



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA
DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

NUEVOS SUPERCONDENSADORES DE
NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) PARA
APLICACIONES AERONÁUTICAS:
RECUPERACIÓN DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS EN
LAS VENTANAS DE TRANSPARENCIA

Autor: Felipe Manchado González

Director: José Sánchez del Río Sáez

Madrid

Julio de 2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor: Felipe Manchado Gonzalez

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra:

Nuevos supercondensadores de nanotubos de carbono (CNT) para aplicaciones aeronáuticas.

Recuperación de las señales eléctricas en las ventanas de transparencia

que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 12 de Julio de 2019

ACEPTA

Fdo.....



Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:


Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Nuevos supercondensadores de nanotubos de carbono (CNT) para aplicaciones aeronáuticas: recuperación de las señales eléctricas en las ventanas de transparencia.

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Felipe Manchado González

Fecha:12/ 07/2019



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: José Sánchez del Río

Fecha:12/ 07/2019





COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA
DE TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

NUEVOS SUPERCONDENSADORES DE
NANOTUBOS DE CARBONO (CNT) PARA
APLICACIONES AERONÁUTICAS:
RECUPERACIÓN DE LAS SEÑALES ELÉCTRICAS EN
LAS VENTANAS DE TRANSPARENCIA

Autor: Felipe Manchado González

Director: José Sánchez del Río Sáez

Madrid

Julio de 2019

RSEUMEN DE PROYECTO:

El siguiente trabajo documenta los pasos seguidos en la realización de un proyecto emprendido a solicitud de la sede alemana de la empresa AIRBUS.

El encargo en cuestión consistía en el estudio y corrección de unas anomalías presentes en el sistema eléctrico estándar de un modelo de avión en concreto. Estas anomalías observadas se manifiestan como intermitentes ventanas de tiempo durante las cuales el flujo de potencia por el sistema eléctrico se interrumpe brevemente, forzando por tanto el reinicio de algunos dispositivos electrónicos acoplados a él.

El estudio sobre la búsqueda de una solución para el problema en cuestión se planteó en el diseño de un sistema encargado de almacenar energía que sea capaz de integrarse dentro del enramado eléctrico, reemplazando así la generación primaria en los momentos “valle” de potencia.

La decisión tomada fue la del empleo de elementos de acumulación capacitivos para desempeñar dichas funciones de almacenamiento. En una primera instancia se emplearon condensadores electrolíticos comerciales en una prueba de carga y descarga sobre un grupo de resistencias de alta potencia que verificara experimentalmente el funcionamiento adecuado de estos.

Más adelante el proyecto se formalizaría en el estudio e investigación de nuevos materiales electrolíticos que, confinados entre dos capas conductoras formadas por tejidos de nanotubos de carbono, actuaran a modo de dieléctrico y por tanto el conjunto funcional se comportara como un supercondensador.

El estudio sobre supercondensadores se extendería a gran parte del proyecto, añadiéndole adicionalmente estudios sobre la resistencia mecánica de los supercondensadores al infundirles propiedades estructurales gracias a una capa de resina epoxi. Estos estudios se harían a la vez que un conjunto de mediciones eléctricas planteadas para observar las variaciones de las propiedades electroquímicas ante cambios realizados sobre la estructura.

Palabras clave: Supercondensador, CNT, dieléctrico, transparencia, puente de corriente continua

PROJECT SUMMARY

The following work explains the steps taken in the realization of project which was a request from the company AIRBUS in Germany. The assignment in question consisted in the study and correction of some anomalies present in the standard electrical system of a particular airplane model. These observed anomalies can be seen as intermittent time windows during which the power flow is interrupted briefly through the electrical system, forcing the restart of some electronic devices.

The search for a solution to the problem was raised in the design of a system capable of storing energy, replacing the primary generation in the “valley” points of power. This system could be integrated itself into the airplane electric system.

The decision was made to use capacitive accumulation elements to perform this energy storage functions. In the first instance, commercial electrolytic capacitors were used in a charge and discharge test on a group of high-power resistors will verify experimentally the proper functioning on these.

Later the project would be formalized in the study and research of new electrolytic materials that, confined between two conductive layers of Carbon Nanotubes act as a dielectric and therefore the functional set behaves like a supercapacitor.

This research would extend to a large part of the project, adding additional studies on the mechanical strength of the supercapacitors by infusing them with structural properties thanks to a layer of epoxy resin. These studies would be done at the same time as a set of electrical measurements, designed to observe variations in the electrochemical behavior, are made.

Keywords: Supercapacitor, CNT, dielectric, transparency, direct current bridge

Índice

1 Antecedentes

1.1 Introducción.....	1
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Datos suministrados.....	6
1.4 Posibles causas.....	7

2 Pruebas Experimentales

2.1 Simulación del circuito de carga.....	15
2.2 Análisis del fallo y posibles soluciones.....	17
2.3 Corrección de la señal.....	17

3 Supercondensadores

3.1 Teoría de supercondensadores.....	27
3.2 Fabricación de supercondensadores en el laboratorio.....	30
3.3 Caracterización electroquímica de los supercondensadores.....	32
3.4 Caracterización de las propiedades mecánicas.....	33
3.5 Mejora de las propiedades mecánicas.....	36

4 Trabajo de laboratorio

4.1 Fabricación y prueba de supercondensadores.....	39
---	----

5 Conclusiones

5.1 Conclusiones.....	49
-----------------------	----

Bibliografía.....	51
-------------------	----

1 Antecedentes

1.1 Introducción

A principios del siglo XX, los hermanos Wright, mundialmente conocidos por ser de los primeros precursores de la historia en ingeniería aeronáutica, lograron realizar con éxito el primer vuelo tripulado tras fabricar un aeroplano capaz de planear una corta distancia con la asistencia de un impulso externo proporcionado mediante una catapulta. No consiguió volar de forma autónoma, pero el impulso fue suficiente para probar la sustentación, el sistema de viraje y manejo de la estabilidad, estableciendo las bases de lo que más tarde serían los estándares para la manufacturación de aparatos capaces de transportar aparatos más pesados.

No fue hasta 1906 y de la mano de Traian Vuia Quien, inventor rumano menos conocido, pero de gran relevancia en la historia del aire, que diseñó y construyó el primer avión autopropulsado más pesado que el aire. Desde este punto todos los avances fueron apareciendo de manera lenta y progresiva, sin marcar grandes diferencias pero indicando el camino hacia una ciencia del aire más consolidada y moderna como la que tenemos hoy.

Fue al llegar la Primera Guerra Mundial cuando se mejoraron los aviones autopropulsados por hélice y se empezaron a fabricar en mayores cantidades por fines bélicos. Con la venida de la Segunda Gran Guerra llegó una mejora de los propulsores de los aviones haciéndolos más grandes y eficientes. Sin embargo, la precariedad y la falta de técnica los convertía en máquinas aéreas de muy poca seguridad. [1]

Hoy en día, los aviones son unos de los transportes más seguros jamás creados, gracias a todos sus sistemas enfocados a prevenir errores y asegurar una autonomía suficiente de vuelo, su diseño les permite mantenerse en funcionamiento incluso bajo las peores condiciones. [2]

Con ejemplo del Boeing 747, cuyo sistema de propulsión cuenta con cuatro motores turbofan (JT9D-7), capaces de proporcionar más de 200kN de empuje unitario, cuenta con un diseño que asegura su aterrizaje frente a situación de parada de tres de los cuatro motores. [3]

En sus orígenes, los requerimientos eléctricos por parte de la industria aeronáutica eran muy básicos y en parte simbólicos, en un comienzo se empleaba un sistema de encendido llamado magnetos, cuya función era la de crear un voltaje lo bastante elevado como para provocar una chispa en las bujías y provocar el arranque del motor. Este sistema se mantiene vigente, aunque hace tiempo que se encuentra en desuso para los aviones comerciales.

A medida que avanza la tecnología, nuevas funciones se fueron agregando al vuelo tripulado, tales como el sistema de radio, que sustituía las comunicaciones con tierra mediante el lenguaje de luces, iluminación estroboscópica (necesaria para el tránsito aéreo y las maniobras) y el sistema de radioguía.

Todas estas integraciones fueron exigiendo un aumento en las necesidades eléctricas de abordó, de las cuales se optó a integrar unas pequeñas baterías al comienzo de la cola del avión y que contaban con un sistema de recarga basado en una dinamo accionada por una turbina exterior. Tal sistema no proporcionaba más de 500W de potencia eléctrica, pero era más que suficiente para las exigencias con las que se encontraban.

Durante el periodo de entreguerras surgieron las primeras compañías aéreas enfocadas al transporte, tanto de mercancías como de pasajeros y con un gran peso en el apartado de correo, el aumento del tráfico aéreo y la necesidad de su disponibilidad con razones logísticas fueron forzando la necesidad de vuelos nocturnos, lo cual componía una exigencia extra de iluminación de cabina y alimentación para vuelo instrumental de grandes distancias. Llegados a este punto el requisito de potencia se había elevado y oscilaba entre los 2 y los 3 kW, obligando a que el generador dependiera directamente del motor del avión al que se acoplaba mecánicamente.

Finalmente fue la llegada de la Segunda Guerra Mundial la que promovió un verdadero avance técnico en la aviación: los primeros prototipos de radares, el desarrollo de motores con mejores prestaciones y finalmente, la fabricación en serie del primer avión a reacción realmente operativo. Estos avances no solo tuvieron aplicaciones militares sino también comerciales y fueron dirigidos en parte al transporte.

Poco a poco las distintas técnicas para cubrir las necesidades eléctricas de los dispositivos que se iban incorporando al transporte aéreo se fueron quedando obsoletas por su incapacidad para adaptarse al aumento de la demanda.

Actualmente la exigencia de energía por parte de los componentes eléctricos y electrónicos que componen los subsistemas de un avión comercial superan con creces las capacidades de generación que se han comentado hasta ahora, llegando a consumos de entre 200kVA y 600kVA, llegando en algunos casos como el del A380 a una generación nominal de 800kVA.

La realidad actual es de una tendencia al aumento del tráfico aéreo por parte de los consumidores, gracias a aerolíneas de bajo coste, como Ryanair, EasyJet, y Southwest Airlines que son las protagonistas de una insólita democratización del aire que da acceso a millones de pasajeros a diario. [1]

Se estima que en cuestión de 20 años el tráfico aéreo va a verse empujado a un incremento que duplicará su uso, y pese a que Airbus declarara que “las aeronaves son aproximadamente un 80% más eficientes que hace 50 años” este aumento de la circulación no sería sostenible sin una importante mejora multidisciplinaria que imponga unos nuevos estándares a la hora del manejo de los recursos energéticos.

La reducción del impacto que provoca la aviación sobre el medio ambiente es un objetivo clave para la industria del aire, que está empleando gran parte de sus recursos en una mejora del rendimiento energético y en disminución de sus emisiones. [3]

Tales propuestas como el desarrollo de tecnologías de propulsión eléctrica y sin emisiones abren las puertas a un futuro con una clara relevancia del almacenamiento y producción de energía eléctrica. Esto complicará más si cabe las instalaciones eléctricas dentro de los aparatos, complicando su seguridad. Tema al que se dedica ese trabajo.

1.2 Descripción del problema

En los aviones comerciales actuales, el correcto funcionamiento de la aeronave se obtiene utilizando distintas fuentes de energía. El objetivo, aparte de la alimentación de todos los circuitos, es contar con energía de reserva en caso de avería de uno o más de los generadores principales.

Las fuentes de energía eléctrica utilizadas en los aviones suelen ser las siguientes:

- Generadores del avión: en los aviones comerciales cada motor tiene un generador que se encarga de suministrar corriente a todo el avión de manera ininterrumpida.
- APU: Auxiliar Power Unit (*fig. 1*) o Unidad de Energía Auxiliar consiste en un pequeño motor a reacción integrado en el extremo de la cola y que acciona un generador, este motor no está destinado a impulsar el avión, sino que se emplea en tierra o en caso de que sea necesario una fuente de energía de respaldo o para alimentación de sistemas, carga de las baterías y el propio arranque. Además de esto el APU suministra, a través de el compresor de la turbina, presión neumática al avión.
- Baterías: normalmente se emplea como recurso de emergencia o para mantener los equipos encendidos cuando se esté en tierra.
- GPU: Ground Power Unit (*fig. 2*) o Unidad de Energía de Tierra: consiste en un generador móvil que se emplea únicamente cuando se encuentra en tierra para la carga de baterías sin uso del propio combustible del avión.



(fig. 1): Auxiliar Power Unit [4]



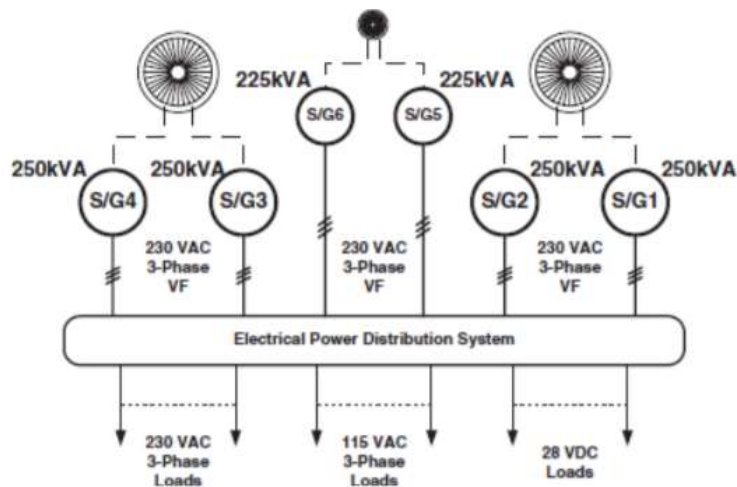
(fig. 2): Ground Power Unit [4]

Todas las aeronaves actuales presentan una configuración similar en su sistema de generación eléctrica, consistente en generadores trifásicos comunicados mecánicamente a los ejes de las turbinas motor y al sistema APU, produciendo una corriente alterna de tensión superior a 115V y una frecuencia igual a 400Hz. [4]

Estos conforman el subsistema de generación principal del avión en condiciones de funcionamiento normal, mientras que las fuentes auxiliares, como las baterías, solo entran en funcionamiento para cubrir las necesidades del sistema de carga cuando el sistema de generación primario (o parte de este) se encuentre fuera de servicio.

Este sistema de generación normalmente cuenta con una unidad de velocidad constante (CSD) que actúa como una reductora de paso variable para asegurar una frecuencia de la corriente generada igual en fase y frecuencia en todas las fuentes y corregir las variaciones de velocidad que rondan entre los 360 y 720 Hz.

En ocasiones se opta por prescindir del sistema CSD debido a su elevado coste y se sustituye por un grupo de rectificadores unidos a un alternador de 400Hz mediante un puente de corriente continua (Link DC).



(Fig. 3): sistema de generación y distribución eléctrica en un Boeing 777

Los generadores eléctricos se conectan al sistema de distribución integrado en propio avión, que generará una señal de continua a 28V para los distintos dispositivos, mientras que aquellas cargas que requieran otro tipo de tensión contarán con su respectivo grupo de convertidores, ya sean de corriente alterna o continua.

Como podemos ver en la *fig. 3*, La cual ilustra de manera simplificada el sistema de generación en un Boeing 777, es el EPDS (Electrical Power Distribution System) el que se encarga de la distribución de energía, y es el responsable de la recarga de baterías y del deslastre (o desconexión) de carga eléctrica en caso de fallo de un generador primario y conexión de fuentes auxiliares frente a situaciones que requieran de asistencia energética.

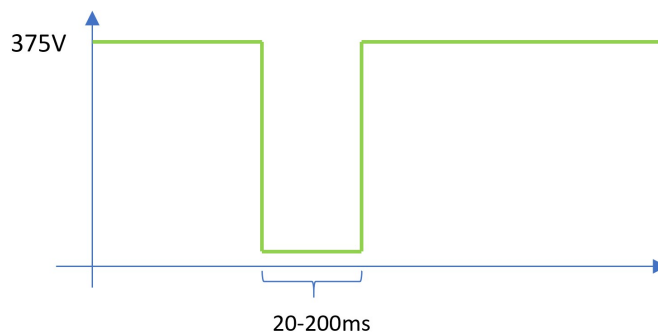
Es en un sistema energético parecido a este donde se presenta el problema que la compañía aeronáutica Airbus Alemania solicitó a IMDEA Materiales para su estudio y contribución en la búsqueda de una posible solución.

