	98
4 capas	0.3	100	680	98
5 capas	0.3	100	850	98

R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	eps
99	101	5.00E-03	10115	1950156299
99	101	4.00E-03	1269	4875390748
99	101	3.00E-03	1692	9750781496
99	101	3.00E-03	1692	1.3001E+10
99	101	3.00E-03	1692	1.6251E+10
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
Vo (mV) 529.7	Tiempo (h) 0.231	E (J/cm3) 83794	E (wh/l) 23276	P (w/l) 100956
Vo (mV) 529.7 396.4	Tiempo (h) 0.231 0.247	E (J/cm3) 83794 29320	E (wh/l) 23276 8144	P (w/l) 100956 32944
Vo (mV) 529.7 396.4 434.4	Tiempo (h) 0.231 0.247 0.317	E (J/cm3) 83794 29320 31299	E (wh/l) 23276 8144 8694	P (w/l) 100956 32944 27455
Vo (mV) 529.7 396.4 434.4 518.0	Tiempo (h) 0.231 0.247 0.317 0.356	E (J/cm3) 83794 29320 31299 33378	E (wh/l) 23276 8144 8694 9272	P (w/l) 100956 32944 27455 26077





Ilustración 4-1 Tendencia de E en la serie "grosor"



Ilustración 4-2 Tendencia de P en la serie "grosor"

4.2.2 Voltaje

Como se explicó en el apartado 3.2.2, en esta serie el factor a cambiar es el voltaje, en el proceso de carga del condensador, lo que se obtuvo tras realizar el experimento viene mostrado en la Tabla 4-2

En la imagen, en la primera columna aparece descrito el descriptor de la práctica correspondiente a la serie, y en las dos últimas columnas de abajo a la derecha, se muestra la energía específica y la potencia específica del condensador bajo las circunstancias reseñadas en la primera columna.

Como podemos observar, a mayor voltaje, mayor es también la energía específica ya que a mayor voltaje que se aplique a los bornes del condensador, mayor será el número de dipolos del material dieléctrico que se polarizarán, de manera que mayor será la energía retenida en el interior del condensador.

La potencia específica es también directamente proporcional al voltaje inicial aplicado, ya que, como se explicó anteriormente, a voltajes más bajos en bornes del condensador, es también menor la potencia desarrollada, por ello existía el problema explicado en el capítulo 293.3.2, en el cual el Excel daba el mismo peso a todos los puntos pero estos no representaban por igual los valores de voltaje por el cual se había pasado.

Como se puede observar en la Ilustración 4-3 y en la Ilustración 4-4, en este caso la tendencia seguida por ambas cualidades del condensador aumentaba cuadráticamente, hasta llegar al voltaje de ruptura del material, a partir del cual nuestro superdieléctrico se convertirá en conductor perdiendo toda capacidad de almacenamiento de energía.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
0,5V	0.3	100	170	98
0,75V	0.3	100	170	98
1V	0.3	100	170	98
1,25V	0.3	100	170	98
1,5V	0.3	100	170	98

R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	8.00E-03	635	1218847687
99	101	6.00E-03	846	1625130249
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	3.00E-03	1692	3250260499
99	101	2.00E-03	2538	4875390748
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
Vo (mV) 283.4	Tiempo (h) 0.128	E (J/cm3) 14983	E (wh/l) 4162	P (w/l) 32573
Vo (mV) 283.4 438.5	Tiempo (h) 0.128 0.192	E (J/cm3) 14983 47850	E (wh/l) 4162 13292	P (w/l) 32573 69348
Vo (mV) 283.4 438.5 529.7	Tiempo (h) 0.128 0.192 0.231 0.231	E (J/cm3) 14983 47850 83794	E (wh/l) 4162 13292 23276	P (w/l) 32573 69348 100956
Vo (mV) 283.4 438.5 529.7 605.2	Tiempo (h) 0.128 0.192 0.231 0.300	E (J/cm3) 14983 47850 83794 182283	E (wh/l) 4162 13292 23276 50634	P (w/l) 32573 69348 100956 168780

Tabla 4-2 Serie "voltaje"



Ilustración 4-3 Tendencia de E en la serie "voltaje"



Ilustración 4-4 Tendencia de P en la serie "voltaje"

4.2.3 Concentración

Como se explicó en el apartado 3.2.3, para realizar esta serie se alteró la disolución en la cual se empapaba el papel de filtro, empleado como dieléctrico, de modo que la disolución variaba su concentración en peso de cloruro sódico, siendo el estándar 30% y usándose en esta serie de 10, 20, 40, y 50 por ciento. El resultado obtenido se muestra en la Tabla 4-3.

