

# **Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento de Energía Eléctrica.**

## **Índice:**

- Introducción a los Condensadores.
- Supercondensadores.
  - Simétricos
  - Asimétricos
- Otros Sistemas de Almacenamiento de Energía
  - Aire Comprimido.
  - Central Hidroeléctrica Reversible.
  - Volante de Inercia.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento.

Un **condensador** es un dispositivo que almacena carga eléctrica.

Se diferencian de las baterías en que en estos **no ocurren reacciones químicas**

Son los únicos dispositivos que almacenan energía eléctrica de forma directa

Existen dos tipos: **Electrostáticos** y **Electroquímicos** (en éstos si hay reacciones químicas)



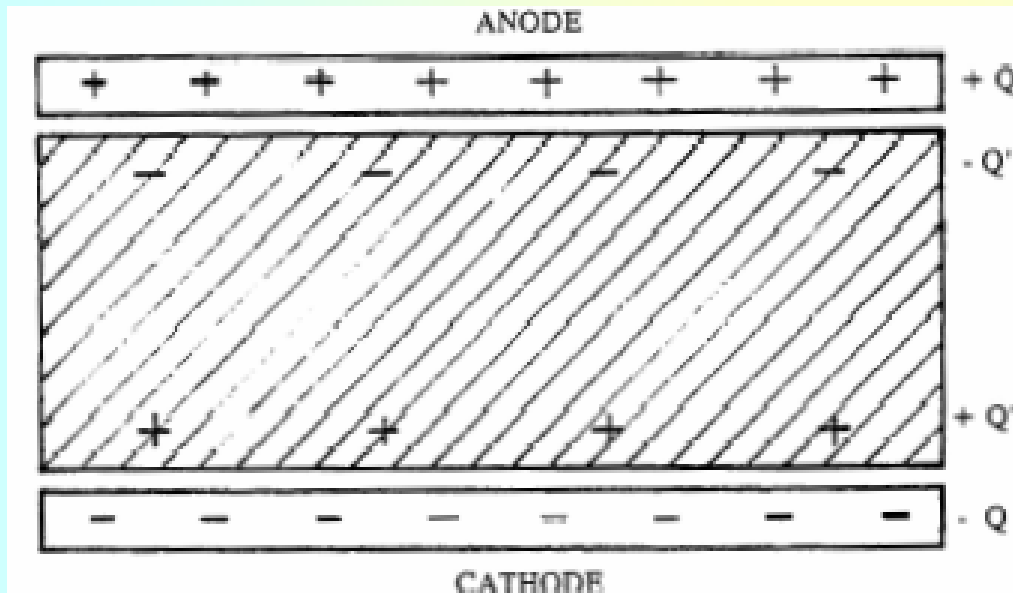
Figure 14-8  
Maxwell Capacitor 2700F, 2.5 V<sub>dc</sub>

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento.

**Condensador Electrostático** es el más simple. Consta de dos placas paralelas (electrodos), que son conductoras y que tienen un área de contacto  $A$ . Una placa estará cargada con carga positiva y la otra negativamente.

Las placas están separadas entre sí por **una distancia,  $d$** .

Entre ambas placas se coloca el llamado **dieléctrico**, que debe ser no conductor y sirve para mantener las cargas separadas.