Tal y como se pudo observar, cierto modelo de avión presentaba un problema en el punto de transformación eléctrica, a causa del cual la energía se detenía durante breves periodos de tiempo.

1.3 datos suministrados.

La anomalía se manifiesta especialmente en el puente de corriente continua que une el grupo de rectificadores de onda con el sistema de distribución de energía. En este punto se detecta como durante breves periodos de tiempo tensión "cae" a $0V_{DC}$. Estas caídas son rápidas (entre 20ms y 200ms) y se recuperan inmediatamente después regresando la tensión nominal de puente.

Estos saltos no son lo bastante notables como para llamar la atención a simple vista, pero sí lo bastante como para que la privación de energía pasajera fuerce el reinicio de algunos aparatos electrónicos conectados a la red interna del avión.



(fig. 4): representación visual de una ventana de tiempo

Los datos adicionales que se nos ofrecieron sobre las características que componían el caso de estudio fueron bastante reducidas y en ciertos casos información resultaba hasta trivial para el análisis, esto era debido a derechos de privacidad de la información del propio fabricante aeronáutico, lo que obligaba a que cada dato tuviera que solicitarse de manera oficial a través de un canal de comunicación con un portavoz de la institución Airbus alemana.

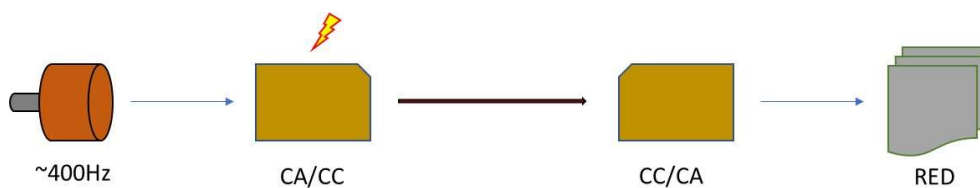
Esto limitará bastante el análisis del caso, presentando distintos problemas a lo largo del desarrollo y diseño.

La información aportada referenciaba al sistema de rectificadores y se reducía a:

- La tensión del puente de corriente continua, cuyo valor es constante e igual a 375V.
- La frecuencia de la tensión producida por los generadores síncronos, de 400Hz.
- El consumo de la carga eléctrica, de aproximadamente 500W

Esta limitación obliga a contemplar el sistema de manera simplificada, reduciendo los componentes en tres bloques:

- El bloque generador, que sintetiza los distintos motores primarios destinados a la generación de energía en una única fuente de corriente alterna de tensión y frecuencia constantes.
- Bloque consumidor, que modela los distintos dispositivos electrónicos suministrados de energía por el distribuidor eléctrico.
- Bloque de transporte y transformación, encargado de convertir la energía a las distintas tensiones y frecuencias que se requieran (compuesto por rectificadores y alternadores que trabajan en unas condiciones de tensión y frecuencia específicas)



(fig. 5): Representación en bloques del sistema eléctrico integrado

1.4 posibles causas

Basándonos en la información que teníamos sobre las faltas podríamos acarrear el problema a distintas causas dentro del sistema eléctrico:

Falta en un generador

La caída instantánea de la tensión en el puente de corriente continua podría deberse a un posible colapso dentro de la red de los generadores de corriente alterna, este sería provocado por una falta entre los devanados de algún generador o un cortocircuito producido entre el cobre que conforma los bobinados del inducido y la chapa del estator.

Una falta entre los tres inducidos produciría un colapso de la tensión en todo el sistema de generadores y en caso de no actuar la protección la falta se vería alimentada por todos los motores en generación provocando sobre intensidades y quemaduras que carácter irreversible, incluso pudiendo derivar en un accidente si no cuenta con las protecciones adecuadas frente a incendios.

Por otro lado, en caso de ser una falta de carácter trifásico no explicaría la recuperación instantánea de potencia pasada la ventana de tiempo, por lo que se descarta como posible causa de la anomalía.

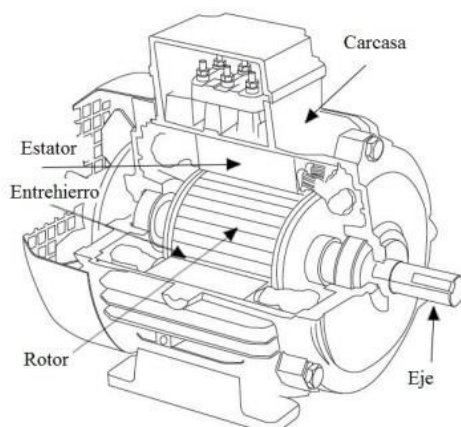
Un tipo de falta distinta que podría ser probable a la hora de explicar la intermitencia de las pérdidas es la falta entre devanados y chapa; cabe la posibilidad de que dentro de un generador los devanados del rotor no se encuentren dispuestos de manera adecuada, haciendo que, al alterarse la velocidad de rotación de los generadores (superando esta los 400Hz) sus bobinados se separen del cuerpo giratorio (rotor) debido a los fuertes esfuerzos centrífugos a los que se somete, provocando un contacto entre estos cuerpos, responsables de la inducción de corriente, y la chapa que conforma el cuerpo fijo del motor (estátor).

Una vez provocado el contacto el resultado sería equivalente al de una falta trifásica en bornes del generador, esta se mantendría presente hasta que las fuerzas electromotrices originadas por el cortocircuito regresaran la velocidad de rotación a una más estable o que la propia fuente de la sobre velocidad cesara devolviendo el sistema a los 400Hz.

Debido a este motivo se podría explicar su intermitencia y brevedad, ya que las correcciones de velocidad suponen un transitorio relativamente rápido para unos generadores de tamaño reducido como los integrados en los aviones.

Otra posibilidad sería en caso de que la perturbación de velocidad se diera en un único generador, haciendo que este se desincronice del resto, alterando la red y alertando a las protecciones eléctricas que aseguran el correcto funcionamiento del sistema.

Por otro lado, de haberse debido a cualquiera de las anteriores razones podrían haberse observado distintas alteraciones y defectos dentro de los generadores, así como averías permanentes que habrían supuesto una información relevante a informar.



(fig. 6): componentes de un motor síncrono (imagen de Google)

Falta dentro del rectificador

Una explicación a la que se le podría acarrear los efectos de la intermitencia dentro del puente de tensión continua es la de una falta dentro del grupo de rectificadores.

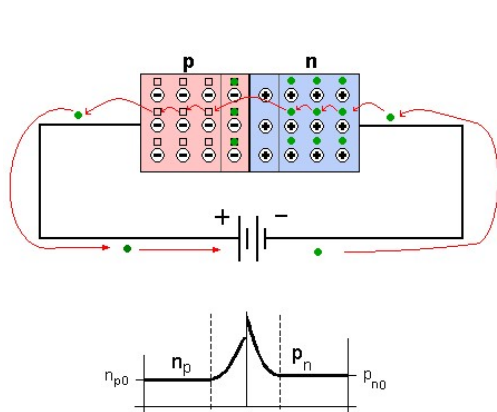
El rectificador (o también llamado convertidor de corriente) es una configuración electrónica que transforma la potencia transmitida en corriente alterna a una señal de corriente continua. Permitiendo el intercambio de energía entre circuitos de potencia de distintas frecuencias, o la alimentación con corriente continua a una carga que lo requiera, directamente desde la red.

Los rectificadores no controlados están formados exclusivamente por un puente de diodos que, sin circuitos de control y mando, conmutan de forma pasiva debido a las fuerzas eléctricas. [5]

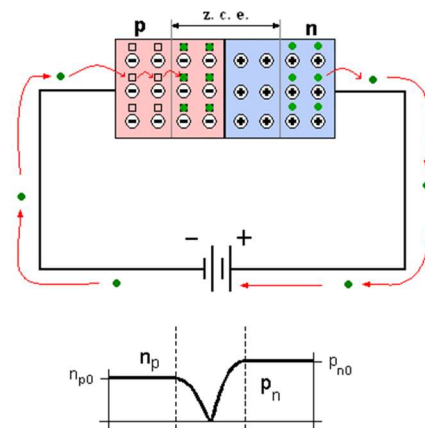
Los diodos son dispositivos semiconductores que actúan como un interruptor unidireccional, permitiendo el flujo de corriente en una única dirección.

Ésto es posible gracias a que en su interior están formados por dos tipos de materiales o cristales (generalmente de silicio), un extremo del diodo estará compuesto por cristal de silicio con impurezas de un compuesto con menos electrones de valencia (comúnmente el boro), las cuales al introducirse restarán electrones al resultado y creando un dopaje de carga positiva, a este polo se le llamará P (también llamado ánodo). [6]

Al extremo contrario se le realizará un proceso de dopado que añada un elemento pentavalente (con 5 electrones en la capa de valencia), aumentándole el número de portadores de cargas libres negativas (electrones extra), a este polo se le llamará N (también llamado cátodo).



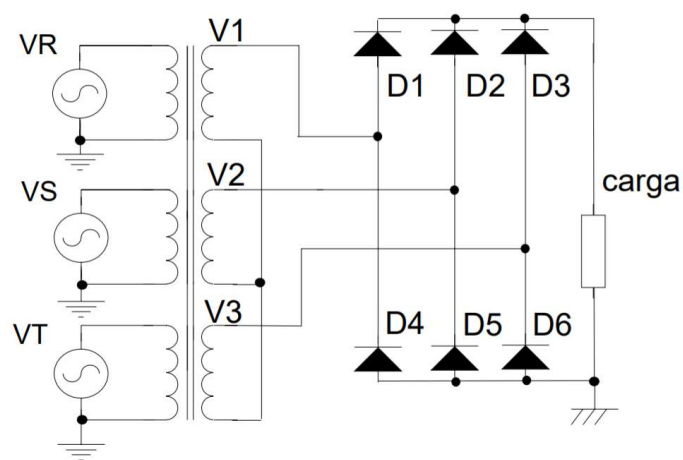
(fig. 7): diodo en polarización directa [7]



(fig. 8): diodo en polarización inversa [7]

La unión de los dos semiconductores N y P es la más común de todas y es altamente versátil ya que la disposición de la carga atómica no ofrece resistencia cuando el flujo de corriente es de P a N, es decir, de ánodo a cátodo. Y además se presentará como un circuito abierto con resistencia infinita cuando se le imponga una diferencia de potencial opuesta a la posición de semiconductores. [7]

Un rectificador en esencia es un puente formado por 6 de estos semiconductores, los cuales están dispuestos de tres paralelos formados por una serie de dos diodos orientados en el mismo sentido.



(fig. 9): rectificador trifásico no controlado [5]

En la figura 9 podemos ver un ejemplo de un rectificador trifásico aislado galvánicamente gracias a un transformador trifásico cuyos devanados secundarios están conectados en Y, es decir, sus masas se encuentran unidas en el mismo punto. Su funcionamiento consiste en la capacidad de los diodos de comportarse como un corto, cuando la tensión en el ánodo es superior a la presente en el cátodo este conmutará, permitiendo pasar la corriente con un mínimo valor en pérdidas.

De esta manera la forma de trabajar del rectificador consiste en el diodo de la fila superior (por ejemplo, el D1) conmutando para cerrarse al tener un mayor voltaje y los demás (D2 y D3) abriéndose al medir en su cátodo el voltaje V1 del ánodo del primer diodo, el cual será superior a los respectivos V2 y V3. Conforme el voltaje instantáneo vaya cambiando de valor los diodos irán conmutando para que la carga tenga en su punto de mayor tensión siempre el valor máximo de los tres voltajes monofásicos.

Lo mismo sucederá con los diodos de la fila inferior, cuya disposición realiza la misma función, conmutando el valor de mayor tensión en el ánodo, pero haciendo que la carga vea en su punto de menor tensión el valor de mínimo de las fuentes en ese instante.

De esta manera se consigue que la tensión en el puente CC (representado como una carga desde el rectificador) sea la diferencia entre la máxima y la mínima tensión instantánea en bornes trifásicos. Este diferencial no es constante, sino que tiene pequeñas fluctuaciones que se detectarán como armónicos o ruido, para el correcto funcionamiento del dispositivo será necesaria la instalación de un filtro de paso bajo, que consistirá en un condensador con un valor capacitivo suficiente para eliminar en gran parte la frecuencia del primer armónico.

El resultado será de una señal de corriente continua cuyo valor es aproximadamente la diferencia entre los máximos y mínimos de las tensiones de entrada, es decir, su valor será igual a la tensión pico-pico de la fuente de alimentación, complicando el control sobre la tensión continua a la salida (sería necesario un transformador trifásico que permitiera variar la relación de espiras).

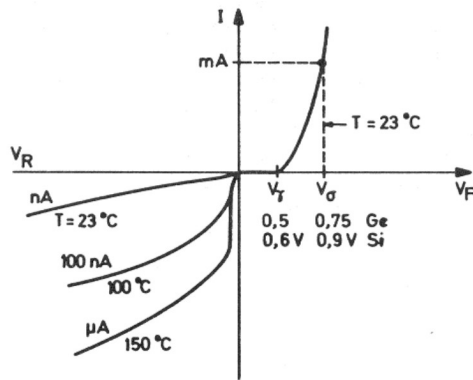
La tensión de salida, una vez filtrada, puede emplearse directamente sobre una carga que requiera tal tipo de alimentación. No obstante, la dependencia de los rectificadores sobre un elemento físico como son los diodos puede acarrear diversos problemas. El diodo no es capaz de actuar de manera instantánea, la conmutación se realiza

Los diodos pueden presentar errores o destruirse en caso de que un circuito supere su tasa actual de voltaje, o podría llegar a quemarse si se le exigiera un paso de corriente superior a su capacidad nominal. A pesar de que estén diseñados para conducir corriente en una soladirección, pueden en ciertos casos cortar la conductividad en ambas direcciones o producir una falla y que no se dirija al resto del circuito.

Otra desventaja que dificulta su funcionamiento es la velocidad de conmutación; aunque el paso de "vacío" (diodo actuando como un interruptor abierto) a corto es bastante rápido, no se llega a efectuar de forma inmediata, sino que sufre el cambio durante un breve periodo de tiempo transitorio donde la resistencia equivalente que presenta varía desde su valor máximo a su resistencia de cortocircuito. (fig. 10)

Otro inconveniente, aunque menos notable es el de la tensión de arranque. Todos los diodos necesitan un mínimo de voltaje para cambiar su estado, y una vez comienza el flujo de corriente contará con una pequeña caída de voltaje que se presentará como pérdidas y se disipará en forma de calor.

A la hora de trabajar con un puente de diodos, todos estos errores tienen una cierta probabilidad de sucederse, generando fallos que pueden afectar a la tensión de salida, provocando errores en los circuitos acoplados



(Fig. 10): conmutación de un diodo [6]

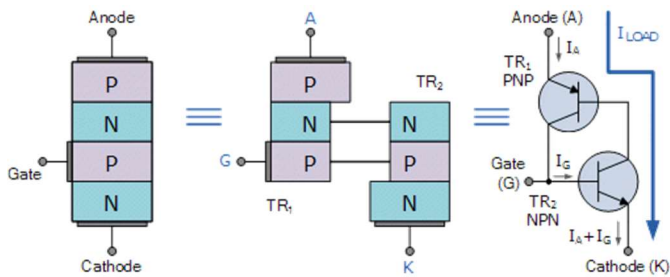
En el caso de una posible apertura simultánea de diodos a causa de una de las razones mencionadas, provocaría un fallo interno que podría hacer saltar las protecciones o incluso llevar a los generadores a una situación de desacople y pérdida del sincronismo. Si tal caso se diera, se provocaría a la salida del rectificador un efecto de cortocircuito y pérdida inmediata de energía durante un breve periodo de tiempo hasta que las condiciones de funcionamiento se reestablecieran, dejando caer la tensión a 0V y creando las ventanas de tiempo observadas dentro del puente.

