



universidad
de león



Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Trabajo de Fin de Máster

ESTUDIO TÉCNICO DE SUPERCONDENSADORES PARA
ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SAI

TECHNICAL STUDY OF SUPERCAPACITORS FOR UPS ENERGY
STORE

Autor: Sofía González Carranza
Tutor: Natalia Prieto Fernández

(Diciembre, 2021)

Sofía González Carranza

UNIVERSIDAD DE LEÓN
Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y
Aeroespacial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
Trabajo de Fin de Máster

ALUMNO: Sofía González Carranza

TUTOR: Natalia Prieto Fernández

TÍTULO: Estudio técnico de supercondensadores para almacenamiento de energía en SAI

TITLE: Technical study of supercapacitors for UPS energy storage

CONVOCATORIA: Diciembre, 2021

RESUMEN:

Las baterías eléctricas son dispositivos que almacenan la energía en forma de energía química. Constan de tres elementos básicos siempre presentes: terminal positivo o cátodo, un terminal negativo o ánodo, y un electrolito. Los principales tipos de baterías eléctricas son de plomo-ácido, de ion-litio, de níquel-cadmio, de níquel-metal hidruro y de tipo zebra.

Los supercondensadores son dispositivos que almacenan la energía en forma de campo eléctrico. Destacan por sus características de gran capacitancia, su capacidad de entregar y absorber grandes picos de potencia. Los principales tipos de supercondensadores son de doble capa eléctrica o EDLC, pseudocondensadores o condensadores híbridos.

Se lleva a cabo un estudio técnico para la sustitución de una batería de ácido-plomo en un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) presente en la Universidad de León. Se llevan a cabo tres diseños diferentes a partir de los cálculos realizados de las condiciones iniciales en que se encuentra el SAI. El primero de los diseños asocia supercondensadores en serie y en paralelo. El segundo de los diseños asocia supercondensadores en paralelo junto con un convertidor de CC/CC de tipo elevador de tensión. El tercer y último diseño busca una batería comercial de supercondensadores que cumpla con los requisitos del diseño.

Una vez llevado a cabo los pertinentes estudios de los tres diseños diferentes, se descartan el primero diseño por motivos económicos y el segundo por motivos técnicos, quedando como diseño final el tercer modelo.

ABSTRACT:

Electric batteries are devices that store energy in the form of chemical energy. They consist of three basic elements that are always present a positive terminal or cathode, a negative terminal or anode, and an electrolyte. The main types of electric batteries are lead-acid, lithium-ion, nickel-cadmium, nickel-metal hydride, and zebra batteries. Supercapacitors are devices that store energy in the form of an electric field. They are notable for their high capacitance characteristics, their ability to deliver and absorb large power peaks. The main types of supercapacitors are electrical double layer capacitors or EDLCs, pseudocapacitors or hybrid capacitors.

A technical study is carried out for the replacement of a lead-acid battery in an uninterruptible power supply (UPS) at the University of León. Three different designs

are carried out based on the calculations of the initial conditions of the UPS. The first design associates supercapacitors in series and in parallel. The second design associates supercapacitors in parallel with a step-up type DC/DC converter. The third and final design seeks a commercial supercapacitor battery that meets the design requirements. Once the relevant studies of the three different designs have been carried out, the first design is discarded for economic reasons and the second for technical reasons, leaving the third model as the final design.

Palabras clave: Supercondensador, almacenamiento de energía, batería, modelado

Firma del alumno:

VºBº Tutor/es:

Resumen

En la actualidad, nos encontramos inmersos en una era donde la energía es algo fundamental e imprescindible para el ser humano, aunque las necesidades de almacenamiento de energía eléctrica han variado significativamente en cuanto a la propia escala de almacenamiento.

Los principales modelos de almacenamiento de energía que se recogen en el presente Trabajo de Fin de Máster son las baterías eléctricas y los supercondensadores.

Las baterías eléctricas son dispositivos que almacenan la energía en forma de energía química. Constan de tres elementos básicos que están presentes en todas las variedades distintas de baterías que puedan existir. De esta manera se cuenta con un terminal positivo o cátodo, un terminal negativo o ánodo, y un electrolito. Los principales tipos de baterías eléctricas son de plomo-ácido, de ion-litio, de níquel-cadmio, de níquel-metal hidruro y de tipo zebra.

Los supercondensadores son dispositivos que almacenan la energía en forma de campo eléctrico. Destacan por sus características de gran capacitancia, su capacidad de entregar y absorber grandes picos de potencia. Los principales tipos de supercondensadores son de doble capa eléctrica o EDLC, pseudocondensadores o condensadores híbridos.

Por otra parte, se lleva a cabo un estudio técnico para la sustitución de una batería de ácido-plomo en un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) presente en la Universidad de León. Esta sustitución va a ser realizada con una tecnología diferente de almacenamiento de energía, los supercondensadores. Se llevan a cabo tres diseños diferentes a partir de los cálculos realizados de las condiciones iniciales en que se encuentra el SAI. El primero de los diseños asocia supercondensadores en serie y en paralelo. El segundo de los diseños asocia supercondensadores en paralelo junto con un convertidor de CC/CC de tipo elevador de tensión. El tercer y último diseño busca una batería comercial de supercondensadores que cumpla con los requisitos del diseño.

Una vez llevado a cabo los pertinentes estudios de los tres diseños diferentes, se descartan el primero diseño por motivos económicos y el segundo por motivos técnicos, quedando como diseño final el tercer modelo. Así, se presenta un modelado con dos baterías de supercondensadores comerciales asociadas en paralelo que cumplen con los requisitos de capacitancia y de tensión, aunque con un elevado coste, lo que ha supuesto que no se haya podido implementar prácticamente.

Abstract

Nowadays, we are immersed in an era in which energy is something fundamental and essential for human beings, although the needs for electrical energy storage have varied significantly in terms of the scale of storage itself.

The main energy storage models covered in this master's thesis are electric batteries and supercapacitors.

Electric batteries are devices that store energy in the form of chemical energy. They consist of three basic elements that are present in all the different varieties of batteries that may exist. Thus, there is a positive terminal or cathode, a negative terminal or anode, and an electrolyte. The main types of electric batteries are lead-acid, lithium-ion, nickel-cadmium, nickel-metal hydride, and zebra-type.

Supercapacitors are devices that store energy in the form of an electric field. They are notable for their high capacitance characteristics, their ability to deliver and absorb large power peaks. The main types of supercapacitors are electrical double layer capacitors or EDLCs, pseudocapacitors or hybrid capacitors.

On the other hand, a technical study is being carried out for the replacement of a lead-acid battery in an uninterruptible power supply (UPS) at the University of León. This replacement will be carried out with a different energy storage technology, the supercapacitors. Three different designs are carried out based on the calculations of the initial conditions of the UPS. The first design associates supercapacitors in series and in parallel. The second design associates supercapacitors in parallel with a step-up type DC/DC converter. The third and final design seeks a commercial supercapacitor battery that meets the design requirements.

Once the relevant studies of the three different designs have been carried out, the first design is discarded for economic reasons and the second for technical reasons, leaving the third model as the final design. Thus, a model is presented with two commercial supercapacitor batteries associated in parallel that meet the capacitance and voltage requirements, although at a high cost, which has meant that it has not been possible to implement it practically.

Índice de contenidos

Resumen.....	III
Abstract.....	V
Índice de contenidos	VI
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas	XI
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	2
3. Estado del arte.....	3
3.1. BATERÍAS CONVENCIONALES	3
3.1.1. INTRODUCCIÓN A LAS BATERÍAS	3
3.1.2. DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO	4
3.1.2.1. MODELADO DE UNA BATERÍA	5
3.1.3. ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA BATERÍA	7
3.1.4. TIPOS DE BATERÍAS MÁS COMUNES.....	7
3.1.4.1. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.....	10
3.1.4.2. BATERÍAS DE ION-LITIO	12
3.1.4.3. BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO (NiCd).....	14
3.1.4.4. BATERÍAS DE NÍQUEL-METAL HIDRURO (NiMH).....	16
3.1.4.5. BATERÍAS TIPO ZEBRA.....	18
3.2. SUPERCONDENSADORES.....	20
3.2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SUPERCONDENSADORES	20
3.2.2. DEFINICIÓN	20
3.2.3. ESTRUCTURA INTERNA DE UN SUPERCONDENSADOR	21
3.2.3.1. MATERIALES CON LOS QUE SE REALIZA EL ELECTRODO DE UN SUPERCONDENSADOR.....	22

A.	ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS DE CARBONO	23
B.	ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS POR ÓXIDOS METÁLICOS.....	24
C.	ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS POR POLÍMEROS CONDUCTORES.....	25
3.2.3.2.	MATERIALES CON LOS QUE SE REALIZA EL ELECTROLITO DEL SUPERCONDENSADOR.....	27
A.	ELECTROLITOS ACUOSOS.....	27
B.	ELECTROLITOS ORGÁNICOS.....	28
3.2.4.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN SUPERCONDENSADOR.....	29
3.2.5.	APLICACIONES DE LOS SUPERCONDENSADORES.....	30
3.2.6.	SUPERCONDENSADORES VS BATERÍAS CONVENCIONALES: CO-LIVING	35
3.2.7.	SUPERCONDENSADORES ELÉCTRICOS DE DOBLE CAPA (EDLC)	38
3.2.8.	PSEUDOCONDENSADORES O CONDENSADORES FARÁDICOS.....	40
3.2.9.	SUPERCONDENSADORES HÍBRIDOS.....	43
4.	Planteamiento de la problemática / Modelado del sistema solución.....	47
4.1.	INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN INICIAL.....	47
4.2.	DISEÑO DEL SISTEMA.....	50
4.2.1.	MODELADO DE COMPONENTES.....	50
4.2.1.1.	CÁLCULOS.....	50
4.2.1.2.	POSIBLES DISEÑOS A IMPLEMENTAR.....	55
4.2.1.3.	ELECCIÓN DE ELEMENTOS COMERCIALES.....	58
4.2.2.	ELECCIÓN DEL DISEÑO.....	72

5. Conclusiones (y recomendaciones futuras)	73
6. Referencias bibliográficas	75

Índice de figuras

Figura 3.1. Pila de Volta (Fuente [4]).....	4
Figura 3.2. Esquema de los componentes de una batería (Fuente [10]).....	7
Figura 3.3. Esquema de una batería de Plomo-Ácido (Fuente [11])	8
Figura 3.4. Esquema de la carga y la descarga de una batería de iones de Litio (Fuente [12]).....	9
Figura 3.5. Batería de Plomo-Ácido (Fuente [13])	11
Figura 3.6. Principio de funcionamiento de una batería de Ion-Litio (Fuente [14])	13
Figura 3.7. Batería sellada de Níquel-Cadmio (Fuente [16])	14
Figura 3.8. Baterías industriales de Níquel-Cadmio (Fuente [17]).....	15
Figura 3.9. Batería de Níquel-Metal Hidruro (NiMH) (Fuente [18])	17
Figura 3.10. Comparación de potencia específica de baterías convencionales (Fuente [19]).....	18
Figura 3.11 Imagen de una batería ZEBRA (Fuente [19]).....	19
Figura 3.12. Esquema de las partes de un supercondensador (Fuente [21]).....	21
Figura 3.13. Esquema del concepto básico de funcionamiento de un supercondensador (Fuente [9])	29
Figura 3.14. Flujo de electricidad en la aplicación de un sistema Sistras (Fuente [9])	31
Figura 3.15. Representación un sistema Sistras MES (Fuente [9]).....	32
Figura 3.16. Representación un sistema Sistras HES Independet Concept (Fuente [9])	34
Figura 3.17. Gráfico de la energía específica y potencia específica de diferentes dispositivos de almacenamiento de energía (Fuente [23])	36
Figura 3.18. Principio de funcionamiento de los supercondensadores eléctricos de doble capa EDLC (Fuente [24]).....	38

Figura 3.19. Comportamiento de un supercondensador EDLC durante los procesos de carga y de descarga (Fuente [26])	39
Figura 3.20. Mecánica de la pseudocapacidad en un polímero conductor (Fuente[28]).....	41
Figura 3.21. Principio de funcionamiento de los pseudocondensadores (Fuente [24])	42
Figura 3.22. Principio de funcionamiento de los supercondensadores híbridos (Fuente [24]).....	43
Figura 3.23. Relación DC ESR(%) y Temperatura (°C) (Fuente: [29])	45
Figura 3.24. Relación Capacitancia y Temperatura (°C) (Fuente: [29]).....	46
Figura 4.1. Esquema de conexión del SAI con el PC (Fuente: Elaboración propia)	48
Figura 4.2. Disposición de las baterías en el SAI (Fuente: [30]).....	51
Figura 4.3. Esquema eléctrico del diseño de supercondensadores en serie-paralelo (Fuente: Elaboración propia).....	56
Figura 4.4. Esquema eléctrico del diseño de supercondensadores en paralelo con CC/CC (Fuente: Elaboración propia).....	57
Figura 4.5. Ejemplo de baterías de supercondensadores del fabricante Maxwell (Fuente:[35]).....	58
Figura 4.6. Modelo de supercondensador elegido para el primer diseño (Fuente: [45])	59
Figura 4.7. Representación de la planta de un supercondensador EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: Elaboración propia).....	64
Figura 4.8. Modelo de supercondensador elegido para el segundo diseño (Fuente: [45])	66
Figura 4.9. Modelo de batería de supercondensadores elegido para el tercer diseño (Fuente: [47]).....	69
Figura 4.10. Conexión de las baterías de supercondensadores en paralelo en el tercer diseño (Fuente: Elaboración propia).....	71

Índice de tablas

Tabla 4.1. Características técnicas del supercondensador elegido para el primer diseño EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: [45]).....	60
Tabla 4.2. Características técnicas del supercondensador elegido para el segundo diseño EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: [45]).....	66
Tabla 4.3. Características técnicas supercondensador elegido para el tercer diseño SKELSTART 24V (Fuente: [47]).....	69

1. Introducción

En la época actual, nos encontramos inmersos en una era donde la energía es algo fundamental e imprescindible para el ser humano.

De esta manera, uno de los retos más desmedidos a los que se enfrenta la humanidad tanto para su propio desarrollo como para el cuidado y supervivencia del planeta es, ciertamente, el almacenamiento de energía. Es de vital importancia que se desarrollen nuevos sistemas a través de los cuales se pueda almacenar dicha energía. Este almacenamiento no debe suponer un alto coste y a la vez ser gentil con el medio ambiente, debido a las corrientes relacionadas con la ecología que tanta fuerza están tomando en la sociedad actual [1].

Si consideramos el sistema eléctrico como un sistema logístico, cuyo principal objetivo es garantizar al cliente la entrega del bien o servicio en el plazo y en la forma en que se ha acordado con el cliente, minimizando al máximo cualquier tipo de stock, nos encontramos que a partir del punto de vista de la logística industrial, la industria competente del suministro eléctrico es el paradigma máximo en cuanto a la *“producción bajo demanda”* y al *“equilibrio oferta-demanda”* a tiempo real [2].

Aunque el almacenamiento de la energía eléctrica sea una de las herramientas que cuenta con mayor potencial en el ámbito de la gestión del sistema eléctrico, todavía se presenta como un asunto pendiente en el ámbito de la ciencia y la ingeniería. A día de hoy, el único sistema de almacenamiento de energía a gran escala son las centrales hidráulicas reversibles, o de bombeo [2].

No obstante, en la actualidad las necesidades de almacenamiento de energía eléctrica han variado significativamente en cuanto a la propia escala de almacenamiento. La electrónica de consumo, y su creciente presencia en nuestras vidas, así como la necesidad de encontrar una buena tecnología para las baterías de vehículos eléctricos, han propiciado un desarrollo tecnológico en dicho ámbito, alcanzando importantes hitos en cuanto a la fabricación de baterías altamente eficientes [2].

2. Objetivos

Los objetivos que se persiguen con la realización del presente Trabajo de Fin de Máster son:

- Revisión de carácter teórico acerca de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en forma de baterías convencionales, en cuanto a las diferentes tipologías presentes, su funcionamiento y aplicaciones.
- Revisión de carácter teórico acerca de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en forma de supercondensadores, en cuanto a su origen, su principio de funcionamiento, sus diferentes tipos y principales aplicaciones.
- Comparativa entre el alcance de las baterías y los supercondensadores, de manera individual, así como de su uso conjunto y combinación en aplicaciones de almacenamiento de energía.
- Estudio de caso tipo práctico, dada una situación real donde se presenta un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI), con presencia de una batería de ácido plomo, para una posible modificación en la tecnología del almacenamiento de energía por una batería de supercondensadores.
- Modelado de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica para un sistema alimentación ininterrumpida con un método alternativo de almacenamiento de electricidad en forma de banco de supercondensadores.
- Análisis del sistema modelado de banco de supercondensadores en términos de vida útil, rendimiento, económicos, y de infraestructuras. Comparación con el sistema anterior.

Cabe destacar que la implementación práctica del sistema descrito para su prueba, así como la construcción de un prototipo físico queda fuera del alcance de este proyecto abriendo la puerta a futuras líneas de investigación.

3. Estado del arte

El *Estado del Arte* del presente Trabajo de Fin de Máster va a abarcar conceptos relativos a los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en cuanto a las baterías convencionales y a los supercondensadores. Así, se pretende tener una visión acerca de su origen, su funcionamiento, los materiales con los que estos dispositivos están realizados, así como sus clasificaciones principales en cuanto a diferentes tipos o sus principales aplicaciones actualmente.

3.1. BATERÍAS CONVENCIONALES

3.1.1. INTRODUCCIÓN A LAS BATERÍAS

Se puede considerar a Alessandro Volta como el padre de las baterías eléctricas, pues hacia el año 1800, profesor de la Universidad de Pavía, creó un dispositivo capaz de entregar corriente continua. Dicho dispositivo se basaba en dos pequeños discos, con un tamaño similar al de una moneda, de materiales distintos: uno de los discos era de plata mientras que el otro era de zinc, separados por un material algo colchado, como el cuero. A este conjunto lo sumergió en una solución alcalina, como puede ser el agua salada, y se dio cuenta que si se le conectaba una fuente corriente, este dispositivo era capaz de entregar dicha corriente una vez desconectada la fuente inicial, así como que si se aumentaba el número de pares de discos, es decir se *apilaban*, la tensión que otorgaba el conjunto era aún mayor [3].



Figura 3.1. Pila de Volta (Fuente [4])

3.1.2. DEFINICIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Las baterías entregan/liberan energía eléctrica acumulada en su interior, aunque no la generan por sí mismas. De esta manera, se pueden considerar como generadores eléctricos secundarios [5].