En dicha imagen, en las columnas que se observan abajo a la derecha, se observa una vez más la energía específica y potencia de descarga del capacitor en estudio. Para el correcto análisis de esta serie es necesario saber un dato empírico y es que la concentración máxima en peso del cloruro sódico en agua está en torno al 40%. Conocido este dato y analizando los resultados en cuanto a energía específica en el condensador, se observa una clara tendencia que va en aumento de la energía conforme aumenta también la concentración. La explicación a este hecho es que a mayor cantidad de cloruro sódico disuelto en el agua, mayor número también de iones disueltos. Estos son los iones que se polarizan cuando se les aplica una caída de tensión en los bornes del condensador y por lo tanto, para concentraciones bajas, menor número de iones y por lo tanto menor energía retenida por parte del condensador y viceversa.

En cuanto a potencia transmitida por el condensador, al igual que la energía captada aumenta con la concentración también lo hace la potencia, la cual se vio que dependía fundamentalmente de la energía que poseía el condensador a la hora de comenzar la descarga.

Un dato que se aprecia también es que en la práctica en la que se empleó la concentración al cuarenta y la que se empleó la concentración al cincuenta por ciento resultan tener energía específica igual y potencia específica prácticamente igual, esto es debido a que al ser cerca de cuarenta la concentración máxima, aun añadiendo un cincuenta por ciento más de sal, la disolución que absorbe el papel de filtro es la misma, la diferencia es que en el vaso medidor quedaría mayor o menos cantidad de cloruro sódico precipitado.

En la Ilustración 4-5 y en la Ilustración 4-6, se puede observar cómo se han quitado tanto en una como en otra gráfica los valores de E y P correspondientes al 50% de concentración en peso, esto es debido a que la disolución al 50% es idéntica a la disolución al 40%, y quitándolo de las gráficas se consigue una línea de tendencia más precisa, ya que a partir del 40% todos son iguales. Por ello se

quitó, y a partir de los otros cuatro datos, el ajuste que mayor valor de R daba era el ajuste exponencial, por lo que se puede afirmar que la energía y potencia específicas de un condensador aumentan exponencialmente cuando aumenta la concentración del líquido que el material solido absorbe en la formación del superdieléctrico.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
10%	0.1	100	170	98
20%	0.2	100	170	98
30%	0.3	100	170	98
40%	0.4	100	170	98
50%	0.5	100	170	98
R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	1.00E-02	508	975078150
99	101	9.00E-03	564	1083420166
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	2.00E-03	2538	4875390748
99	101	2.00E-03	2538	4875390748
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
80.0	0.086	956	265	3082
79.7	0.075	1053	293	3901
529.7	0.231	83794	23276	100956
521.6	0.414	203088	56413	136300
509.0	0.394	193371	53714	136177

Tabla 4-3 Serie "concentración"



Ilustración 4-5 Tendencia de E en la serie "concentración"



Ilustración 4-6 Tendencia de P en la serie "concentración"

4.2.4 Cambio en las resistencias

En la serie que se presenta, el objetivo era analizar cómo afectan las resistencias a la energía y potencia específicas del condensador. Para ello se intercambiaron las resistencias por defecto de 100Ω . Los resultados ante esta alteración se muestran en la Tabla 4-4.

En esta imagen, en la esquina inferior derecha se pueden observar las dos últimas columnas, la penúltima muestra la variación de la energía específica del condensador ante la variación del circuito. Como se mostró anteriormente, en el circuito del montaje de las prácticas, las resistencias R1 y R2 no afectan en absoluto a la fase de carga, ya que la caída de tensión en bornes del condensador es ajena a

estas. Por ello en la columna de energía específica lo cinco valores son similares, no idénticos por el fallo de redondeo de Excel.

