

Capítulo 3

Descripción del sistema

3.1 Descripción del Vehículo.

Las características del automóvil original ya se explicaron en el apartado 1.3.4, en la página 3. Sin embargo al mencionado vehículo se le han hecho una serie de modificaciones, necesarias para adaptarlo al su nueva condición de coche eléctrico con pila de combustible. Así, los principales cambios son los siguientes:

- ▷ Transmisión: Se elimina la opción de tracción total. El conductor podrá elegir entre propulsión o punto muerto. Esta última opción se tiene únicamente por seguridad, ya que en un motor eléctrico no es necesaria.
- ▷ Motor: Se elimina el motor de combustión, que es sustituido por el eléctrico descrito en el apartado 3.4.1.
- ▷ Embrague: Se elimina, y se inutiliza el pedal izquierdo. Resulta innecesario para un motor eléctrico.
- ▷ Caja de cambios: No se elimina, pero se fija a la cuarta marcha. Se elimina la palanca de cambios, y se añade un botón para la marcha atrás.
- ▷ Dirección: Se elimina la dirección asistida, para ganar espacio.
- ▷ Dispositivos de frenado: Se elimina el servofreno, para ganar espacio.
- ▷ Instalación eléctrica: Se cambia por completo para adaptarla a los dispositivos de gestión de potencia (apartado 3.4).
- ▷ Sistema de combustible: Se retira el depósito de gasoil, y se añade un sistema nuevo de almacenamiento de combustible, que se describe en el apartado 3.2.

La colocación de los distintos elementos en el vehículo se puede ver de manera esquemática en la figura 3.1

3.2 Almacenamiento de Hidrógeno

El hidrógeno se almacena a presión en tres depósitos situados en la parte trasera del vehículo. Dos de ellos tienen una capacidad de 33 litros, y el tercero de 24. Todos aguantan una presión de hasta 350 bares, lo que equivale a unos 2'4 kg de gas. En la figura 3.2 se muestra la integración de los depósitos en el vehículo.

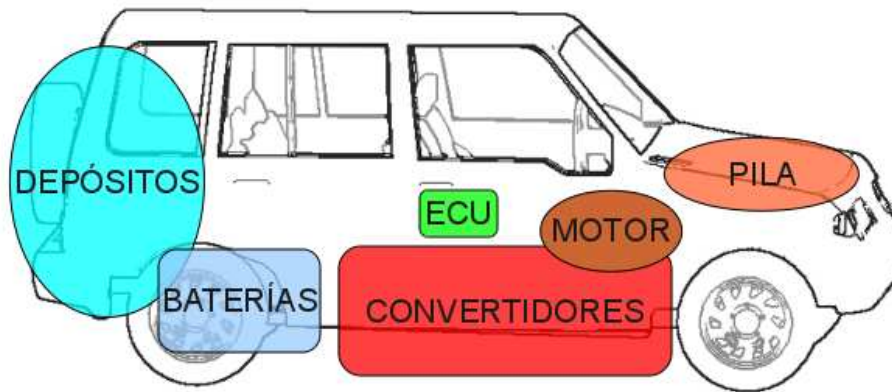


Figure 3.1: Colocación de los dispositivos en el vehículo.

3.3 Descripción del Sistema de Gestión de Potencia.

Como se ha dicho en el apartado anterior, el sistema sobre el que se hace el control es un automóvil eléctrico con pila de hidrógeno. En este punto se analizarán los dispositivos necesarios en el mencionado vehículo; comenzando por una configuración sencilla, a la que se le irán añadiendo elementos según vayan surgiendo diferentes necesidades. De esta manera se explicarán las funciones de los distintos dispositivos del vehículo, así como sus características.

En principio el vehículo de compondrá de un motor que sea capaz de moverlo, que como se ha explicado será eléctrico, una fuente de energía que alimente el motor, y una serie de elementos auxiliares necesarios, también alimentados por energía eléctrica, tales como luces, el elevavinas, etc. Esta configuración se muestra en la figura Figura 3.3, donde P_{ac} es la potencia que demanda el usuario, a través del acelerador, y P_{aux} es la potencia requerida por los elementos auxiliares.

La pila se comportará de manera que suministre la potencia que se le exija mediante una consigna de potencia, que en este caso será la suma de la potencia que demanda el usuario y la potencia de los auxiliares. El estudio del comportamiento de la pila, así como el diseño del controlador que permita el mencionado suministro de potencia quedan fuera de los objetivos de este trabajo; si bien el conocimiento de la dinámica de la pila sí va a ser necesario, como se verá más adelante.