Las baterías funcionan de la siguiente manera. Un generador eléctrico les proporciona electricidad, que ellas almacenan internamente en forma de energía química a través de la reacción que tiene lugar cuando dos materiales distintos (los de los electrodos positivo y negativo) son sumergidos en el electrolito. Así la electricidad circula con origen la batería eléctrica cuando se conecta un circuito cerrado en sus bornas [6].

Las baterías cuentan con **inconvenientes**, ya que tienen un ciclo determinado por el uso de la propia batería en cuanto al número y cantidad de veces que hayan llevado a cabo procesos de carga y de descarga de energía. Por otro lado, también se encuentran condicionadas a la hora de poder absorber importantes picos de

potencia en momentos puntuales, así como poder entregar picos de potencia en determinadas situaciones, pues se vería comprometida la salud de la batería. Esto repercute directamente en que los tiempos de carga y de descarga de las baterías están bajo restricciones determinadas, así como la corriente con la que se carga o se descarga la misma. También habría que tener en cuenta que en algunos se presenta un efecto dañino para la propia batería, el denominado “*efecto memoria*”. Este efecto o condición hace que en las sucesivas recargas de la batería se vaya disminuyendo la capacidad de carga, por lo que se pierde las cualidades de fábrica del almacenador, lo que lleva a su deterioro progresivo hasta poder quedar inservible [5].

Como **ventaja**, frente a otros tipos de almacenamiento de energía, las baterías cuentan con una gran densidad de energía a la hora de su almacenamiento.

3.1.2.1. MODELADO DE UNA BATERÍA

Se considera a las baterías convencionales de almacenamiento de energía eléctrica como elementos difíciles de modelar, pues no se trata de dispositivos que cuenten con un comportamiento eléctrico de tipo lineal. Esta no linealidad radica en la presencia de múltiples parámetros que intervienen en dicho comportamiento eléctrico. La temperatura interna de la batería, el estado de carga y de descarga o la tasa de carga/descarga son parámetros influyentes en el proceso [7].

No obstante, la capacidad de carga de una batería se puede definir en función de la tasa de descarga de esta y de su temperatura interna. Esta relación recibe el nombre de *Ecuación de Peuket*:

$$C_p = I^n \times t \quad (3.1)$$

Donde:

- **C_p** es la capacidad de la batería
- **I** la corriente de descarga
- **t** el tiempo de descarga

- n el exponente de Peukert que tiene la forma:

$$n = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log I_1 - \log I_2} \quad (3.2)$$

Otro parámetro que puede resultar interesante a la hora de dimensionar una batería, o más bien, a la hora de seleccionar una batería comercial para una aplicación determinada es el SOC. El SOC (State of Charge) se define como el porcentaje de energía que queda en una batería, en relación con su capacidad total, una vez suministrada cierta cantidad de amperios/hora [8]. Este SOC tiene su importancia ya que los valores de tensión y de resistencia de la batería dependen de él.

3.1.3. ELEMENTOS BÁSICOS DE UNA BATERÍA

Las baterías cuentan con tres elementos básicos que están presentes en todos los tipos de baterías que existen, los cuales se describirán en apartados sucesivos. Por una parte, tendríamos los dos terminales: el positivo o *cátodo* y el terminal negativo o *ánodo*. Por otra parte, tendríamos el *electrolito*, el cual es el encargado de que a través de él los electrones circulen de un terminal a otro, lo que permite que se produzca la liberación de la energía acumulada en la batería [9].

En la figura 3.2 se muestra un esquema básico y sencillo del funcionamiento de los componentes principales de una batería.

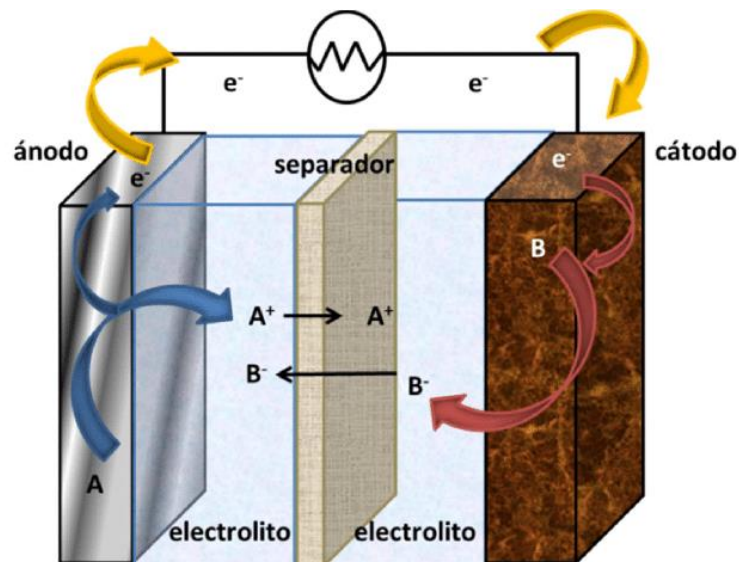


Figura 3.2. Esquema de los componentes de una batería (Fuente [10])

3.1.4. TIPOS DE BATERÍAS MÁS COMUNES

Existe gran infinidad de tipos de baterías, ya sean de Plomo-Ácido, *Ci-Cd*, *NaS Li-ion*, *NiMh*, etc. Hay que tener en cuenta, que para la elección de una batería de una naturaleza u otra dependeremos de la aplicación que se vaya a llevar a cabo con ella, ya que, con gran probabilidad y posibilidad, existirán condicionantes como el tamaño o el peso de la batería [5].

Se puede destacar, que dos de los tipos de baterías más utilizados son las baterías de Plomo-Ácido, o las baterías de ion de Litio. En cuanto a las baterías de Plomo-Ácido son muy populares en aplicaciones destinadas al almacenamiento de energía eléctrica proveniente de fuentes de energía renovable. Estas baterías, conformadas a partir de plomo con un ácido de baja concentración de antimonio, cuentan con aproximadamente un total de 2000 ciclos vitales con una capacidad de carga máxima del 80% de su capacidad total, un total de 1200 ciclos vitales con una capacidad de carga máxima del 50% de su capacidad total. Esto se traduce en una vida útil de unos 15 años con un rendimiento del 75%. Se especificará más acerca de este tipo de baterías en apartados sucesivos.

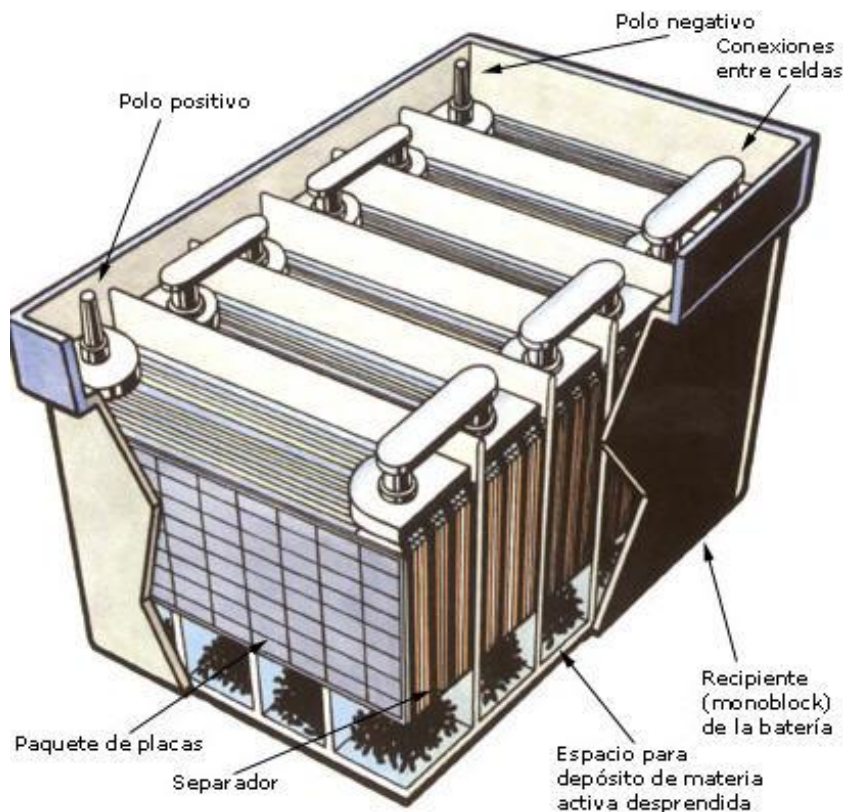


Figura 3.3. Esquema de una batería de Plomo-Ácido (Fuente [11])

El otro tipo de baterías más comunes, como se nombró anteriormente, son las baterías de iones de litio. Como introducción a la naturaleza de este tipo de baterías, se puede destacar que son muy prácticas gracias a la densidad de energía que

pueden almacenar, así como a su potencia o a su eficiencia (en cuanto a carga y descarga) y su carencia del efecto memoria. Al igual que las baterías de plomo-ácido, se especificará más acerca de este tipo de baterías en apartados sucedáneos.

LITHIUM-ION BATTERY

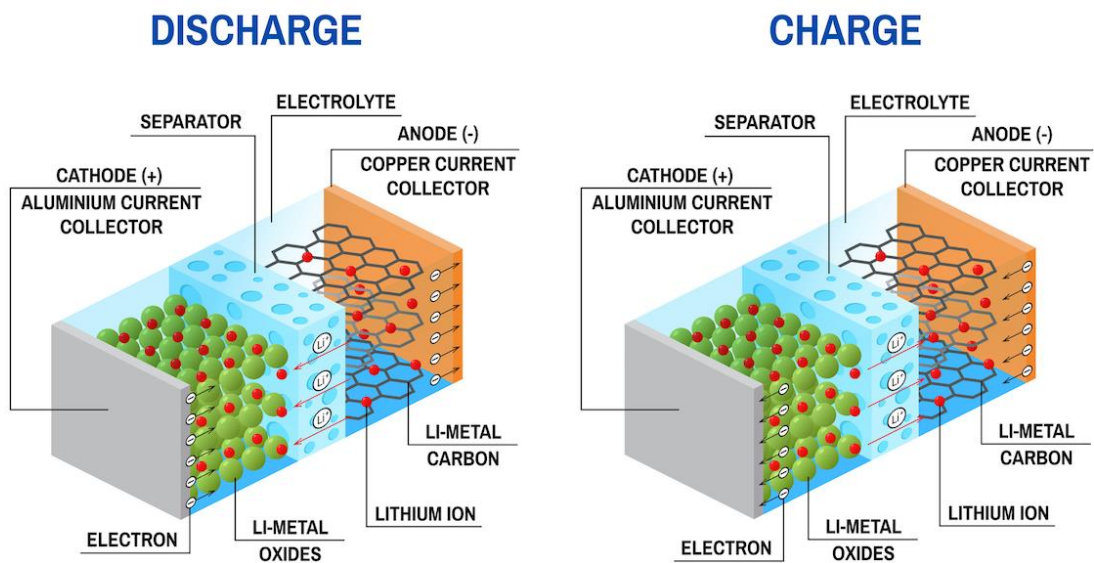


Figura 3.4. Esquema de la carga y la descarga de una batería de iones de Litio (Fuente [12])

3.1.4.1. BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

Este tipo de baterías es una de las tecnologías más longevas que se conocen.

El funcionamiento de las baterías de Plomo-Ácido radica en la presencia de reacciones electroquímicas entre el electrodo positivo de la batería (formado de dióxido de plomo, PbO_2), el electrodo negativo de la misma (formado de plomo en forma esponjosa), y un electrolito (compuesto en este caso por ácido sulfúrico H_2SO_4 en disolución con agua).

En estas baterías, se pueden adoptar diseños adecuados para poder obtener una gran densidad de potencia a un precio bastante adecuado, con propiedades interesantes como la fiabilidad o la robustez. No obstante, también acarrear algunas desventajas importantes a destacar en cuanto a esta tecnología, entre las que se encuentran:

- El carácter tóxico del Plomo dificulta que las baterías en sí sean respetuosas con el medio ambiente.
- Densidad energética bastante insuficiente.
- Baja ciclabilidad.
- Vida útil ínfimamente extensa (únicamente unos 500 ciclos de carga/descarga).
- Rango de temperaturas de operación muy restringido.
- Necesidad de la presencia de un sistema de ventilación
- Obligación de sulfatar los terminales en momentos de carga en nivel bajo.

Este tipo de baterías están presentes principalmente en aplicaciones donde el peso de la batería no es un parámetro importante para tener en cuenta. Por otra parte, es importante destacar que se requiere de una infraestructura para el reciclado de las mismas, con el fin de disociar el ácido sulfúrico del plomo en ellas presente [9].



Figura 3.5. Batería de Plomo-Ácido (Fuente [13])

3.1.4.2. BATERÍAS DE ION-LITIO

El litio es, de los elementos químicos conocidos, el que cuenta con una mayor propiedad de potencial electroquímico. Esta característica nos indica que, al menos teóricamente, el litio es el mejor aspirante para el almacenamiento de energía [9].

En la actualidad, este tipo de baterías cuentan con una gran presencia dentro del entorno de los vehículos eléctricos, aparte de considerarse una tecnología ya madura en ámbitos de aplicaciones electrónicas.

En cuanto a su estructura interna, las baterías de ion-Litio cuentan con dos materiales reactivos que se encuentran capacitados para llevar a cabo una reacción química entre ellos. En dicha reacción, se produce una transferencia de electrones, es decir, se lleva a cabo una reacción de tipo *redox*, siempre y cuando ambos materiales se encuentren en un entorno de contacto eléctrico (directo o a través de un conductor), para que se produzca el intercambio iónico.

Por otra parte, dentro de la celda de la batería, los dos materiales se encuentran en contacto iónico, pero no eléctrico, puesto que se encuentran separados por un electrolito, el cual no permite el paso de electrones, pero sí el paso de iones. La corriente eléctrica se crea una vez conectada una carga en los conectores externos de la batería (como es obvio), a través de la cual se lleva a cabo el intercambio de electrones de los materiales reactivos, lo que genera la reacción química *redox* anteriormente expuesta [14].

En cuanto a propiedades generales de este tipo de baterías, se encuentran varias que resultan bastante interesantes. El almacenamiento de energía en forma de Ion-Litio cuentan con gran densidad energética y presenta una buena eficiencia en cómputo total. Por otra parte, presentan buen funcionamiento y comportamiento frente a la temperatura, así como una baja autodescarga, lo que las hace muy interesantes. Una de las principales ventajas de esta tecnología es que cuentan con una vida útil elevada y superior a la de otro tipo de baterías que puedan estar enfocadas a aplicaciones similares. Se deja entrever que, en un futuro, las baterías de Ion-Litio puedan contar con una densidad de potencia similar a la de los supercondensadores, lo que las llevaría a una clara posición de competencia con éstos.

Sin embargo, no solo se presentan beneficios y ventajas en el almacenamiento energético. En situaciones de sobrecarga, se vuelven bastante inestables y cabe destacar que son elementos altamente inflamables, lo que repercute en cuidar la seguridad de estos dispositivos. Por otra parte, cuentan con una baja ciclabilidad, lo que no les otorga una larga útil [9].

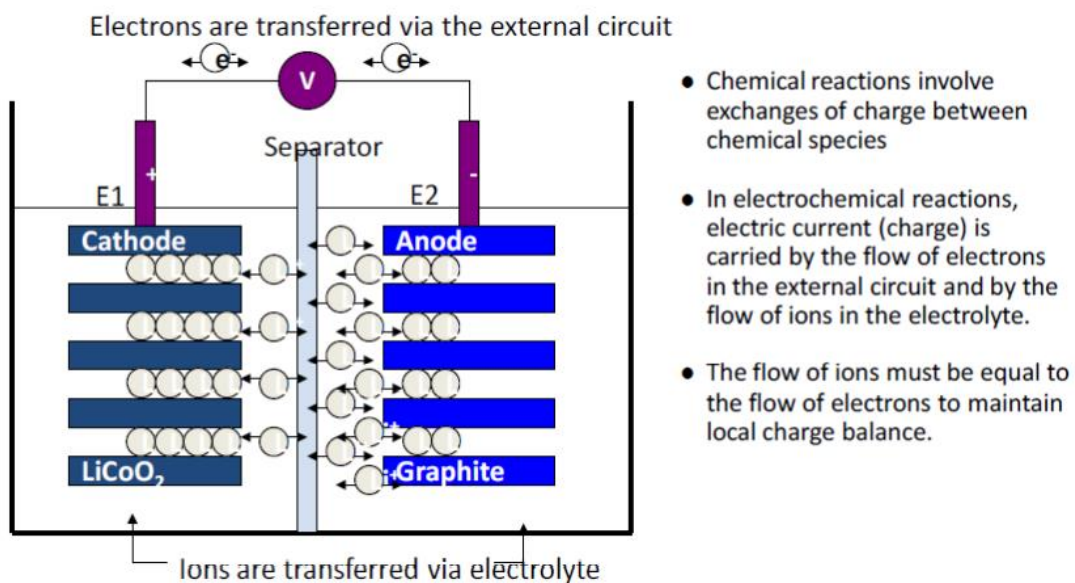


Figura 3.6. Principio de funcionamiento de una batería de Ion-Litio (Fuente [14])

Las baterías de Ion-Litio cuentan con las siguientes características técnicas [9]:

- Energía específica: **150 – 250 Wh/kg**
- Potencia específica: **300 – 1500 W/kg**
- Densidad volumétrica de energía: **250 – 530 Wh/l**
- Tensión nominal: **3,6 / 3,7V**
- Rango de temperatura de carga: **0 – 45°C**
- Rango de temperatura de descarga: **-20 -60°C**
- Vida útil: **400 – 1200 ciclos**

3.1.4.3. BATERÍAS DE NÍQUEL-CADMIO (NiCd)

En este tipo de baterías destaca su toxicidad, ya que el cadmio es altamente contaminante. Por otra parte, se puede decir que cuentan con una densidad de energía mucho más elevada que otras tecnologías de almacenamiento de energía en forma de baterías, a la par que una vida útil más larga. Sin embargo, cuentan con muy poca densidad de potencia [9].

Las baterías de Níquel-Cadmio se clasifican en dos grandes grupos [15]:

- Baterías industriales (o baterías abiertas), utilizadas con fines de tracción de vehículos o para aplicaciones estacionarias.
- Baterías selladas, comúnmente con forma cilíndrica y ensambladas en un envoltorio de plástico, para aplicaciones en las que se deban transportar más fácilmente esas baterías, como en comunicación móvil, videovigilancia, iluminaciones de emergencia, etc.

Las baterías de Níquel-Cadmio selladas eran la principal tecnología de almacenamiento de energía en el ámbito de la electrónica de consumo en los años 90, únicamente en algunas aplicaciones competían con las baterías de plomo-ácido o de ion de litio en situaciones con la presencia de circuitos impresos.