En cambio, en la última columna de la imagen, la de la P, vemos como los cinco valores se puede observar que tienden a descender conforme los valores de las resistencias aumentan. Esta tendencia se muestra en la Ilustración 4-7 y en la Ilustración 4-8. La tendencia descendente se explica porque es a través de las resistencias donde se disipa la energía y con lo que se descarga el condensador. Al ser mayores las resistencias deberían limitar el paso de la corriente a través de ellas debido a la ecuación $R = \frac{V}{I}$ lo que da lugar a mayor tiempo de descarga, que a igualdad (o similitud) de energía específica, deriva en una menor potencia específica. Por ello la tendencia de potencia es logarítmica, porque es máximo cuanto menor sea la potencia y se va acercando a cero pero sin llegar cuanto mayor es el valor de las resistencias.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
100, 100 Ω	0.3	100	170	98
100, 200 Ω	0.3	100	170	98
220, 220 Ω	0.3	100	170	221
300, 200 Ω	0.3	100	170	299
470, 470 Ω	0.3	100	170	469
R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
201	101	3.00E-03	1115	2141475981
220	101	3.00E-03	756	1451930427
200	101	2.00E-03	1002	1924753462
472	101	1.00E-03	1063	2041343204
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
529.7	0.231	83794	23276	100956
602.7	0.347	119101	33084	95281
617.9	0.306	84865	23574	77150
763.9	0.742	171992	47776	64417
621.7	1.083	120819	33561	30979

Tabla 4-4 Serie "resistencias"



Ilustración 4-7 Tendencia de E en la serie "resistencias"



Ilustración 4-8 Tendencia de P en la serie "resistencias"

4.2.5 Secado

Como se explicó en el apartado 3.2.5, para la realización de esta serie se alteró la cantidad de agua que había absorbido el papel de filtro dejando constante la sal que tenía. Los resultados surgidos de esta serie se muestran en la Tabla 4-5.

En dicha ilustración se puede observar los valores de energía captada por el condensador y la potencia de descarga que este condensador ha tenido ante cada situación. Empezando por la energía específica del condensador en cada caso, tenemos que la prueba por defecto es la que mayor energía acumuló debido a que al tener mayor cantidad de agua, había más átomos de cloro y de sodio libres y por tanto se formaron mayor cantidad de iones una vez se aplicó la tensión en el condensador. A partir de esta, al ir disminuyendo la masa de agua, los átomos de Na^+y Cl^- se vuelven a junta en la estructura cristalina inicial formando cristales en las zonas mas secas del papel y estos cristales no son capaces de ionizarse debido a su estado sólido, es pues, que cuanto menor sea la cantidad de agua,

menor es también el número de iones que se pueden polarizar y por tanto menor la energía específica que es capaz de mantener el condensador.

En cuanto a la potencia específica, se aprecia una tendencia a disminuir al igual que con la energía específica. En este caso se aprecia un fallo, ya que entre la primera y la segunda prácticas la potencia específica aumenta en lugar de reducirse, esto es debido a un problema del que ya se ha hablado, y es que en la mayoría de las prácticas, el primer cero que daba el voltímetro no era el cero real, si no que debido al fallo de precisión en el arduino daba uno antes. En la segunda práctica de esta serie, este fallo no lo hubo, ya que la primera vez que marcó cero el arduino era el momento en que se descargaba por completo el condensador. Así pues, mientras las demás prácticas se cortaban aproximadamente en 5 mV que es el rango de error del arduino, cuando empieza a marcar cero, en la segunda práctica de aquí se tuvo un poco más de tiempo, lo que resulta, por los cálculos seguidos, que una vez el agua del dieléctrico se seca ligeramente, se obtiene un pico de potencia. Lo cual no es cierto, pues ningún cálculo ni ninguna teoría lo soporta así, por eso se sabe que ese valor es debido a un error de procedimiento.

