

# CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS COMPONENTES PASIVOS V: SUPERCAPACITORES.

## Supercapacitores.

Un supercapacitor es un condensador electroquímico formado por dos electrodos separados por una membrana permeable a los iones (el "separador") y un electrolito que conecta iónicamente ambos electrodos.

La posibilidad de almacenar grandes cantidades de energía en estructuras de este tipo se conoce desde el siglo XIX, pero la tecnología necesaria para implementar una solución dispositivo operativo no estaba disponible.

El primer condensador electro-químico fue patentado por General Electric en 1957, pero su estructura no resultó comercializable.

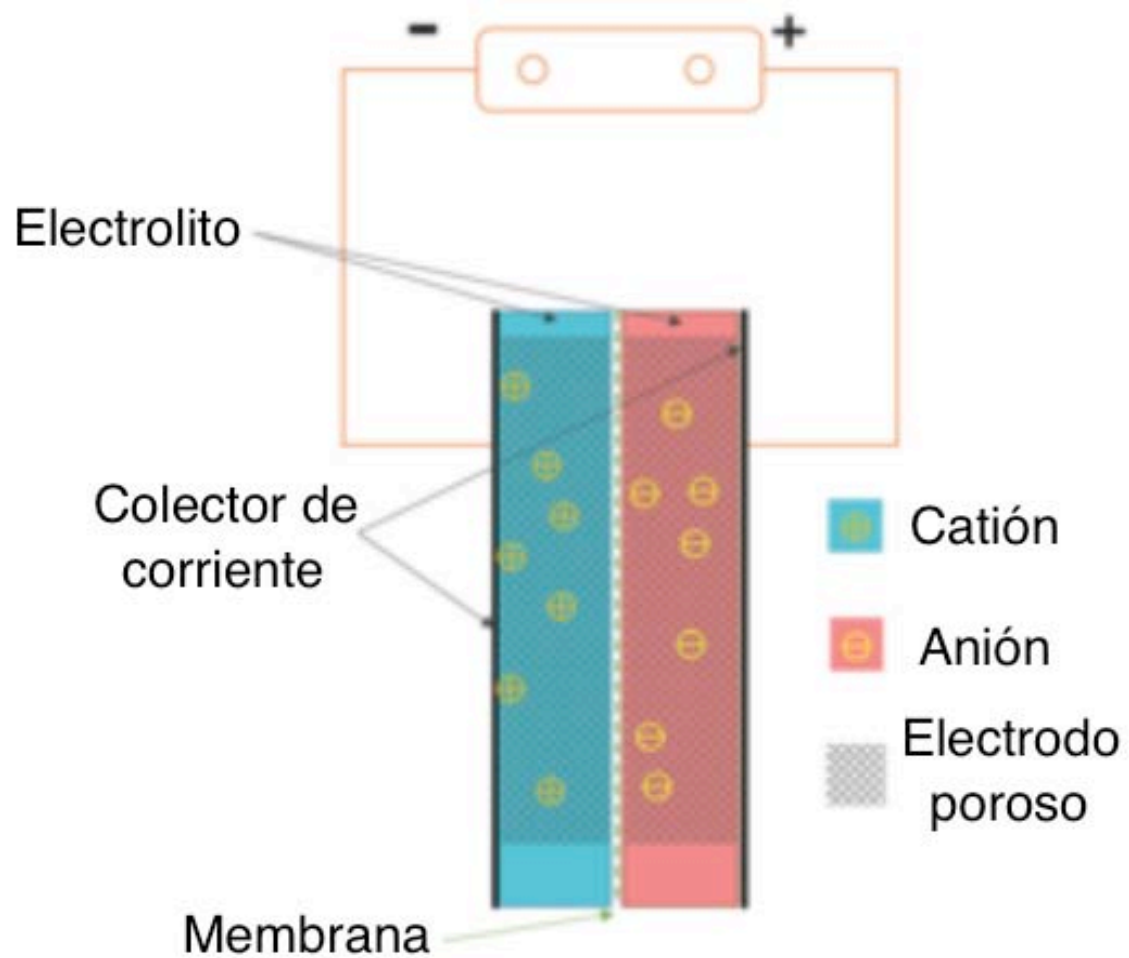
En su forma actual fue inventado por Robert A. Rightmire de la Standard Oil Company de Ohio, compañía que cedió la patente a NEC, que los comercializó por primera vez en 1971.