Figura 3.7. Batería sellada de Níquel-Cadmio (Fuente [16])



Figura 3.8. Baterías industriales de Níquel-Cadmio (Fuente [17])

3.1.4.4. BATERÍAS DE NÍQUEL-METAL HIDRURO (NiMH)

Como consecuencia de la toxicidad de las baterías de Níquel-Cadmio, a causa de la gran capacidad de contaminación del Cadmio, surgen las baterías de Níquel-Metal Hidruro (NiMH) como sus sucesoras naturales. En septiembre del año 2008, a raíz de una directiva europea, se prohíbe el uso de la tecnología NiCd como almacenamiento de energía, lo que impulsa finalmente las baterías de NiMH.

Esta “evolución” forzosa resulta altamente beneficiosa, puesto que estas nuevas baterías cuentan con mayores ventajas que las anteriores, como pueden ser [9]:

- Se alejan de la gran toxicidad de las baterías de Ni-Cd
- Gran densidad energética
- Elevada vida útil, superior a 1000 ciclos de carga-descarga
- Alta capacidad de ciclado
- Elevada velocidad de carga, hasta de 15 minutos si se gestiona bien el proceso de carga

Como era de esperar, no todo iban a ser ventajas en este tipo de baterías, ya que también acarrearán algunas desventajas con respecto a otras tecnologías de almacenamiento de energía en forma de batería:

- Cuentan con un voltaje nominal (1,2V) inferior, en comparación con las baterías que utilizan litio en su composición (3V) o las que cuentan con ácido-plomo (2V).
- Elevada tasa de autodescarga, lo que aleja a este tipo de baterías de aplicaciones donde se deba almacenar energía durante periodos de tiempo extensos.
- Proceso de detección de final de carga dificultoso, en términos del algoritmo que se encarga de ello, ya que es necesario un hardware determinado para llevar a cabo dicha tarea.



Figura 3.9. Batería de Níquel-Metal Hidruro (NiMH) (Fuente [18])

3.1.4.5. BATERÍAS TIPO ZEBRA

Las baterías de tipo cloruro de sodio-níquel, o comúnmente denominadas baterías ZEBRA cuentan con diversas propiedades que las hacen interesantes. Cuentan con un bajo coste de adquisición, y son capaces de tolerar hasta un total de 1000 ciclos de carga y descarga de la propia batería sin que ésta sufra un desgaste a tener en cuenta, además de ser capaces de descargar prácticamente el 100% de su contenido energético sin consecuencias posteriores [19].

En cuanto a su densidad energética, es comparable a la de las baterías de ion-litio, si hablamos en términos de Wh/kg . Por el contrario, cuentan con una menor densidad de potencia, como se muestra en la figura 3.10.

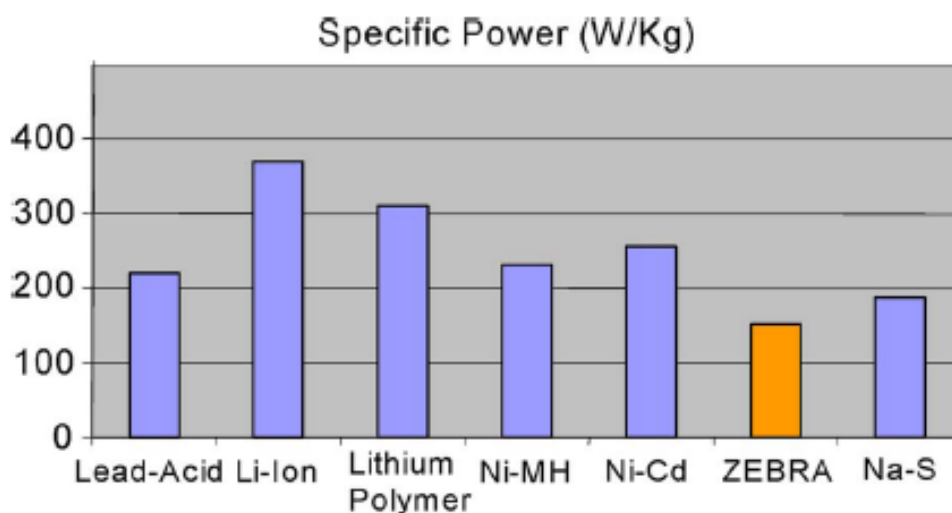


Figura 3.10. Comparación de potencia específica de baterías convencionales (Fuente [19])

Este tipo de baterías, pese a que no ocurre con los demás tipos de baterías convencionales, requieren de altas temperaturas para llevar a cabo su correcto funcionamiento. En torno a un rango de temperaturas entre los 270°C y los 350°C se podría estimar dicho funcionamiento. Este hecho restringe ampliamente su uso en aplicaciones cotidianas, o en unas condiciones de operación comunes. Las baterías tipo *Zebra* deben estar alojadas en un contenedor apto e idóneo para alcanzar su temperatura óptima de operación. Así mismo, requieren de amplios

periodos para adecuarse a dicha temperatura de operación, lo que se traduce en periodos de calentamiento de la propia batería [9].



Figura 3.11 Imagen de una batería ZEBRA (Fuente [19])

3.2. SUPERCONDENSADORES

3.2.1. INTRODUCCIÓN A LOS SUPERCONDENSADORES

Para acceder al origen de los supercondensadores como tal, hay que remontarse hasta el año 1978, cuando la compañía *NEC* utilizó este término para referirse a un nuevo componente electrónico destinado al almacenamiento y provisionamiento de energía eléctrica a modo de respaldo de la memoria de un ordenador.

Este nuevo componente basaba su funcionamiento en un principio por el cual se almacena energía sobre una superficie, como ya se presentó en 1957 en *General Electric*, cuando al utilizar elementos con electrodos de material tipo poroso de carbono se dieron cuenta de que se presentaba efecto de condensador eléctrico de doble capa. Así, se percataron de que en dichos poros del material se almacenaba energía, y que presentaba a su vez una gran capacitancia [1].

3.2.2. DEFINICIÓN

Los supercondensadores, también denominados como *ultracondensadores* o *condensadores eléctricos de doble capa*, son componentes electrónicos destinados al almacenamiento de energía eléctrica. Destacan principalmente por sus características en cuanto a que presentan una gran capacitancia y una baja resistencia interna, si los comparamos con los condensadores convencionales. A partir de estos aspectos, son dispositivos capaces de entregar y absorber energía mucho más rápido, con picos de potencia, lo que los diferencia y aventaja en ciertos aspectos a los dispositivos de almacenamiento de energía convencionales, las baterías [1].

3.2.3. ESTRUCTURA INTERNA DE UN SUPERCONDENSADOR

Estos dispositivos están formados por dos electrodos, un electrolito y un medio separador encargado de aislar eléctricamente los dos electrodos anteriormente señalados. Los electrodos, uno de carácter positivo, faltar de electrones y otro negativo, excedente de electrones, se encuentran impregnados, se encuentran conectados, cada uno respectivamente, a un colector de corriente. En cuanto al separador anteriormente nombrado, conformado por un material de tipo de poroso e inerte, el cual es el encargado de que no haya traspaso de electrones de un extremo a otro [20].

Cabe destacar, que uno de los materiales más importantes o clave en la construcción de un supercondensador es el material del cual se compone el electrodo, debido a que éste es el responsable de determinar las propiedades eléctricas del propio dispositivo.

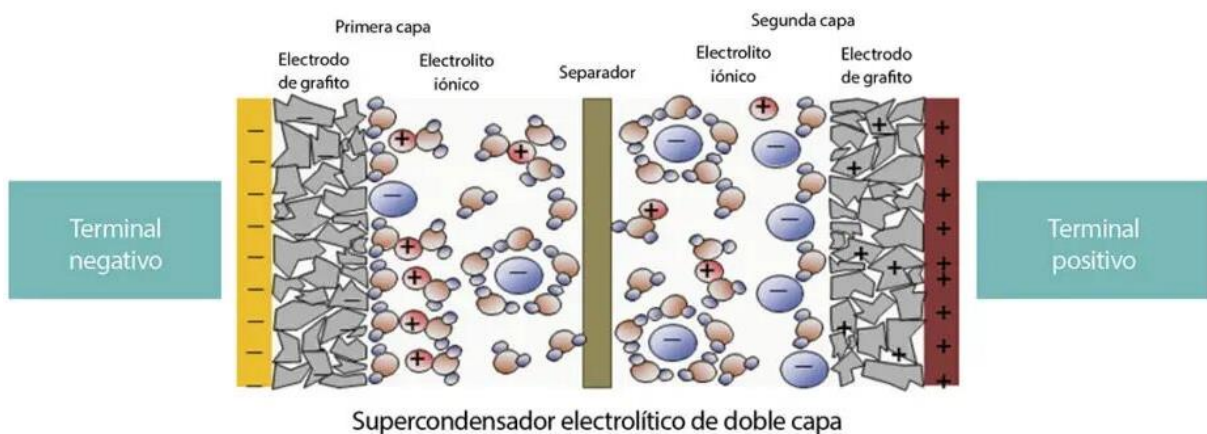


Figura 3.12. Esquema de las partes de un supercondensador (Fuente [21])

3.2.3.1. MATERIALES CON LOS QUE SE REALIZA EL ELECTRODO DE UN SUPERCONDENSADOR

Se ha hecho ya presente uno de los grandes inconvenientes de los supercondensadores, su capacidad de almacenar energía, es decir su densidad energética. A la hora de mejorar este aspecto, la solución del problema radica en la elección del material con el que se implementa el electrodo, para aumentar dicha densidad de almacenamiento de energía, pero siempre manteniendo las otras características de los supercondensadores, tales como la densidad de potencia para absorber cargas y descargas repentinas, así como su vida útil.

En cuanto a los materiales que se han utilizado tradicionalmente en la fabricación de los electrodos de supercondensadores destacan principalmente materiales formados por carbono, óxidos metálicos o polímeros conductores. Los materiales de carbono son buenas opciones gracias a la gran superficie que presentan, mientras que los óxidos metálicos cuentan con gran capacitancia específica y una resistencia bastante baja y están enfocados a la fabricación de ultracapacitores de alta potencia y energía. Por último, en el caso de los polímeros conductores son utilizados ya que presentan un proceso de oxidación-reducción encargado del almacenamiento y la liberalización de la carga eléctrica [1].

Es importante dejar claro que, aunque la naturaleza del electrodo (en cuanto a sus características fisicoquímicas) sea algo crucial en el comportamiento del supercondensador, no es el único parámetro que influye en ese sentido. Otros aspectos claves para tener en cuenta son la composición de este, así como el ensamblado de la celda en sí. Otros componentes, tal que el colector de corriente, el separador o la naturaleza propia del electrolito (como se verá en subapartados posteriores) son constituyentes a considerar también.

Antes de comenzar con los distintos tipos y sus características, se aclarará que la cantidad, así como el tipo de polímero que se añade al mismo tiene bastante importancia para el comportamiento del supercondensador. Dicho polímero, en cuanto a agente ligante, es básico en el proceso de fabricación del propio electrodo, ya que en el caso de los electrodos basados en carbono hace que se establezca

correctamente el contacto eléctrico entre las partículas del material carbonoso, y en el resto de los casos hace del electrodo una pieza sólida a par que estable [20].

A. ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS DE CARBONO

Los materiales basados en carbono son materiales muy interesantes y sugerentes a la hora de enfocarlos en la fabricación de los electrodos en un supercondensador. Destacan principalmente componentes como los carbones activos, los aerogeles, xerogeles, los nanotubos de carbono o las nanofibras de carbono.

En primer lugar, podría ser interesante destacar aquellas propiedades fisicoquímicas que pueden ser de alta importancia para este tipo de aplicaciones, la fabricación de electrodos para supercondensadores. Entre dichas propiedades se remarcarán las siguientes:

- Alta conductividad eléctrica
- Óptima área superficial específica (alrededor de los $1.500-2.000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$)
- Correcta resistencia a la corrosión
- Elevada estabilidad en términos de temperatura
- Coste comparativamente asequible y accesible
- Facultad para llevar a cabo el control de la textura de tipo porosa
- Procesabilidad viable

Como se ha presentado con anterioridad, este tipo de materiales, basados en carbono, se suelen utilizar para la fabricación de supercondensadores de doble capa, los llamados EDLC. En dichos supercondensadores en particular, un parámetro sumamente primordial es el área superficial específica del electrodo si éste es de algún material basado en carbono, como es el caso que nos atañe en

este subapartado. En líneas generales se puede resumir que cuanto mayor sea esa área, mayor capacidad específica presenta el supercondensador.

Nos podemos llegar a preguntar cómo se realiza el almacenamiento de energía en los electrodos de esta naturaleza, y esto es debido a la constitución y establecimiento de una doble capa eléctrica. No obstante, también se pueden dar la existencia de ciertas agrupaciones superficiales que contribuyen cierta pseudocapacidad al conjunto [20].

B. ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS POR ÓXIDOS METÁLICOS

Los electrodos constituidos por materiales de tipo óxidos de metales de transición se encuentran principalmente en supercondensadores de tipo electroquímicos, es decir, los pseudocondensadores o supercondensadores Farádicos. Normalmente, estos electrodos están únicamente integrados por el material óxido, o a lo sumo, se encuentran acompañados de algún material extra como carbones activos, geles, nanofibras, nanotubos de carbono, polímeros conductores, etc.

Se encuentran en estos componentes, los citados óxidos, que cuentan con propiedades interesantes, tales como una alta capacidad específica a la hora del almacenaje de energía o una resistencia interna sustancialmente baja. Dentro de la amplia variedad de óxidos que pueden desempeñar estas funciones, el que destaca por su más correcta idoneidad es el RuO_2 , es decir, el dióxido de rutenio, debido a su particular gran capacidad específica, su buena conductividad o su idónea reversibilidad en materia electroquímica. No obstante, este compuesto tiene un coste bastante elevado, ya que el rutenio se presenta en una notable escasez, lo que se incrementa también con el elevado coste de la producción industrial del óxido en sí.

Al respecto de las dificultades para llevar a cabo electrolitos con RuO_2 , surge la necesidad de búsqueda de opciones alternativas que subsanen la imposibilidad de uso generalizado de dicho óxido. De esta manera, se presentan distintas líneas de actuación, con diferentes opciones y/o materiales, entre las que destacan [20]:

- La producción de óxidos de metales nobles a través de métodos de obtención alternativos, preservando, en la medida de lo posible, que se cuente con un valor elevado de área superficial.
- Uso de rutenio como metal para el óxido, en una menor proporción, combinándolo en lo posible con otros metales alternativos, para la formación de óxidos binarios, perovskitas o nitruros, entre otros.
- Reemplazo del rutenio por otros metales de distinta naturaleza, tales como níquel, cobalto, hierro, vanadio, molibdeno, etc., con los que poder abaratar el coste del electrodo del supercondensador.
- Construcción de electrodos de carácter híbrido, a partir de la unión de los óxidos metálicos característicos junto a polímeros conductores o materiales basados en carbono de carácter poroso.

C. ELECTRODOS DE MATERIALES CONSTITUIDOS POR POLÍMEROS CONDUCTORES

Los electrodos constituidos por polímeros conductores suelen estar presentes en supercondensadores de tipo farádicos, como en el caso anterior, es decir, los pseudocondensadores. Esto es así ya que el proceso de almacenamiento de energía en dichos dispositivos se produce a consecuencia de las reacciones farádicas que se producen en el material del electrodo, lo que aporta pseudocapacidad al medio.

Como ventajas a la utilización y uso de estos materiales en los electrolitos, podemos encontrar que:

- Son de sencilla preparación en medio acuoso
- Correcta estabilidad al entrar en contacto con el aire
- Facilidad a lo largo del procedimiento de dopaje
- Altos valores de capacidad específica

- Altos valores de conductividad cuando el polímero conductor se encuentra cargado, lo que nos repercute en supercondensadores con un bajo valor de resistencia en serie equivalente

No obstante, es importante destacar que este tipo de material también acarrea consigo una serie de desventajas o inconvenientes a la hora de su presencia en el electrodo del supercondensador. Como contrapunto principal, tenemos que los polímeros conductores cuentan con una baja ciclabilidad, es decir, se deterioran a lo largo de los procesos de carga-descarga del supercondensador a causa de las variaciones de volumen que provocan el desgaste de los electrodos en sí.

Para subsanar estos últimos inconvenientes descritos anteriormente, se propone, en ciertas ocasiones, el uso de materiales de carbono (porosos por su propia naturaleza) a los que se les ha añadido polímeros conductores. Como otras opciones, se propone en otros casos y circunstancias el uso de composites de nanotubos de carbono-polianilina para el electrodo de supercondensadores electroquímicos. De esta última combinación, se ha comprobado que ofrecen buenas propiedades electroquímicas, mecánicas y eléctricas en comparación con los polímeros conductores solamente, puesto que la conjunción de la pseudocapacidad, proveniente de los polímeros, y las características estructurales y mecánicas de los nanotubos de carbono ofrecen muy buenos resultados [20].

3.2.3.2. MATERIALES CON LOS QUE SE REALIZA EL ELECTROLITO DEL SUPERCONDENSADOR

Como se ha indicado con anterioridad, los materiales con los que se construyen y fabrican este tipo de dispositivos son cruciales para determinar sus posteriores características, sobre todo en cuanto a sus capacidades de almacenamiento de energía o de entrega y/o absorción de potencia. De esta manera, se presentan varios tipos de electrolitos diferentes, así como sus aplicaciones, ventajas y desventajas.

A. ELECTROLITOS ACUOSOS

Este tipo de electrolitos destacan por su elevada conductividad iónica. Esta conductividad iónica está directamente con la ESR de la celda del supercondensador, la cual a su vez está involucrada con el valor máximo de potencia que la celda puede entregar. Este máximo valor viene conferido por la ecuación (3.3):

$$P = \frac{V^2}{4R} \quad (3.3)$$

Debido a esta alta conductividad iónica, la ESR de la celda es baja, lo que provoca que los supercondensadores que cuenten con este tipo de electrolito tienen la capacidad de suministrar gran potencia, lo que será crucial a la hora de elegirlos en una aplicación determinada. Por otra parte, el voltaje de las celdas queda determinado por la estabilidad electroquímica del electrolito empleado. En los electrolitos acuosos, el valor del voltaje de trabajo no sobrepasa 1V, ya que la descomposición electrolítica del agua tiene lugar a partir de los 1,23V.