A estas imperfecciones mencionadas se le añade el problema de no poder variar la tensión continua que genera el puente, lo cual genera una falta de flexibilidad que dificultaría su aplicación en el sistema eléctrico integrado.

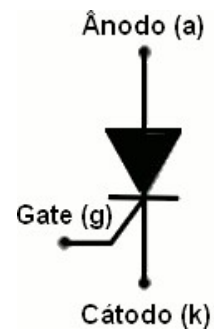
Otra formalidad de rectificador que facilitaría la tarea del manejo de la tensión de salida en continua es la del rectificador controlado, el cual es empleado en casos que se exijan mayores requisitos de control sobre la carga. El rectificador controlado se basa en el mismo principio y configuración que el no controlado, con la diferencia de que los diodos se sustituyen por tiristores. [8]

Un tiristor es otra forma de semiconductor que se vale de la realimentación interna para conmutar. Cuando se le conecta un voltaje en polarización inversa se comporta de la misma forma que un diodo, impidiendo el flujo de corriente como un circuito abierto. Sin embargo, cuando la alimentación es directa no conmutará hasta que se alimente un tercer polo o "puerta", pudiendo elegir por tanto el momento de conmutación. De esta forma se puede saltar de una onda a otra no cuando una sobrepase a la otra, sino cuando se desee (siempre hasta cierto punto, en el que se invierte la polaridad y cesa el traspaso de potencia por dicho tiristor). (fig. 13) [9]

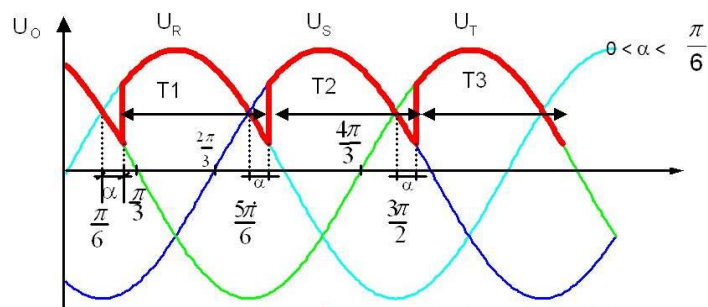
Esto es posible gracias a la configuración de los semiconductores que lo conforman que tienen una formación P-N-P-N. El funcionamiento de este dispositivo no se puede llevar a cabo de forma pasiva, sino que necesita de un mando que controle indicando al semiconductor cuándo activarse. [10]



(fig. 11): configuración de los semiconductores en un tiristor [10]



(fig. 12): esquema de un tiristor [10]



(fig. 13): conmutación de tiristores en rectificador trifásico [8]

El resultado de esta operación es la capacidad de controlar la amplitud del valor eficaz de la señal a la salida, siendo este igual a la tensión continua que generará el rectificador.

Los rectificadores trifásicos controlados son más versátiles y su uso está más extendido que el de los rectificadores pasivos, sin embargo presentan una serie adicional de problemas debido a la necesidad implícita de un controlador que varíe el ángulo de conmutación de los distintos tiristores. La electrónica implicada puede cometer errores puntuales en el cálculo o presentar fallos dentro de sus salidas analógicas que conduzcan a conmutaciones simultáneas de distintos tiristores, provocando fallas y cortocircuitos internos por sí solo, o saltos dentro del cálculo de conmutaciones dejando durante los periodos observados sin energía al resto del sistema. [11]

Esta última podría ser la explicación más coherente a la que se le podría acarrear la causa de las ventanas temporales sin energía. Sin embargo, a pesar de que una revisión del rectificador favorecería el análisis y permitiría una correcta rectificación de la falta, no se nos ha facilitado la información ni el acceso pertinentes a la que podría ser la fuente de nuestro caso de estudio.

Por lo tanto, dada la información que se nos ofrece, debemos tratar de solucionar el problema de la forma más adecuada posible, aunque esto suponga una opción menos óptima y limitada. De esta forma, nuestra única opción llegados a este punto es suplir la energía de la que carece el alternador el tiempo suficiente para que se recupere la señal de las fuentes de generación.

La manera más eficiente de realizar esta tarea es a través de una fuente de acumulación de energía que almacene un excedente de la generación durante los puntos de funcionamiento nominal y supla la carencia en el sistema durante los puntos “valle”. Esta acumulación y liberación de potencia se deberá realizar necesariamente en corriente continua, puesto a ser la más eficiente para el almacenamiento a corto y largo alcance de tiempo (muy por encima de los métodos de generación y transformación de energía térmica en eléctrica, y la acumulación en forma de energía cinética. Ambas ya en desuso).

Una vez llegados a este punto, la conclusión fue la de suplir la falta dentro del puente de corriente continua y así ahorrar al sistema de nuevas fuentes de generación o acumulación conectadas directamente a la carga a través de alternadores.

Por lo tanto comenzamos nuestro estudio sobre el terreno centrándonos en este punto del transporte de energía en corriente unidireccional.

2 Pruebas Experimentales

2.1 Simulación del circuito de carga

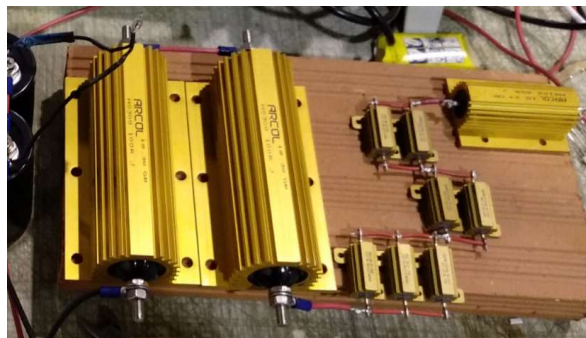
Para poder estudiar el comportamiento del sistema construimos un circuito de carga cuyas propiedades fueran similares a las del complejo de generación interno del avión.

Los datos proporcionados señalaban la necesidad de crear un puente entre un generador de tensión continua y un grupo de resistencias que consumiera, a la tensión de 375V, 500W nominales. El valor de la impedancia para lograr ese consumo es de $\frac{375^2}{500} = 281.25\Omega$ cuyo valor es fácilmente obtenible en el laboratorio, sin embargo para el funcionamiento al que se va a someter, esta carga debe ser capaz de disipar 0.5KW de manera constante sin exceder la temperatura de rotura de los componente, por ello fue necesario la obtención de disipadores de alta potencia al igual que una fuente de laboratorio capaz de aportar una alta cantidad de potencia a elevadas tensiones.

Una vez obtenidos estos componentes, realizamos un montaje estructurando los elementos mediante conexión en serie y paralelo para de esta forma poder limitar la corriente en cada uno de ellos por debajo de la máxima corriente de carga permitida por sus especificaciones.

También fue necesario disponer de un aislante térmico para que, durante las horas de simulación, las elevadas temperaturas no pudieran afectar al entorno de trabajo donde se realizaba el experimento, así como reforzar las soldaduras y procurar un enfriamiento constante para evitar el debilitamiento de estas debido al calor generado por la disipación de energía.

El valor de impedancia teórico resultante de la conexión de los componentes era de 283.33 Ω (dos resistencias 100 Ω en serie, una de 50 Ω y una conexión serie/paralelo de siete resistencias de 25 Ω como se muestra en la imagen (fig. 14)). Junto a las resistencias implícitas por las soldaduras y conexiones, su valor se eleva ligeramente por encima del requerido para simular a la carga con exactitud, Este error será ignorado en la práctica por encontrarse por debajo del 1% de su valor teórico.



(fig. 14): conexión de grupo de resistencias

Una vez finalizado el montaje y comprobada su estabilidad frente a largos periodos de carga, era necesario plantear el sistema de interrupción de energía. Esta interrupción debía realizarse en un periodo de tiempo casi instantáneo para reconectar pasada una breve ventana de tiempo, secuencia que debía repetirse una elevada cantidad de veces para facilitar la toma de datos.

La primera opción era la de emplear un transistor MOSFET que abriera y cerrara el puente de corriente continua siguiendo las instrucciones de un microprocesador, la interrupción repentina de intensidad resulta en una caída de tensión instantánea a 0 voltios entre los bornes de la carga, tal y como aparenta hacer el sistema real. Sin embargo la elevada potencia y alta diferencia de tensión que tendría que soportar el elemento semiconductor son demasiadas para cualquier semiconductor convencional, lo que hizo que se descartara esta opción por su dificultad implícita en la obtención de componentes.

La siguiente elección fue la de un grupo de relés, puesto que son más accesibles y sus propiedades de tensión y potencia son más adecuadas para las condiciones a las que se va a someter. En este caso, al ser los relés más dedicados a interrumpir corrientes de carácter alterno, y puesto que están escasamente estandarizados aquellos que interrumpen altas tensiones de origen continuo, la resolución más lógica fue la de interrumpir el paso de corriente a la alimentación de la fuente.

Esta fuente digital de alta potencia tiene la característica de cortar inmediatamente la potencia suministrada cuando se produce un fallo en la red, con la ventaja de que su memoria electrónica se mantiene alimentada durante un periodo próximo a 10 segundos después de la interrupción de la alimentación, aprovechando esta cualidad somos capaces de provocar la pérdida en la carga desde la red de tensión alterna, para recuperarla inmediatamente después sin perder en el proceso los valores de tensión y corriente con los que estaba trabajando.

El grupo de relés siguen las órdenes dirigidas desde un microprocesador Arduino. Este realiza dos funciones: interrupción y verificación. Debido a que la interrupción del relé no es capaz de efectuarse de manera inmediata, es necesario que el mismo procesador que envía la orden de corte monitorice la corriente de línea para confirmar su interrupción, y entonces inicializar un temporizador de un valor determinado.

Esto se consigue colocando en la línea del puente un grupo de resistencias que generarán una caída de tensión por el paso de la corriente desde la fuente principal y la secundaria (que veremos más adelante) a la carga. Estas resistencias a su vez servirán de guía para la medida de la intensidad aportada por ambas fuentes.

Los tiempos elegidos para las ventanas de tiempo serán de 400ms (máxima amplitud observada) separadas por espacios de 250ms en los que la fuente de potencia recupera la tensión en el puente.

2.2 Análisis del fallo y posibles soluciones

Una vez realizadas las pruebas de conexión y desconexión con éxito, pasamos a la siguiente cuestión, centrada en el método que se seguirá para suplir la potencia de la fuente.

La propiedad principal con la que debe contar consiste en proporcionar mediante una respuesta inmediata, la misma tensión que se encontraba previamente en el puente y mantenerla el tiempo suficiente hasta que el origen de la falta desaparezca y se regrese a su estado de funcionamiento ideal.

La primera propuesta fue la del uso de un grupo de baterías de respuesta rápida, accionado por un sistema de carga y descarga de energía de alta velocidad. El bloque de baterías podría disponerse bajo un asiento y tendría autonomía suficiente como para abastecer la potencia exigida. No obstante, esta propuesta sería descartada más adelante debido a su elevado peso y volumen, exigiendo la transformación de un área importante del aeroplano, entre otros motivos.

La siguiente opción, y la que finalmente sería llevada a la práctica y estudio es la de la disposición de un grupo de condensadores de acumulación, que cuentan con la ventaja de asegurar una descarga rápida e inmediata sobre la carga una vez comienza la ventana de tiempo, estos condensadores se cargarían de manera pasiva durante los periodos de funcionamiento y para su posterior descarga, tanto de manera directa como a través de un elevador CC-CC de potencia, empleado para elevar la tensión a la salida y asegurar que esta sea constante e igual al valor nominal a pesar de la descarga del condensador.

2.3 Corrección de la señal

Tras elegir el método de rectificación de señal que iba a utilizarse para nuestro proyecto era necesario probar de manera experimental su comportamiento frente a la falta para verificar su capacidad para suplir la energía carente en esta.

A la hora de incluir el elemento de recuperación dentro del sistema era necesario tener en cuenta diversos puntos de su funcionamiento; al desconocer el origen de la falta y su comportamiento real más allá de sus efectos en la tensión de puente, era necesario proteger el elemento de rectificación presente dentro de la unidad de generación frente a la posibilidad de que se originara la falta a raíz de un cortocircuito interno. De esta manera era esencial evitar la descarga inmediata de los condensadores vertiendo la energía acumulada por estos sobre la falla, dañándose en el proceso y pudiendo afectar además a los elementos internos del rectificador. Por este motivo instalamos un semiconductor en el puente que hiciera la función de no-retorno impidiendo el redireccionamiento de la energía en sentido contrario a la carga. El diodo utilizado debía contar con las características necesarias de tensión y potencia y generar las menores pérdidas posibles para un funcionamiento óptimo y adecuado.

Además de esto se debía asegurar que la carga del condensador contara con una resistencia de seguridad para evitar cortocircuitar al aumentar el voltaje de la fuente y la corriente de descarga debía medirse de manera aproximada con el osciloscopio al igual que la proveniente de la fuente.

Por último, era necesario encontrar un valor adecuado para la carga capacitiva de condensador, para lo que había que tener en cuenta el tiempo de funcionamiento de este.

Según la información que nos fue proporcionada, las ventanas temporales tenían una duración máxima de 200 ms., así que la constante temporal de descarga del condensador necesariamente se tenía que encontrar por encima de este valor.

La constante temporal de un condensador se define como el producto de la capacidad de este y la resistencia equivalente de Thévenin que contribuye a cargarlo o descargarlo (en nuestro caso esa resistencia es la que simula la carga eléctrica 281,25Ω). La constante de tiempo se incluye en la ecuación del transitorio eléctrico $U(t) = U_{t=0} + (U_{t=\infty} - U_{t=0})(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$

que marca el transitorio entre el valor inicial a $t=0$ y el valor final a $t=\infty$

Además sabemos que a tiempo $t=\tau$ el valor puntual de la tensión en este caso ya se encuentra a un 63.21% de su valor final. Por lo que es importante que la constante de tiempo sea lo mayor posible para hacer de la descarga un proceso lo más duradero posible y así se mantenga la tensión próxima a su valor nominal el mayor tiempo posible.

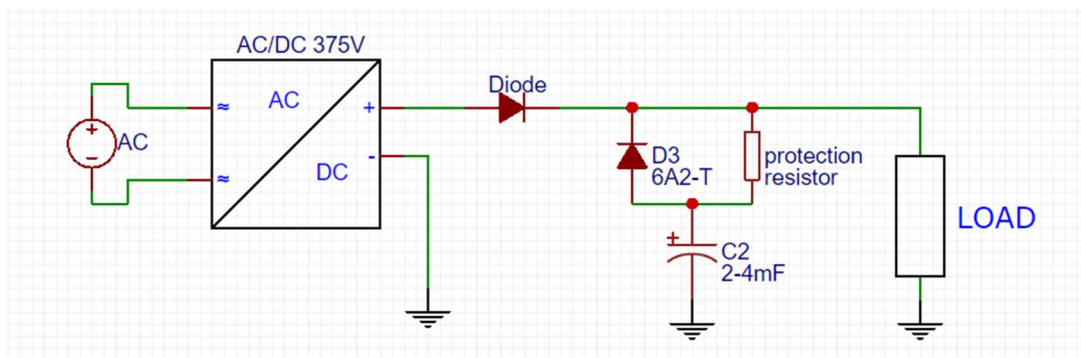
Elegimos que la constante de tiempo bastaba con ser al menos cinco veces superior a la máxima prolongación de la ventana, lo que provocaría que en el último instante de esta la tensión se habría reducido menos del 20% desde su valor inicial

$$U(200ms) = 375 + (0 - 375)(1 - e^{-\frac{200}{1000}}) = 307V \text{ reducción del } 18.13\%$$

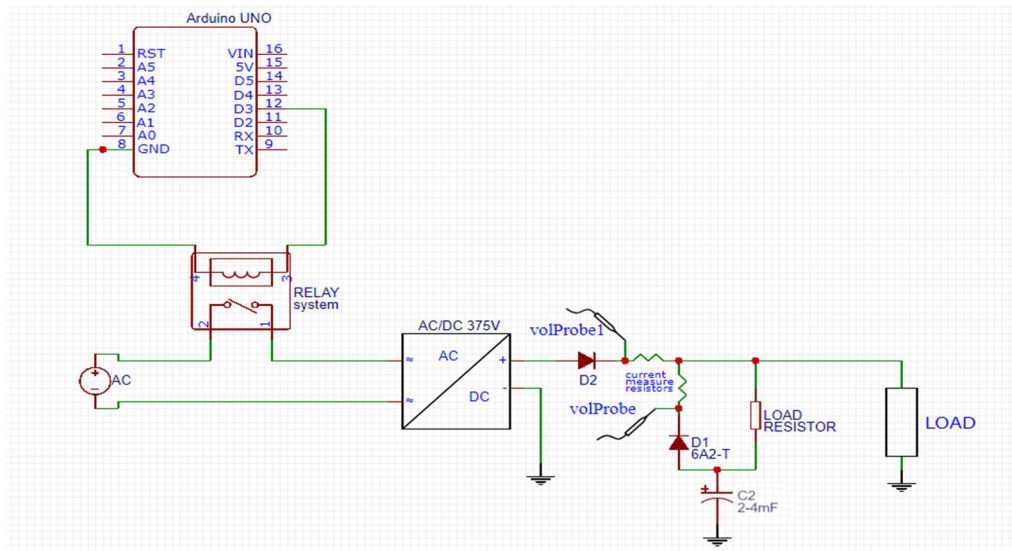
Para $\tau=1000ms$ calculamos un condensador de capacidad $C = \frac{200ms * 5}{281,25} = 3.55mF$

valor que finalmente redondearemos a 4mF por comodidad y para incrementar el valor de τ en la mayor medida de lo posible.