En la Ilustración 4-9 y en la Ilustración 4-10, se puede observar que las tendencias que siguen la serie de secado tanto en cuanto a densidad energética como a potencia específica son lineales con respecto a la masa de agua remanente en el papel de filtro.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
2.961 g	0.3	100	170	98
2.041 g	0.418	100	170	98
1.411 g	0.573	100	170	98
0.961 g	0.78	100	170	98
0.511 g	1.21	100	170	98
R2 (Ω)	Rs (Q)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	1.10E-02	461	886434681
99	101	6.00E-03	846	1625130249
99	101	1.70E-02	299	573575382
99	101	2.20E-02	231	443217341
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
529.7	0.231	83794	23276	100956
175.1	0.081	4161	1156	14348
126.5	0.098	3983	1106	11316
91.7	0.039	793	205	5278
50.5	0.026	173	48	1843

Tabla 4-5 Serie "secado"



Ilustración 4-9 Tendencia de E en la serie "secado"



Ilustración 4-10 Tendencia de P en la serie "secado"

4.2.6 Tamaño de los electrodos

Para llevar a cabo esta serie, como se explica en el apartado 4.2.6, se cambió el tamaño de los electrodos y también el área del papel de filtro que iba entre ambos electrodos, ya que de no haberlo hecho, se tocarían los electrodos produciendo un cortocircuito y no siendo entonces un condensador. Los resultados obtenidos ante el cambio de tamaño en los electrodos se muestran en la Tabla 4-6.

Para analizar los datos obtenidos como resultados ante las prácticas que conforman esta serie, se debe mirar a las dos columnas de abajo a la derecha de la imagen para hallar ahí la energía acumulada durante la fase de carga y la potencia liberada durante la fase de descarga. En la columna de la energía se puede observar lo mismo que se observaba en la serie "grosor", y es que al ser energía específica y el único factor variado es el área de todas las piezas, la energía por unidad de volumen se mantiene aproximadamente constante, con valores que rondan los 120 kW/h. como ocurría en el apartado de la serie de grosor, no es constante porque el Excel solo da hasta tres decimales del exponente en la ecuación de la línea de regresión.

En el apartado de potencia del condensador se aprecia, al igual que en el apartado grosor, como es más o menos la misma en todas las prácticas pero que tiene mayor rango de error debido a que a esta se añade un nuevo error con respecto a la columna de energía específica, por ello, en la práctica del 5x5 cm la potencia entregada da un valor tan alto, porque se mantuvo alrededor de 10 mV mucho tiempo sin caer a 0. También influye que el exponente sea o 0,007 o 0,006 y no un valor intermedio en el cual se encuentra en este caso el valor de potencia, debido a esto tanto la energía específica como la potencia específica salen mayores ligeramente mayores bajo esta condición.

En el caso del tamaño del electrodo, como se puede observar en Ilustración 4-11 y en la Ilustración 4-12, las tendencias de energía específica y de potencia específica tienen ajustes diferentes. Todo apunta a que se deba muy posiblemente a uno de los errores comentados previamente, especialmente al de detener la descarga con el primer cero marcado por el arduino, ya que la potencia se calcula a partir de la energía específica y el tiempo, y el único error que afecta al tiempo de descarga es el ya comentado. Aun así se puede observar como la tendencia en cuanto a la energía específica es lineal pero como ya se ha explicado es por error de redondeo del Excel y los valores aunque muy similares no son iguales y la tendencia en potencia específica es exponencial y ascendente, igual que en la serie de grosor, no hay demasiadas variaciones porque el cambio de volumen no afecta a la energía por volumen del condensador.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
14x14 cm	0.3	196	170	98
12x12 cm	0.3	144	170	98
10x10 cm	0.3	100	170	98
7x7 cm	0.3	49	170	98
5x5 cm	0.3	25	170	98
R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	4.00E-03	1269	1243722130
99	101	6.00E-03	846	1128562673
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	6.00E-03	846	3316592346
99	101	7.00E-03	725	5571875141
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
798.0	0.272	121277	33688	123752
827.0	0.194	118182	32828	168832
529.7	0.231	83794	23276	100956
342.0	0.208	59407	16502	79209
327.0	0.169	91219	25339	149539

Tabla 4-6 Serie "tamaño"



Ilustración 4-11 Tendencia de E en la serie "tamaño"



Ilustración 4-12 Tendencia de P en la serie "tamaño"

4.2.7 Temperatura

Como se explicó en el apartado 3.2.7, para modificar la temperatura de trabajo del condensador, lo que se hizo fue colocar tanto encima como debajo de los electrodos, una bolsa de frío y calor y un termómetro controlando que las temperaturas se mantuvieran medianamente constantes. Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 4-7.