Aunque este primer montaje es muy sencillo, en la práctica resulta irrealizable. El motor, si es de continua, necesitará un convertidor que pase el voltaje de la pila al que en ese momento requiera el propio motor. Y si es de alterna requerirá, además, de un inversor que pase la corriente de continua a alterna. Por otra



Figure 3.2: Integración de los depósitos de hidrógeno en el vehículo.

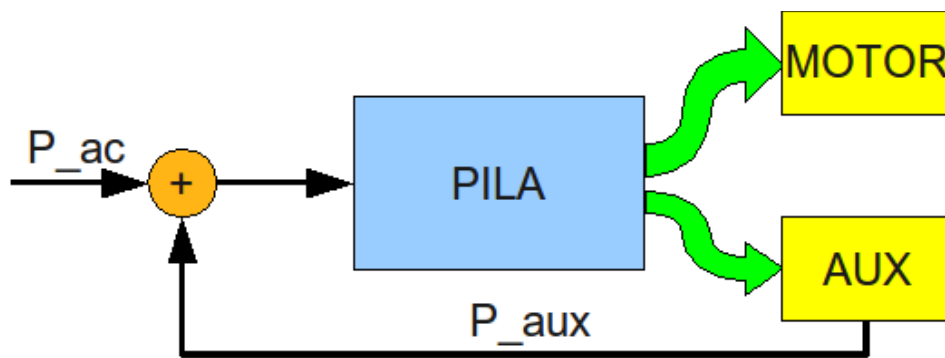


Figure 3.3: Primera Configuración.

parte, la variación de potencia que permite la pila es menor que la que puede requerir el usuario. Además, la pila trabaja mal a baja potencia, y puede resultar dañada si no se le demanda cierta carga durante un tiempo. Finalmente, la pila de combustible requiere de una fuente de energía para el arranque de sus dispositivos internos (controlador, compresores, etc). Por lo tanto se necesitan otros elementos en el sistema.

La solución al problema de las variaciones de carga, así como el de una hipotética carga baja para la pila y el de su arranque, es instalar alguna fuente de energía paralela a la pila. Dicha fuente puede estar compuesta por baterías o por supercondensadores. Ambos tipos de dispositivos tienen la ventaja de que pueden tanto entregar potencia como recibirla, recargándose de esta manera.

Un montaje más completo sería el de la Figura 3.4.

De esta manera las baterías (o en su caso, supercondensadores) actúan como sumidero de energía cuando el motor la proporcione (frenado regenerativo), o cuando la pila suministre más potencia de la que se requiera en ese momento. Por ejemplo en caso de que el motor esté parado, ya que no es bueno que la pila se apague y se encienda continuamente. A su vez, las baterías (supercondensadores) actúan como fuentes en el caso de que el motor requiera más potencia de la que la pila puede dar, o si tuvieran una carga excesiva. Éste, con algunas variantes, es el montaje más utilizado en los vehículos con pila de combustible.

En la Figura 3.5 se puede ver la configuración definitiva. En la misma, además

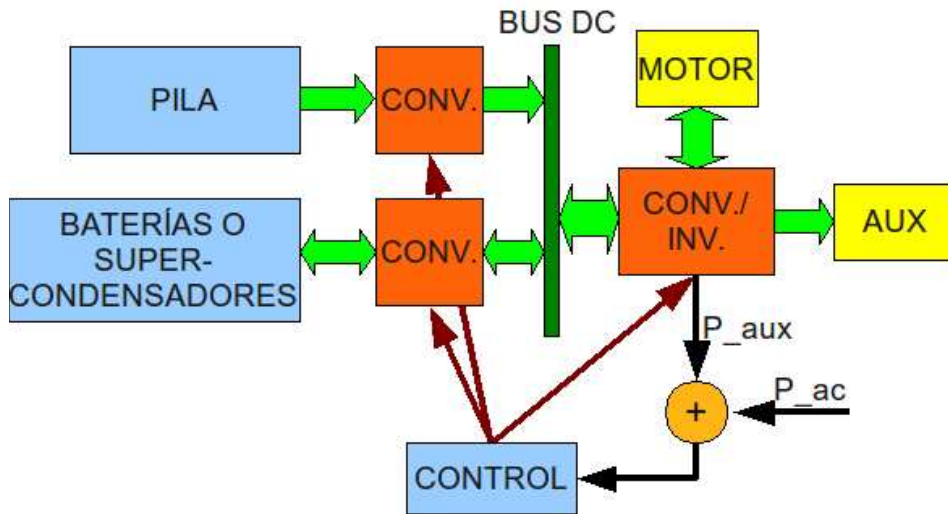


Figure 3.4: Segunda Configuración.