Ya con todos los componentes procedemos a realizar el montaje experimental final tal y como podemos ver en las figuras fig. 15 y fig. 16 correspondientes al sistema final listo para ser integrado en el enramado eléctrico del avión, y el sistema experimental realizado en el laboratorio con sus componentes de medida.



(fig. 15): esquemático del sistema de recuperación final



(fig. 16): esquema del sistema de recuperación experimental

El esquema simplificado de la figura 16 se han eliminado distintos elementos para facilitar la comprensión del conjunto, así como por ejemplo el accionamiento del relé no depende directamente del microprocesador, sino que este está vinculado a un circuito paralelo accionando un transistor para que una fuente independiente active o desactive el relé.

Al mismo tiempo se añadieron resistencias de un valor reducido que comparten un punto en común (punto de tierra del osciloscopio), dispuestas de tal forma que se pueda medir en la borna contraria la tensión que está cayendo en ellas a causa de las distintas corrientes que las atraviesa (es un método de medida orientativo, puesto que el error introducido por el osciloscopio y por las propias resistencias es muy superior al tolerable para la medida)

La elección de la resistencia de carga vinculada al condensador fue elegida de tal forma que limitara la corriente inicial de carga (cuando el condensador está totalmente descargado) por debajo de la máxima intensidad que es capaz de proporcionar el condensador, y al mismo tiempo esta resistencia contribuyera con una constante de tiempo de carga (diferente de la descarga) varios órdenes de magnitud por debajo de la constante de tiempo de descarga, contribuyendo con una carga rápida para mayor estabilidad y pronta disposición del condensador en toda su capacidad.

Finalmente realizamos un simple programa para el Arduino

```
int button = 12;    //botón para iniciar experimento
int relay = 13;    //salida al relé
int buttonLast = LOW; //referencia de pulsación
int verification= 14; //verifica que se ha abierto el relé
```

```

int i=0;

unsigned long timer; //temporizador para pulsación larga

void setup() {
pinMode(button, INPUT);
pinMode(relay, OUTPUT);
pinMode(verification,INPUT);
digitalWrite(relay,LOW); //al iniciar relé cerrado
}

void loop() {
if(digitalRead(button)==HIGH && buttonLast==LOW)
{
timer=millis();
}
if(digitalRead(button)==LOW && buttonLast==HIGH)
{
if(millis()-timer>3000)
{
do
{
digitalWrite(relay,HIGH);
do}while(digitalRead(verification==HIGH));
delay(400);
//cuando se abre el relé la caída de tensión en la resistencia se pierde y la lectura es 0
digitalWrite(relay,LOW); //reenganche de la fuente
delay(250);
i++;
}while(i<9); //se repite 10 veces
i=0;
}
}

```

```

else
{
  digitalWrite(relay,HIGH);
  do{}while(digitalRead(verification==HIGH));
  delay(400);
  //cuando se abre el relé la caída de tensión en la resistencia se pierde y la lectura es 0
  digitalWrite(relay,LOW); //reenganche de la fuente
}
}

buttonLast=digitalRead(button);
}

```

La función de este programa es la de que el Arduino ordene al relé abrirse para privar a la fuente de la red y así se simule la pérdida de tensión.

Tiene dos modalidades: cuando se pulsa el botón una sola vez la red se corta durante 400ms para después reengancharse y finalizar el programa. Por lo contrario, si mantienes el botón pulsado durante un tiempo superior a 3 segundos, el relé abrirá durante 400ms para después cerrar, entonces realizará una pausa de 250ms y repetirá el ciclo un total de 10 veces, permitiendo captar datos con mayor facilidad.

Además de esto para asegurar que la desconexión se produce durante 400ms con la mayor exactitud posible, el Arduino cuenta con una lectura que hace sobre la resistencia de medida de la corriente que proviene de la fuente, cuando esta esté conectada, la lectura que hará será `digitalRead(verification)= HIGH`, por lo que cuando mande la orden de desconexión tendrá que esperar a verificar la apertura del sistema para luego inicializar el temporizador hasta su reenganche a la red. Esto se debe a que el relé no actúa de manera inmediata, sino que tarda un tiempo en desconectar la fuente de la línea por los esfuerzos mecánicos que se producen dentro de los contactos del relé, afectados por las fuerzas electromagnéticas.

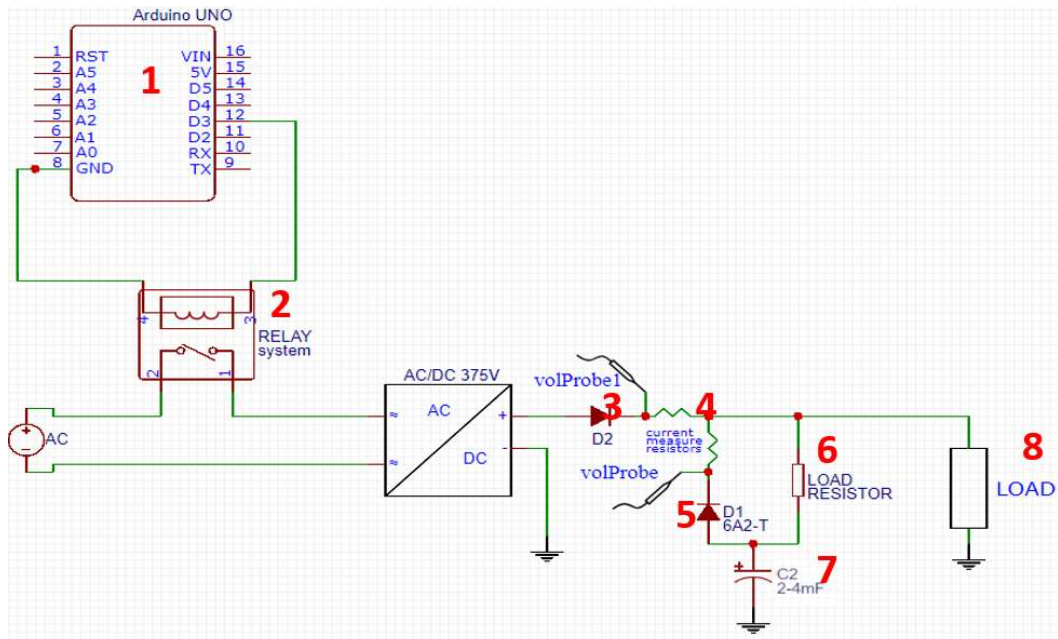
Ahora ya con todo dispuesto podemos finalmente realizar el montaje y organizar el entorno de pruebas. El elemento experimental utilizado es una pareja de condensadores comerciales de 400V y 2mF cada uno, puestos en paralelo para sumar su capacidad. Además de esto, y de forma totalmente opcional, decidimos poner una luz de neón, extraída de una regleta, en serie con una resistencia de un alto valor entre las bornas de los condensadores para tener una señal visual que advierta del funcionamiento del equipo. Esto lo hacemos por seguridad, puesto que diversos puntos desprotegidos de la instalación se encuentran a una elevada tensión y los disipadores aumentan su temperatura pudiendo provocar quemaduras.



(fig. 17): montaje final para testeo de recuperación de señal



(fig. 18): sistema experimental con los elementos señalados

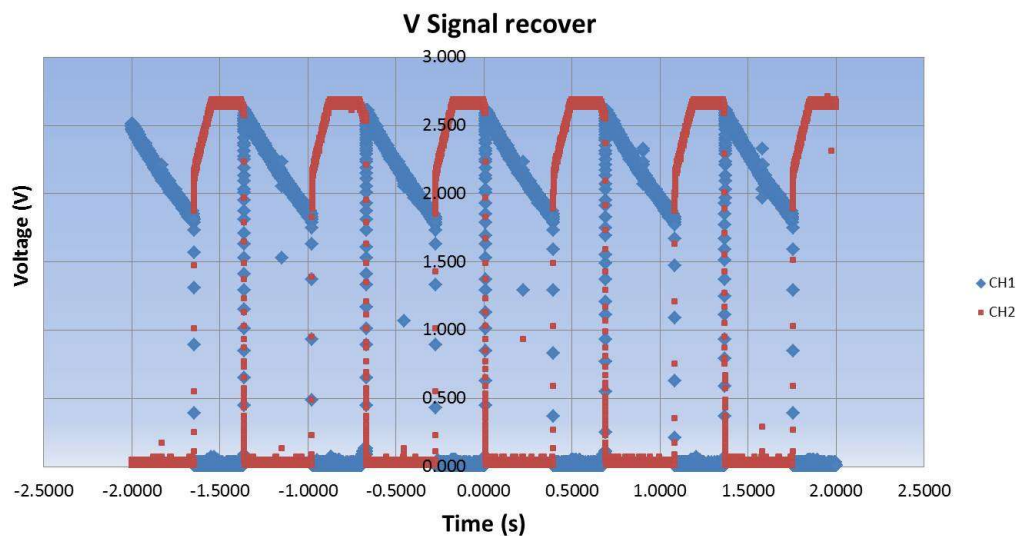


(fig. 19): esquema del sistema, comparativa de componentes

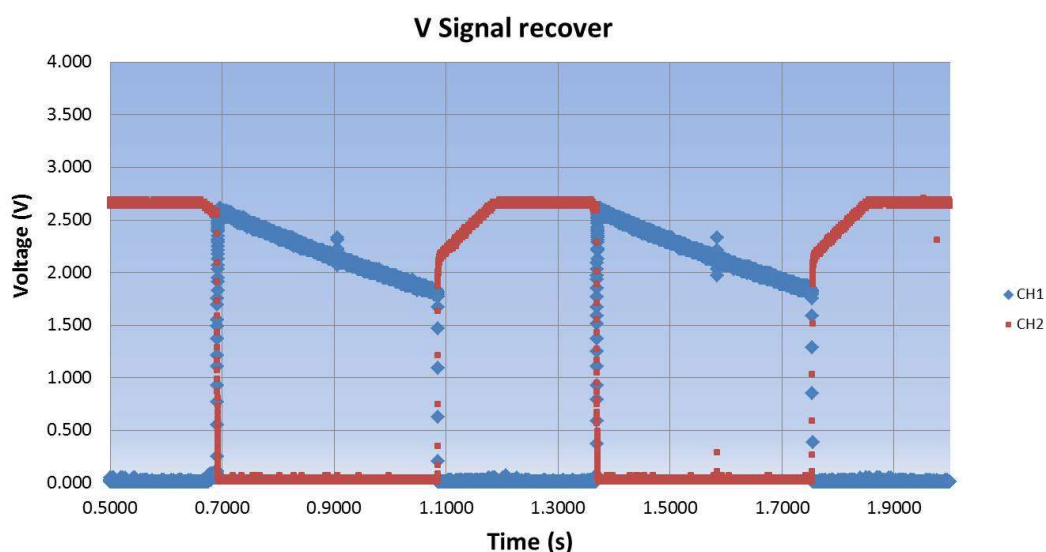
En la figura 17 podemos ver el montaje completo empleado para el estudio, junto a los condensadores comerciales empleados en primera instancia. Más tarde se trataría de sustituir por otro tipo de condensador de fabricación propia realizada en el propio instituto de investigación IMDEA, dicha parte del proyecto ocuparía la mayor parte de tiempo en investigación y testeo de diferentes materiales, como ya veremos más adelante.

Con las figuras 18 y 19 vemos en comparativa los distintos elementos, presentes en el esquema, y dónde se encuentran dentro del sistema físico.

Los resultados del experimento captados por el osciloscopio son los siguientes:



(fig. 19): muestreo a 625Hz



(fig. 20): muestreo a 1500Hz

Como se puede observar en el muestreo del osciloscopio, los cortes se realizan correctamente en plazo de 400 y 250ms, intercalando entre la fuente y los condensadores; en funcionamiento normal, la corriente proveniente de la fuente (rojo) permanece a 2,66V de caída en la primera resistencia del puente, la que se encuentra inmediatamente después del diodo 3 (fig. 19), y cuando el relé conmuta para privar al sistema de energía, la potencia proveniente de la fuente colapsa y se sustituye inmediatamente por la proveniente del grupo de condensadores (azul), que comienzan la descarga.

Al conmutar de nuevo el relé, pasados 400 milisegundos, podemos observar que primero la tensión cae en la resistencia en vez de ser lineal y partir del mismo punto donde se encontraba previo a la conmutación, realiza un escalón y después asciende linealmente. Esto se debe a que durante el proceso de carga del condensador, la intensidad que fluye hacia él genera una diferencia de tensión adicional en los bornes de la resistencia de medida, la cual se irá atenuando conforme ascienda la tensión del condensador mientras se complete su carga.

El resultado de la tensión incrementando de manera exponencial en el condensador, y su intensidad de entrada que se reduce en el tiempo de la misma manera, además de las limitaciones de tensión e intensidad, hace que la tensión sobre la carga ascienda de manera lineal incrementando su consumo de intensidad de forma proporcional hasta llegar a su valor de 1.33 amperios teóricos mientras la intensidad de carga del condensador se atenúa hasta llegar a ser próximo a 0. Esto resulta en un incremento de intensidad que atraviesa la resistencia de 2Ω prácticamente lineal.

Además de esto podemos observar que la caída de potencia es de aproximadamente el 20% de su valor inicial, y aunque este es mejorable (añadiendo condensadores al paralelo) entra dentro del rango de no interferencia con las cargas electrónicas conectadas al alternador de potencia. Concluimos con la eficacia del sistema de corrección de la señal.

Tras la verificación de la eficacia del método de corrección, la decisión del instituto de investigación IMDEA, fue la de la sustitución de los elementos de acumulación por otros de fabricación propia que cumplieran la misma función que los condensadores comerciales.

3 Supercondensadores

3.1 Teoría de supercondensadores

El sistema de acumulación que se estudiaría para su empleo en esta función será un conjunto de supercondensadores experimentales, estos llevan un tiempo siendo estudiados en el Instituto de Estudios Avanzados IMDEA, y dada su alta experiencia en el campo, el estudio de estos condensadores acabaría ocupando un grueso de la investigación en materia de este proyecto.

Por lo tanto, el trabajo per se consistía en la investigación de distintos materiales que sirvieran como aislante o dieléctrico entre dos capas conductoras que pudieran resultar en un componente estructural con validez eléctrica y mecánica.