En esta tabla, se pueden observar, además de los datos con los que se llevó a cabo la práctica, los resultados obtenidos. Se hará especial hincapié en las dos últimas columnas de abajo a la derecha. En la penúltima columna, la que da la energía específica del condensador, se puede apreciar una tendencia a reducirse en valor, esto es debido a que cuanto mayor sea la temperatura, más propensos serán los iones a moverse y viceversa, el máximo exponente de esto es que a partir del punto de ebullición, a

mayor temperatura, los enlaces se rompen y los átomos circulan libremente y en el punto de fusión, a temperatura más baja, se forma el sólido cuyos átomos no pueden polarizarse. Así es pues, que a menor temperatura los dipolos son más reacios a polarizarse y esa es la razón de que las dos últimas prácticas de esta serie tengan valores de energía específica más bajos que las dos primeras prácticas. Cabe destacar, también, que estas dos primeras tienen igual valor por una razón ya explicada y es que Excel sólo da tres decimales a esta incógnita, por lo cual aunque debieran ser parecidos pero no iguales, el resultado es idéntico.

En la última columna, la que da la potencia del condensador, se observa también una tendencia descendente, sólo hay una excepción que es entre la primera y la segunda, en la cual asciende, porque al ser mayor la temperatura, tarda más en descargarse en el primero que en el segundo, pero por el fallo de los tres decimales, la energía que debía ser mayor también en el primer caso, da un valor igual al siguiente, y al dividir entre el tiempo total de descarga, que en el primero es mayor, da un valor más bajo de potencia específica.

En la Ilustración 4-13 y en la Ilustración 4-14, también se puede observar como los valores de E y P son directamente proporcionales al valor que tome la temperatura tanto en la fase de carga como de descarga. A pesar de que para temperatura de 14°C tengamos un pico de potencia, eso se asume como error, ya sea de Excel o de procedimiento en cuanto al montaje de la práctica.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
40°C	0.3	100	170	98
32°C	0.3	100	170	98
22°C	0.3	100	170	98
14°C	0.3	100	170	98
7°C	0.3	100	170	98
R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	2.00E-0.	2538	4875390748
99	101	3.00E-03	1692	3250260499
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	1.00E-03	508	975078150
99	101	6.00E-03	846	1625130249
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
681.8	0.469	347028	96397	205342
594.8	0.333	176066	48907	146722
529.7	0.231	83794	23276	100956
704.5	0.128	74108	20586	161105
151	0.115	5674	1576	13737

Tabla 4-7 Serie "temperatura"



Ilustración 4-13 Tendencia de E en la serie "temperatura"



Ilustración 4-14 Tendencia de P en la serie "temperatura"

4.2.8 Porosidad

La porosidad como se explicó en el apartado 3.2.8, para esta serie también hubo que probar varios condensadores, cambiando el material dieléctrico por un nuevo papel de filtro. La Tabla 4-8 muestra los datos con los que se realizaron los montajes para esta serie y los resultados obtenidos.

Ya que la porosidad del papel de filtro empleado por defecto es mayor que la del papel de filtro redondo, el primero absorbe mayor cantidad de disolución y por lo tanto dispondrá de mayor número de iones que puedan ser polarizados una vez esté sometido a la diferencia de potencial a la que se expone para realizar el estudio. Esa es la razón por la cual en la columna de la energía específica la práctica realizada por defecto da un valor más alto de energía específica porque para una misma

unidad de volumen, tiene más tamaño de poro el primer papel de filtro, y por lo tanto más disolución polarizable.