de haber separado las baterías y los supercondensadores, se ha añadido una resistencia eléctrica. Ésta servirá para disipar parte de la potencia que entreguen el motor o de la pila, en caso de que las baterías o los supercondensadores no fueran capaces de absorberla; bien por estar demasiado cargados, bien por su propia dinámica.

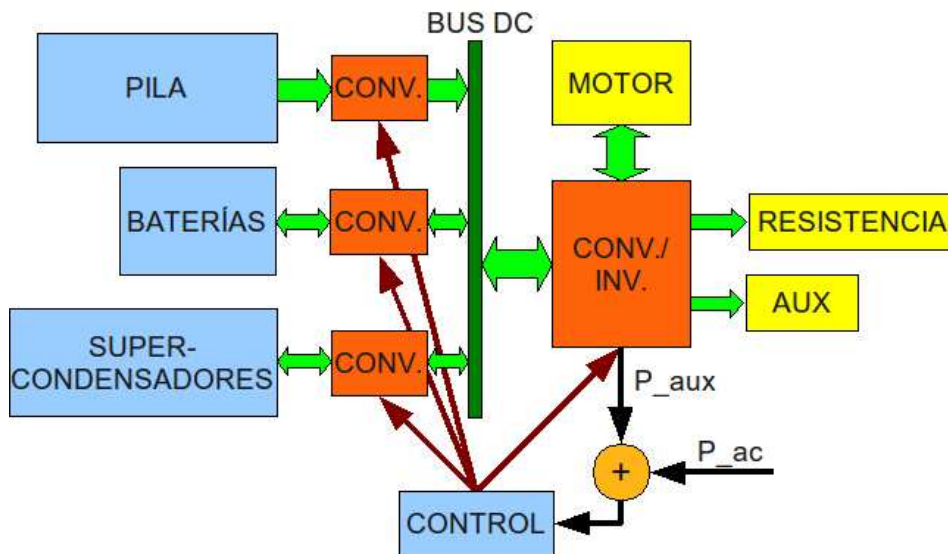


Figure 3.5: Tercera Configuración.

3.4 Descripciones de los componentes.

3.4.1 Motor eléctrico.

Como es evidente, siendo el sistema completo un automóvil, el motor es el elemento más importante de todos. Así, la consigna principal de potencia va a ser la que el usuario quiera que se le aporte al motor.

Como el motor real aún no está caracterizado por el fabricante, para el presente trabajo se ha supuesto que se comporta como un sistema de primer orden, con una constante de tiempo de 0'1 segundos. Para el resto de características, se supondrá que cumple las siguientes especificaciones:

Par máximo	460 N·m
Potencia máxima	66 kW
Velocidad máxima	6000 r.p.m.
Peso	75 kg

Table 3.1: Características del motor eléctrico.

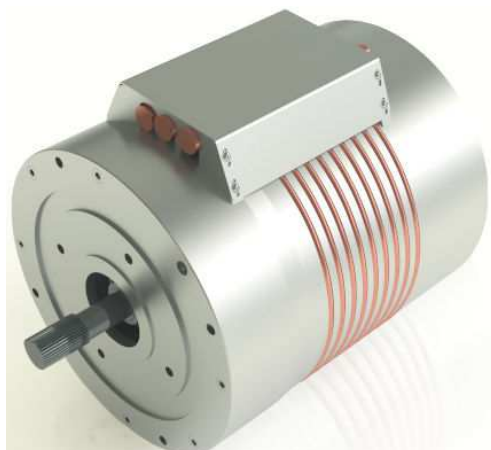


Figure 3.6: Motor Eléctrico.

3.4.2 Pila de combustible.

Fabricada por la empresa Nuvera, la pila de combustible consta de 2 stacks de 128 celdas cada uno, que puede generar una potencia máxima de 56 kW. Sus características principales se presentan en la tabla 3.2.