La ventaja del uso de este tipo de electrolitos, a parte de la gran conductividad iónica con la que cuentan, es que su coste no es elevado, sobre todo si lo comparamos con el de los electrolitos no acuosos, ya que requiere de pocos tratamientos durante su fabricación, lo que abarata su coste final.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que la concentración del electrolito debe ser lo suficientemente alta como para poder llevar a cabo el procedimiento de carga de los supercondensadores de tipo electroquímico. En el caso de que eso no ocurriese, y la reserva disponible de electrolito fuese escasa con respecto al área superficial de del electrodo del supercondensador, se llegaría a un mal comportamiento electroquímico [20].

B. ELECTROLITOS ORGÁNICOS

Este otro tipo de electrolitos cuenta con propiedades algo distintas y opuestas si lo comparamos con los electrolitos acuosos, lo que nos lleva a que los supercondensadores que cuenten con esta tecnología estén enfocados a otro tipo de aplicaciones. Uno de los puntos principales donde se desmarca este tipo de electrolito es que cuenta con una tensión de trabajo superior con respecto a los acuosos, alrededor de los 2,5V. Esta tensión de trabajo entra en juego junto con la energía que es capaz de almacenar el supercondensador. Esta energía, que viene dada según la ecuación (3.4):

$$E = \frac{1}{2} \cdot CV^2 \quad (3.4)$$

De esta manera, con un voltaje de trabajo alto, el dispositivo es capaz de almacenar más energía en sí mismo, lo que le confiere la principal de las ventajas con respecto a los demás electrolitos.

Con esto, los supercondensadores que cuentan con un electrolito orgánico están enfocados a aplicaciones donde se presente una necesidad de un gran almacenamiento de energía. Sin embargo, esta concesión de energía se paga con una baja densidad de potencia, causada por la baja conductividad iónica del material del electrolito.

Por último, se debe tener en cuenta que en los electrolitos de esta naturaleza, debido a la alta resistividad del electrolito en sí, el supercondensador cuenta con una alta resistencia interna [20].

3.2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN SUPERCONDENSADOR

El principio básico de funcionamiento de un supercondensador en cuanto al almacenamiento de energía radica en la distribución de los iones presentes en el electrolito hacia la superficie de los electrodos del supercondensador.

La figura 3.13 muestra el esquema del concepto del funcionamiento de los supercondensadores.

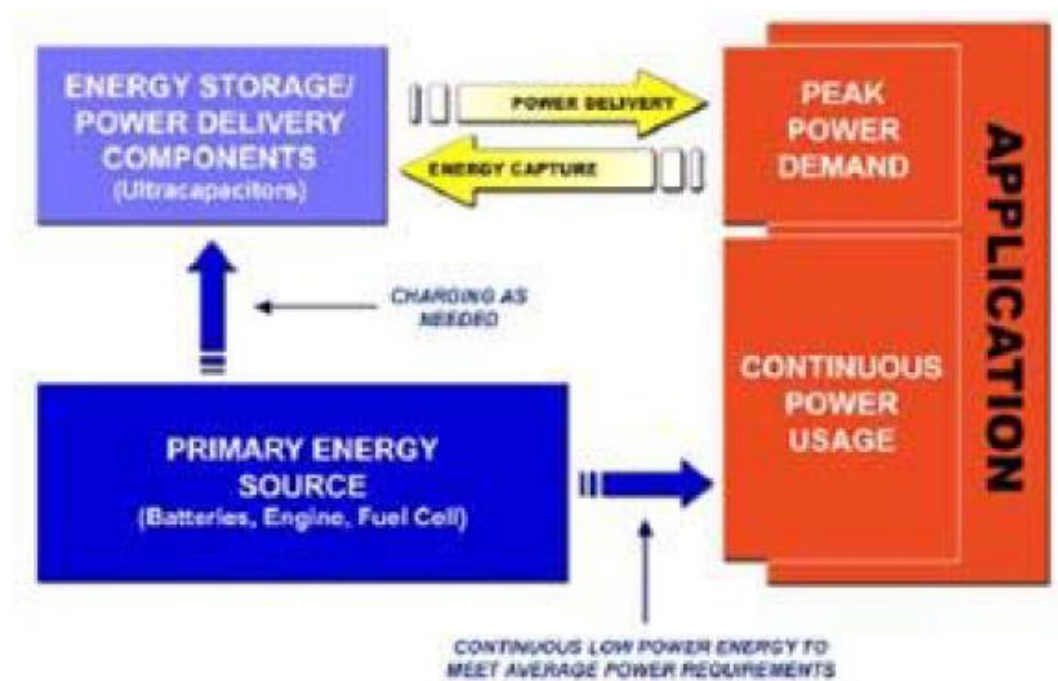


Figura 3.13. Esquema del concepto básico de funcionamiento de un supercondensador (Fuente [9])

3.2.5. APLICACIONES DE LOS SUPERCONDENSADORES

Los supercondensadores tienen múltiples aplicaciones, donde su presencia es potencialmente más beneficiosa que la de una batería convencional. Algunos de esos casos pueden ser aplicaciones en las cuales sirvan de almacenamiento temporal de energía (aplicaciones de recuperación de energía en momentos de frenado), aplicaciones que requieran alta potencia en un corto periodo de tiempo (aplicaciones de arranque de generadores eléctricos como energía de respaldo).

A continuación, se van a describir algunos ejemplos particulares, a gran escala, de sistemas de almacenamiento de energía a partir de supercondensadores, ya sea en solitario o en acompañamiento de alguna otra tecnología de almacenamiento de energía. Todos los sistemas que se presentan pertenecen al entorno ferroviario [9].

- Sistema Sitras®SES (Siemens Transportation)

El llamado Sitras SES (*Stationary Energy Storage System*) se presenta como un sistema de almacenamiento de energía fundamentado en agrupaciones de supercondensadores situados en tierra, es decir no a bordo del vehículo. Estos supercondensadores almacenan energía proveniente de las frenadas regenerativas de los trenes o tranvías que están alimentados a través de una catenaria, la cual debe estar conectada al sistema Sitras. Así mismo, Sitras provee al vehículo de picos de potencia cuando se requiera.

La agrupación de supercondensadores denominada banco de supercondensadores, cuenta con las siguientes características:

- Número de supercondensadores: **1152**
- Capacidad total: **94 F**
- Energía aprovechable: **2,5 kWh**
- Ahorro energético por hora: **80 kWh/h**

- Potencia máxima: **0,7 MW**
- Rango de tensión admisible: **600-750 V**
- Dimensiones (*ancho x profundidad x altura*): **2 bancos de 1,4x0,7x2,6 m³**
- Peso: **4,3 Tn**

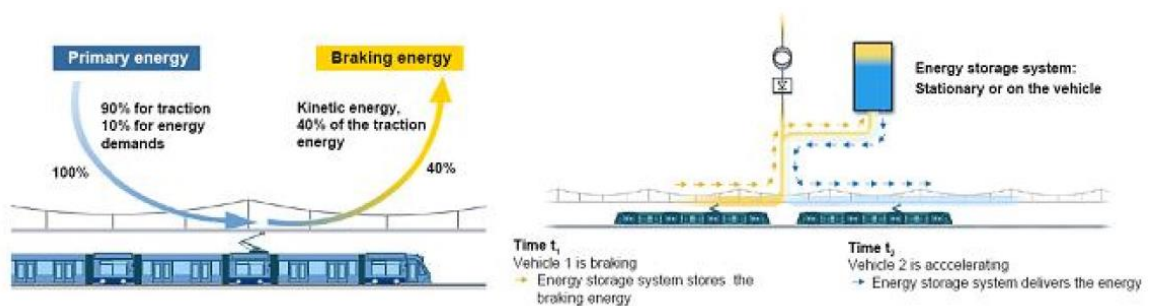


Figura 3.14. Flujo de electricidad en la aplicación de un sistema Sitras (Fuente [9])

- Sistema Sitras®MES (Siemens Transportation)

El llamado Sitras MES (*Mobil Energy Storage System*) se presenta como un sistema de energía fundamentado en agrupaciones de supercondensadores, al igual que ocurría en el sistema Sitras SES. Sin embargo, en Sitras MES el conjunto de supercondensadores se encuentra emplazado en el propio vehículo ferroviario, sobre el techo de éste, convirtiéndose en un sistema embarcado. El hecho de que sea un sistema embarcado repercute principalmente en una disminución de las pérdidas en términos de energía, ya que la energía en estos sistemas transita distancias sustancialmente menores que las de los sistemas como Sitras SES.

En cuanto a la conexión de este sistema al punto de alimentación, se lleva a cabo a través de un *chopper*, para que este sistema pueda ser incorporado tanto en vehículos de nueva incorporación o en vehículos ya en circulación.

El banco de supercondensadores de un sistema Sistras MES cuenta con las siguientes características:

- Energía aprovechable: **0,85 kWh**
- Potencia máxima: **2x144 kW**
- Refrigeración: **forzada**
- Dimensiones (*ancho x profundidad x altura*): **2000x1520x630 mm³**
- Peso: **820 kg**

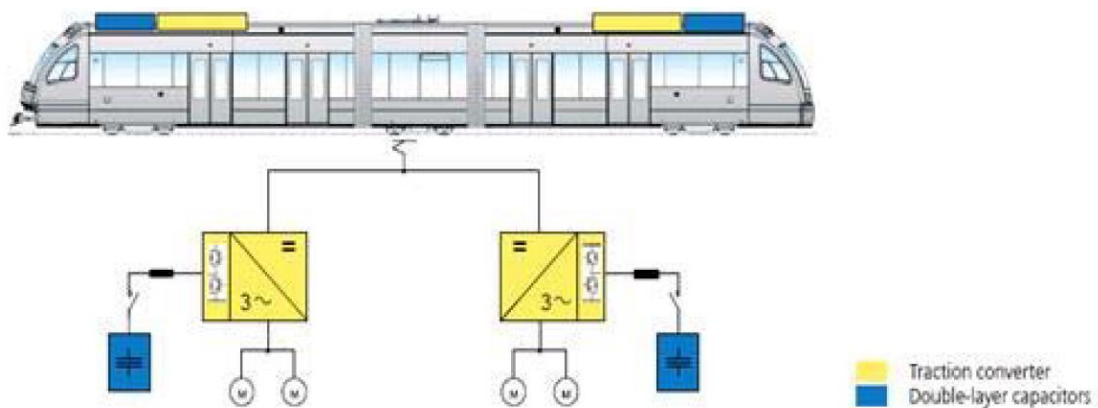


Figura 3.15. Representación un sistema Sistras MES (Fuente [9])

- Sistema Sistras®HES (Siemens Transportation)

El llamado Sistras HES (*Hybrid Energy Storage system*) se presenta como un sistema de almacenamiento de energía híbrido, el cual combina una agrupación de supercondensadores del tipo sistema Sistra MES, el cual se encuentra embarcado en el vehículo, junto con un sistema propio de tracción del vehículo constituido por baterías del tipo NiMH (Níquel-Metal Hidruro).

El sistema Sistras HES, al igual que el MES, se posiciona en el propio vehículo ferroviario, convirtiéndolo en un sistema embarcado. Se concatena al punto de alimentación a través de un chopper. Su funcionamiento se basa en la carga del sistema en los tramos de la trayectoria donde el vehículo se

alimenta de la catenaria, en los momentos de parada, o durante la frenada regenerativa. En los tramos en los que no haya catenaria, el vehículo se tracciona a través de la batería de NiMH, otorgándose picos de potencia necesarios a través del banco de supercondensadores del sistema Sitras MES.

El banco de supercondensadores de un sistema Sitras HES cuenta con las siguientes características:

- Energía aprovechable: **0,85 kWh**
- Potencia máxima: **2x144 kW**
- Rango de tensión admisible: **190-480 V**
- Refrigeración: **forzada**
- Dimensiones (*ancho x profundidad x altura*): **2000x1520x630 mm³**
- Peso: **820 kg**

La agrupación de baterías del sistema Sitras HES cuenta con las siguientes características:

- **44 bloques de celdas NPH 10-340 conectadas en serie**
- Energía aprovechable: **18 kWh**
- Potencia máxima: **105 kW**
- Tensión nominal: **528 V**
- Refrigeración: **agua**
- Dimensiones (*ancho x profundidad x altura*): **1670x1025x517 mm³**

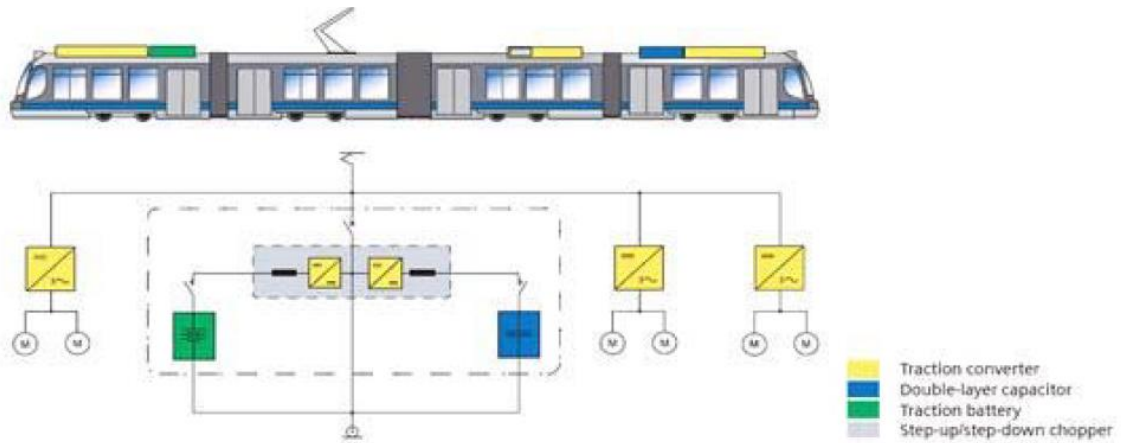


Figura 3.16. Representación un sistema Sistras HES Independet Concept (Fuente [9])

Algunos de los sistemas anteriormente descritos, así como la combinación de algunos de ellos, llevan desde mediados de la década de los años 2000 implantados en sistemas ferroviarios urbanos e interurbanos, en tranvías por ejemplo, en ciudades como Niza o París, en Francia, y Sapporo, en Japón [9].

3.2.6. SUPERCONDENSADORES VS BATERÍAS CONVENCIONALES: CO-LIVING

Hay que destacar, que las baterías convencionales y los supercondensadores no pueden ser presentados como elementos rivales en cuanto al almacenamiento de energía. En cada caso de aplicación se deberá evaluar cuales son las necesidades de dicha aplicación y cuáles son los requisitos o las condiciones de operación que se presenten. Se debe tener en cuenta que si lo que prima es la energía, se debería decantar por una batería, y si por el contrario, lo que prima son picos puntuales de carga o de descarga de potencia, se debería optar por un supercondensador [22].

En términos de magnitudes, para poder comparar ambos dispositivos de almacenamiento de energía, se deben tener en cuenta dos magnitudes principalmente. Por un lado, se contaría con la cantidad de energía eléctrica que la batería o el supercondensador es capaz de acumular, en términos de *forma de energía*, expresada en Wh/kg. Por otro lado, se contaría también con el punto máximo relativo a términos de potencia que el almacenador puede proporcionar, de manera puntual o de manera prolongada, expresada en términos de *potencia específica* en W/kg [20].

En este sentido, como se puede apreciar en la siguiente figura, las baterías alcanzan una densidad de energía muy superior a los supercondensadores (160 Wh/kg en contra de los 20 Wh/kg máximos de los supercondensadores en términos de energía específica). Sin embargo, en términos de densidad de potencia, los supercondensadores son mucho más potentes que las baterías convencionales, ya que los primeros pueden llegar a contar con una potencia específica máxima de aproximadamente 1.000.000 W/kg en contraposición de los 150 W/kg con los que cuentan las baterías ordinarias.

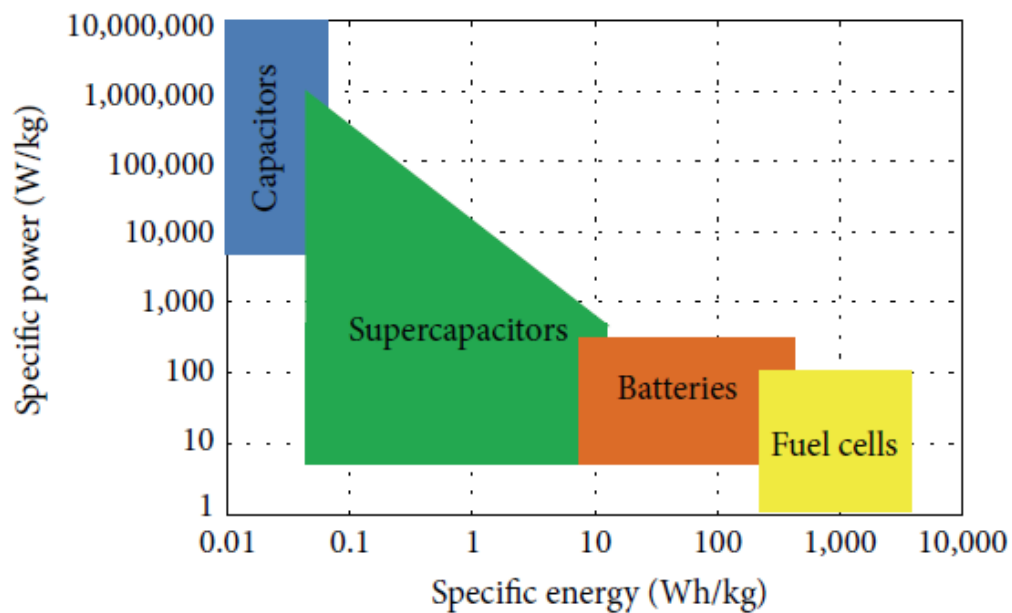


Figura 3.17. Gráfico de la energía específica y potencia específica de diferentes dispositivos de almacenamiento de energía (Fuente [23])

De esta manera, queda justificada que no son métodos de almacenamiento de energía exclusivos, si no que la elección de uno o de otro va a depender principalmente de la aplicación a la que se vaya a destinar dicho dispositivo. Sin embargo, se pueden dar situaciones donde se presenten ambos requisitos, y entonces sea necesario la presencia de un sistema híbrido, donde se combinen las dos tecnologías para un mejor resultado del sistema de almacenamiento de energía eléctrica. Un ejemplo de aplicación de un sistema híbrido de baterías-supercondensadores podría ser un sistema de baterías a gran escala, donde los supercondensadores actuaran para compensar y absorber los picos de energía que se puedan producir por interrupciones súbitas del suministro, con el fin de no sobrepasar los límites de las baterías.