Los supercapacitores actuales alcanzan valores de capacidad órdenes de magnitud mayores que los condensadores convencionales pero operando a tensiones mucho menores.

Los supercapacitores son capaces de almacenar entre 10 y 100 veces mas energía por unidad de masa que los condensadores electrolíticos, pueden aceptar y entregar carga mucho mas rápidamente que las baterías y toleran muchos mas ciclos de carga y descarga que las baterías recargables.

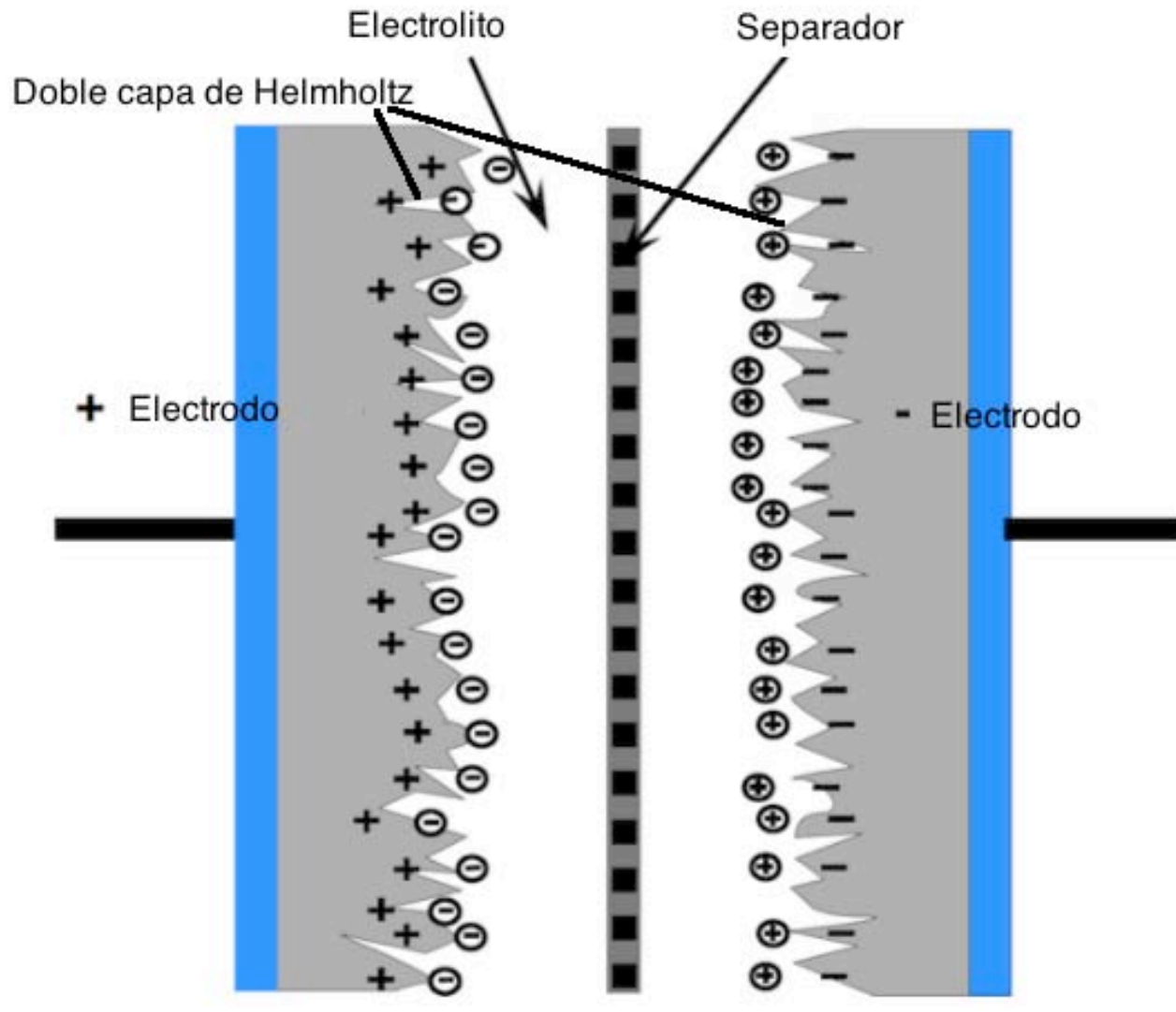


Ultracapacitor, 1.200F, 2,7V, 1,22Wh, ESR 0,3miliOhm, 66mm de diámetro.



Estructura de un supercapacitor.

Cuando los electrodos son polarizados por un voltaje externo (etapa de carga del supercapacitor), iones del electrolito forman un par de capas de polaridad opuesta a la del electrodo correspondiente, de forma que el electrodo polarizado positivamente tendrá una capa de iones negativos en la interfaz electrodo/electrolito, que estará balanceada por iones positivos (la "doble capa de Helmholtz"), y lo mismo, pero con las polaridades opuestas ocurre en el electrodo polarizado negativo.



Estructura del un supercapacitor con la doble capa de Helmholtz ya formada.

Esto da origen a dos modos de almacenamiento de energía que ocurren simultáneamente:

1.- Capacitancia de capa doble, que almacena energía por separación de la carga eléctrica en la "doble capa de Helmholtz" a nivel de la interfase entre la superficie de la lámina conductora y la solución electrolítica.

La distancia de separación de la carga es del orden de unos pocos Angstroms (0,3 a 0,8 nm). Este almacenamiento es de naturaleza electro-estática.