3.4.3 Baterías.

El diseño del conjunto de baterías que lleva el coche es anterior a la realización de este proyecto, y queda fuera del mismo.

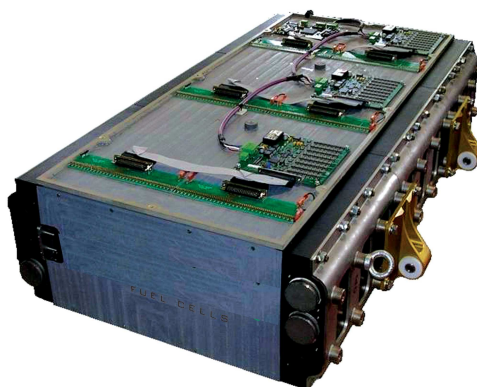


Figure 3.7: Pila de Combustible.

Potencial nominal	56 kW
Número de celdas	256
Tensión de salida	150 a 257 voltios
Corriente máxima	360 amperios
Temperatura de operación	5 – 45 °C
Rizado	5% a 1 kHz
Dimensiones	480 x 200 x 578 mm
Peso	96 kg
Volumen	56 litros

Table 3.2: Características de la pila de combustible.

El mencionado conjunto se compone de cincuenta y dos baterías de ión-litio, repartidas en cuatro bloques conectados en serie, de trece baterías cada uno, conectadas en serie.

El modelo de baterías es lithium-ion Kokam SLPB 125255255H.

Las características de cada unidad se pueden ver en la Tabla 3.3.

Capacidad nominal	75 Ah
Tensión nominal	3'7 voltios
Fin de descarga	3'0 voltios
Tensión máxima de carga	4'15 voltios
Corriente máxima de carga	225 amperios
Corriente máxima de descarga	450 amperios
Rangos de temperaturas de operación	Carga: 10 a 45 °C; Descarga: -20 a 55°C
Peso	Max. 1'73 kg
Dimensiones	262x257x12,3 mm

Table 3.3: Características de las baterías.

Agrupadas en los cuatro bloques:

Como se puede comprobar contrastando las características de las baterías por separado y en conjunto, el fabricante ha sido muy conservador en el diseño. No obstante, es el que se tiene de partida, y se respeta.



Figure 3.8: Pila de combustible integrada en el vehículo.

Discharge Rate	0.5C	1.0C	2.0C	3.0C	5.0C	6.0C
Capacity (%)	100,00%	> 95%	> 92%	> 92%	> 90%	> 90%
Discharge Temperature	-20°C	-10°C	0°C	25°C	40°C	55°C
Capacity (%)	>70%	>75%	> 85%	100,00%	> 97%	> 97%

Table 3.4: Comportamiento eléctrico de las baterías.

3.4.4 Súper Condensadores.

3.4.4.1 Justificación del uso de Súper Condensadores. Comparación con las baterías

Como se ve en el apartado 1.3, el proyecto original incluía el uso de baterías, pero no de SC. Sin embargo, en los últimos años el uso de SC para automoción ha crecido de manera notable. Según [17], la tecnología de los SC fue descubierta en 1957, si bien hasta 1969 no se llegó a hacer un intento serio por su comercialización. Pero su mayor desarrollo empezaría a llegar a partir de los años 90, a partir del diseño de los primeros vehículos híbridos.

En efecto, numerosos vehículos híbridos usan SC como sistema de almacenamiento de potencia. Así, particularizando para vehículos con pila de combustible, encontramos diversos ejemplos, como [13], [2], [15], [18] o [19]. Sin embargo, no son pocas las publicaciones sobre vehículos con baterías y pila de combustible, como [16], [20], [9], [3], [4], [5], [6] o [7]. Otros proyectos han ido cambiando su dispositivo de almacenamiento según distintas etapas de desarrollo, como el kart con pila de combustible diseñado en el *Imperial College* [21].