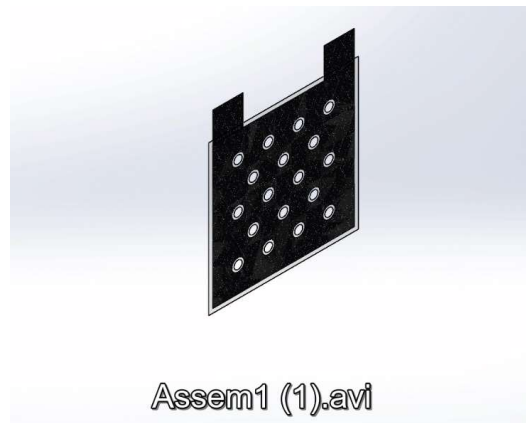
Este tipo de útiles eléctricos se producen mediante la integración de estructuras contrapuestas, alternando entre finas capas de un material conductor (también llamados “velos”) fabricados con fibras de nanotubos de carbono (Carbon Nanotubes, CNT), y un material electrolítico polimérico, basado en un líquido iónico, que actúa como separador y aislante eléctrico.

Este proceso está seguido de la infusión y curado de una resina epoxi. La estructura resultante se comporta ambos como condensador eléctrico y un elemento estructural que presenta esfuerzos y puede ser empleado para la construcción de distintos componentes que requieran resistencia mecánica.

El módulo de flexión que se ha medido en el laboratorio supera los 60GPa y presenta una resistencia a la flexión de 153MPa. Al mismo tiempo se alcanzan los 88mF de capacidad específica por cada gramo de material compuesto, llegando a densidades de potencia y energía de 30W/kg y 37mWh/kg respectivamente. [12]

Además, los estudios de las propiedades eléctricas, medidas durante el proceso de aplicación de esfuerzos mecánicos de flexión, señalan que los rendimientos electroquímicos se mantienen estables y constantes hasta la fractura de la resina endurecida, presentando en ocasiones pequeñas variaciones en la resistencia equivalente del condensador.

Con intención de mejorar las propiedades mecánicas de los condensadores, se reproducen en estas pequeñas perforaciones circulares, permitiendo la interconexión mecánica de las paredes de resina rígida separadas por el condensador, esta interconexión mejora notablemente la resistencia a esfuerzos de flexión, aun a coste de una reducción en los atributos eléctricos a causa de la pérdida de material por las perforaciones. Estos agujeros eliminan material reduciendo el “área útil”, que es la que, compuesta de dieléctrico y conductor, es capaz de generar una diferencia de potencial acumulando energía eléctrica. (fig.21)



(fig. 21): Extracto de una simulación del montaje de un super condensador completo [13]

El objetivo de crear materiales multifuncionales que valgan a su vez de acumuladores eléctricos y presenten propiedades estructurales se debe a la creciente demanda de nuevas tecnologías de almacenamiento de energía. Dado al rápido desarrollo tecnológico eléctrico, los requerimientos energéticos han ido incrementando cada vez más, especialmente en la incansable búsqueda de una fuente portátil de energía que mejore sus prestaciones de peso y volumen.

Comúnmente, la forma de conseguir minimizar el peso de los componentes de almacenamiento de energía consiste en aumentar tanto su densidad de potencia como su densidad energética, mejorando su rendimiento másico y en muchas ocasiones volumétrico.

No obstante, otro enfoque menos investigado se basa en el desarrollo de materiales multipropósito, estos podrían combinar la función de almacenamiento de energía electroquímica y estructural, formando parte de la cobertura o estructura que componga al dispositivo que deba alimentar.

Gracias a esto, se puede sustituir dicha estructura por la propia fuente de energía, ahorrando espacio y peso en estos componentes en comparación con los sistemas monofuncionales. Además los condensadores son especialmente atractivos por la simplicidad de su estructura y la facilidad para su carga y descarga.

El almacenamiento de energía en super condensadores se basa en el principio de la acumulación de carga electrostática en el entorno de los electrodos y el electrolito que los separa, típicamente los electrodos consisten en una estructura porosa de carbono, embebidos por un electrolito líquido de una elevada conductividad iónica.

Estos super condensadores comúnmente presentan densidades de energía relativamente altas, además de una larga vida útil y una alta versatilidad en su uso a distintas cargas y temperaturas.

Hasta hoy el trabajo de investigación se ha centrado especialmente en el uso de fibras de carbono (CF) para la fabricación de los electrodos de dichos super condensadores, y electrolito de polímero sólido como matriz envolvente estructural

Un ejemplo de las investigaciones que se han realizado recientemente en el área es la de reproducir una activación química y cubrimiento a través de un polímero redox activo, para

aumentar la capacidad inherente de la tela CF6. El electrolito polimérico estructural se trataba de una red reticulada de dimetracrilato de tetraetilenglicol y metoxi poli (etiglicol)550-acrilato con imidas de litio disueltas en él. [12]

Esta técnica da resultado en una muestra de capacidad específica equivalente a 35mF por gramo de material, además de un módulo de tracción de 10GPa y una resistencia a los esfuerzos de corte (entre dos componentes unidas) de 0.75MPa.

El grupo de investigación de Yun Qian ideó un método para el desarrollo de un aerogel de carbono (CAG) de alta área específica alrededor de los tejidos de fibras de carbono, gracias a la infusión de una resina de formaldehído de resorcinol además de su posterior carbonización. Esto, combinado con una matriz de Poli Etiglicol Diglicil Éter (PEGDGE), condujo a una potencia calculada y densidades de energía de 600mF por gramo, 0.033W y 0.84mWh por kilo de material.

Por lo tanto se demostró como en presencia de dicho aerogel se mejoraban las propiedades eléctricas del componente, además de incrementar su esfuerzo al corte hasta los 895 MPa de cizalladura y un módulo de corte de 8.71MPa. [12]

Otras estrategias estudiadas se basan en el aumento de la SSA (specific Surface área) que es una propiedad de los sólidos definida como el área total de un material por unidad de masa, incluyendo la integración de nanotubos de carbono (CNT). Las pretensiones de este estudio eran las de modificar la estructura del laminado (electrodo) y potenciar el almacenamiento de energía.

Como bien podemos ver, los mayores avances se han realizado en el campo de las propiedades mecánicas de los compuestos estructurales, mientras que las propiedades electroquímicas han sido de difícil estudio. Comúnmente, la caracterización electroquímica de los supercondensadores estructurales de fibras de carbono requiere un estudio de mediciones de carga y descarga no convencionales, a menudo a voltajes bajos cercanos a los 0.1V y densidades de corriente extremadamente reducidas cercanas a los 0.001-0.1 mili Amperios por centímetro cuadrado de material.

Un enfoque alternativo es la construcción de supercondensadores estructurales alrededor de las telas unidireccionales de las fibras de nanotubos de carbono. Estas telas son matrices de fibras macroscópicas de CNT, combinando las propiedades mecánicas de filamento a un mayor rango con un área específica mayor y una conductividad eléctrica mejorada de $3.5 \cdot 10^5$ Siemens por metro. Estos materiales pueden actuar con una gran eficacia tanto como un material activo además de colector de corriente.

Recientemente, IMDEA demostró una vía de estampado de fácil acceso para la producción de supercondensadores sólidos de gran superficie, la cual actualmente es la que se está empleando en el centro para la fabricación de supercondensadores.

Esta combina las fibras de CNT con un electrolito polimérico que contiene 1-butil-1 metilpirrolidinio bis(trifluorometanosulfonil)imida, el cual es un líquido iónico y termoplástico de poli vinilideno fluoruro-co-hexafluoropropileno convencional. Los dispositivos tienen altos valores normalizados de capacitancia por electrodo (28F por gramo) y una energía y potencia de 11.4Wh y 46kW por kilogramo respectivamente, además de ir acompañados de una

flexibilidad excepcional y una resistencia específica a la tracción de 577MPa (por encima de las del cobre y el polímero 21 de alto rendimiento)

Se espera que las mejoras en la fabricación de telas produzcan dispositivos con una resistencia de 0.37GPa y módulos de 18GPa mediante la tracción de filamentos de fibra CNT individual y la reducción del grosor de la membrana del electrolito polimérico, permitiendo a los electrodos una mayor proximidad y por tanto produciendo una capacidad eléctrica del dispositivo mayor.

De una manera similar a esta, recientemente se llegó a demostrar que la densidad de energía respecto a la masa de las telas de CNT aumenta al recubrir con una deposición de óxido de metal pseudocapacitivo o mediante la funcionalización en fase gaseosa del material²³. Esta combinación de propiedades hace que los electrodos de fibras CNT sean un elemento ideal para los supercondensadores estructurales, por encima de los estudiados convencionalmente formados por CF.

Más adelante veremos los pasos a seguir para la producción de un supercondensador estructural, además presentaremos profundo estudio de las propiedades electroquímicas en la fabricación de compuestos por infusión de resina, demostrando con tales mediciones que el avance de los procesos electroquímicos es mucho más amplio que los esperados en el campo de la deformación mecánica del material compuesto laminado.

Las muestras de este estudio realizado en IMDEA combinan altas propiedades mecánicas y excelentes capacidades de almacenamiento de energía, además de poseer los valores más altos de densidad energética y de potencia reportados hasta la fecha para dispositivos estructurales.

3.2 fabricación de supercondensadores en el laboratorio

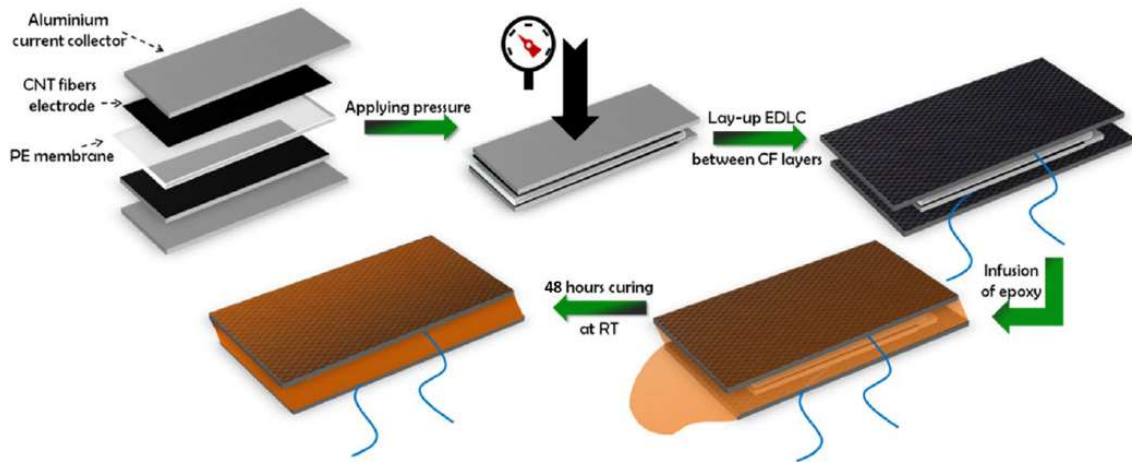
En la figura 22 podemos observar el proceso simplificado de fabricación para un supercondensador estructural EDLC (Electric Double-Layer Capacitor). En esencia el método consiste en la producción de dos capas de tamaño similar de un conductor, en este caso fibra de carbono, para que actúen en forma de electrodos. Estas membranas se separan por un dieléctrico electrolítico polimérico fabricado en el laboratorio. Una vez centradas las láminas se insertan entre dos placas de aluminio y se transporta a una prensa hidráulica manual donde se le aplica una presión durante un tiempo determinado.

La prensa logra la impregnación de la membrana blanda del dieléctrico entre las porosidades presentes entre las fibras de los electrodos. El resultado de la compresión es una fina membrana de entre 100 y 120 micrómetros comprendida por las láminas conductoras y el compuesto electrolítico.

El EDLC puede ser grande, de tamaño y forma variables sin que afecte al resultado. Sin embargo las muestras requeridas para su estudio oscila entre figuras rectangulares de 4cm² de área efectiva, y compuestos de sección circular de 1cm de diámetro.

El conjunto CNF y dieléctrico se introduce en una cámara de vacío, disponiendo las bornas de los electrodos de manera que sea accesible, y se procede a la infusión de las telas con una resina termoestable que se deja curar.

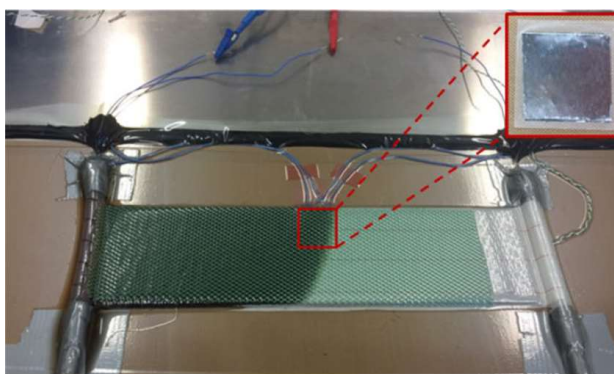
Tras 48 horas la resina solidificada aporta propiedades estructurales y una alta resistencia a los esfuerzos de tracción y flexión.



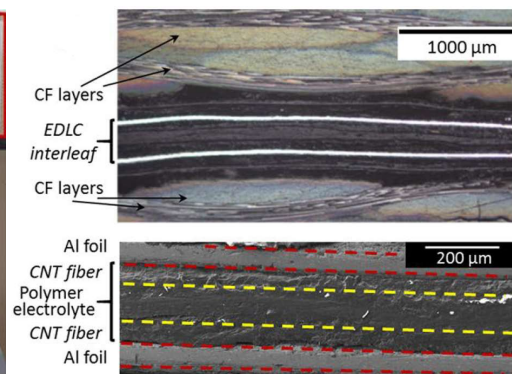
(fig. 22): proceso de fabricación para supercondensador estructural [12]

A este proceso simplificado se le pueden añadir mejoras que contribuyen a su resistencia estructural, como la perforación de la membrana en zonas concretas, permitiendo la unión física de las dos capas de resina disgregadas a ambos lados del conjunto EDLC, la unión contribuirá con un esfuerzo cortante adicional aumentando la resistencia a la flexión del material.

La infusión de resina se realiza en una cámara de vacío, esto permite eliminar posibles burbujas que puedan aparecer dentro de la resina afectando su resistencia mecánica a la flexión, además facilita el flujo de la resina epoxi por dentro de la cámara. Esta técnica obliga a que la muestra resultante tenga un tamaño predefinido mayor que el propio condensador. Como podemos ver en la figura 23, el supercondensador ocupa una pequeña porción de la muestra final junto a la resina.



(fig. 23): supercondensador tras infusión de resina



(fig. 24): imagen por microscopio de sección [12]

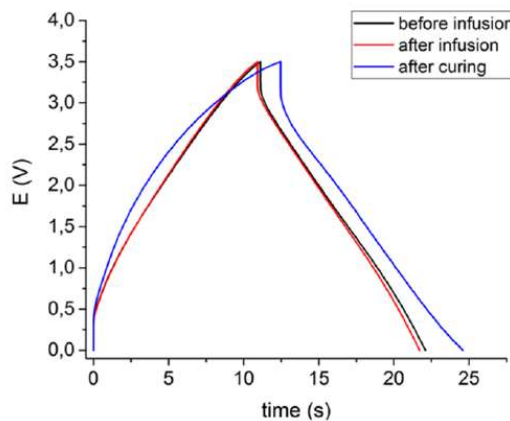
La figura 24 muestra dos imágenes, ambas de una sección en corte realizada sobre el mismo supercondensador fabricado en el laboratorio, la superior es una micrografía óptica tomada por un microscopio convencional. En ella podemos apreciar como el supercondensador (franja blanca) ocupa una parte reducida de la sección resultante de la infusión.

Al mismo tiempo la imagen inferior de la figura 24 es una micrografía de la sección transversal tomada gracias al sincrotrón que se encuentra en el instituto IMDEA, el sincrotrón es un microscopio de electrones que funciona gracias a un acelerador de partículas en forma toroidal, permitiendo generar imágenes microscópicas con un alto detalle.