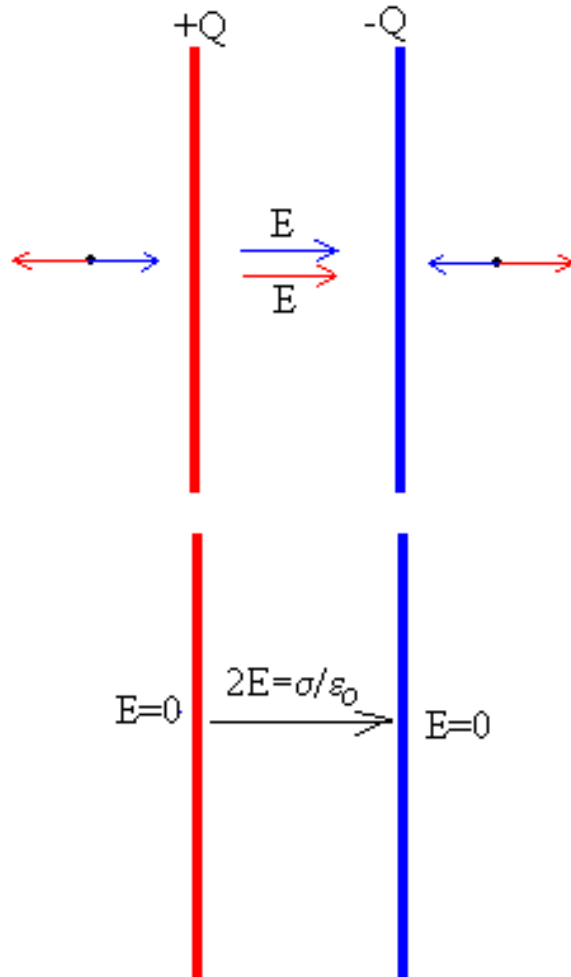


El **dieléctrico** puede consistir en aire, papel u otro material no conductor.

Incrementa la energía almacenada en el dispositivo.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Campo Eléctrico creado en un condensador.



La **dirección** del campo eléctrico es perpendicular a la placa cargada, hacia afuera si la carga es positiva y hacia la placa si la carga es negativa.

En la figura de arriba, se muestra el campo producido por cada una de las placas y en la figura de abajo, el campo resultante.

El campo **se cancela en la región del espacio situado fuera de las placas**, y se suma en el espacio situado entre las placas.

Por tanto, **solamente existe campo entre las placas del condensador, siendo despreciable fuera de las mismas.**

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Al aumentar la carga almacenada en las placas, el campo eléctrico creado a través del material dieléctrico también se incrementa. De esta forma, la diferencia de potencial incrementa con la carga,  $Q$ , que almacena el condensador:

**$Q$  es proporcional al voltaje.**

**Capacidad o conductancia** de un condensador:

$$C = \frac{Q}{E} = \frac{\varepsilon_o A}{d} = \kappa \frac{A}{d}$$

$\varepsilon$  es la permitividad dieléctrica del material

$\varepsilon_o$  es la permitividad dieléctrica en el vacío ( $8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m)

$\kappa$  es la constante dieléctrica

$E$  es el potencial

La unidad de capacitancia en el SI es el Faradio, F:

$$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$$

La capacidad de un condensador depende claramente de la geometría, la distancia entre placas y de la naturaleza del dieléctrico,  $\kappa$ .

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Al tener dos Placas, en cada una de ellas se crea una diferencia de potencial, por tanto, tenemos dos condensadores en serie. Llamando  $C_c$  a la capacidad del cátodo y  $C_a$  a la del ánodo, la capacidad total del condensador será:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c} \quad \text{o reordenando} \quad C = \frac{C_a C_c}{C_a + C_c}$$

En un condensador de dos placas colocadas en serie la capacidad que domina es la menor de las dos.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Al ser la carga proporcional al voltaje, se podría pensar que cuanto mayor es la diferencia de potencial, la carga almacenada aumentará indefinidamente. Sin embargo, esto no es así:

Si aumentamos el voltaje, la carga del condensador aumentará, pero llega un momento en el que **el dieléctrico no es capaz de aislar más las cargas de ambos electrodos**. En este momento el dieléctrico se rompe o se hace conductor en algunas áreas, lo que produce una disminución de la carga y energía acumulada, a la vez que se calienta.

Este fenómeno ocurre cuando se ha alcanzado un determinado potencial, llamado **potencial de ruptura,  $E_r$ , del condensador**. Este potencial determina la **carga máxima,  $Q_{máx}$** , que puede almacenar un condensador:

$$Q_{máx} = C \cdot E_r$$

El **voltaje de trabajo de un condensador** es el máximo voltaje que puede usarse en un condensador. Normalmente es menor del voltaje de ruptura.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