2.-Pseudocapacitancia: Se logra almacenamiento adicional de energía mediante reacciones químicas de tipo redox (reacciones químicas simultáneas de oxidación y reducción por intercambio de electrones).



Comparación de los parámetros de almacenamiento de energía de supercapacitores, condensadores electrolíticos de tántalo y baterías recargables de Li-ión (I).

	Maxima capacitancia equivalente	Energía almacenada (mWh/g)	ESR (mW)
Supercapacitor	1 2.000F	4 a 9	40 a 80
Condensador de tántalo	25 $\mu$ F	0,1 a 0,3	100 a 25.000
Barería Li-ión	1 200F	100 a 265	80

## Comparación de los parámetros de almacenamiento de energía de supercapacitores, condensadores electrolíticos de aluminio y baterías recargables de litio-ión (II)

Parameter	Aluminum electrolytic capacitors	– Supercapacitors –			Lithium-ion batteries
		Double-layer capacitors (memory backup)	Supercapacitors (high power)	Pseudocapacitors & hybrid (LI-Ion) (long-term)	
Temperature range, Celsius (°C)	-40 ... +125 °C	-40 ... +70 °C	-20 ... +70 °C	-20 ... +70 °C	-20 ... +60 °C
Maximum charge, Volts (V)	4 ... 630 V	1.2 ... 3.3 V	2.2 ... 3.3 V	2.2 ... 3.8 V	2.5 ... 4.2 V
Recharge cycles, thousands (k)	unlimited	100 k ... 1 000 k	100 k ... 1 000 k	20 k ... 100 k	0.5 k ... 10 k
Capacitance, Farads (F)	≤ 2.7 F	0.1 ... 470 F	100 ... 12 000 F	300 ... 3 300 F	—
Specific energy, milli-Watt hours per gram (mW·h/g)	0.01 ... 0.3 mW·h/g	1.5 ... 3.9 mW·h/g	4 ... 9 mW·h/g	10 ... 15 mW·h/g	100 ... 265 mW·h/g
Specific power, Watts per gram (W/g)	> 100 W/g	2 ... 10 W/g	3 ... 10 W/g	3 ... 14 W/g	0.3 ... 1.5 W/g
Self-discharge time at room temp.	short (days)	middle (weeks)	middle (weeks)	long (month)	long (month)
Efficiency (%)	99%	95%	95%	90%	90%
Working life at room temp., in years (y)	> 20 y	5 ... 10 y	5 ... 10 y	5 ... 10 y	3 ... 5 y