No existe por tanto un acuerdo sobre cuál es la mejor solución. Las publicaciones anteriores utilizan diferentes tipos de estrategias de control para distintas clases de vehículos, sin que haya relación alguna con el tipo de sistema de almacenamiento utilizado. Curiosamente en ninguno se justifica el uso de baterías o

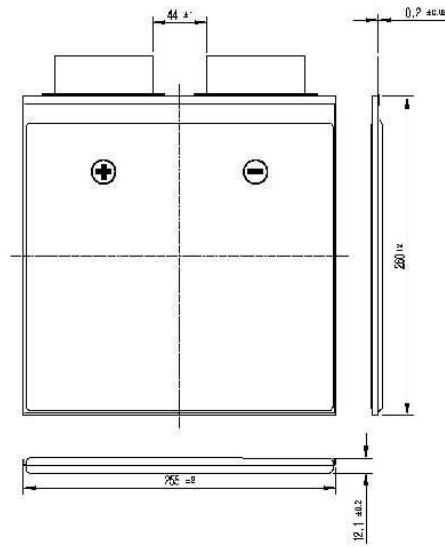


Figure 3.9: Plano de la batería.

SC.

Sí hay, en cambio, algunos trabajos donde se comparan ambas opciones. Como se sabe, los supercondensadores tienen una mayor densidad de potencia que las baterías. Es decir, para un mismo volumen ocupado, los supercondensadores son capaces de absorber o generar más potencia que un conjunto de baterías. Sin embargo las baterías tienen una mayor capacidad de almacenamiento de energía. En [22] se comparan a nivel general, concluyendo que la decisión final dependerá del coste y de su vida útil. Otra publicación interesante es [23], donde la comparación se hace considerando cuatro casos: en dos se utilizan baterías, y en los otros dos SC. Las pruebas se realizan mediante el software ADvanced VehIcle SimulatOR, simulando diferentes ciclos de conducción. La conclusión en este último trabajo es que con los SC se consigue una mejor respuesta para el sistema, así como un menor consumo de combustible.

Como se puede ver en 1.3, el sistema sobre el que está basado este TM utiliza baterías. Consecuentemente, para comparar la gestión de potencia con un sistema con SC, ha sido necesario diseñar un conjunto de Súper Condensador, de manera que sustituyan a las baterías que el vehículo real va a utilizar; para posteriormente comparar los resultados de las simulaciones obtenidas con uno y otro sistemas de almacenamiento. Finalmente se diseñará un sistema mixto, en el que se utilicen los dos tipos de dispositivos, tratando de mejorar el comportamiento general de la gestión de potencia.

3.4.4.2 Fundamentos Básicos de los Súper Condensadores.

Introducción. Sin necesidad de entrar en detalles, resulta conveniente introducir ciertos conceptos sobre los SC antes de entrar en el diseño de un *kit*.

Concepto de condensador. Un *condensador* (dieléctrico) es un dispositivo formado por dos placas metálicas paralelas separadas por un material dieléctrico,

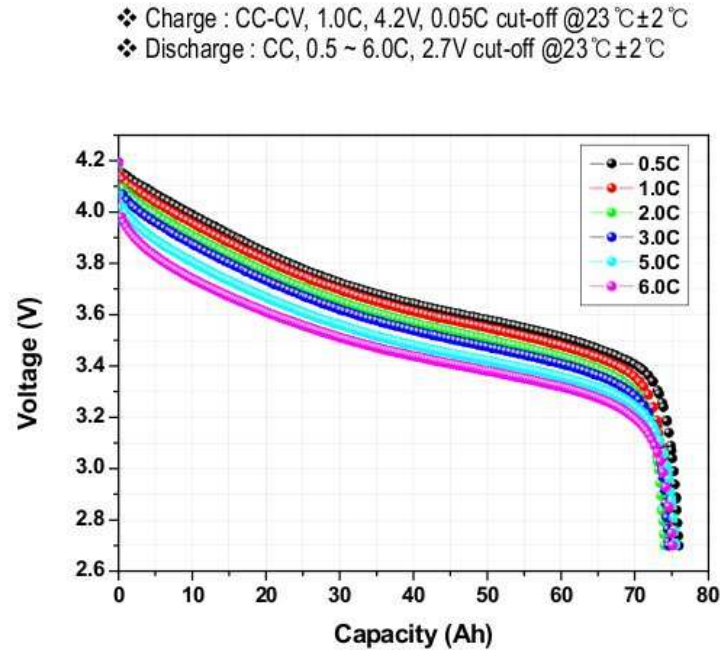


Figure 3.10: Curvas de Descarga a Distintas Intensidades.

de manera que se almacena en ellas una cierta carga. Aunque ello implica a su vez un almacenamiento de energía, ésta resulta muy pequeña respecto a la que se transfiere en el circuito, por lo que el condensador se suele utilizar simplemente para regular la tensión en un punto del circuito, o, en corriente alterna, para reducir la potencia reactiva en una carga inductiva. La característica principal de un condensador es su *capacidad* (C), que indica la carga que el dispositivo puede almacenar para una diferencia de potencial unitaria. Es decir, $C = \frac{Q}{\Delta V}$.