Como ejemplo de lo propuesto en el párrafo anterior, donde se plantea el uso de sistemas híbridos de acumulación de energía con baterías y supercondensadores, se presentan múltiples casos en el entorno ferroviario. Más concretamente en vehículos ligeros, como son tranvías y metros ligeros. En esos casos, los sistemas híbridos proponen a la batería convencional como sistema primario de energía, debido a la elevada densidad energética que presentan. Mientras y, por otro lado, los supercondensadores son los encargados de otorgar la dinámica al sistema, ya

que son los que absorben los picos de potencia generados en la frenada regenerativa (muy presente en los entornos ferroviarios) y los que aportan también picos de potencia al sistema si son necesarios en algún momento preciso. Este conjunto permite al vehículo disponer de un reservorio energético de seguridad para utilizar en situaciones que requieran una potencia baja o media en casos puntuales o en emergencias [9].

3.2.7. SUPERCONDENSADORES ELÉCTRICOS DE DOBLE CAPA (EDLC)

En los supercondensadores electroquímicos de doble capa (EDLC), la energía es almacenada tras formarse una doble capa de iones situados en el electrolito, más concretamente, en el lugar de superficie con los electrodos. Esa doble capa, es la encargada del almacenamiento de cargas eléctricas.

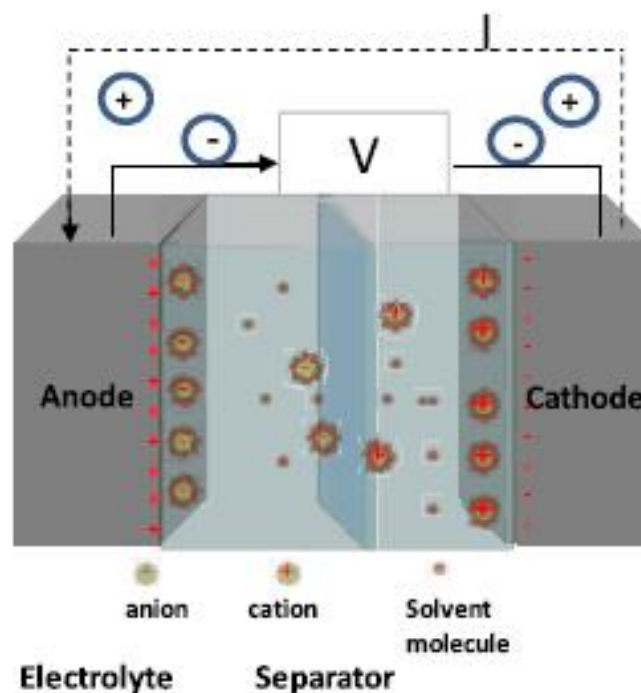


Figura 3.18. Principio de funcionamiento de los supercondensadores eléctricos de doble capa EDLC (Fuente [24])

El proceso de carga y descarga en este tipo de supercondensadores se lleva a cabo de la siguiente manera:

- En la carga, los electrones se desplazan desde el ánodo (electrodo positivo) hasta el cátodo (electrodo negativo) como respuesta a la presencia de una tensión externa.
- En el proceso de descarga, son los aniones los que se desplazan hacia el cátodo del supercondensador y los cationes hacia el ánodo.

Este tipo de supercondensadores cuentan con una ciclabilidad de alrededor de 1 millón de ciclos sin que su rendimiento se vea afectado [24].

En estos dispositivos, al almacenarse la energía en forma de campo eléctrico entre sus dos electrodos (particularidad que los diferencia de los condensadores ordinarios), su funcionamiento no es dependiente de una reacción electroquímica lo que repercute en el aumento del número de cargas y descargas, así como de una descarga más profunda que en las baterías ordinarias [25].

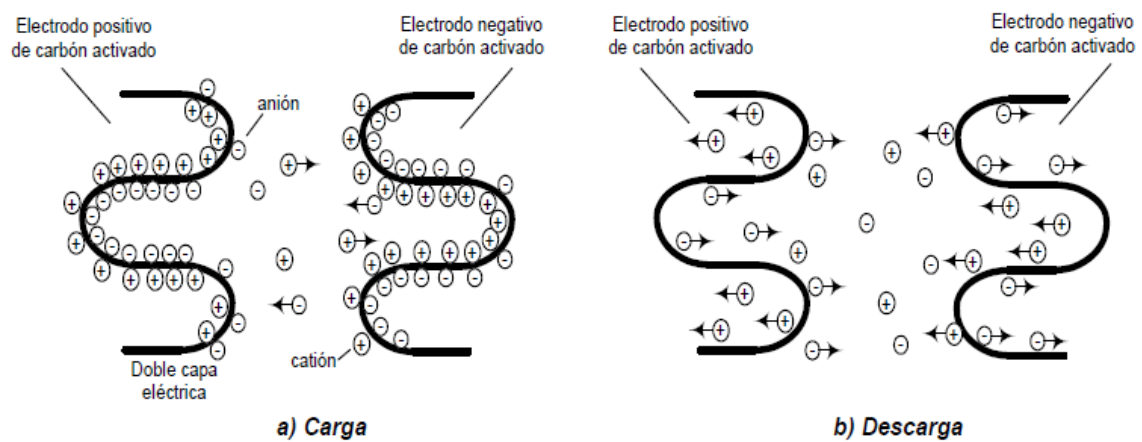


Figura 3.19. Comportamiento de un supercondensador EDLC durante los procesos de carga y de descarga (Fuente [26])

3.2.8. PSEUDOCONDENSADORES O CONDENSADORES FARÁDICOS

Este tipo de supercondensadores, denominados pseudocondensadores o supercondensadores redox [20]. El proceso de funcionamiento de un pseudocondensador radica en un proceso faradaico en el cual se lleva a cabo una transferencia de electrones a través de la superficie de contacto del electrodo mediante la oxidación o reducción de una especie química. Este tipo de procesos pueden ser reversibles o irreversibles. En el reversible, no se generan nuevas especies químicas en el momento de las reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar, mientras que en el proceso faradaico irreversible sí se generan [27].

Los efectos pseudocapacitivos tienen su procedencia en las reacciones de tipo faradaicas que se dan entre el electrolito y el electrodo del almacenador de energía. Por otra parte, en este tipo de supercondensadores, la carga que se transfiere en las reacciones redox internas depende del voltaje, siguiendo la ecuación (3.5) que se muestra a continuación.

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (3.5)$$

Como principal consecuencia de los fenómenos de pseudocapacidad en este tipo de supercondensadores, se puede evidenciar un valor más grande en cuanto a la capacidad global, si los comparamos con los EDLC cuyo funcionamiento es esencialmente un efecto electrostático [20].

- Uno de los puntos fundamentales en los que se debe prestar especial atención en la fabricación de este tipo de dispositivos es el material que se emplea para el electrodo del supercondensador, puesto que con una buena elección de dicho material, se favorecerá sustancialmente la cantidad de energía que el dispositivo puede almacenar en sí. En este caso, debido a las reacciones farádicas en las que se basa el almacenamiento de energía, los materiales que sean tipo óxidos metálicos, más particularmente los óxidos de metales de transición como:
 - RuO₂

- MnO_2
- CoO_x
- NiO_x

Otro de los materiales que son interesantes de emplear en la fabricación de los electrodos de estos almacenadores energéticos son ciertos polímeros que cuentan con características conductoras, tales como la polianilina, el polipirrol u otros derivados del politiofeno.

Por otra parte, y para esclarecer ligeramente el concepto del almacenamiento de energía mediante pseudocapacidad, se presenta la siguiente figura.

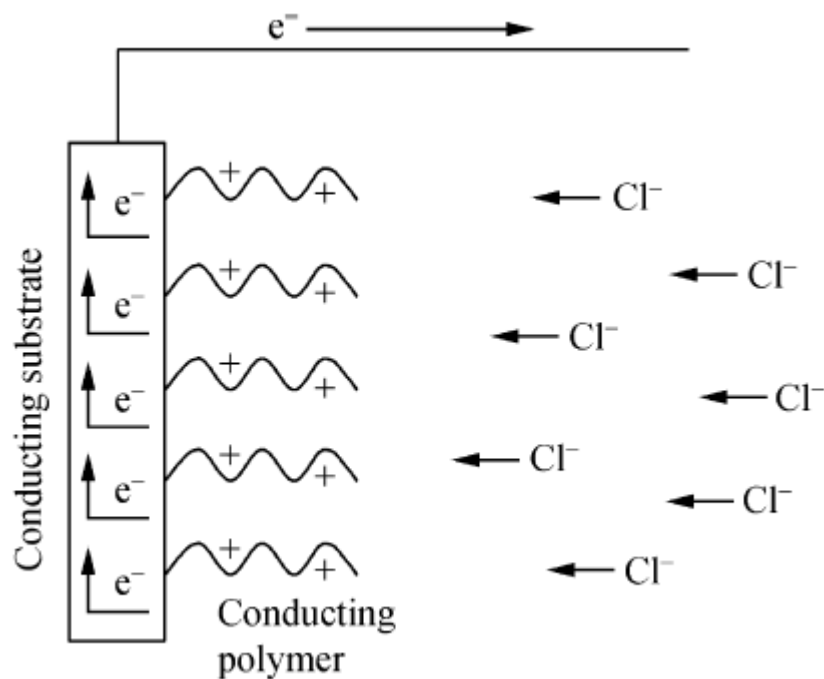


Figura 3.20. Mecánica de la pseudocapacidad en un polímero conductor (Fuente[28])

De esta manera, en la figura anterior se muestra la mecánica de funcionamiento de la pseudocapacitancia de un dispositivo de almacenamiento de energía eléctrica con electrodo de polímero conductor. En él, se aprecia como el material polímero conductor es el encargado de perder los electrones, lo que provoca la aparición de

policationes (con carga positiva). Así, se produce un intercalado de los aniones que se encuentran en la disolución, siendo en este caso particular aniones de cloro Cl^- , en la propia estructura del polímero, teniendo como fin último preservar el estado de electroneutralidad, donde los policationes y polianiones se mantienen estables [28].

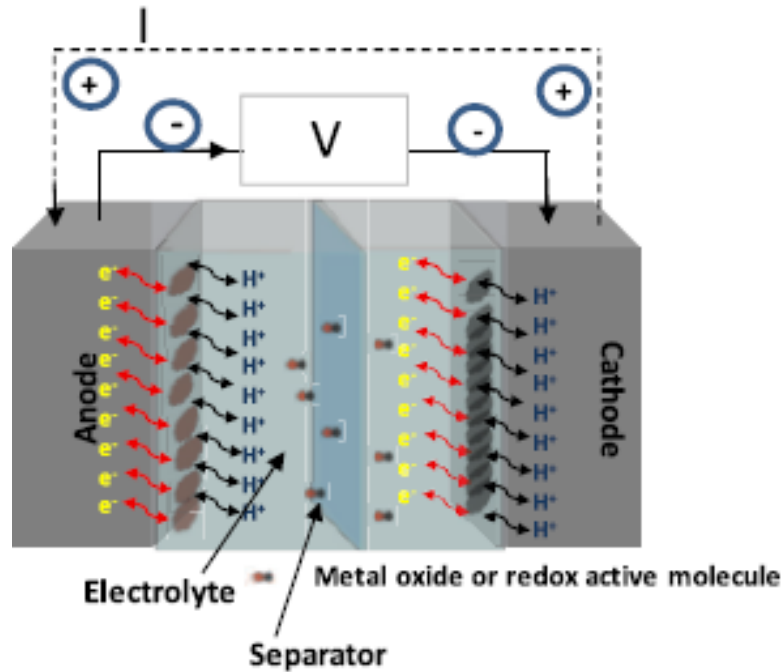


Figura 3.21. Principio de funcionamiento de los pseudocondensadores (Fuente [24])

3.2.9. SUPERCONDENSADORES HÍBRIDOS

A diferencia de los supercondensadores simétricos, los supercondensadores híbridos cuentan con una tensión de trabajo más elevada, con un valor de 3,8V máximo, al igual que la capacidad y densidad de energía, las cuales llegan a incrementarse hasta 10 veces con respecto a los supercondensadores más convencionales. Además, cabe destacar que la corriente de autodescarga y la corriente de *stand-by* bastante más bajas. Por otra parte, los supercondensadores no híbridos presentan mayor poder de potencia gracias a un ESR más bajo, además de un rango de temperaturas de trabajo más amplio. Otra diferencia notable entre ambos tipos de supercondensadores es que los híbridos no se pueden descargar en su totalidad, a 0V, por motivos de seguridad, como si se ocurre con los sus predecesores.

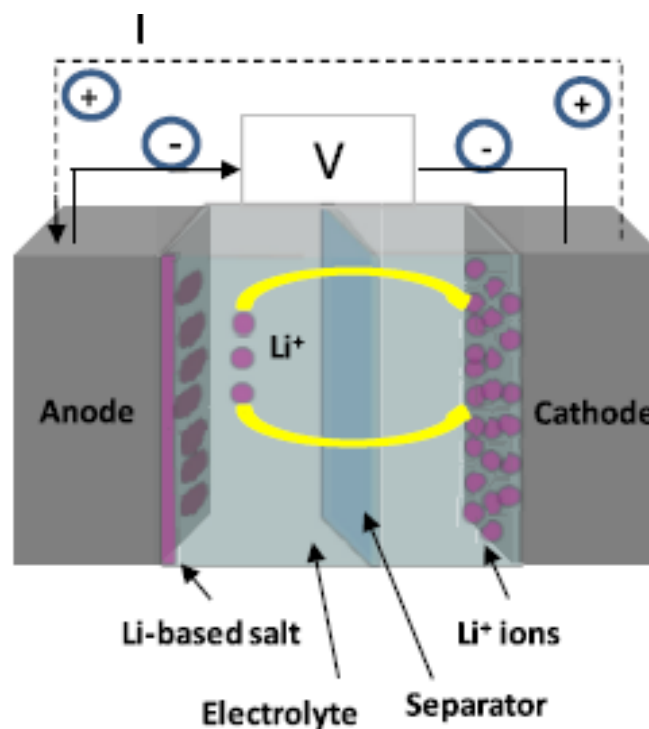


Figura 3.22. Principio de funcionamiento de los supercondensadores híbridos (Fuente [24])

Si nos fijamos desde la perspectiva de la construcción física de estos almacenadores de energía, se presentan bastante análogos, teniendo presente que los híbridos cuentan con un ánodo laborado con grafito acompañado de litio y un electrolito distinto.

De esta manera, una de las características más destacada de los supercondensadores híbridos es que su voltaje de trabajo aumenta un 25% con respecto a los supercondensadores simétricos, así como la capacitancia, siendo de 6 a 9 veces las de éstos últimos. Además, su corriente de fuga es aproximadamente un 10% de la correspondiente a un EDLC convencional.

Con respecto a la seguridad de estos componentes, se puede asegurar su protección en casos de cortocircuito, pues a diferencia de las baterías comunes de iones de litio, no se produce fuga térmica. Es preciso puntualizar también que, aunque no comprometan su seguridad, se deben evitar situaciones como sobretensión, sobredescarga, cortocircuito o perforación para alargar la vida útil de los supercondensadores y que no presenten una degradación prematura. Sin embargo, el electrolito presente en el interior de los supercondensadores híbridos es inflamable, y sí puede comprometer la seguridad si se pone en contacto con fuego, líquidos o si se utilizan cuando el componente se presenta en deterioro.

Otro aspecto destacable de los supercondensadores híbridos es que no requieren de un sistema de gestión de batería, o según sus siglas en inglés BMS (*Battery Management System*). Estos tipos de sistemas de gestión de energía son necesarios en las baterías comunes de tipo plomo-ácido o de iones de litio. En el caso de los supercondensadores, tanto los híbridos como los convencionales o estándares, se aconseja acompañarlos de un sistema de gestión celular o CMS (*Cell Management System*), un sistema mucho más simple y sencillo que un BMS. Los CMS acompañan a los supercondensadores con el fin de alargar su vida útil en cuanto a equilibrar y mantener iguales los voltajes de cada supercondensador en una asociación de estos elementos. Así, los CMS mantienen igualados la tensión en celdas de supercondensadores donde se conectan varias celdas en serie, mientras que los BMS son necesarios para preservar la seguridad de las baterías convencionales.

A continuación, y para profundizar en el rendimiento de los supercondensadores híbridos, se presentan dos figuras donde se muestran los efectos de la corriente continua de pérdidas debido a la ESR (Resistencia en Serie Equivalente) del supercondensador y la capacitancia del mismo, ambas frente a la temperatura, según nos ofrece un conocido fabricante de estos componentes como es *EATON* [29].