## Comparación de parámetros operacionales y de aplicación de baterías, capacitores y supercapacitores (Cortesía KEMET Corporation)

	Secondary Battery		Capacitor	
	NiCd	Lithium Ion	Aluminum Electrolytic	Supercapacitor
Back-up ability	-	-	-	-
Eco-hazard	Cd	-	-	-
Operating Temperature Range	-20 to +60°C	-20 to +50°C	-55 to +105°C	-40 to +85°C (FR, FT)
Charge Time	few hours	few hours	few seconds	few seconds
Charge/Discharge Life Time	approximately 500 times	approximately 500 to 1,000 times	limitless (*1)	limitless (*1)
Restrictions on Charge/Discharge	yes	yes	none	none
Flow Soldering	not applicable	not applicable	applicable	applicable
Automatic Mounting	not applicable	not applicable	applicable	applicable (FM and FC series)
Safety Risks	leakage, explosion	leakage, combustion, explosion, ignition	heat-up, explosion	gas emission (*2)

(\*1) Aluminum electrolytic capacitors and supercapacitors have limited lifetime. However, when used under proper conditions, both can operate within a predetermined lifetime.

(\*2) There is no harm as it is a mere leak of water vapor which transitioned from water contained in the electrolyte (diluted sulfuric acid). However, application of abnormal voltage surge exceeding maximum operating voltage may result in leakage and explosion.