Súper Condensador. Físicamente, un Súper Condensador se parece más a una batería que a un condensador, en tanto en cuanto tiene dos electrodos sumergidos en un electrolito, con un separador entre los electrodos. Los electrodos están hechos de un material poroso, de manera que tenga una gran superficie exterior. La carga se almacena en los microporos, en la entrecara entre el electrodo sólido y el electrolito, o cerca de la misma. No obstante, y pese a sus diferencias físicas, la característica principal de un SC sigue siendo la capacidad. La única diferencia reside en que ésta es mucho mayor que la de un condensador dieléctrico, de manera que se hace posible su uso como fuente de energía.

Ecuaciones principales de un condensador.

Capacidad.

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (3.1)$$

- ❖ Charge : CC-CV, 0.5C, 4.2V, 0.05C cut-off @25 °C±2 °C
- ❖ Discharge : CC, 0.5C, 2.7V cut-off @ each temperature
- ❖ Soaking time : 2hr

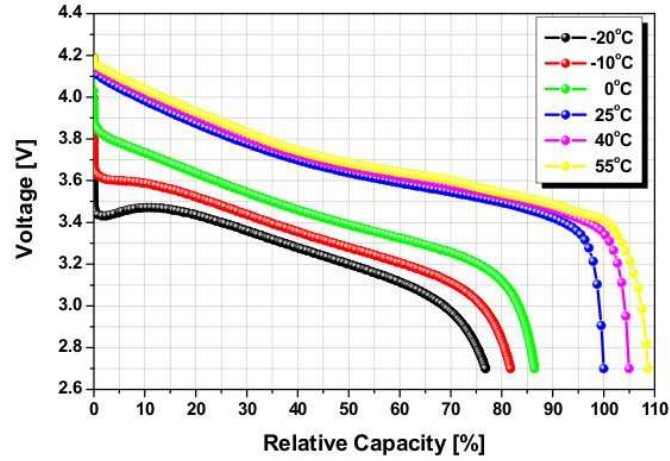


Figure 3.11: Curvas de Descarga a Distintas Temperaturas.

Intensidad.

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(CV)}{dt} = C \frac{dV}{dt} \quad (3.2)$$

Potencia.

$$P = iV = VC \frac{dV}{dt} \quad (3.3)$$

Energía.

$$E = \int_{t_0}^{t_f} P dt = \int_{V_0}^{V_f} CV dV = \frac{1}{2} C (\Delta V)^2 \quad (3.4)$$

Conexión en serie.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \sum_k \frac{dV_k}{dt} \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{C_{eq}^s} i \\ \frac{dV_k}{dt} &= \frac{1}{C_k} i \end{aligned}$$

Consecuentemente:

$$\frac{1}{C_{eq}^s} = \sum_k \frac{1}{C_k} \quad (3.5)$$

Capacidad nominal	18 kWh
Número de bloques	4
Número de baterías por bloque	13
Número de baterías total	52
Tensión nominal	150 voltios
Tensión límite operativa	200 voltios
Corriente nominal	120 amperios
Corriente pico	120 amperios
Corriente pico regenerativa	120 amperios
Temperatura operativa	-20 °C a 45 °C
Refrigeración	Ninguna
IP	55
Volumen	80'3 litros
Peso	100 kg

Table 3.5: Características del conjunto de baterías.

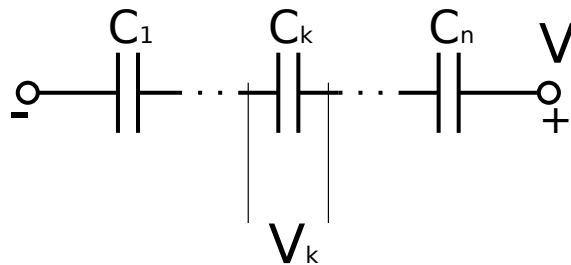


Figure 3.12: Condensadores conectados en serie.