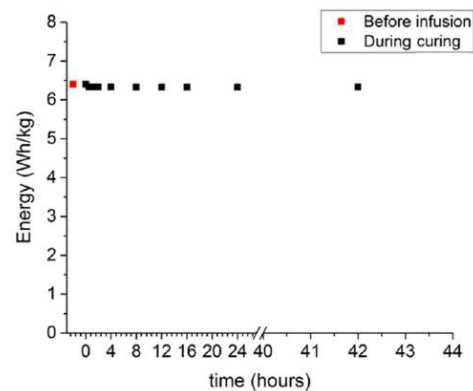
La imagen recién mencionada muestra amplificadas las capas que conforman los electrodos de fibra de nanotubos de carbono, y su separación intermedia electrolítica. Esta imagen amplificada sirvió para confirmar que la resina pudo llenar la vanidad hueca de la cámara de vacío sin que el conjunto de supercondensador interfiriera en el proceso ni que dicha resina afectara la estructura la minar del EDLC

3.3 Caracterización electroquímica de los supercondensadores

Normalmente se realizan pruebas eléctricas (principalmente la de carga y descarga) tras la infusión para comprobar como esta puede afectar a las propiedades eléctricas a través de las distintas fases del curado de la resina epoxi (infusión, gelificación y solidificación) y evaluar el impacto de estos procesos en el rendimiento electroquímico del supercondensador, a estas pruebas se les llama carga y descarga in situ.



(fig. 25): patrón de tensión ante carga y descarga in situ



(fig. 26): medidas densidad de potencia in situ [12]

Como se puede comprobar en la figura 25, los cambios que produce la infusión sobre las propiedades electroquímicas del supercondensador son mínimos, alterando mínimamente la capacidad del condensador y reduciéndola sin provocar grandes variaciones. Por el contrario, la prueba de carga y descarga una vez curada y solidificada la resina, podemos apreciar unas modificaciones visiblemente mayores sobre la curva.

Aparentemente en la prueba realizada sobre este condensador, el tiempo de carga se alarga unos segundos, sugiriendo que la infusión de resina epoxi solidificada podría contribuir a la carga capacitiva del supercondensador. Paralelamente se observa un aumento en la caída de tensión en el punto de inicio de la descarga. Esta diferencia de tensión negativa está provocada por la resistencia interna equivalente del condensador.

El la caída de tensión debida a la descarga del condensador, en un experimento como este que se produce a intensidad constante, indican el doble de la resistencia interna equivalente, puesto a que durante el transitorio de carga, la tensión acumulada por el condensador será la medida en bornes de este menos la caída sobre la resistencia (en teoría constante); una vez alcanzada la tensión programada para la carga, comenzará a descargarse a la misma intensidad y la caída sobre la tensión se invertirá, provocando la medida $V_{out} = V_{cap} - C_{drop} = V_{max} - 2 * C_{drop}$

Los resultados de las medidas indicaban una prevalencia de la eficiencia culómbica igual al 99% tras la infusión, además de un descenso de la resistencia equivalente hasta los 240hm/cm². Tras un curado de la resina de 48 horas las medidas indicaban un incremento en la resistencia en serie equivalente llegando a alcanzar los 35 Ohm/cm²

Sin embargo a pesar de estas pequeñas variaciones, tal y como indica la figura 26, la medida de la densidad de energía permanece prácticamente impasible a los efectos de la resina epoxi a lo largo de la infusión y solidificación de esta, manteniéndose cercana a 6.4Wh/kg. Confirmando que la resina epoxi no alcanza a penetrar el polímero electrolítico alterando su naturaleza química.

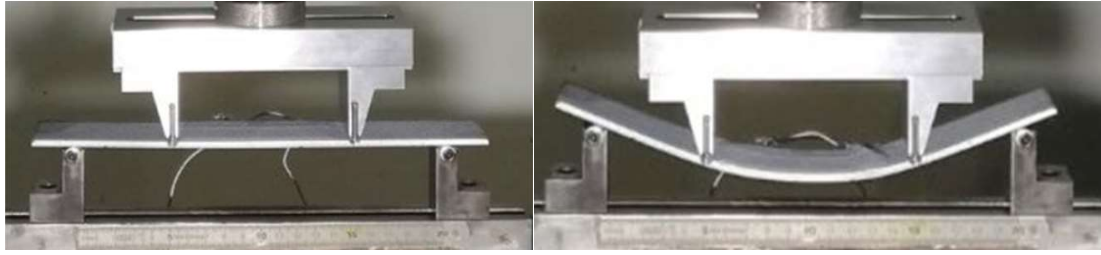
3.4 Caracterización de las propiedades mecánicas

Gracias a la alta eficiencia del compuesto, somos capaces de realizar simultáneamente el estudio de las propiedades electroquímicas y mecánicas. Para el siguiente experimento se introdujo la muestra en una prensa para realizar las mediciones de espectroscopia, de impedancia y de carga y descarga in situ, durante la flexión del material solidificado aplicando presión en 4 puntos.

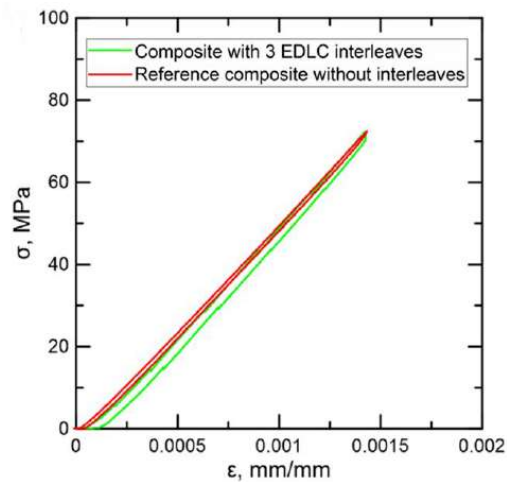
La prensa hidráulica registra la presión máxima y gracias a ello es posible calcular el esfuerzo máximo de flexión σ y gracias al desplazamiento registrado se puede calcular la tensión ϵ .

Para la siguiente prueba que vamos a presentar se fabricó un dispositivo con 8 capas de fibras de nanotubos y 3 intercalaciones de dieléctrico que fueron insertadas entre la primera y la última capa intermedia y la tercera se dispuso en el plano neutro. Los dispositivos fueron probados individualmente tras la fabricación del compuesto y mostraron un rendimiento electroquímico similar.

La decisión de posicionar varios condensadores a distintas alturas del material no es sino la del estudio de la alteración de las propiedades electroquímicas en distintos puntos dentro del material flexionado.



(fig. 27): prueba de flexión a 4 puntos [12]

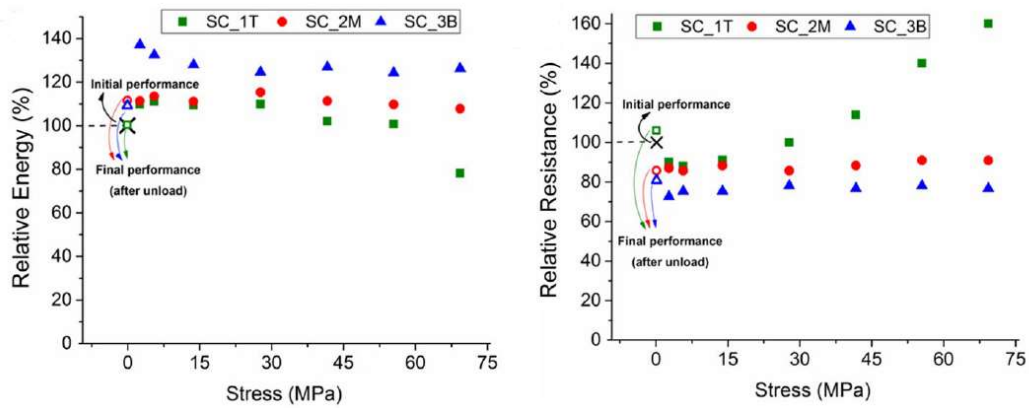


(fig. 28): comparación de módulos [12]

Los resultados del experimento fueron comparados con los de un experimento anterior donde se aplicaron fuerzas de flexión sobre una placa sólida de resina epoxi sin condensadores interpuestos (fig. 28). El módulo elástico resultante es prácticamente equivalente en ambos casos. No obstante, se puede observar un desplazamiento inicial de la curva con capas EDLC sensiblemente mayor en el eje de la deformación, indicando que la presencia de estos altera en cierta medida la deformación elástica al permitir un leve desplazamiento de las capas de resina a falta de una unión mecánica entre estas. Esta diferencia de flexión se irá amortiguando conforme la presión aplicada sobre la muestra aumente, haciendo que ambas curvas se aproximen entre sí.

Las mediciones electroquímicas y de impedancia que se realizaron durante el experimento fueron tomadas hasta una tensión de flexionado de $\sigma = 70$ MPa, realizando muestreo cada 10 MPa aplicados.

Por lo general, los cambios observables sobre estas medidas al aumentar el esfuerzo sobre la placa experimental son pequeños comparados con la gran deformación de la propia muestra, llegando a ser superior a los 30mm.



(fig. 29): alteración de las propiedades electroquímicas [12]

La figura 29 nos muestra cómo se ven alteradas las propiedades electroquímicas ante la presión aplicada durante la deformación. Cada gráfica tiene tres grupos de puntos correspondientes a los distintos condensadores introducidos en la muestra, el azul correspondiente al condensador introducido en la parte inferior de la placa, demuestra un incremento inicial de su energía en el primer punto de muestreo, debido a la sobrecompactación del condensador ante la presión aplicada, resultando en un aumento de la capacidad dada por una infiltración mejorada del electrolito de polímero en el electrodo poroso de fibras de nanotubos.

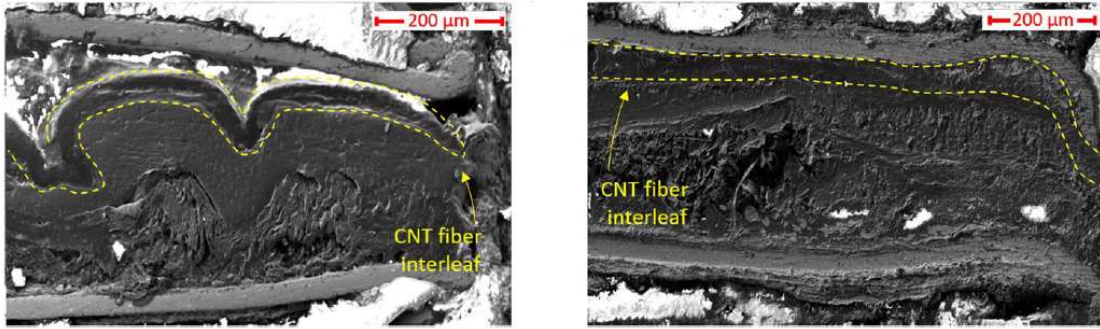
Este incremento se reducirá ligeramente hasta permanecer en torno a un 130% relativo a su valor inicial, el resto de los condensadores muestran un incremento de su densidad de energía relativa, aunque este aumento es significativamente menor que el de la muestra inferior.

El cambio más significativo respecto a la densidad de energía se produce en el condensador superior que experimenta un decremento de un 22% desde su valor inicial, esta variación se produce de manera simultánea a un incremento del 60% de su resistencia interna equivalente, señalándola como una posible causa de la pérdida de rendimiento electroquímico.

El aumento de las resistencias equivalentes es debido a las pérdidas de contacto locales entre electrodo y dieléctrico, incrementando la resistencia de contacto entre ellos a razón de la apertura transversal del dispositivo y consecuente separación de sus partes que lo componen. Tras la aplicación de la fuerza el componente regresa a su forma natural gracias a su propiedad elástica. Los puntos de medición tras la deformación y recuperación están distinguidos de los demás por un punto sin relleno en el origen 0 de la presión aplicada.

Las placas que no se encontraban en la posición superior se localizan ahora en un punto de menor resistencia que al origen del experimento, señalando una mejora permanente del contacto de los componentes, mientras que el supercondensador situado en la parte superior de la muestra ha disminuido casi hasta su punto de origen, quedándose con un valor final ligeramente mayor.

Estos resultados sugieren que la mayoría de las pérdidas por contacto son reversibles y no alteran de manera permanente las propiedades de los condensadores.



(fig. 30): radiografía final de sección transversal de los condensadores superior e inferior respectivamente [12]

3.5 Mejora de las propiedades mecánicas

Si bien el almacenamiento de energía eléctrica es el objetivo del experimento, se ha de tener en cuenta que las alteraciones sobre la resistencia del material son una parte esencial de los supercondensadores estructurales, por lo que deberemos encontrar el punto medio que maximice las prestaciones del elemento de acumulación y de resistencia mecánica.

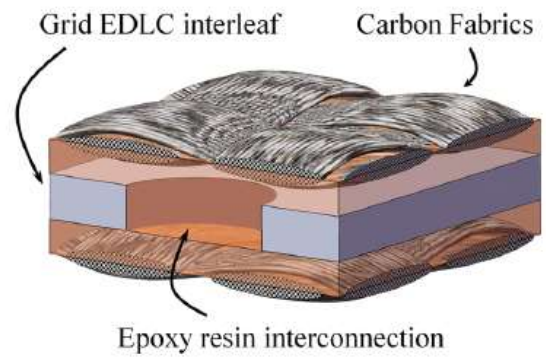
En este punto el conjunto de supercondensador se puede contemplar como un defecto interno del material que resiste la deformación, reduciendo considerablemente sus propiedades de resistencia.

El interlaminado de polímero blando provoca deslizamientos entre las placas conductoras, anulando los esfuerzos cortantes en parte del material, por lo que se hace necesario un diseño estructural que mitigue tales reducciones de las propiedades interlaminares. Aprovechando la estructura simple y el método de fabricación se puede alterar fácilmente el componente interno y que este no impida en parte el esfuerzo estructural.

Con este objetivo se realizó una nueva muestra de supercondensador estructural, en el que se produjo un entrelazado del EDLC con una estructura en forma de rejilla que en la fabricación deriva a una estructura compuesta con una lámina adyacente que se unió mecánicamente con columnas epoxi rígidas.

Este simple método de unión asegura una transmisión eficiente de esfuerzos cortantes a través de las vigas de resina sólida. Sin embargo, esto es a costa de una reducción del área útil del material conductor, reduciendo de manera proporcional las propiedades capacitivas del acumulador.

En las imágenes que vamos a ver realizadas en el laboratorio, veremos el ejemplo de un supercondensador de cuya área (sin orificios) ocupa 32cm^2 a la que se le han practicado un total de 18 orificios de 1cm de diámetro, resultando en un total de 17.86cm^2 (aproximadamente un 56% de su área inicial).



(fig. 31): supercondensador estructural perforado [12]

4 Trabajo de laboratorio

4.1 fabricación y prueba de supercondensadores

El siguiente paso necesario para nuestra investigación debía ser en la dirección de un supercondensador capaz de corregir las ventanas temporales de potencia nula en el puente de corriente continua, y que a su vez fuera posible su integración en el fuselaje del avión en forma de materia estructural.

El dispositivo podía implementarse como parte de la estructura, sustituyendo elementos de resistencia mecánica del propio avión, aportando con un peso ligero la misma función para la infraestructura, y paralelamente conformar el acumulador de energía que necesitamos.

Por lo tanto, a partir de este punto se inició (realmente ya estaba siendo llevada a cabo) una investigación que ocuparía la mayor parte del proyecto, esta se basaba en la búsqueda de un nuevo polímero electrolítico capaz de comportarse como un aislante eléctrico blando y con él fabricar un supercondensador cuyas características electroquímicas fueran superiores a las comerciales.

Para poder formar parte de este proyecto hube de firmar una cláusula de confidencialidad, por lo que parte de los datos relacionados con el material y los procesos tomados deberán ser omitidos en respeto al acuerdo y para evitar en el peor de los casos medidas legales.

La primera parte de la investigación de la que pude formar parte consistía en la fabricación en el laboratorio de condensadores y su posterior análisis. Este estudio estaba dirigido por la jefa de proyectos Moumita Rana, y en todo momento mi trabajo se encontraba bajo la supervisión de la encargada del laboratorio de electroquímica, Chen Chen.

La primera parte de laboratorio consistió en el análisis de las propiedades de distintos compuestos logrados en el laboratorio; cada uno se vertía en estado líquido sobre una placa y se distribuía de manera uniforme sobre ella para posterior reposo y gelificación. Pasadas unas 48 horas, el compuesto se retiraba y se almacenaba para su observación.