Densidad de potencia en W/kg

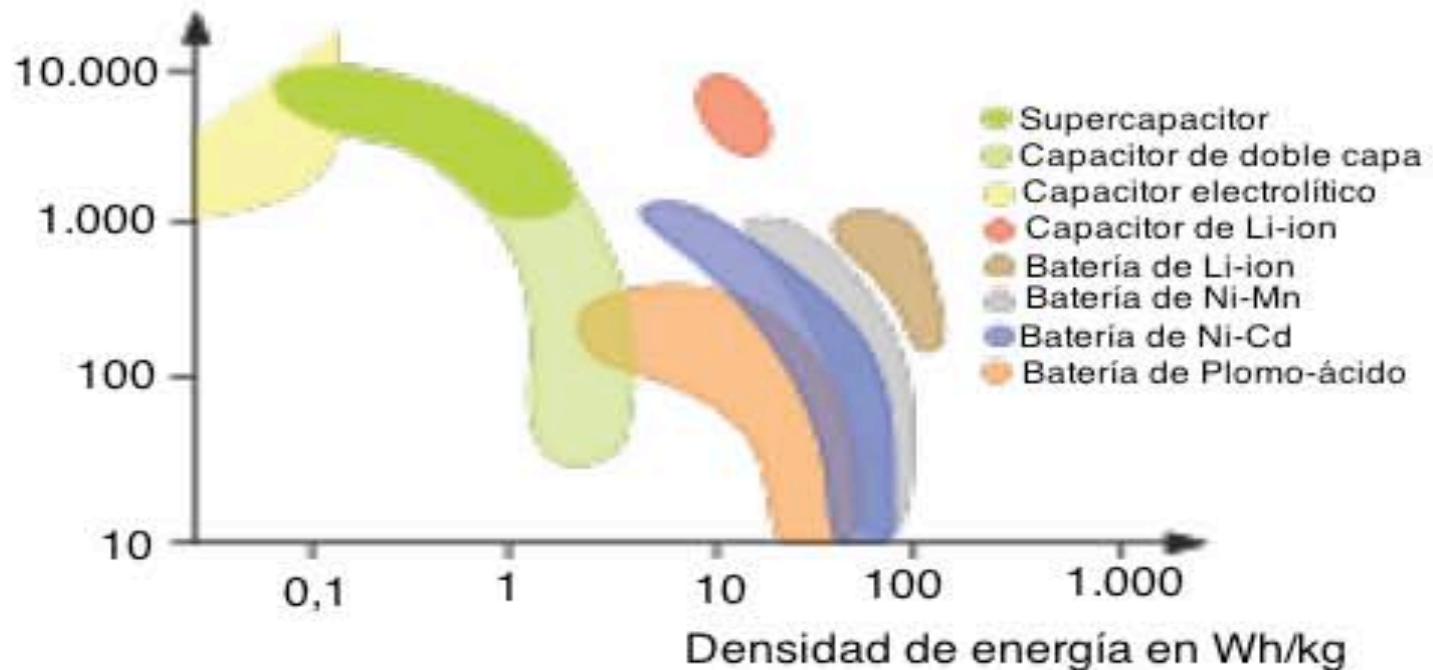


Diagrama de Ragone comparando las características densidad de potencia vs. densidad de energía de varios tipos de condensadores, supercapacitores y baterías recargables.

Los supercapacitores son polarizados, estrictamente para aplicaciones DC.

La tensión de operación debe estar estrictamente controlada para evitar daños; los supercapacitores con electrolitos acuosos tienen tensiones pico de 2,1 a 2,3V; los de solvente orgánico están en el orden de 2,5 a 2,7V y los de Litio-ión pueden tener un límite superior de 3,8 a 4V, pero el inferior puede ser 2,2V.

Operar los supercapacitores a tensiones inferiores a su máximo valor mejora el comportamiento a largo plazo de estos componentes.

En la práctica es usual que se necesiten tensiones mucho mas altas, lo que obliga a conectar celdas en serie; como cada celda tiene características ligeramente distintas, es preciso ecualizarlas activa o pasivamente para que el voltaje del arreglo se reparta adecuadamente (esto es aplicable también a los arreglos de baterías de litio-ión).

La energía total de un arreglo serie de supercapacitores,

$W_{Max}$  (en Joules) es:

$$W_{Max} = \frac{1}{2} C_{total} V_{Max}^2$$

Por supuesto, no toda la energía es recuperable, así que es mas realista calcular la energía recuperable (o energía efectiva),  $W_{ef}$ :

$$W_{ef} = \frac{1}{2} C_{total} (V_{Max}^2 - V_{min}^2)$$

La cantidad de energía que puede ser almacenada en un sistema de almacenamiento por unidad de masa es su "energía específica", expresada gravimétricamente en vatios-hora por kilogramo (Wh/kg).

La cantidad de energía que puede ser almacenada en un sistema de almacenamiento por unidad de volumen es su "densidad de energía", expresada volumétricamente en vatios-hora por litro (Wh/l).

Según datos de 2013, las energías específicas de los supercapacitores comerciales estaban en el rango de 0,5 a 15 Wh/kg; como comparación, la de condensadores electrolíticos de aluminio estaban entre 0,01 y

0,3Wh/kg, las baterías de plomo-ácido estaban en el rango de 30 a 40 Wh/kg y las baterías de litio-ión entre 100 a 265 Wh/kg.

Cambiando de tecnología, la gasolina tiene una energía específica de 12.300Wh/kg, que en aplicaciones automovilísticas prácticas se reduce a unos 3700 Wh/kg, considerando una eficiencia de conversión típica del 30% para un motor de combustión.