En la Ilustración 4-15 y en la Ilustración 4-16 se muestra la tendencia de la energía y potencia específicas. En ambos casos se puede apreciar que tanto energía como potencia ascienden con el tamaño del poro, lo cual era de esperar ya que cuanto mayor sea el poro más lugar hay donde almacenar el líquido que porta los iones. La razón por la cual no ha habido una mayor diferencia es porque al cambiar el papel de filtro también cambia su grosor, así pues aunque tenga menor tamaño de poro, el papel de filtro de 1,2 μ m es más grueso y por ello reduce las diferencias entre el y el papel de filtro empleado por defecto de 30 μ m.

El ajuste observado en las dos imágenes es lineal, esto es porque este experimento sólo se ha realizado con dos muestras y por lo tanto entre dos valores no hay mayor ajuste que el lineal.

Descriptor	Nacl/H2O (w/w)	A (cm2)	D (um)	R1 (Ω)
Papel filtro	0.3	100	170	98
Filtros redondos	0.3	100	170	98
R2 (Ω)	Rs (Ω)	1/tau	C (mF)	Eps
99	101	5.00E-03	1015	1950156299
99	101	66.00E-03	846	2581089220
Vo (mV)	Tiempo (h)	E (J/cm3)	E (wh/l)	P (w/l)
529.74	0.231	83794	23276	100956
92.71	0.099	1347	374	3794

Tabla 4-8 Serie "porosidad"



Ilustración 4-15 Tendencia de E en la serie "porosidad"



Ilustración 4-16 Tendencia de P en la serie "porosidad"

4.3 Localización en el diagrama de Ragone

Una vez obtenidos los resultados de potencia específica y densidad energética, ya somos capaces de posicionar un condensador basado en material superdieléctrico en un diagrama de Ragone, en este caso se ven ubicados cada uno de los experimentos realizados en las ilustraciones: Ilustración 4-17, Ilustración 4-18, Ilustración 4-19, Ilustración 4-20, Ilustración 4-21, Ilustración 4-22, Ilustración 4-23, Ilustración 4-24. Están ubicados según a la serie que correspondan en su correspondiente ilustración.

En todas ellas se puede observar como los condensadores testados durante este trabajo poseen, en general, mayor densidad energética y potencia específica que el resto de dispositivos de almacenamiento.



Ilustración 4-17 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "grosor" ubicados



Ilustración 4-18 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "voltaje" ubicados



Ilustración 4-19 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "concentración" ubicados



Ilustración 4-20 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "resistencias" ubicados



Ilustración 4-21 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "secado" ubicados



Ilustración 4-22 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "tamaño" ubicados



Ilustración 4-23 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "temperatura" ubicados



Ilustración 4-24 Diagrama de Ragone con los experimentos de la serie "porosidad" ubicados

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Condiciones óptimas

Para finalizar, es necesario establecer las conclusiones a las que este equipo científico ha llegado tras el estudio del comportamiento del recién inventado condensador superdieléctrico es que responde mejor ante unas condiciones que ante otras, para dicho análisis se ha diferenciado entre cómo responde su energía y potencia específica.

5.1.1 Energía específica

A las que responde de mejor manera hablando en términos de energía específica son los siguientes:

5.1.1.1 Grosor

En cuanto a densidad energética no varía, pero la energía acumulada para un grosor de 650 micrómetros es mayor que la acumulada en 130 micrómetros.

5.1.1.2 Voltaje

Cuanto mayor sea el voltaje aplicado en bornes del condensador, mayor será la densidad energética almacenada por este, siempre que no se rompa el dieléctrico. Para este trabajo, la tensión óptima es de 1,5V.

5.1.1.3 Concentración

Cuanto mayor sea el número de iones libres en la disolución mayor densidad energética tendrá el condensador, por lo tanto el punto óptimo de concentración en la disolución es de 40%, ya que de usar el 50% se estaría desaprovechando la sal que queda en estado sólido.

5.1.1.4 Resistencias

No afectan a la energía específica del condensador, pero la potencia específica se ve alterada de forma que a mayor valor de las resistencias, menor potencia específica.