Conexión en paralelo. Por un lado:

$$i = C_{eq}^p \frac{dV}{dt}$$

$$i_k = C_k \frac{dV_k}{dt}$$

Por otro lado:

$$V = V_k$$

$$i = \sum_k i_k$$

Consecuentemente:

$$C_{eq}^p = \sum_k C_k \quad (3.6)$$

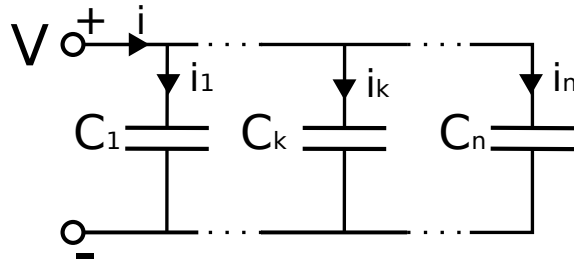


Figure 3.13: Condensadores conectados en paralelo.

3.4.4.3 Diseño de un Conjunto de Súper Condensadores.

Objetivos. Como es evidente, con el kit de SC se pretende tener un sistema de almacenamiento de energía, que sirva para las funciones que se explicaron en el apartado 3.3. El parámetro de diseño habría de ser, por tanto, la energía que son capaces de almacenar. Pero, ¿qué capacidad de almacenamiento es la que necesita el sistema?. En este TM lo que se pretende es comparar el comportamiento del sistema cuando la energía se almacena en baterías y cuando se hace en SC. Como se explica en el capítulo 1.3, el sistema de partida ya tiene diseñado un módulo de baterías. Habría, por tanto, que diseñar uno de SC de manera que se pudiera comparar con el que está en el vehículo.

Diseño según la capacidad de almacenamiento. Según las características de las baterías (tabla 3.4), las baterías pueden almacenar hasta:

$$W = V \cdot Q = 200V \cdot 75Ah = 15000Wh = 5'4 \cdot 10^7 J$$

Para comenzar, escogemos un tipo de SC cualquiera. Por ejemplo el *Panasonic 1200*, cuyas características principales son las siguientes [24]:

V (V)	C (F)	R (mΩ)	RC (s)	Wh/kg
3	1200	1.0	1.2	4.2
W/kg (95%)	W/kg (M.I.)	Peso (kg)	Vol. (l)	
744	6618	0'34	0'245	

Table 3.6: Características del SC *Panasonic 1200*.

La energía de almacenamiento de un condensador es, según la ecuación (3.4):

$$E = \frac{1}{2}C(\Delta V)^2$$

Por lo tanto:

$$5'4 \cdot 10^7 = \frac{1}{2}C_{eq} \cdot 3^2 \Rightarrow C_{eq} = 1'2 \cdot 10^7 F$$

Suponiendo un montaje en paralelo, siguiendo la ecuación (3.5) y teniendo en cuenta que todos lo SC son iguales:

$$C_{eq}^p = \sum_0^n C_i = n \cdot C_i$$

Por consiguiente:

$$n = \frac{C_{eq}^p}{C_i} = \frac{1'2 \cdot 10^7}{1200} = 10000 \text{ Condensadores}$$

Estos SC pesarían unos 3400kg y ocuparían más de 2400 litros. Evidentemente esto no es admisible para un vehículo.

Se procede por tanto a una nueva manera de dimensionar los SC: según su tamaño y su peso.

Diseño según peso y volumen. Ya que no se puede alcanzar la capacidad de almacenamiento de las baterías, se dimensionará el kit según su peso y su volumen, de manera que pese u ocupe lo mismo que el módulo de las baterías, según el caso más restrictivo. Según la tabla 3.5, las características físicas de las baterías son:

Volumen	80'3 litros
Peso	100 kg

Table 3.7: Peso y volumen del conjunto de baterías.

ésos serán por tanto los valores máximos de peso y volumen que puedan tener los SC.

Cálculo. Se escoge como primera opción el SC *BCAP 2000*, del fabricante *Maxwell*. Sus características principales son [25]:

Capacidad	2000 F
Voltaje	2'7 V
Resistencia int.	0'35 mΩ
E_{max}	5'06 Wh/kg
Volumen	0'312 l
Peso	0'4 kg
P_{peak}^{-1}	1464'5 W/kg

Table 3.8: Características del SC *Maxwell BCAP 2000*.