El material empleado para conformar los electrodos era un tejido oscuro y ligero de nanotubos de carbono fabricado por otra sección del laboratorio, este material posee unas capacidades conductivas superiores a las de los materiales CNT comerciales, antes de utilizar este material era necesario provocar en su superficie una oxidación del material para mejorar sus prestaciones, esto se hacía introduciéndolo durante tres minutos en una cámara de luz ultravioleta.

Una vez acabado el proceso de oxidación lo llevábamos a otra parte del laboratorio junto con el dieléctrico experimental, era importante que el seccionado de los componentes fuera uniforme para que todas las muestras contaran con la misma área activa para el estudio de sus propiedades relativas al área.

El método empleado para la obtención de los componentes de la matriz era la perforación de esta con un elemento cilíndrico cortante de medidas normalizadas. El material se posiciona sobre una plataforma de PVC y se golpea el seccionador sobre esta con un martillo hasta asegurar que se ha realizado un corte limpio.

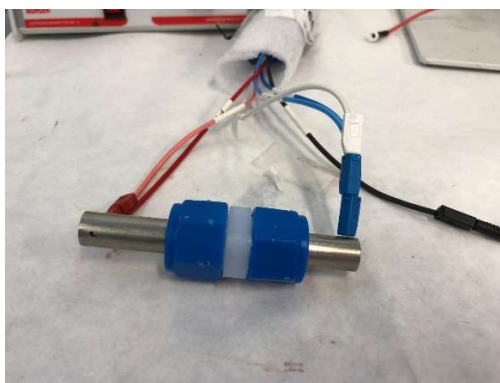
En todo momento se emplearon simultáneamente dos elementos de corte simultáneamente, uno de diámetro equivalente a 1cm y otro cuya sección era ligeramente superior, esto era para cortar con cada uno los distintos elementos; en el caso del tejido de nanotubos de carbono se

utilizaría la más pequeña. Gracias a esto se facilitaba el montaje de la muestra y se tenía más seguridad de que no contactaran ambos electrodos.

El resultado de la unión era un pequeño condensador de área útil igual a $0.25\pi \text{ cm}^2$ (figura 32).



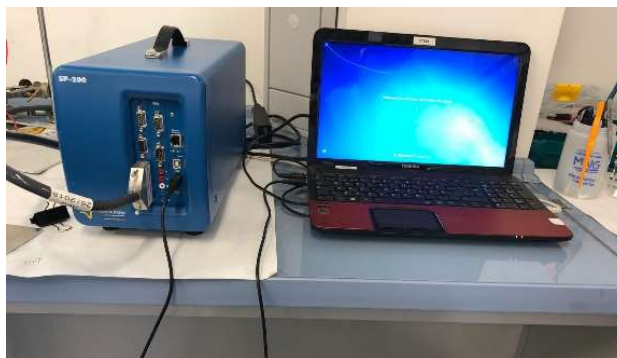
(fig. 32): muestra de condensador experimental para mediciones del dieléctrico



(fig. 33): probeta para medida de impedancia

Las muestras son introducidas en una probeta metálica diseñada para el sondeo de materiales capacitivos, una vez introducida se aplicaba presión para asegurar el mayor contacto posible entre las partes que lo componen y reducir la resistencia de contacto a un valor mínimo y así evitar su interferencia.

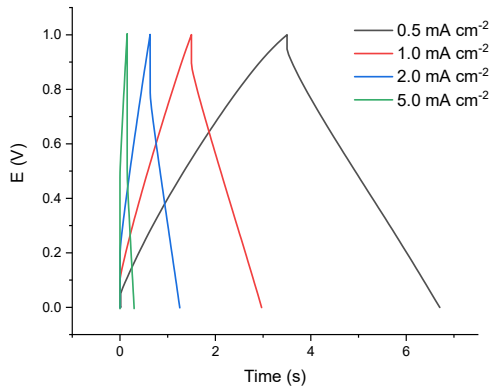
La sonda se conecta a un medidor de impedancia electroquímico, de alta precisión pensado para investigaciones del orden de 500mA y con capacidad de medir intensidades del orden de 100 femto Amperios



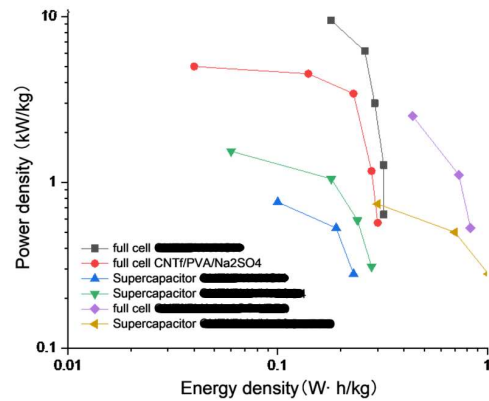
(fig. 34): Potenciostato-Galvanostato SP-200 BioLogic

Este aparato de medida realiza pruebas de carga y descarga del condensador a distintas intensidades un número repetido de veces y las superpone para obtener el comportamiento medio de la muestra, con los datos obtenidos es capaz de completar gráficas de densidad de potencia y energía, además de diagramas de Bode.

Los resultados de distintos materiales se comparan y se estudia sus propiedades con tal de buscar el que pueda aportar una mejor curva de caracterización.



(fig. 35): Curva de carga y descarga CNTf/PVA/NaSO₄

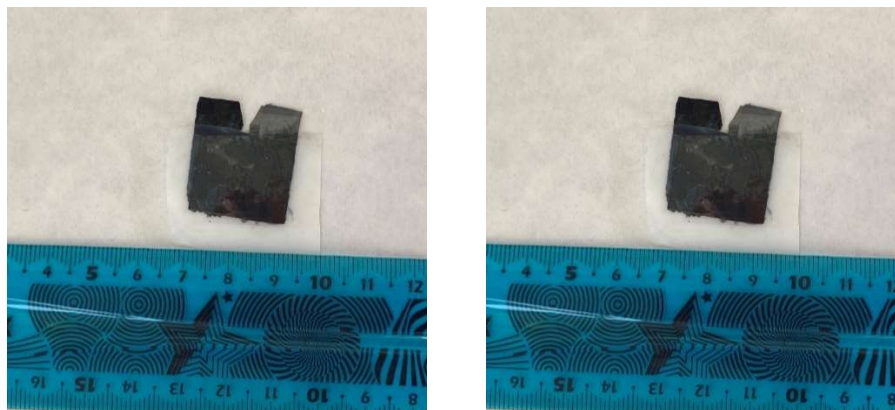


(fig. 36): comparación de distintos materiales

La creación y prueba de distintos compuestos duraría varias semanas para finalmente acabar con una selección de tres distintos tipos de disoluciones válidas.

A partir de este punto la investigación continuaría en la misma dirección pero con un enfoque distinto; en vez de conformar condensadores circulares para la sonda, comenzamos la fabricación de pequeños condensadores experimentales y funcionales.

Los condensadores, de corte rectangular, tienen un tamaño de 2x2cm de área útil, sus electrodos están separados y sobresalen por la parte superior para facilitar su conexión a los aparatos de medida, además de estar protegidos por una lámina de acrílico que protege los tejidos de nanotubos de posibles impurezas y del contacto con la mano.



(fig. 37): supercondensadores experimentales

Durante el proceso experimental de estos condensadores se realizaron distintos tipos de pruebas, estudiando su comportamiento con mayor precisión para diferentes condiciones de trabajo.

Para cada material se debían fabricar varios de estos condensadores que estudiarían su caracterización a varios niveles. Una de las pruebas más importantes era la del grado de compresión, cada supercondensador se transportaba a una prensa hidráulica manual y se le sometía a un nivel de presión distinto durante un determinado tiempo.

Las tablas correspondientes a la experimentación reunían curvas de carga y descarga para cada presión de compactación y tiempo de aplicación e incluían diferentes intensidades de carga y descarga.

Otro tipo de experimento que se realizó en el laboratorio fue la del grado de humedad, en la cual se realizaban las mismas pruebas que con los experimentos de presión. Esta actividad se realizó en menor medida en comparación con las relacionadas con la presión.

Mayoritariamente se aprovechaban para este experimento aquellos condensadores que hubieran sufrido algún tipo de defecto durante el periodo de pruebas, especialmente si se había producido una perforación del dieléctrico, estos podían “volver a la vida” aumentando su grado de humedad gracias a la naturaleza fluida del dieléctrico.

Durante los siguientes periodos de pruebas en el laboratorio me vi progresivamente menos involucrado conforme los experimentos exigían cada vez un mayor conocimiento en la materia de electroquímica. De tal forma fui relegado a una fase de prueba posterior en la que mi tarea consistía en realizar sencillas pruebas de descarga sobre los condensadores que fueran siendo aprobados en el laboratorio.

Un punto relevante que comentar sobre los supercondensadores fabricados por IMDEA es que, pese a la alta capacidad que poseen estos, la estabilidad de los materiales no permite contener una elevada diferencia de tensión entre sus electrodos, llegando en ciertas ocasiones a ser una tensión máxima no superior a un voltio y medio.

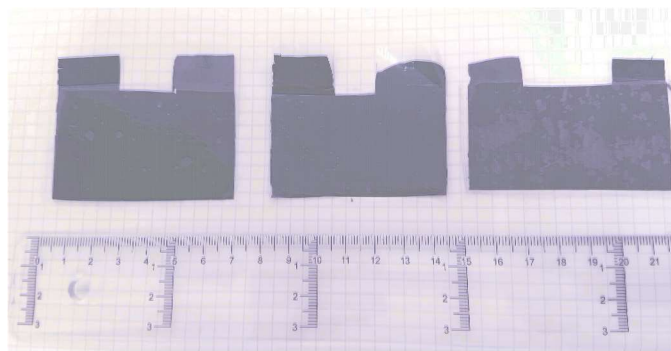
Los límites de tensión son una barrera que inevitablemente van a reducir la cantidad de energía capaz de ser almacenada dentro de los condensadores. La tensión máxima puede aumentarse llevando a cabo una simple unión en serie de diversos condensadores, de tal forma que la tensión máxima final será tantas veces mayor como condensadores hayan sido unidos a la conexión en serie.

Por desgracia esto no nos será útil para el aumento de energía almacenable, ya que conforme se incrementa la conexión en serie y se multiplique la tensión máxima, la capacidad del conjunto se reducirá de igual forma, anulándose la una a la otra $E = \frac{1}{2} QV$

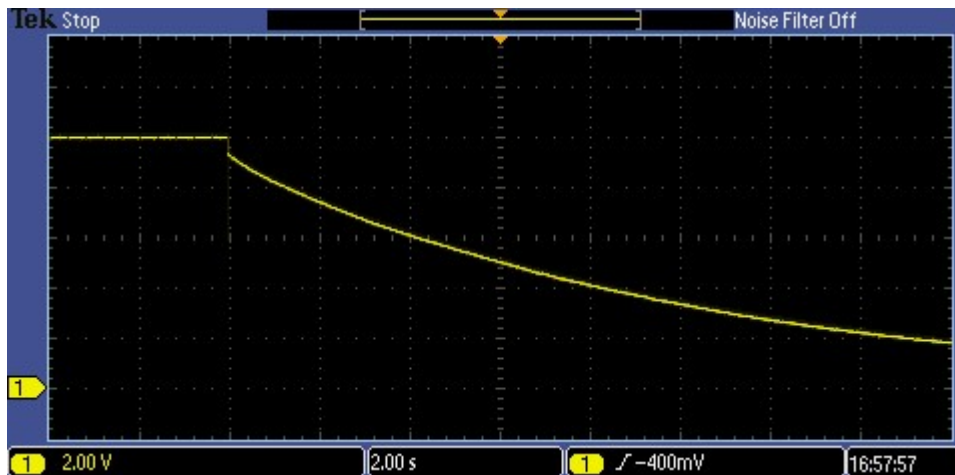
	Capacidad equivalente	Tensión máxima	Intensidad máxima	Potencia máxima	Energía almacenable
Conexión serie	x1/2	x2	=	x2	=
Conexión paralela	x2	=	x2	x2	x2

Esto implica que para el montaje de un condensador funcional de tensión nominal 375V y capacidad 4mF e intensidad 1.33A se tendrá que construir una matriz de conexiones en serie y paralelo especialmente amplia, dependiendo de las características de los condensadores.

Para asegurar el buen funcionamiento de los dispositivos electroquímicos ante una conexión en serie y comprobar su comportamiento, realizamos una sencilla prueba de descarga. El montaje se realizó con tres condensadores funcionales del mismo material electrolítico conectando sus electrodos entre sí aplicando presión para unir las fibras de CNT de la forma más eficiente posible. Los supercondensadores tienen un tamaño superior al tratarse de componentes en fase final de pruebas y su área es de 6x4 cm² la tensión máxima de estos condensadores alcanzan los 3.5V. La prueba se realiza a 10V y 40mA de descarga



(fig. 38): Condensadores no estructurales en fase final

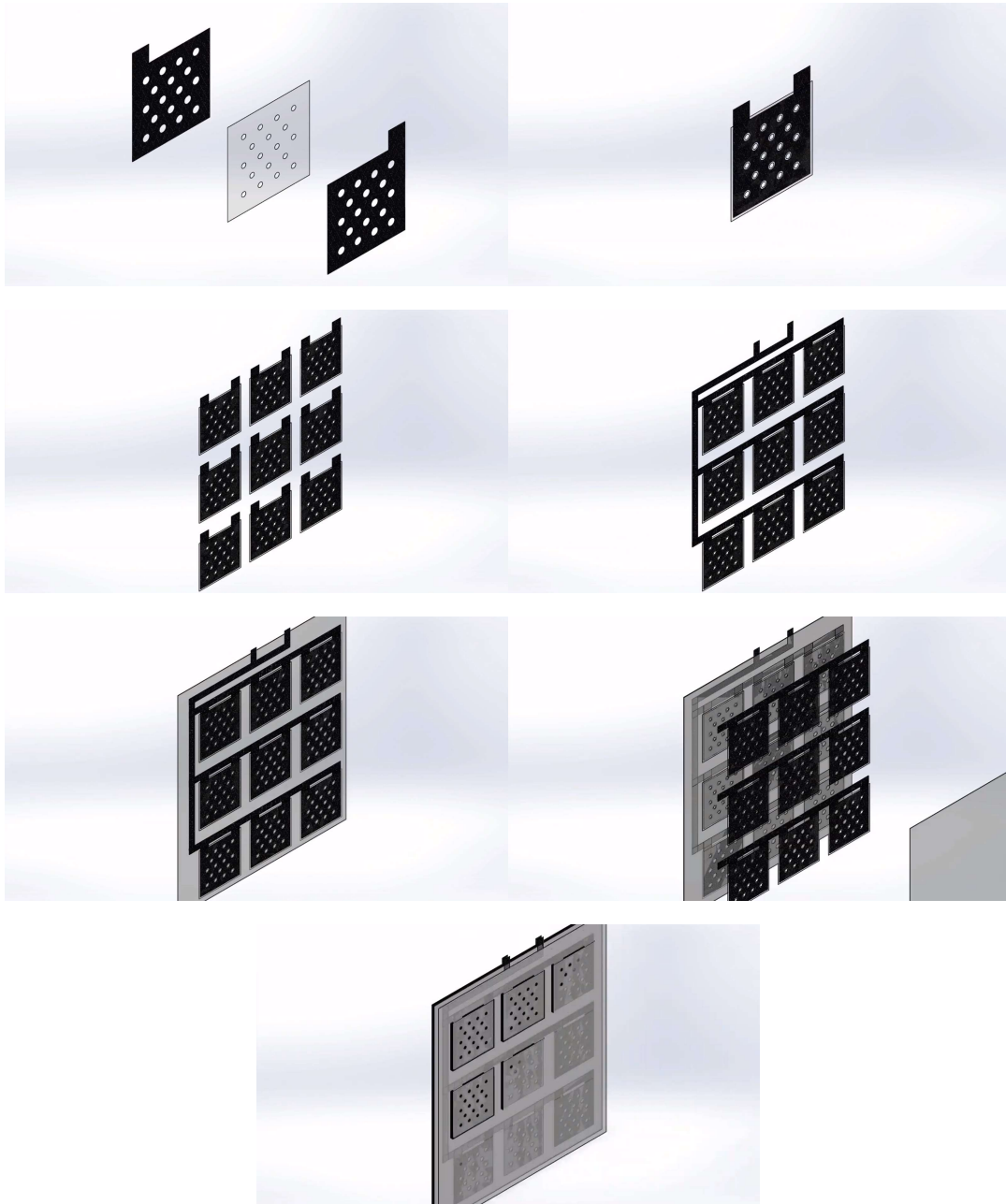


(fig. 39): descarga condensadores en serie 10V, 40mA iniciales

Los resultados parecen ser positivos y presentar un comportamiento normal, y los cálculos sobre el papel indican una capacidad de cada supercondensador equivalente a 96.928mF, y aunque es un valor considerable no es lo bastante eficiente como para sustituir los condensadores comerciales en el modelo del sistema de recuperación de señal del avión.