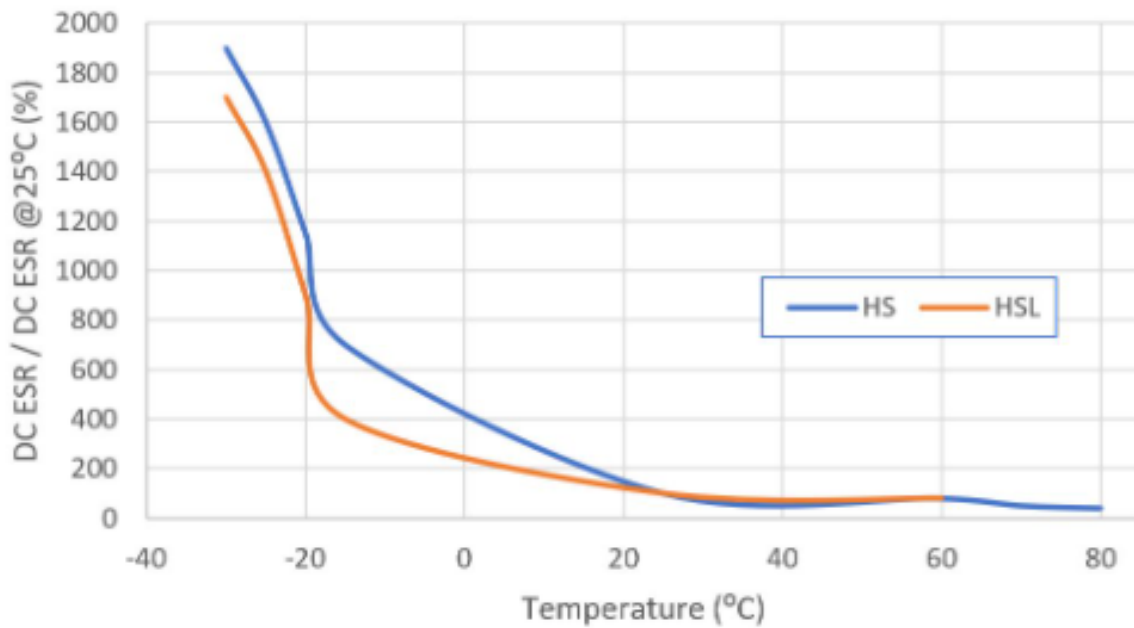


Figura 3.23. Relación DC ESR(%) y Temperatura (°C) (Fuente: [29])

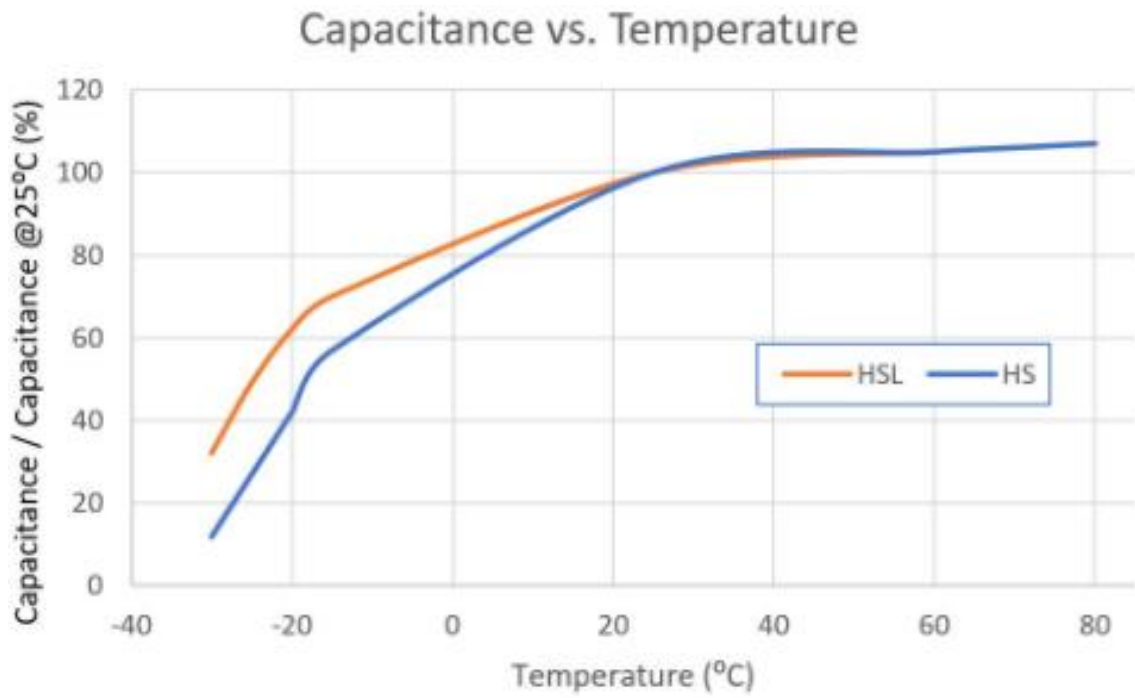


Figura 3.24. Relación Capacitancia y Temperatura (°C) (Fuente: [29])

4. Planteamiento de la problemática / Modelado del sistema solución

4.1. INTRODUCCIÓN. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN INICIAL

En este apartado se va a presentar y a desarrollar la principal problemática que concierne a la presente investigación.

Como se ha indicado ya anteriormente en el apartado de **objetivos**, uno de los apartados que se van a llevar a cabo va a ser el estudio de un equipamiento real, el cual cuenta con un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI) y una batería convencional de tipo ácido-plomo. Con el estudio de este conjunto se pretende analizar el funcionamiento del equipo de respaldo energético, con el fin de modificar la tecnología de almacenamiento de energía. Es decir, estudiar la posibilidad de reemplazar la batería de ácido-plomo allí presente, por otro tipo de almacenamiento de energía. Ese reemplazo, se trataría inicialmente de un banco de supercondensadores, a expensas del correspondiente estudio acerca de su propia idoneidad.

Para llevar a cabo el presente estudio, se ha dispuesto de los equipos presentes en uno de los despachos de la Escuela de Ingenierías Industriales, Informática y Aeroespacial de la Universidad de León. No obstante, no se trata de equipamiento de tipo exclusivo, o de carácter innovador, ya que pueden estar presentes en múltiples entornos.



Figura 4.1. Esquema de conexión del SAI con el PC (Fuente: Elaboración propia)

En la figura 4.1 se muestra el equipamiento que va a ser objeto de estudio del presente Trabajo de Fin de Máster. De esta manera, se pueden apreciar los siguientes elementos o dispositivos allí presente:

- PC: dedicado a funciones de ofimática corrientes. De este elemento sólo será necesario conocer los valores de tensión y corriente de la fuente de alimentación de éste, para conocer el funcionamiento del conjunto PC+SAI.
- SAI: Sistema de Alimentación Ininterrumpida. Este dispositivo va a ser el encargado de, ante un corte repentido de la corriente eléctrica, otorgar un periodo extra de sustento energético al PC para poder guardar la información presente en ese momento y poder llevar a cabo un correcto apagado del equipo. Según datos del fabricante, **SAI Smart-UPS de APC 700 VA 230V**, el tiempo que este SAI puede alimentar al equipo del PC oscila entre los 10 y los 15 minutos aproximadamente. Con respecto a este dispositivo, lo que nos debe de resultar importante es todo lo relacionado con la batería, puesto que el resto de circuitería no va a ser objeto del estudio. Así, se presenta que se encuentran dos baterías de 12V dispuestas en serie, aumentando la tensión a un total de 24V.

La forma de proceder en el estudio/análisis de este sistema va a ser el siguiente:

- En primer lugar, se analizará la situación inicial, en términos energéticos, de tensión y de corriente del SAI, o más concretamente de la batería de éste.

- En segundo lugar, y una vez llevado a cabo el primer paso, se procede al diseño del nuevo sistema. Así, se modelarán cada uno de los elementos que deban intervenir de manera individual.
- Posteriormente, se llevará a cabo la arquitectura del sistema modelado, para poder tener una idea general de cómo será el nuevo conjunto almacenador de energía.
- Seguidamente, se buscarán componentes comerciales que entren dentro de los rangos de funcionamiento establecidos en el modelado de los propios componentes. Se debe tener en cuenta la posibilidad de que se tenga que reajustar el modelado si no se presentan componentes totalmente idóneos para el diseño realizado.
- Por último, se deberá llevar a cabo una comparación entre el sistema de almacenamiento de energía precedente y el modelado, en términos técnicos y económicos. Así, se deducirá hasta qué punto merece la pena llevar a cabo e implementar el sistema modelado.

4.2. DISEÑO DEL SISTEMA

En este apartado se va a detallar el diseño del sistema, en términos de modelado, teniendo en cuenta las condiciones iniciales del estudio y algunas consideraciones que se hagan con el fin de aportar condicionantes reales en el momento del diseño. Posteriormente, se comprobarán los elementos comerciales que pueden subsanar las necesidades que exija el diseño del modelo, y teniendo siempre en cuenta que éste puede variar en función de lo que el mercado pueda ofertar.

4.2.1. MODELADO DE COMPONENTES

Para llevar a cabo el modelado de los componentes, así como de la futura arquitectura del sistema, se va a partir de unos cálculos iniciales, que serán comunes a todos los hipotéticos diseños que se puedan presentar. Posteriormente se describirán dichos posibles diseños, con sus particularidades, sus ventajas y desventajas, siempre desde un punto de vista inicial, pues no se va a llevar a cabo el prototipo de ninguno de dichos diseños. Una vez presentadas las posibles líneas de actuación, se procederá a la búsqueda de los elementos comerciales que satisfagan los requisitos establecidos en la etapa del diseño. De esta manera se descartará alguno de los modelos, con la posibilidad de encontrar algún componente comercial que sí satisfaga alguno de los diseños presentados o no, en cuyo caso se deberá volver a la fase del diseño e introducir nuevas restricciones o condiciones correspondientes a lo que oferta el mercado en el entorno de los supercondensadores y toda la electrónica asociada a ellos.

4.2.1.1. CÁLCULOS

Inicialmente, se van a realizar unos cálculos iniciales partiendo de las condiciones originarias de las que se parte, como ya se ha indicado anteriormente.

De esta manera, partiremos de las dos siguientes premisas:

- Almacenamiento de energía en el SAI: el SAI cuenta con dos baterías de ácido plomo en serie de **12V** y **7Ah**, lo que hace un total de **24V**, con una conexión como muestra la siguiente figura.

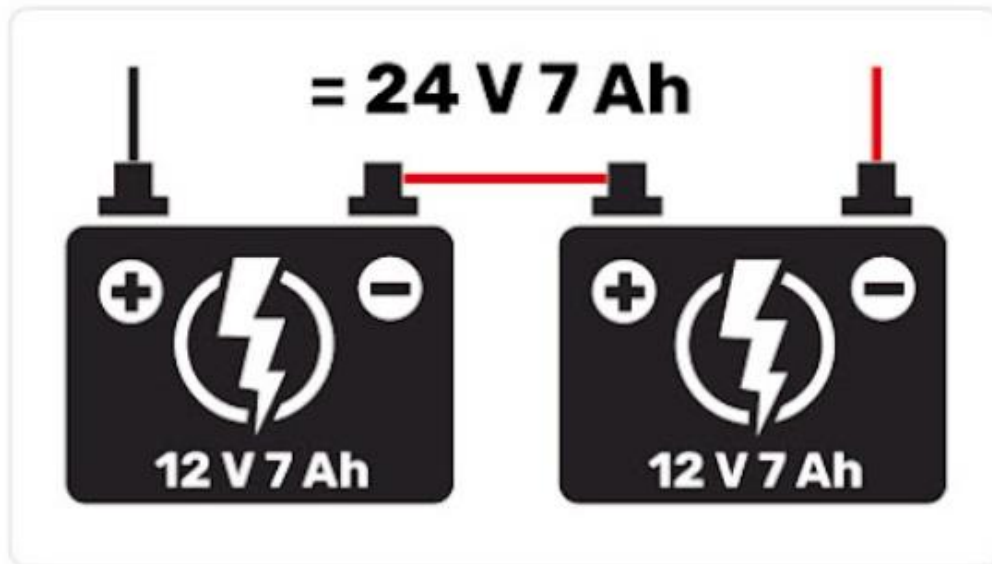


Figura 4.2. Disposición de las baterías en el SAI (Fuente: [30])

- Fuente de alimentación del PC: el PC que va a ser objeto del sistema de alimentación de respaldo cuenta con una fuente de alimentación de **200W** de potencia, con un 20% de pérdidas en el rectificador, y una tensión de entrada de **12V**.

En este punto, se comienza analizando la potencia que tiene la fuente de alimentación del PC teniendo en cuenta ese 20% de pérdidas que se nos presenta cómo rendimiento del rectificador de la propia fuente. De esta manera, se calcularía:

$$\text{Potencia de la f. de alim.} = 200W \times \frac{100\% + 20\%}{100} = \mathbf{240W} \quad (4.1)$$

Una vez se conoce la potencia que debe llegar a la entrada de la fuente de alimentación, se calcula, a través de la propia definición de potencia eléctrica, la corriente con la que se opera. Además, se sabe, por los datos que nos otorga el

fabricante, que hay una tensión de 12V a la entrada de dicha fuente de alimentación.

$$P = V \times I \quad (4.2)$$

$$240W = 12V \times I$$

$$I = 20A$$

De esta manera, se conoce que la corriente a la entrada de la fuente de alimentación del PC es de **20A**.

En este punto de la investigación, se procede a analizar los datos con los que se cuenta del SAI. Es importante destacar, que no se van a querer mejorar las condiciones de funcionamiento del sistema de respaldo de energía, ya que solamente se pretende la sustitución de la tecnología de almacenamiento de energía. La mejora de las condiciones de funcionamiento del SAI puede resultar una de las líneas futuras del estudio. De esta manera, las mismas condiciones que la batería de ácido-plomo con que cuenta inicialmente el sistema se traducen en una autonomía de unos 10 minutos, desde que se corta la corriente principal de abastecimiento.

Así, se procede al cálculo de la carga Q (en Culombios, C) y de la capacidad C (en Faradios, F) que presenta el SAI en las condiciones iniciales de funcionamiento [31] [32] [33]:

$$Q = I \times t \quad (4.3)$$

$$Q = C \times V \quad (4.4)$$

Donde:

- Q es la carga de la batería, en Culombios [C]
- I es la corriente que sale de la batería, en Amperios [A]
- t es el tiempo que se va a tener a la aplicación en funcionamiento, es segundos [s]

- **C** es la capacidad que vamos a requerir en la agrupación de supercondensadores, en Faradios [F]
- **V** es la tensión en bornas de los supercondensadores, en voltios [V]

De esta manera, con una corriente de 20A y un tiempo de soporte de 10 minutos, se considera una carga de:

$$Q = 20A \times 10min \times \frac{60s}{1min} = \mathbf{12.000 C} \quad (4.5)$$

Se sabe así que se requiere de una carga de **12.000 C** totales para una corriente de 20A en un tiempo de 10 minutos.

A continuación, se va a realizar una serie de nuevas hipótesis para realizar el cálculo de la capacidad de los supercondensadores que se van a emplazar como dispositivos de almacenamiento de energía. Por una parte, se sabe que los supercondensadores tienen una tensión de unos 3V aproximadamente en sus bornas. Por otra parte, sabiendo que la energía que se almacena en un supercondensador lo hace de similar manera a un condensador ordinario, se cuenta con la siguiente expresión matemática para tal efecto [34]:

$$E = \frac{1}{2} \times \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \times Q \times V = \frac{1}{2} \times C \times V^2 \quad [J] \quad (4.6)$$

En este punto, vamos a estudiar cuanto decae la energía de un supercondensador por cada voltio que disminuye su tensión, para establecer un límite razonable y poder calcular así la capacidad total, en Faradios, que van a ser necesarios en la aplicación.

Por lo tanto, el cálculo resultante es:

$$(V = 3V) \rightarrow E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (3)^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot 9 = \mathbf{4,5 \cdot C} \quad (4.7)$$

$$(V = 2V) \rightarrow E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (2)^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot 4 = \mathbf{2 \cdot C} \quad (4.8)$$

$$(V = 1V) \rightarrow E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (1)^2 = \frac{1}{2} \cdot C \cdot 1 = \frac{C}{2} \quad (4.9)$$

Analizando los resultados de los cálculos realizados en las ecuaciones (4.7), (4.8) y (4.9), se evidencia como, al caer la tensión 1V, el primero de ellos, es decir, cuando la tensión cae de 3V a 2V, la energía total decae hasta 2 veces la capacidad del condensador, lo que se puede tomar como un valor aceptable. Sin embargo, en la caída del siguiente voltio, es decir, cuando la tensión cae de 2V a 1V, la energía decae hasta la mitad de la capacidad del supercondensador. Este valor, resulta inaceptable, ya que la energía presente disminuye a un nivel no aceptable. Así, se establece que la descarga de los supercondensadores se va a llevar a cabo desde los 3V a los 2V.

Con la información que se ha extraído de los últimos cálculos, se puede llevar a cabo el cálculo de la capacidad total de los supercondensadores que necesitamos, a través de la ecuación (4.4).

De esta manera, se tiene que la carga de los supercondensadores con una tensión en bornas de 3V es:

$$Q = 3 \cdot C \quad (4.10)$$

Por otro lado, la carga que queda los supercondensadores una vez se ha descargado 1V es:

$$Q' = 2 \cdot C \quad (4.11)$$

Si restamos las ecuaciones (4.10) y (4.11), queda:

$$Q - Q' = (3 - 2) \cdot C \quad (4.12)$$

El término $Q - Q'$ corresponde a la carga que es extraída del sistema de almacenamiento. O lo que es lo mismo, los 12.000 C que se calcularon en etapas anteriores. Por lo tanto, la ecuación (4.12) quedaría:

$$Q - Q' = (3 - 2) \cdot C \quad (4.13)$$

$$12.000 = (3 - 2) \cdot C$$

$$12.000 = 1 \cdot C$$

$$C = \mathbf{12.000 F}$$

Una vez se ha llegado aquí, se concluyen los cálculos de carácter general y comunes a cualquiera de los diseños que se presenten en los subapartados a continuación.

4.2.1.2. POSIBLES DISEÑOS A IMPLEMENTAR

Una vez llevados a cabo todos los cálculos generales, se procede a plantear diferentes diseños para la sustitución de la batería de ácido-plomo por un sistema basado en supercondensadores. En este subapartado se van a plantear los tres diseños que se pueden llevar a cabo de manera teórica, ya que se depende total y absolutamente de los elementos comerciales que haya en el mercado en la actualidad disponibles para implementar dichos diseños. De esta manera, en el siguiente subapartado, ya con dichos elementos comerciales elegidos, se procederá a desarrollar más los diseños o descartar alguno de ellos, para finalmente escoger uno como el más idóneo de los tres presentados.

- **COMBINACIÓN DE SUPERCONDESADORES EN SERIE-PARALELO**

En este primer diseño, se propone la asociación de supercondensadores en serie y en paralelo, con el fin de alcanzar los valores que se han calculado en el subapartado anterior.

En primer lugar, se dispondrán los supercondensadores en paralelo, con el fin de aumentar la capacidad total del banco de almacenamiento, hasta los 12.000F necesarios para la aplicación. Posteriormente, se dispondrán múltiples de esas asociaciones en paralelo conectadas en serie entre sí, de manera que consigamos aumentar la tensión del conjunto hasta los 24V necesarios.

Con el objetivo de que se utilicen el menor número posible de supercondensadores para poder abaratar el banco de almacenamiento en lo mayor de lo posible, se elegirán dispositivos con gran capacidad, y si fuese posible, con mayor tensión.

No obstante, surge una serie de inconvenientes en este diseño. Por una parte, se van a necesitar un alto número de supercondensadores para poder alcanzar esos 12.000F necesarios. Eso conlleva que se requiera de un montaje ciertamente laborioso y que necesita de un espacio importante para situarlo. Además, la asociación en serie de supercondensadores lleva siempre asociada una electrónica extra, puesto que es necesario un balanceo de la tensión en bornas de cada supercondensador. Dicho balanceo es necesario ya que los supercondensadores no cuentan todos con la misma ESR, lo que hace que en una conexión en serie no todos los supercondensadores se carguen a la misma tensión.