Por peso:

$$n \cdot 0'4 \text{ kg/cond} = 100 \text{ kg} \Rightarrow n = \mathbf{250 \text{ cond.}} \quad (3.7)$$

Por volumen:

$$n \cdot 0'312 \text{ l/cond} = 80'3 \text{ l} \Rightarrow n = \mathbf{257 \text{ cond.}} \quad (3.8)$$

Es por tanto la limitación por peso la más restrictiva. Haciendo uso de la expresión (3.7), el número de condensadores habría de ser 250. Sin embargo se le añadirán dos más, ya que 252 es un número divisible entre 2, 3 y 4. Esto conviene al no saber a priori la configuración que va a tener el kit de SC (es decir, el número de condensadores en serie y en paralelo).

Probamos con 2, 3 y 4 hileras en paralelo:

Nº hileras	Nº cond./hilera	Tensión (V)
2	126	340'2
3	84	226'8
4	63	170'1

Table 3.9: Posibles configuraciones del kit de SC BCAP 2000.

El parámetro principal por el que se debe elegir una u otra configuración es la tensión. En [12] usan un set de 360 V y en [15] uno de 340 V. Por lo tanto se escoge la configuración de dos hileras de 126 SC, con una tensión máxima de 340'2 V.

Características del conjunto de SC. Capacidad equivalente: En cada hilera hay 126 condensadores conectados en serie. Siguiendo la expresión (3.6):

$$\frac{1}{C_{eq}^{hilera}} = \frac{126}{C_{cond}} \Rightarrow C_{eq}^{hilera} = 31'75 F \quad (3.9)$$

Las dos hileras están conectadas en paralelo, retomando la expresión (3.5):

$$C_{eq} = 2 \cdot C_{eq}^{hilera} = 63'5 F \quad (3.10)$$

Resistencia equivalente:

Análogamente:

$$R_{eq}^{hilera} = 126 \cdot R_{cond} \Rightarrow R_{eq}^{hilera} = 44'1 m\Omega \quad (3.11)$$

$$\frac{2}{R_{eq}^{hilera}} \Rightarrow R_{eq} = 22'05 m\Omega \quad (3.12)$$

Peso:

$$Peso = 252 \cdot 0'4 \Rightarrow Peso = 100'8 kg. \quad (3.13)$$

Volumen:

$$Volumen = 252 \cdot 0'4 \Rightarrow Volumen = 78'624 l. \quad (3.14)$$

Potencia pico:

$$P_{peak} = 100'8 \cdot 1464'5 = 147'62 kW. \quad (3.15)$$

Energía:

$$E_{max} = 100'8 \cdot 5'06 = 510 Wh. \quad (3.16)$$

El resumen de las características puede verse en la tabla 3.10

Capacidad	31'75 F
Voltaje	340'2 V
Resistencia int.	22'05 m Ω
E_{max}	510 Wh
Volumen	78'624 l
Peso	100'8 kg
P_{peak}	147'62 kW

Table 3.10: Características del conjunto de SC *Maxwell BCAP 2000*.

Diseño con un SC de mayor capacidad. En la tabla 3.10 se puede ver que el conjunto de SC va a tener una potencia muy superior a la necesaria (147 kW pico, frente a los 65 kW del motor), y una capacidad de almacenamiento bastante limitada comparándola con la de las baterías (510 Wh frente a los 18 kWh de las baterías). Se busca mejorar este último parámetro, sacrificando la potencia máxima. Para ello se prueba con un condensador de mayor capacidad: el *Maxwell BCAP 3000*, cuyas características principales pueden verse en la tabla 3.11

Capacidad	3000 F
Voltaje	2'7 V
Resistencia int.	0'29 m Ω
E_{max}	5'52 Wh/kg
Volumen	0'475 l
Peso	0'55 kg
P_{peak} ²	1285'46 W/kg

Table 3.11: Características del SC *Maxwell BCAP 3000*.

Haciendo cálculos análogos a los realizados para el BCAP 2000 (ecs. (3.10) a (3.16)), resulta:

E_{max}	513'1 Wh
P_{peak}	19'483 kW

Table 3.12: Características del conjunto de SC *Maxwell BCAP 3000*.

Como puede comprobarse comparando las tablas 3.10 y 3.12, apenas se gana capacidad de almacenamiento usando uno u otro tipo de SC (menos de un 1%). Por contra, el uso de los condensadores de 3000 F conllevaría una estructura de dos hileras de condensadores, con un voltaje de 228 V. Esto se aleja de los valores referidos en [12] y [15]. Por lo tanto se escogen definitivamente para el sistema los SC *Maxwell BCAP 2000*.