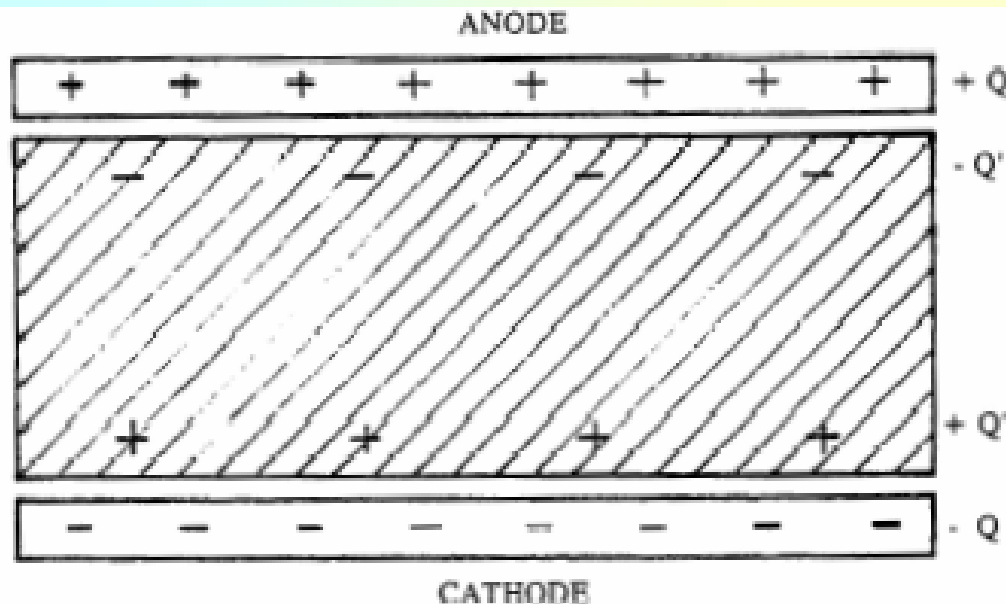
**Influencia de  $\kappa$  sobre la capacidad de un condensador:**

$$C = \frac{\epsilon_o A}{d} = \kappa \frac{A}{d}$$

Cuando un dieléctrico se introduce entre las placas de un condensador, su capacidad aumenta en un factor  $\kappa$ :

$$C = \kappa C_0$$

donde  $C_0$  es la capacidad del condensador sin dieléctrico (cuando hay vacío entre las placas) y  $C$  la capacidad del condensador con dieléctrico.



$Q +$  y  $Q -$  son las cargas estabilizadas sobre los electrodos.

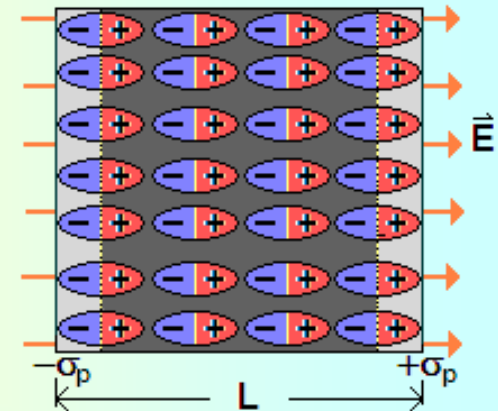
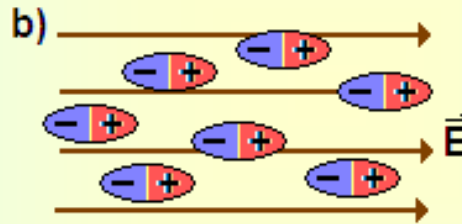
$Q' +$  y  $Q' -$  son inducidas sobre el dieléctrico.

**Estas cargas inducidas se ven afectadas por la  $\kappa$**



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Si un dieléctrico se compone de **moléculas polares**, con *dipolos permanentes*, estos están orientados al azar cuando no existe campo eléctrico (figura a). Bajo la acción de un campo eléctrico, se produce cierto grado de orientación y, cuanto más intenso es el campo, tanto mayor es el número de dipolos que se orientan en la dirección del mismo (figura b).