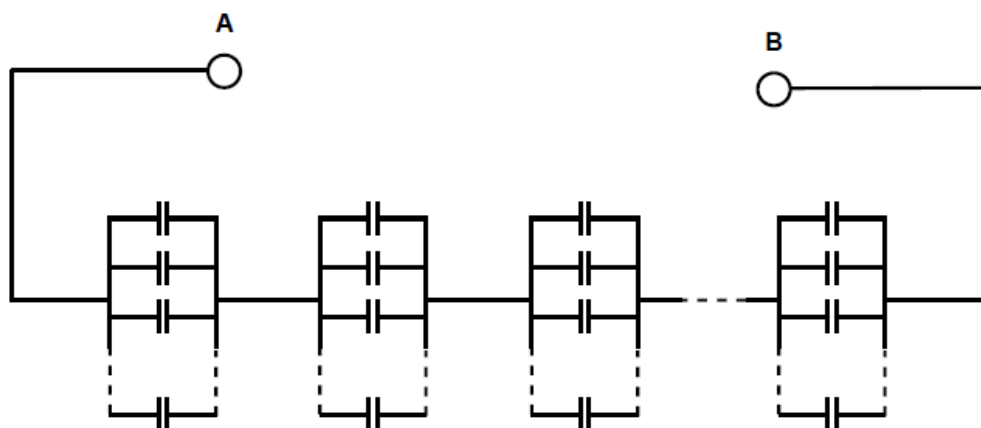


Figura 4.3. Esquema eléctrico del diseño de supercondensadores en serie-paralelo (Fuente: Elaboración propia)

- **COMBINACIÓN DE SUPERCONDENSADORES EN PARALELO CON CC/CC**

En este segundo diseño, se propone la asociación en paralelo de supercondensadores hasta alcanzar la capacidad necesaria de diseño, es decir, hasta alcanzar los 12.000F. Con respecto al diseño anterior, no se va a disponer

ningún supercondensador en serie para elevar la tensión a la salida de la agrupación.

En este caso, se va a disponer de un convertidor de CC/CC para elevar la tensión hasta los 24V necesarios. De esta manera, se reduce considerablemente el número de supercondensadores necesarios, aunque se requiera de un componente extra. Además, al no haber asociación en serie, no es necesario hacer balanceo de la tensión para que todos los supercondensadores se carguen a la misma tensión.

Cabe destacar que el uso de un convertidor o regulador de corriente continua (CC/CC) proporciona un acertado control del contenido energético de los supercondensadores, aunque una hipotética conexión directa entre la batería principal del sistema y los supercondensadores en sí disminuyan la presencia de corrientes transitorias tanto dentro como fuera de la propia batería [7]. Sin embargo, como en la aplicación que se propone no se cuenta con una batería principal, sino que es la asociación de supercondensadores el almacenamiento principal de energía este aspecto no es relevante.

Otro aspecto para tener en cuenta es que se depende del elemento comercial que se escoja como regulador CC/CC y sus especificaciones técnicas, habrá que disponer de una sola unidad o una unidad por cada supercondensador.

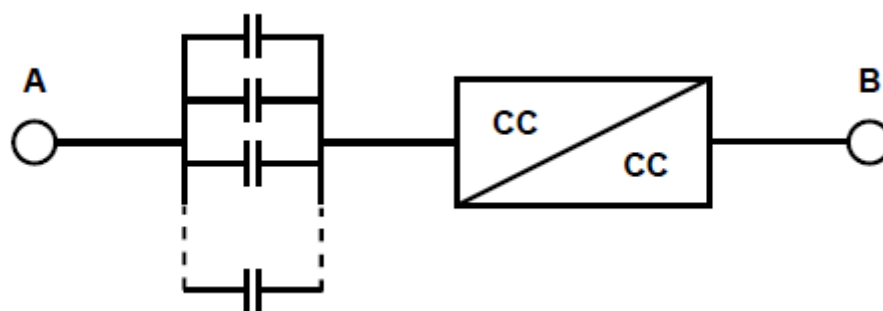


Figura 4.4. Esquema eléctrico del diseño de supercondensadores en paralelo con CC/CC (Fuente: Elaboración propia)

- **BATERÍA DE SUPERCONDENSADORES**

Para tercer y último diseño, se va a escoger una batería de supercondensadores que venga ya dispuesta para un montaje directo. Como no se va a tener que llevar a cabo ningún cálculo extra en este diseño, se depende totalmente de la oferta comercial que haya en el mercado. Estos elementos son ya dispositivos compactos que permiten conexiones más sencillas puesto que llevan ya internamente su propia circuitería.



Figura 4.5. Ejemplo de baterías de supercondensadores del fabricante Maxwell (Fuente:[35])

4.2.1.3. ELECCIÓN DE ELEMENTOS COMERCIALES

Una vez llevados a cabo los cálculos iniciales del estudio, comunes a todos, y tras presentar brevemente los tres posibles diseños del nuevo sistema de almacenamiento de energía eléctrica para el SAI, se procede a la búsqueda de los elementos comerciales que mejor se adapten mejor a las situaciones requeridas en cada uno de los diferentes diseños. Como ya se indicó en apartados anteriores, es posible que alguno de los diseños se tenga que reajustar dependiendo de los valores de tensión, de capacidad, de carga, etc., con que cuenten los elementos que se elijan.

Comercialmente, se ha llevado una intensa búsqueda en fabricantes como *Illinois Capacitor* (actualmente *Cornell Dubilier Energizing Ideas*) [36], *EATON Powering Business Worldwide* [37], *VISHAY Intertechnology* [38], *Maxwell Technologies* [39], entre otros. Igualmente, se ha acudido a portales de venta especializados en componentes electrónicos, como por ejemplo *MOUSER ELECTRONICS* [40], *DigiKey ELECTRONICS* [41], *Farnell*, [42], *RS Components* [43] o *FUTURE ELECTRONICS* [44] entre otros.

- **COMBINACIÓN DE SUPERCONDENSADORES EN SERIE-PARALELO**

Para este diseño, se ha elegido el siguiente modelo comercial de supercondensador, del fabricante EATON [45] :



Figura 4.6. Modelo de supercondensador elegido para el primer diseño (Fuente: [45])

Las características principales de este modelo comercial de supercondensador son:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS <i>EATON XV3560-2R7407-R</i>	
Fabricante	EATON
Modelo	XV3560-2R7407-R
Tipo de supercondensador	RADIAL
Capacitancia	400F
Tensión nominal	2,7V
Tolerancia (%)	De -5% a +10%
ESR	3,2mΩ
Corriente de fuga	0,85mA
Rango de temperaturas de operación	De -40°C a +65°C
Dimensiones	L 63mm x D 35mm
Método de montaje	Snap Fit
Precio	26,158€/unidad
Proveedor	FUTURE ELECTRONICS

Tabla 4.1. Características técnicas del supercondensador elegido para el primer diseño EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: [45])

Se ha elegido el modelo anteriormente presentado ya que cuenta con una tensión similar a la que ha sido utilizada para realizar los cálculos iniciales (2,7V -5% +10%), pero principalmente ha sido seleccionado debido a que cuenta con una gran capacidad, unos 400F según los datos del fabricante.

Una vez en este punto del estudio, se llevan a cabo los cálculos pertinentes para ver qué número de unidades de supercondensadores se necesitan para la implementación de este diseño.

En primer lugar, se va a llevar a cabo el cálculo de las asociaciones o ramas en paralelo. Este modelo de asociación va a perseguir alcanzar la capacidad total que se quiere conseguir. Sabiendo que la capacidad total de una asociación de supercondensadores se calcula de la misma manera que la de los condensadores ordinarios, se tiene que [46]:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (4.14)$$

Donde:

- C_{eq} es la capacidad equivalente o total de todos los supercondensadores individuales [F]
- C_1, C_2, C_3, C_n son las capacidades individuales de los supercondensadores [F]

En este caso particular, todas las capacidades individuales van a ser iguales, puesto que todos los supercondensadores van a ser iguales. De esta manera, la ecuación para el cálculo de la capacidad total queda:

$$C_{eq} = n_1 \times C \quad (4.15)$$

Donde

- n_1 es el número total de supercondensadores en la rama en paralelo
- C es la capacidad individual de cada supercondensador. Van a ser todos iguales, y se conoce su capacidad previamente, pues se ha elegido a propósito. Este valor será de 400F.

Por otro lado, la capacidad equivalente de la asociación en paralelo va a resultar la capacidad total que la aplicación requiere, y la cual se ha calculado ya anteriormente. Por lo tanto:

$$C_{eq} = C_{TOTAL} = 12.000F \quad (4.16)$$

De esta manera, el cálculo del número de supercondensadores necesarios resulta:

$$12.000F = n_1 \cdot 400F \quad (4.17)$$

$$n_1 = 12.000F / 400F = \mathbf{30 \text{ unidades de SC/rama en paralelo}} \quad (4.18)$$

Una vez calculadas las unidades necesarias para conseguir la capacidad total, se procede al cálculo del número de asociaciones en paralelo que se van a situar en serie entre ellas para alcanzar la tensión total necesaria, es decir **24V**. Como ya se ha especificado con anterioridad, se dispondrá de un número determinado de ramas en paralelo, pero dispuestas en serie, como muestra la figura 4.3 a continuación.

Por otro lado, el cálculo de la tensión total en una agrupación de condensadores, que se calcula de la misma manera en el caso de los supercondensadores, se da de la forma [46]:

$$V_{TOTAL} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (4.19)$$

Donde:

- **V_{total}** es la tensión total de la rama en serie
- **$V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$** , son las tensiones individuales de cada rama.

Como las tensiones individuales de cada rama van a ser iguales entre sí, puesto que van a proceder de las tensiones individuales de las asociaciones en paralelo, la expresión para el cálculo de la tensión total de la rama en serie se puede expresar como:

$$V_{TOTAL} = n_2 \times V \quad (4.20)$$

Donde:

- **V_{total}** es la tensión total de la rama en serie
- **n_2** es el número total de asociaciones en paralelo, que se van a situar en la rama en serie
- **V** es la tensión individual de cada asociación en paralelo

De esta manera, el cálculo del número de supercondensadores necesarios resulta:

$$24V = n_2 \cdot 2,7V \quad (4.21)$$

$$n_2 = 24V / 2,7V = 8,89 \rightarrow n_2 = 9 \text{ asociaciones en paralelo} \quad (4.22)$$

Una vez calculados el número de supercondensadores que se van a disponer en cada rama en paralelo, y el número total de asociaciones en paralelo que se van a disponer en serie, se procede a calcular el número total de supercondensadores que se van a requerir en este primer diseño del nuevo sistema de almacenamiento de energía eléctrica para el SAI.

$$\begin{aligned} N^{\circ} \text{ Supercondensadores}_{TOTALES} & \quad (4.23) \\ &= 9 \text{ asociaciones en paralelo} \times \frac{30 \text{ unidades de SC}}{\text{asociación en paralelo}} \\ &= \mathbf{270 \text{ ud SC}} \end{aligned}$$

Por lo tanto, se necesitan un total de **270** unidades de supercondensadores.

El siguiente paso dentro del estudio, se corresponde al cálculo económico del presente diseño. Cabe destacar que solo se trata de un cálculo aproximado, pues solo se va a calcular el coste que tendrían los supercondensadores, excluyendo el material extra necesario para llevar a cabo el montaje, o la electrónica para el balanceo de las agrupaciones en serie de los elementos.

$$\text{Precio SC} = 270 \text{ ud SC} \times 26,158\text{€} / \text{ud SC} = \mathbf{7.062,66\text{€}} \quad (4.24)$$

Por último, se lleva a cabo un cálculo aproximado de la superficie que ocuparían las 270 unidades de supercondensadores que requiere este diseño. Según el fabricante, las dimensiones con las que cuentan los supercondensadores *EATON XV3560-2R7407-R* son:

- Alto = 63mm
- Diámetro = 35mm

Aunque se pueda pensar que lo más lógico es realizar el cálculo del área individual de cada supercondensador teniendo en cuenta que se trata de un cuerpo con forma

cilíndrica, y por lo tanto utilizar la fórmula del área de un círculo, se ha llevado a cabo el cálculo a través de la fórmula de un cuadrado. Esto se explica a través de la figura 4.7 a continuación:

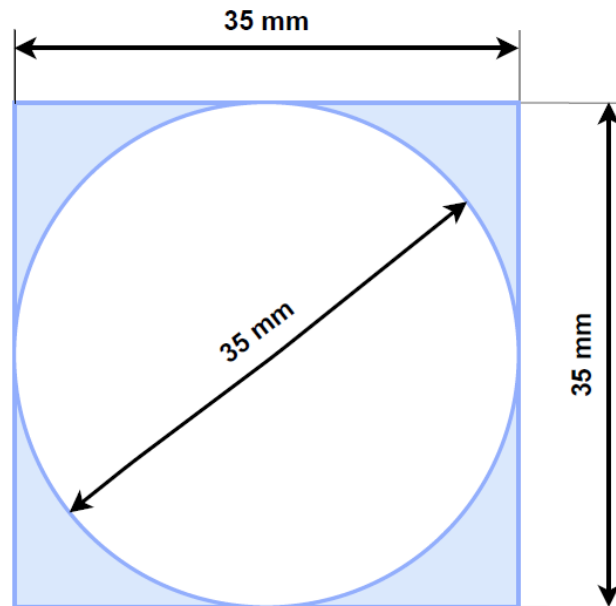


Figura 4.7. Representación de la planta de un supercondensador EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: Elaboración propia)

A la hora de colocar un supercondensador al lado del otro, hay un espacio que no se puede aprovechar, que se encuentra representado en la figura anterior por los espacios situados en azul. Por lo tanto, se calcula el área que pueden ocupar en función del área de un cuadrado.

$$A_{\text{CUADRADO}} = l \times l = l^2 \quad (4.25)$$

De esta manera, al caso que atañe el presente estudio, los cálculos quedan:

$$A_{\text{SUPERCONDENSADOR}} = l^2 = (35\text{mm})^2 = 1.225\text{mm}^2 \quad (4.26)$$

El área que ocupará un supercondensador individualmente son 1.225mm². Si extendemos este cálculo a las 270 unidades de SC que requiere el diseño que se presenta en este subapartado, el área total resulta:

$$A_{TOTAL} = 270 \text{ ud SC} \times \frac{1.225\text{mm}^2}{\text{ud SC}} = 330.750\text{mm}^2 \quad (4.27)$$

Por lo tanto, el área total del modelo de combinación de supercondensadores en serie-paralelo resulta, aproximadamente de **330.750mm²**, o lo que es lo mismo **0,33m²**.

Cabe destacar, como se ha enunciado anteriormente, que el diseño de este modelado requiere de una electrónica extra para el balanceo de la tensión en las asociaciones en serie, la cual no se ha llevado a estudio, ni de modelado, ni de costes, ni de espacio a ocupar. Se ha decidido avanzar en los otros dos diseños para luego tener que añadir esa electrónica al modelado si éste resultase el diseño a elegir.

- **COMBINACIÓN DE SUPERCONDENSADORES EN PARALELO CON CC/CC**

Para este segundo diseño, se ha elegido el mismo modelo de supercondensador que el diseño anterior, *Combinación de supercondensadores en serie-paralelo*. Este modelo de supercondensador cuenta con una tensión en sus bornas estándar para este tipo de dispositivos, 2,7V, y una capacidad de 400F que resulta realmente interesante para este tipo de modelados.



Figura 4.8. Modelo de supercondensador elegido para el segundo diseño (Fuente: [45])

Por lo tanto, la hoja de características de este modelo es idéntica a la anterior.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS EATON XV3560-2R7407-R	
Fabricante	EATON
Modelo	XV3560-2R7407-R
Tipo de supercondensador	RADIAL
Capacitancia	400F
Tensión nominal	2,7V
Tolerancia (%)	De -5% a +10%
ESR	3,2mΩ
Corriente de fuga	0,85mA
Rango de temperaturas de operación	De -40°C a +65°C
Dimensiones	L 63mm x D 35mm
Método de montaje	Snap Fit
Precio	26,158€/unidad
Proveedor	FUTURE ELECTRONICS

Tabla 4.2. Características técnicas del supercondensador elegido para el segundo diseño EATON XV3560-2R7407-R (Fuente: [45])

Este segundo diseño, es muy similar al anterior en cuanto a cálculos, ya que al tratarse del mismo modelo de supercondensador se pueden aprovechar algunos de los desarrollos matemáticos que se llevaron a cabo en el modelado anterior.

De esta manera, este segundo diseño va a contar con una única rama en paralelo, que cuente con un total de **30 unidades** de supercondensadores emplazados en paralelo entre sí, los cuales alcanzan los 12.000F de capacidad totales que la aplicación precisa.

Por otra parte, como ya se anunció en el subapartado anterior, este diseño necesita de una electrónica extra para alcanzar la tensión de 24V necesaria a la salida del sistema de almacenamiento de energía. Esa electrónica sería un convertidor de corriente continua en corriente continua (DC/DC) de tipo elevador, para aumentar la tensión a la salida. No obstante, y esta era una opción que se planteó desde un primer momento, el mercado no ofrece una opción comercial viable según los requisitos del diseño. Por lo tanto, la parte del segundo diseño dedicada a la elevación de la tensión no se puede resolver y queda pendiente como líneas futuras del presente estudio.

No obstante, los cálculos correspondientes a la parte económica y a la superficie que pueda ocupar este modelo sí se van a efectuar.

En cuanto al cálculo económico, se corresponde a un cálculo aproximado, pues solo se va a calcular el coste que tendrían los supercondensadores, sin tener en cuenta el material extra necesario, y la electrónica para elevar la tensión.

$$\text{Precio SC} = 30 \text{ ud SC} \times 26,158\text{€} / \text{ud SC} = \mathbf{784,674\text{€}} \quad (4.28)$$

Por último, se realiza el cálculo relativo a la superficie, aproximada, que van a ocupar los supercondensadores en este diseño. Al igual que en el diseño anterior, se considera que el espacio que va a ocupar un supercondensador tiene forma cuadrada.

$$A_{TOTAL} = 30 \text{ ud SC} \times \frac{1.225\text{mm}^2}{\text{ud SC}} = 36.750\text{mm}^2 \quad (4.29)$$

Por lo tanto, el área total del modelo de combinación de supercondensadores en serie-paralelo resulta, aproximadamente de **36.750mm²**, o lo que es lo mismo **367,5cm²**.

Cabe destacar de nuevo que el cálculo económico y de superficie no es real ya que este diseño está incompleto debido a la falta de opciones comerciales de convertidores CC/CC.

- **BATERÍA DE SUPERCONDENSADORES**

El tercer y último diseño que se presenta como candidato para la sustitución de una batería de ácido-plomo como sistema de almacenamiento de energía diverge ligeramente de los dos anteriores. En el subapartado correspondiente a los cálculos, solo se relata que se depende total y absolutamente de la oferta comercial que el mercado presente en el momento del estudio.