Teniendo en cuenta los valores de tensión, intensidad máxima y capacidad de estos condensadores, se tendría que realizar una conexión de 110 series de 5 condensadores conectados en paralelo.

El modelado de conexiones se puede ver en una simulación que presenta la batería de supercondensadores estructurales en la fase final de montaje (enlace en bibliografía, 13)



(fig. 40): ensamblaje final supercondensador estructural [13]

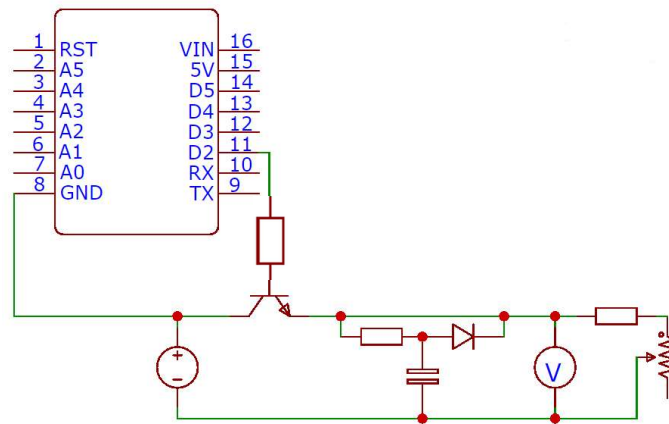
Actualmente la investigación sigue su curso en búsqueda de mejores materiales dieléctricos para mejorar las propiedades de almacenamiento de energía y tensión máxima.

La última fase de mi proyecto consistió en la fabricación de un dispositivo (demonstrator) de fácil uso que realizara las pruebas de carga y descarga a altas tensiones e intensidades y tomara los datos necesarios con la mayor precisión posible.

El dispositivo debía ser capaz de trabajar dentro de un margen de tensiones de entre 3 y 30 V y contar con intensidades de carga nominales de entre 100mA y 2A. Con este propósito la opción más sencilla y eficiente es realizar el montaje de un sistema, similar al que fue llevado a cabo para la prueba de pérdidas en la línea, y a una escala menor.

A diferencia del puente de corriente directa que simulaba las ventanas de tiempo en el avión, aquí la carga simulada varía dependiendo de las exigencias que busquen en el supercondensador experimental, así que se tendrá que procurar una forma de modificar la corriente de descarga.

Para conseguir esto la mejor forma es a través de resistencias variables de alta potencia, que modifiquen la resistencia vista puntualmente por el supercondensador y con ello la constante de tiempo de descarga de este. Los potenciómetros deben ser capaces de, en su punto de menor resistencia, disipar hasta 60W de potencia, lo que implicará un sistema de refrigeración acoplado que evite excesos en la temperatura de los contactos.



(fig. 41): modelo simplificado demostrador

Para llevar a cabo el proyecto será necesario en principio una fuente cuya tensión de salida comprenda de los 0 a los 30 voltios y pueda aportar un mínimo de 60W a la carga, un microprocesador que accione un transistor de manera similar a la que servía para el simulador de pérdidas, la resistencia de carga del condensador puede ser un potenciómetro digital (que se reduzca hasta cortocircuitarse conforme la carga del condensador se complete), o se puede emplear una simple resistencia con un transistor acoplado que la cortocircuite cuando la carga haya sido mayormente completada, para asegurar que la tensión de puente y del condensador sean la misma antes de que el transistor acabe.

Para simular la carga emplearemos potenciómetros de alta potencia que disipen la energía, con ellos se ajustará la intensidad de descarga gracias a una conexión en serie entre dos

resistencias, la primera de hasta 470Ω (que en su valor máximo limita la corriente a 63mA, inferior a los 100mA de corriente mínima que se exigían), el segundo potenciómetro que se emplea llega a 10Ω de impedancia máxima. El motivo por el que empleamos el segundo potenciómetro es para poder realizar ajustes de intensidad con mayor precisión al tener más sensibilidad.

La alimentación consiste en una fuente de laboratorio integrada dentro del conjunto generador-disipador. La mejor opción que se dispuso en calidad de precio, tamaño y peso fue la de unas fuentes que disponen hasta 30V y 3A a su salida, estas incluían una placa de PCB con indicaciones y todos los componentes necesarios sueltos. Adicionalmente se requería un transformador que transformara la tensión de red a 24VAC

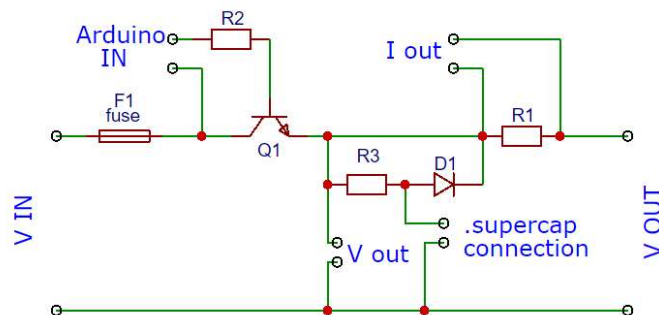
El montaje completo de la primera fuente se completó en menos de una hora, y en sus primeros 2 minutos de funcionamiento presentó una tensión y una intensidad estables hasta que, sin motivo aparente, uno de sus componentes se calentó hasta producir una explosión, dejando vigente la cuestionable calidad del producto. Tras un fallido intento de sustitución de los componentes averiados, procedimos a completar la segunda placa PCB, dando la anterior por averiada.

La segunda y última fuente que se completó presentó problemas en su primera fase de pruebas, forzando a su intercambio y prueba de varios de sus componentes hasta que finalmente se logró una estabilidad térmica, que fue mejorada completando finalmente la fuente con distintos disipadores de calor ya por miedo a otro contratiempo.

Además, con intención de mejorar su precisión sustituimos el potenciómetro destinado a ajustar la tensión de salida por uno de igual valor, pero de hasta 10 vueltas, reduciendo la incertidumbre debida al paso considerablemente.

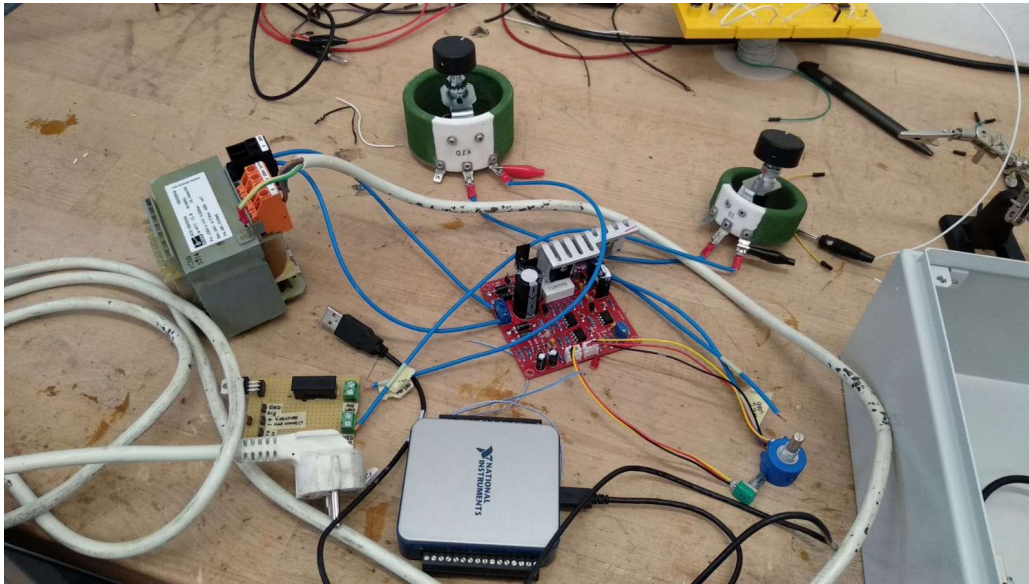
Una vez con el conjunto fuente y carga completado, lo único que resta es el método para tomar medidas y accionar las descargas del condensador, con este propósito empleamos un DAQ (Data Acquisition) USB, cuya función es la de recolección de datos de tensión (en bornas de una pequeña resistencia dispuesta para la medida de corriente) por sus entradas analógicas. Los datos que recoja se presentarán en relación al tiempo en una gráfica que servirá para la validación y caracterización cualitativa de los supercondensadores previo a su montaje final.

Por último, como centro neurálgico de todo el conjunto, tenemos el sencillo diseño de una pequeña placa PCB encargada de las interrupciones, mediciones y la cual une los distintos elementos además de añadir elementos de protección adicional.



(fig. 42): placa de control y esquemático.

Este sencillo sistema, de fácil uso y transporte, hace accesible la medición de manera aproximada de las propiedades de aquellos condensadores de alta carga que otros dispositivos de medida no son capaces de valorar. Además su uso es intuitivo y facilita la toma de datos en un ordenador o dispositivo externo



(fig. 43): interior del demostrador

El siguiente y último paso consistirá en la inclusión de todos los componentes en una caja metálica que provea de las medidas de tensión y corriente de descarga de manera sencilla. El objetivo es conseguir un sistema compacto al acceso del personal del laboratorio de electroquímica que les permita realizar las medidas necesarias para el estudio y agilizar así el proceso de construcción de las baterías de supercondensadores estructurales.

5 Estudio económico

El proyecto ha costado en total 2000 euros aproximadamente.

Lo podemos dividir en:

MAterial electrónica	Material nuevos condensadores	Personal técnico	Gastos indirectos
500 €	800 euros	300 euros	500 euros

En el material de electrónica incluye la compra de todos los componentes y dispositivos de medida. El material de los nuevos condensadores son láminas de CNTs fabricaos en el reactor de IMDEA. En el personal técnico el tiempo empleado por los técnicos/doctorandos para realizar las infusiones de la resina en las láminas de CNTs. Como gastos indirectos, todos los medios que has dispuesto para realizar el proyecto en IMDEA Materiales, incluyendo la electricidad consumida, el pago del seguro, los portátiles usados, etc.

Respecto a la viabilidad del proceso, el proyecto es viable, falta escalarlo a decenas de condensadores puestos en paralelo/serie, dependiendo de la aplicación. Esto puede costar, juntando horas de personal, junto con el material electrónico, unos 20000 euros.

Una vez ya fabricados, pueden seguirse dos caminos: podrán venderse los derechos de patente a una empresa o construir una spin-off para fabricarlos de forma autónoma.

5 conclusiones

5.1 metodología y resultados

En este trabajo se ha conseguido recuperar las pérdidas de señal dadas dentro del sistema de distribución eléctrica de un modelo de avión comercial. Con la finalidad de lograr este objetivo en primera instancia hubimos de recrear tal sistema en el laboratorio basándonos en los datos proporcionados por la respectiva compañía aeronáutica.

Este montaje imita la parte del conjunto generación-distribución que comunica la energía a través de un puente de alta potencia. En nuestra reproducción, la ausencia de señal se lograba provocar gracias al diseño de un sistema de control que interrumpía la conexión privando de potencia a la carga durante breves periodos de tiempo.

La cobertura corrección de esta señal interrumpida se logró realizar con éxito acoplado al circuito de potencia una batería de condensadores diseñados para acumular energía durante el funcionamiento nominal de la generación.

Tras verificar la eficacia del conjunto de acumuladores con el fin de alimentar la carga en los valles de potencia, el proyecto se encaminó en una nueva dirección. Con la intención de sustituir los condensadores comerciales iniciamos la fabricación de nuevos condensadores basados en capas de CNT, para ello experimentamos enfundando distintos dieléctricos entre capas conductoras de nanotubos de carbono, a los cuales les realizábamos medidas eléctricas bajo distintas condiciones de trabajo, corriente y presión de compactación.

Los nuevos condensadores atravesaban un proceso de endurecimiento en el que se infundían con una capa de resina epoxi. Esta capa al solidificar otorga propiedades estructurales provocando escasas variaciones en las características eléctricas de los condensadores. Las propiedades mecánicas de los condensadores resultantes son medidas en el laboratorio gracias a experimentos de compresión y flexión del material.

La infusión fue realizada mediante un proceso conocido por el nombre de VARI (Vacuum Asisted Resin Infusion), este se realiza introduciendo el condensador en una cavidad plástica donde se aplica vacío extrayendo el aire con una bomba, una vez alcanzada la presión mínima se inyecta la resina que cubre la cavidad casi sin porosidades gracias al vacío.

El enfoque de la investigación era la de poder implantar el sistema de rectificación dentro del propio chasis del avión aprovechando sus propiedades estructurales y su reducido peso, contribuyendo de manera multifuncional al diseño del aeroplano.

La investigación llegada a un punto requirió de un método para realizar medidas a condensadores de alta capacidad con tal de lograr escalar los supercondensadores con la perspectiva futura de formalizar un conjunto de baterías a la altura de los condensadores comerciales del inicio del proyecto.

Estas medidas fueron realizadas gracias al diseño de un analizador de potencia que monitoriza por ordenador las cargas y descargas de los conjuntos de condensadores sobre un grupo de resistencias. Su funcionamiento es similar al montaje realizado al comienzo del proyecto con la diferencia de que este es capaz de realizar medidas de mayor precisión a menor potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gago Burón, Gerardo Miguel (Junio 2016). *Sistema Eléctrico de los aviones*. Trabajo de fin de grado de ingeniería eléctrica. Universidad de Valladolid.

- [2] Asun Cardona (18/5/2016). *Evolución del transporte aéreo, una historia de progreso*. www.sertrans.es

- [3] Ian Stephens (20/5/2014). *Boeing 747*. www.aircraft-info.net

- [4] *Sistema eléctrico del avión* (16/12/2016). www.takeoffbriefing.com

- [5] Aurelio García Cerrada, Pablo García González, Mario Rizo Morente. *Tema 1: convertidores CA-CC*. Aplicación de electrónica de potencia. Universidad Pontificia de Comillas. Curso 2018-2019

- [6] Frank Mecafenix (2018). *El diodo ¿qué es y para qué sirve?*. Teoría del diodo. www.fluke.es

- [7] Jose Gabriel Ramiro Leo. *Fundamentos de dispositivos electrónicos semiconductores, la unión P-N*. Asignatura de electrónica analógica. Universidad de Cádiz. Curso 2007-2008

- [8] Lino Mayorga (2014). *Rectificadores controlados*. www.slideplayer.es

- [9] Christiansen, Donald; Alexander, Charles K. (2005); *Standard Handbook of Electrical Engineering (5th ed.)*.

- [10] *Funcionamiento de los tiristores*. www.electronic-tutorials.ws

- [11] *Fallas y soluciones en los diodos* (2013). www.adselectronic.blogspot.es

- [12] Evgeny Senokos, Yunfu Ou, Juan Jose Torres, Federico Sket, Carlos González, Rebeca Marcilla and Juan J. Vilatela (2018 IMDEA). *Energy storage in structural composites by introducing CNT fiber/polymer electrolyte interleaves*. Scientific Reports volume 8, Article number: 3407. 21-02-2018
- [13] Felipe Manchado Gonzalez (6/7/2019). *Structural supercapacitor assembly IMDEA*. www.youtube.es