5.1.1.5 Secado

El punto óptimo de trabajo del condensador es antes de comenzar a secarse, cuando toda el agua absorbida el principio está en estado líquido en los poros del papel de filtro y así sus iones pueden ser polarizados todos.

5.1.1.6 Tamaño

Al igual que el grosor, en términos de densidad energética no influye, pero la mayor cantidad energía de los cinco tamaños estudiados la almacena el condensador cuyos electrodos miden catorce centímetros de lado

5.1.1.7 Temperatura

A mayor temperatura mayor densidad energética, así tenemos que la temperatura óptima de las cinco estudiadas resulta ser la máxima, a 40°C.

5.1.1.8 Porosidad

La porosidad influye en tanto que a mayor es el poro, mayor la densidad energética, por lo tanto, el material óptimo de entre los dos estudiados es el papel de filtro estándar.

5.1.2 Potencia específica

Analizando ahora las condiciones que afectan a la potencia del condensador, se tiene que:

5.1.2.1 Concentración

A mayor concentración, también es mayor la potencia entregada. Luego el punto óptimo vuelve a ser la disolución al 40% en peso.

5.1.2.2 Resistencias

Cuanto menor sean las resistencias empleadas, menos tardará el condensador en descargarse porque le costará menos traspasarlas, entonces, a menor valor de las resistencias, mayor potencia. El valor óptimo de las resistencias es de 98 Ω y 99 Ω .

5.1.2.3 Secado

El punto óptimo vuelve a ser en el cual no se ha producido el secado de agua.

5.1.2.4 Temperatura

La temperatura óptima para aumentar la potencia del condensador es la de 40°C.

5.2 Localización de experimentos en diagrama de Ragone

Como se ha visto en el apartado de resultados, al ubicar esta nueva tecnología (en la mayor parte de sus variantes) en un diagrama de Ragone, se observa que posee grandes densidades de potencia así como de energía, y en comparación con otros dispositivos de almacenamiento de energía, con valores de ambas considerablemente elevados.

5.3 Líneas futuras

El presente Trabajo de Fin de Grado continúa con la línea de investigación que está llevando Jonathan Phillips, entre otros investigadores acerca del recién descubierto comportamiento superdieléctrico que presentan un gran número de materiales. Como líneas futuras para este trabajo, el presente equipo de investigación propone las siguientes pautas:

- Continuar con la investigación sobre energía y potencia específica de distintos condensadores creados con distintos materiales para hallar el que mejores prestaciones tenga y mayor rendimiento presente.
- Diseñar una celda de condensador superdieléctrico de características compatibles con un circuito incorporable a transporte eléctrico y probar la sustitución de las actuales baterías de los coches eléctricos por condensadores de estas características con las condiciones necesarias de potencia y energía específicas para cumplimentar con los requerimientos de transporte y estudiar su viabilidad favoreciendo el transporte eléctrico así y limitando los gases de efecto invernadero emitidos por los tubos de escape de los vehículos con motores MCI.
- Estudiar la viabilidad de emplear esta nueva tecnología para el almacenamiento energético a gran escala evitando que los picos de consumo supongan un problema al estar ya la

energía acumulada de antemano y evitando el consumo innecesario de las centrales al acumular todo excedente.