En este caso, se van a llevar los cálculos ligeramente del revés. Se ha preseleccionado una batería de supercondensadores comerciales, tal que:



Figura 4.9. Modelo de batería de supercondensadores elegido para el tercer diseño (Fuente: [47])

Las características principales de este modelo comercial de batería de supercondensadores son:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS SKELSTART 24V	
Fabricante	Skeleton Technologies GmbH
Modelo	SKELSTART 24V
Tipo de supercondensador	EDLC
Capacitancia	320F
Capacitancia de cada celda individual	3200F
Tensión nominal	24V
ESR	1,79mΩ
Corriente de carga	16A
Rango de temperaturas de operación	-40°C ~ 5°C
Dimensiones	L 328mm x A 171mm x ALT 241 mm
Método de montaje	Montaje de chasis
Precio	1.082,04€/unidad
Proveedor	Digi-Key ELECTRONICS

Tabla 4.3. Características técnicas supercondensador elegido para el tercer diseño SKELSTART 24V (Fuente: [47])

Por lo visto en la hoja de características que proporciona el fabricante, el modelo de batería seleccionada cuenta con una capacidad total de **320F** y una tensión en bornas de **24V**. A diferencia de los otros dos casos anteriores, en este diseño no se cuenta con una tensión individual de 3V, sino de 24V, por lo que hay que reorientar los cálculos hacia otro horizonte. Se parte calculado la carga en Culombios que proporciona esa batería, y a partir de ahí, se decide si esta batería es válida, cuántas unidades son necesarias y en qué disposición se emplazan dichas baterías.

A partir de la siguiente ecuación, se calcula la carga que otorga la batería seleccionada [31] [32] [33]:

$$Q = C \times V \quad (4.30)$$

$$Q = 320F \cdot 24V$$

$$Q = 7.680C$$

Por lo tanto, la batería escogida otorga un valor de 7.680C de carga. A simple vista, puede parecer insuficiente, puesto que lo es. Sin embargo, es un valor cercano a la mitad de la carga total necesaria, los famosos 12.000C. Por lo tanto, se propone situar dos baterías de supercondensadores en paralelo. De esta manera, conseguiremos lo siguiente:

- Por una parte, duplicamos la capacidad, lo que supondrá duplicar la carga
- Por otra parte, la disposición en paralelo de las baterías supone que la tensión de 24V se mantenga, tensión que requiere la aplicación.

Por lo tanto, los cálculo con dos baterías dispuestas en paralelo es:

$$Q = C \times V \quad (4.31)$$

$$Q = 2 \cdot (320F) \cdot 24V$$

$$Q = 15.360C > 12.000C \rightarrow \text{Cumple}$$

Visto lo anterior, dos baterías de supercondensadores situadas en paralelo cumplen con los 12.000C necesarios. Sin embargo, se debe tener en cuenta que disponer dos baterías en paralelo puede acarrear problemas eléctricos si en el momento de

conexión una esté más cargada que la otra, ya que se producirá un pico de corriente de la más cargada a la menos, sin ningún elemento resistivo de por medio. Aunque por su propia tecnología, los supercondensadores pueden absorber tal pico de electricidad, se recomienda que la conexión se haga con las baterías descargadas para luego proceder a la carga conjunta y simultánea de las dos.



Figura 4.10. Conexión de las baterías de supercondensadores en paralelo en el tercer diseño (Fuente: Elaboración propia)

4.2.2. ELECCIÓN DEL DISEÑO

Una vez presentados los cálculos y los elementos comerciales que puedan cumplir las necesidades de los diseños, se procede a la elección de uno de los diseños y descarte de los otros dos.

En primer lugar, se ha decidido descartar el segundo de los diseños, la *Combinación de supercondensadores en paralelo con CC/CC* ya que no se ha podido completar el diseño por falta de uno de los componentes principales del diseño, el convertidor CC/CC.

Una vez descartado uno de los diseños, quedaría analizar los dos modelos restantes para elegir uno y descartar el otro.

Si enfocamos la elección desde un punto de vista económico, los 7.062,66€ que requiere el diseño de *Combinación de supercondensadores en serie-paralelo* frente a los 1.082,04€ por unidad de batería de supercondensadores que hacen un total de 2.164,08€ el total del tercer diseño, dejan en evidencia que sería el tercer diseño el más adecuado para el presente estudio. Además, desde el punto de vista técnico, el primero de los diseños requiere de un montaje laborioso (montaje de 270 supercondensadores), frente a la conexión en paralelo de las dos baterías de supercondensadores del tercer diseño. Por lo tanto, el diseño elegido para la sustitución del conjunto de baterías de ácido-plomo como sistema de almacenamiento de energía del SAI al que se ha sometido a estudio, es:

BATERÍA DE SUPERCONDENSADORES

Tal y como se muestra en la figura 4.10.

5. Conclusiones (y recomendaciones futuras)

Como conclusiones al presente Trabajo de Fin de Máster se puede encontrar que:

- Se ha conseguido alcanzar los objetivos propuestos al comienzo del documento. Por una parte, se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte en cuanto a baterías convencionales y supercondensadores. Por otra parte, se ha estudiado el alcance de las baterías y los supercondensadores como dispositivos de almacenamiento de energía en tándem y de manera individual.
- Se ha conseguido igualmente llevar a cabo un estudio sobre un sistema de alimentación interrumpida, en cuanto a su batería de ácido-plomo. Dicho estudio sirvió como punto de partida para realizar el modelado de un nuevo sistema de acumulación de energía eléctrica con una tecnología de almacenamiento diferente, en forma de supercondensadores.
- Se han desarrollado tres diseños diferentes para el modelado del nuevo sistema de acumulación de energía. El primero de ellos se basa en un conjunto de supercondensadores dispuestos en serie y en paralelo para conseguir los valores de tensión y capacidad calculados. El segundo diseño se basa en un conjunto de supercondensadores dispuestos en paralelo para conseguir la capacidad necesaria, acompañados de un convertidor de tensión de CC/CC de tipo elevador para adecuar la tensión al valor estipulado. El tercer y último diseño se basa en un conjunto de baterías de supercondensadores comerciales dispuestas en paralelo para conseguir la capacidad necesaria.
- Se ha elegido el tercer diseño como diseño final del presente estudio. Dicho modelo cuenta con dos baterías de supercondensadores dispuestas en paralelo, las cuales individualmente presentan 320F de capacidad y 24V en sus bornas. Este diseño acarrearía un coste de 2.164,08€.

- Este diseño no es viable económicamente en la actualidad, ya que el anterior sistema de acumulación de energía eléctrica que presentaba el SAI, las baterías de ácido-plomo, representa un coste de alrededor de un 2% del coste de las baterías de supercondensadores. No obstante, los supercondensadores representan una tecnología en desarrollo actualmente y se espera que en un periodo de tiempo no demasiado largo su coste se reduzca hasta tal punto que diseños como el que aquí se presenta sean viables económicamente hablando.
- Se ha llevado a cabo un diseño y modelado puramente teórico por motivos económicos, ya que no se contaba con la financiación suficiente como para desarrollar una etapa de pruebas en el laboratorio de la Escuela de Ingenierías.

En cuanto a líneas futuras, se ha considerado que:

- La implementación del diseño es necesaria para que el estudio sea lo más real y veraz posible. Hacer pruebas e incluso fabricar un prototipo serían las siguientes etapas del estudio. Además, se podrá probar e implementar el diseño propuesto si se consigue una fuente de financiación para el proyecto.
- Se presenta la posibilidad de desarrollar de manera práctica, o al menos llevar a cabo unas pruebas aproximativas, de los dos diseños descartados en el presente estudio. El modelo basado en la asociación de supercondensadores en serie y paralelo es interesante desde el punto de vista del balanceo de la tensión de los supercondensadores dispuestos en serie. Por otra parte, el modelo basado en la asociación de supercondensadores en paralelo es interesante desde el punto de vista de la electrónica añadida para elevar la tensión a la salida. Dado que no se ha encontrado ningún elemento comercial que realice esa función se propone el diseño implementación del convertidor CC/CC de tipo elevador que eleve la tensión de 3V a 24V.

6. Referencias bibliográficas

- [1] Z. S. Iro, C. Subramani, y S. S. Dash, «A Brief Review on Electrode Materials for Supercapacitor», *Int. Journal Electrochem. Sci.*, vol. 11, pp. 10628-10643, 2016, doi: 10.20964/2016.12.50.
- [2] Luís M^a Atienza Serna, «El almacenamiento de energía eléctrica», *Estud. Econ. Apl.*, vol. 29, n.º 2, pp. 449-466, 2011.
- [3] «Historia de la batería eléctrica - Historia de la pila», *Electrónica Unicrom*, oct. 04, 2020. <https://unicrom.com/historia-de-la-bateria/> (accedido dic. 07, 2021).
- [4] «Pila de Volta», *Cuaderno de Cultura Científica*. <https://culturacientifica.com/app/uploads/2016/04/Pila-de-Volta.jpg> (accedido dic. 07, 2021).
- [5] I. Gil Mera, «Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas», Universidad de Sevilla. Accedido: ago. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4740/fichero/2.+Baterias+y+Supercondensadores.pdf>
- [6] «¿Cómo funciona una batería? VARTA® describe con detalle el funcionamiento de las baterías de coches». <https://www.varta-automotive.es/es-es/soporte-para-baterias-varta/conceptos-basicos-sobre-baterias/como-funciona-una-bateria> (accedido dic. 07, 2021).
- [7] S. Pay y Y. Baghzouz, «Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles», en *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, jun. 2003, vol. 3, p. 6 pp. Vol.3-. doi: 10.1109/PTC.2003.1304472.
- [8] N. Kularatna, «2 - Rechargeable battery technologies: an electronic engineer's viewpoint», en *Energy Storage Devices for Electronic Systems*, N. Kularatna, Ed. Boston: Academic Press, 2015, pp. 29-61. doi: 10.1016/B978-0-12-407947-2.00002-X.
- [9] Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, y Egoitz Iturriaga Zubiri, *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes*. Monografías ElecRail, 2008. Accedido: ago. 22, 2021. [En línea]. Disponible en:

- https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/M4-ElecRail_Sistemas_acumulaci%C3%B3n.pdf
- [10] P. Díaz Baizán, «SUPERCONDENSADORES HIBRIDOS ASIMETRICOS BASADOS EN MATERIALES DE CARBONO Y ESPECIES REDOX INORGANICAS», 2016.
- [11] T. Sun, «¿Las baterías de plomo-ácido pueden ser competitivas actualmente? » Techno Sun - Blog corporativo - Energías renovables», *Techno Sun - Blog corporativo - Energías renovables*, feb. 04, 2010. <http://blog.technosun.com/puede-ser-competitiva-actualmente-la-bateria-de-plomo-acido/> (accedido ago. 24, 2021).
- [12] «Qué son y cómo funcionan las baterías de litio», *EcoInventos*, mar. 21, 2021. <https://ecoinventos.com/baterias-de-litio/> (accedido ago. 24, 2021).
- [13] «Batería de plomo ácido, 12V 120Ah, AGM, terminales T11 | RS Components». <https://es.rs-online.com/web/p/baterias-de-plomo-acido/7270401> (accedido nov. 19, 2021).
- [14] L. Endemaño Ventura, «Análisis global de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica», 2016, Accedido: ago. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/handle/11441/48651>
- [15] J. David, «Nickel-cadmium battery recycling evolution in Europe», *J. Power Sources*, vol. 57, n.º 1, pp. 71-73, sep. 1995, doi: 10.1016/0378-7753(95)02244-9.
- [16] «Nícd-batería Recargable De Níquel Y Cadmio,Tamaño C,1,2 V,C2500mah,Con Botón Superior - Buy Button Top Nícd Battery Cell 2500mah With Size C,Nícd C Size 1.2v 2500mah Rechargeable Battery,Nickel Cadmium Batteries 1.2v Product on Alibaba.com». <https://spanish.alibaba.com/product-detail/nícd-size-c-1-2v-c2500mah-rechargeable-battery-nickel-cadmium-type-with-button-top-60761722156.html> (accedido nov. 18, 2021).
- [17] «Emisa - Baterías de Níquel Cadmio». <https://www.emisa.es/> (accedido nov. 18, 2021).
- [18] «BATERIA NI-MH 1.2V 4500mA R-14 CON TERMINALES». <https://www.cetronic.es/sqlcommerce/disenos/plantilla1/seccion/producto/DetalleProducto.jsp?idIdioma=&idTienda=93&codProducto=111162037&cPath=1068> (accedido nov. 18, 2021).

- [19] J. Dixon, I. Nakashima, E. F. Arcos, y M. Ortuzar, «Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n.º 3, pp. 943-949, mar. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2027920.
- [20] E. G. Calvo, A. Arenillas de la Puente, J. Á. Menéndez Díaz, M. González Vega, y J. C. Viera Pérez, «Propiedades, ventajas e inconvenientes de los materiales utilizados en supercondensadores», *Afinidad* 66 543, 2009, Accedido: ago. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/31154>
- [21] «El amanecer de los supercondensadores, ¿el final de las baterías de iones de litio? - Autofácil». <https://www.autofacil.es/tecnologia/lamborghini-sian-supercondensadores/261040.html> (accedido ago. 25, 2021).
- [22] J. M. Miller, «Ultracapacitor Efficiency under Constant Power Conditions: Prospects for Lithium Battery plus Ultracacitor Hybrid Energy Storage Systems», *Int. Sysposium Large Ultracapacitor Technol. Appl. UCAP Adv. Automov. BAttery Conf. AABC*, 2007.
- [23] A. M. Saleem, V. Desmaris, y P. Enoksson, «Performance Enhancement of Carbon Nanomaterials for Supercapacitors», *J. Nanomater.*, vol. 2016, p. e1537269, ago. 2016, doi: 10.1155/2016/1537269.
- [24] M. Sarno, «Chapter 22 - Nanotechnology in energy storage: the supercapacitors», en *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 179, A. Basile, G. Centi, M. D. Falco, y G. Iaquaniello, Eds. Elsevier, 2020, pp. 431-458. doi: 10.1016/B978-0-444-64337-7.00022-7.
- [25] J. A. Guacaneme, D. Velasco, y C. L. Trujillo, «REVISIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA PARA APLICACIONES EN MICRO REDES», *Inf. Tecnológica*, vol. 25, n.º 2, pp. 175-188, 2014, doi: 10.4067/S0718-07642014000200020.
- [26] Rodolfo R. Martín Hernández, «Análisis, modelado e identificación de los condensadores electroquímicos de doble capa», Universidad de las Palmas de Gran Canaria, Las Palmas de Gran Canaria, 2014. Accedido: oct. 22, 2021. [En línea]. Disponible en: https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/11898/4/0699302_00000_0000.pdf

- [27] W. Raza *et al.*, «Recent advancements in supercapacitor technology», *Nano Energy*, vol. 52, pp. 441-473, oct. 2018, doi: 10.1016/j.nanoen.2018.08.013.
- [28] C. Peng, S. Zhang, D. Jewell, y G. Z. Chen, «Carbon nanotube and conducting polymer composites for supercapacitors», *Prog. Nat. Sci.*, vol. 18, n.º 7, pp. 777-788, jul. 2008, doi: 10.1016/j.pnsc.2008.03.002.
- [29] «What is a hybrid supercapacitor? », *Eaton*. <https://www.eaton.com/us/en-us/products/electronic-components/faq/what-is-a-hybrid-supercapacitor.html> (accedido ago. 20, 2021).
- [30] «Baterías, ¿En Serie o en Paralelo?» <https://www.syscomblog.com/2020/07/baterias-en-serie-o-en-paralelo.html> (accedido nov. 30, 2021).
- [31] BOE. Accedido: nov. 30, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://boe.es/boe/dias/2020/04/29/pdfs/BOE-A-2020-4707.pdf>
- [32] «faradio - Diccionario de Ingeniería Eléctrica». <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:289> (accedido nov. 30, 2021).
- [33] «culombio - Diccionario de Ingeniería Eléctrica». <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=culombio> (accedido nov. 30, 2021).
- [34] «Energy Stored on a Capacitor». <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/electric/capeng2.html> (accedido dic. 01, 2021).
- [35] «El amanecer de los supercondensadores, ¿el final de las baterías de iones de litio? - Autofácil». <https://www.autofacil.es/tecnologia/lamborghini-sian-supercondensadores/261040.html> (accedido dic. 01, 2021).
- [36] «Cornell Dubilier Capacitors - CDE (en-US)». <https://www.cde.com/> (accedido dic. 01, 2021).
- [37] «Spanish (es-es)», *Eaton*. <https://www.eaton.com/es/es-es.html> (accedido dic. 01, 2021).
- [38] «Vishay Intertechnology». <https://www.vishay.com/> (accedido dic. 01, 2021).
- [39] «UCAP Power™», *Maxwell*. <https://maxwell.com/> (accedido dic. 01, 2021).
- [40] «Distribuidor de Componentes Electrónicos - Mouser Electronics España». <https://www.mouser.es/> (accedido dic. 01, 2021).

- [41] «DigiKey Electronics España | Envío Gratuito Para Pedidos Que Superen Los 50 EUR». https://www.digikey.es/?utm_adgroup=General&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=ES_Brand_Digi-Key&utm_term=digikey&productid=&gclid=Cj0KCQiA15yNBhDTARIsAGnwe0VR1UclClkcuAsWTA-Rh68T4_DVD-ACL5szbyVcSwFRmknIAzkwJvoaAte2EALw_wcB (accedido dic. 01, 2021).
- [42] «Farnell España - distribuidor de componentes electrónicos». https://es.farnell.com/?CMP=KNC-GES-PFB-RLSA_RSA-Control-08-Oct-2021&mckv=sgjiYVeSZ_dc|pcrid|563925985178|keyword|farnell|match|e|plid||slid||product||pgrid|19191604029|ptaid|aud-366647998487:kwd-133401130|&gclid=Cj0KCQiA15yNBhDTARIsAGnwe0V9dvDNIMyysJfpHTJq5QzWop2C3YmzC2chVeSq5UdB2Oau77OEx9saAphfEALw_wcB (accedido dic. 01, 2021).
- [43] «RS Components | Su partner digital de soluciones industriales». <https://es.rs-online.com/web/> (accedido dic. 01, 2021).
- [44] «Future Electronics | Global Electronic Components Distributor, Capacitor, Microcontrollers, Wireless». <https://www.futureelectronics.com/es/> (accedido dic. 01, 2021).
- [45] «XV3560-2R7407-R in Bag by Eaton | Supercondensadores | Future Electronics». <https://www.futureelectronics.com/p/passives--capacitors--super-caps/xv3560-2r7407-r-eaton-8056155> (accedido dic. 01, 2021).
- [46] Desconocido, «La capacitancia», *UNAM - Facultad de Química*. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Capacitores_21660.pdf (accedido nov. 09, 2021).
- [47] «SKELSTART 24V Skeleton Technologies GmbH | Capacitores | DigiKey». <https://www.digikey.es/es/products/detail/skeleton-technologies-gmbH/SKELSTART-24V/13180985> (accedido dic. 06, 2021).