Los supercapacitores tienen una energía específica del orden de 10 veces mayor que los condensadores electrolíticos, pero 10 veces menor que las baterías de litio-ión.

La densidad de energía está en el rango de 5 a 8 Wh/l.



Aunque los supercapacitores están en desventaja frente a las baterías en lo referente a la energía específica, tienen ventaja en el parámetro de potencia específica, que describe la velocidad con la que se puede entregar o recibir energía.

La potencia máxima manejable,  $P_{Max}$  es:

$$P_{Max} = \frac{1}{4} \frac{V^2}{R_i}$$

Donde  $V$  es la tensión en los terminales y  $R_i$  es la resistencia interna DC del condensador.

La potencia específica se puede medir gravimétricamente en kilovatios por kilogramo (kW/kg) o volumétricamente, en kilovatios por litro (kW/l).

Tomando en cuenta las caídas internas y otros factores limitantes, la IEC define como parámetro de comparación la potencia específica efectiva,  $P_{ef}$ :

$$P_{ef} = \frac{1}{8} \frac{V^2}{R_i}$$

La potencia efectiva de los supercapacitores es típicamente de 10 a 100 veces superior a la de las baterías, y puede alcanzar valores del orden de lo 15kW/kg.

Todas las características de los supercapacitores dependen de la temperatura de operación, que debe por lo tanto ser controlada.

Altas temperaturas tienden a evaporar el electrolito, acortando la vida útil de estos componentes; en la actualidad es de esperar que operando a temperatura ambiente (25°C) vida de servicio alcance unos 15 años.

Como esta lapso es demasiado largo para esperar a producir unas especificaciones, los fabricantes suelen referirse a mediciones de envejecimiento acelerado, operando los componentes a la máxima temperatura y el máximo voltaje, y los resultados se expresan de la forma Xhoras/65°C.

Los supercapacitores son dispositivos dedicados a aplicaciones específicas, raramente intercambiables. El estándar IEC 62391-1 identifica cuatro clases principales:

1.- Clase 1. Respaldo de memorias SRAMs en equipos electrónicos. La aplicación requiere la entrega de una corriente de bajo nivel, durante un intervalo de tiempo largo.

2.- Clase 2: Almacenamiento de energía. El nivel de entrega de energía es mas alto, pero los intervalos de tiempo son mas cortos, por ejemplo en aplicaciones de sistemas de energías alternativas.

Clase 3.- Alto nivel de energía: La corriente manejada es alta, los ciclos son cortos.

Aplicación típica: sistemas de recuperación de energía de frenado en autobuses o trenes.

Clase 4. Alta potencia instantánea.

Aplicación típica: Sistemas que requieren pulsos muy cortos pero de alto nivel de energía, tales como los sistemas KERS (Kinetic Energy Recovery Systems) en carros fórmula 1.

En general las fuentes principales de energía para vehículos (motores térmicos, celdas de combustible, bancos de baterías) se caracterizan por trabajar bien cuando la carga que se les exige es razonablemente constante, pero tienen problemas con los picos rápidos de demanda, mientras que los supercapacitores tienen una capacidad comparativamente mucho menor para entregar carga constante durante períodos largos de tiempo, pero son muy eficaces entregando (o recuperando) picos rápidos de energía.

En el estado actual de la tecnología parece que salvo en casos de aplicaciones tipo nicho, la mejor combinación para vehículos de batería es un arreglo paralelo entre un banco almacenamiento principal, implementado con baterías y encargado de proporcionar la energía de crucero, y un banco auxiliar de supercondensadores, dimensionado para entregar la energía de aceleración y recuperar la energía de frenado.

En lo que respecta a los vehículos híbridos-eléctricos, es factible que sea mas eficaz que el componente de almacenamiento de energía eléctrica sea solo mediante un banco de supercapacitores, sobre todo en los que la capacidad de almacenamiento eléctrico es reducida.