6 BIBLIOGRAFÍA

1]	F. J. Quintero y J. Phillips, «Novel Materials with Effective Super Dielectric Constants for Energy Storage,» <i>Journal of Electronic Materials</i> , 2015.
2]	E. y. T. Ministerio de Industria, «La energía en España 2015,» 2016.
3]	J. González Velasco, «Energías renovables,» Reverte.
4]	A. Hernández Fernández, Aplicación de supercondensadores para la hibridación de almacenamiento de energía.
5]	J. S. Martín, I. Zamora, J. S. Martín, V. Aperribay y P. Eguía, «Energy Storage Technologies for Electric Applications,» Eibar, 2011.
6]	M. Jiménez Pijoan, Sistema Híbrido de Almacenamiento, 2015.
7]	«wordpress,» [En línea]. Available: https://jmirez.wordpress.com/2013/09/03/j602-almacenamiento-de-energia-magnetica-por-superconductividad-smessuperconducting-magnetic-energy-storage/.
8]	«docplayer,» [En línea]. Available: http://docplayer.es/1441764-Escuela-politecnica-superior-universidad-de-burgos-sistema-mes-aes-para-vehiculo-electrico.html.
9]	«ideasecundaria,»2011.[Enlínea].Available:https://ideasecundaria.blogspot.com.es/2011/03/el-primer-condensador-de-la-historia.html.
10]	«Ecomotion,» [En línea]. Available: http://www.ecomotion.es/noticias/crean-el-primer-supercondensador-de-grafeno-de-10-000-faradios-VMGDZ.
11]	J. I. Díaz de Villafranca, Apuntes Física I, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2014.
12]	«Monografías,» [En línea]. Available: http://www.monografias.com/trabajos107/tipos-sensores-sistema-automatizado/tipos-sensores-sistema-automatizado3.shtml.
	I. Calvo Antón, Elaboración propia, 2018.

13]	
14]	S. Fromille y J. Phillips, «Super Dielectric Materials,» Monterey, CA.
15]	A. Fraiwan, T. H. Nguyen y S. Choi, «Paper-based batteries: a review,» <i>ELSEVIER</i> , 31 agosto 2013.
16]	NR. L. Jenkins, Optimal super dielectric material, Monterey, CA, 2015.
17]	J. Phillips, «Novel superdielectric materials: aqueous salt solution saturated fabric,» <i>MDPI</i> , 2016.
18]	T. y. C. Ministerio de Industria, «La energía en España en 2007,» 2008.
19]	T. y. C. Ministerio de Industria, «Planificación energética indicativa según lo dispuesto en la Ley 2/2011, de 4 de marzo de Economía Sostenible,» 2011.
20]	«Monografías,» [En línea]. Available: http://www.monografias.com/trabajos107/tipos-sensores-sistema-automatizado/tipos-sensores-sistema-automatizado3.shtml.
21]	C. Marín, Apuntes de la asignatura Fundamentos de electrotecnia, Marín, 2015.
22]	«Red Eléctrica de España,» [En línea]. Available: http://www.ree.es/es/.

ANEXO I: GRÁFICAS DE LOS DISTINTOS EXPERIMENTOS

Como anexo al apartado 4.2, en el anexo I se relacionan todas las gráficas de valores a partir de las cuales se sacaron valores para realizar los cálculos, como son, τ , Vo y el tiempo de descarga. Los valores fueron obtenidos por el arduino y tras pasarlos a una hoja de Excel se graficaron, y son esas gráficas las que se muestran a continuación.

6.1 Gráficas de grosor

Experimento una capa:



Experimento dos capas:



Experimento tres capas:



Experimento cuatro capas:



Experimento cinco capas:



6.2 Gráficas de voltaje

Experimento 0,5V



Experimento 0,75V












Experimento 1,5V

6.3 Gráficas de concentración

Experimento al 10%





Experimento al 20%

Experimento al 30%





Experimento al 40%





6.4 Gráficas de resistencias

Experimento $100\Omega \text{ y} 100\Omega$



Experimento 100Ω y 200Ω





Experimento con 220 Ω y 220 Ω

Experimento 200 Ω y 300 Ω



Experimento 470 Ω y 470 Ω



6.5 Gráficas de secado

Experimento con 2,96 g de agua



Experimento con 2,04 g de agua



Experimento con 1,41 g de agua



Experimento con 0,96 g de agua



Experimento con 0,51 g de agua



6.6 Gráficas de tamaño del electrodo

Experimento 14x14 cm



Experimento 12x12 cm





Experimento 10x10 cm

Experimento 7x7 cm





Experimento 5x5 cm

6.7 Gráficas de temperatura

Experimento a 40°C







Experimento a 22°C

76



Experimento a 14°C



Experimento a 7°C

6.8 Gráficas de porosidad

Experimento con papel de filtro



Experimento con papel de filtro redondo



ANEXO II: CONTENIDO DEL SEGUNDO ANEXO