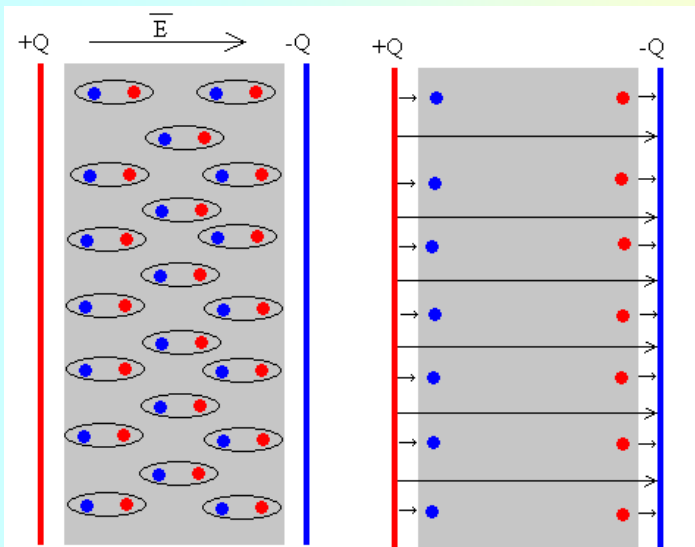
Sean o no polares las moléculas de un dieléctrico, el efecto neto de un campo exterior es similar:

**Las cargas no son libres**, sino que cada una está *ligada* a una molécula situada en la superficie, o próxima a ella. Dentro del resto del dieléctrico, la carga neta por unidad de volumen sigue siendo nula. El material como un todo se convierte en un gran dipolo eléctrico que tiende a moverse en la dirección del campo eléctrico.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Al lado de la placa positiva del condensador, tenemos carga inducida negativa y al lado de la placa negativa del condensador, tenemos carga inducida positiva.

Debido a la presencia de las cargas inducidas el campo eléctrico entre las placas de un condensador con dieléctrico  $E$  es menor que si estuviese vacío  $E_0$ .



Algunas de las líneas de campo que abandonan la placa positiva penetran en el dieléctrico y llegan a la placa negativa, otras terminan en las cargas inducidas. Es decir, esta disposición de cargas en el dieléctrico genera un campo eléctrico que se opone al generado por las placas del condensador. Para compensar la súbita disminución del campo eléctrico total, se almacena aún más carga eléctrica en las placas, por lo que la capacidad total del dispositivo se incrementa.

El campo eléctrico disminuye en proporción inversa a la constante dieléctrica  $\kappa$  del material empleado:

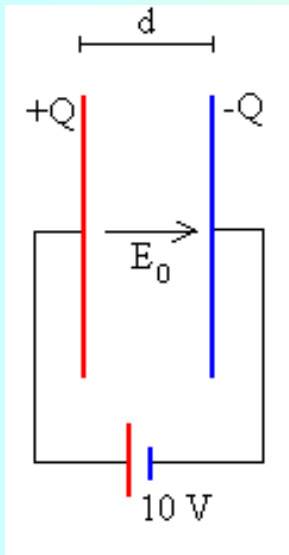
$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\kappa}$$

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Supongamos que tenemos un condensador de placas paralelas al que se conecta una batería de 10 V ( $A = 0.07 \text{ m}^2$  y  $d = 0.75 \text{ mm}$ )

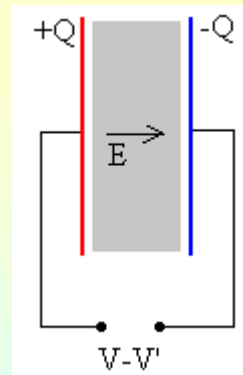
Veamos qué parámetros se obtiene usando como dieléctrico el vacío y baquelita, con  $k=4.6$ . Usaremos :

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad C = \kappa C_0 \quad \vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\kappa}$$



$$\vec{E}_0 = 13333.3 \text{ N/C}$$

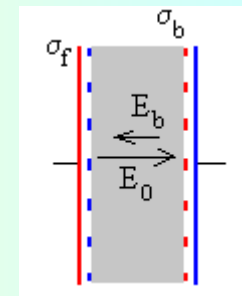
$$C_0 = 8.25 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$



$$2.17 \text{ V}$$

$$C = 3.8 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$\vec{E} = 2898.6 \text{ N/C}$$



$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_b$$

Podemos considerar este campo  $E$ , como la diferencia entre el campo  $E_0$  producido por las cargas libres existentes en las placas, y el campo  $E_b$  producido por las cargas inducidas en la superficie del dieléctrico, ambos campos son de signos contrarios.

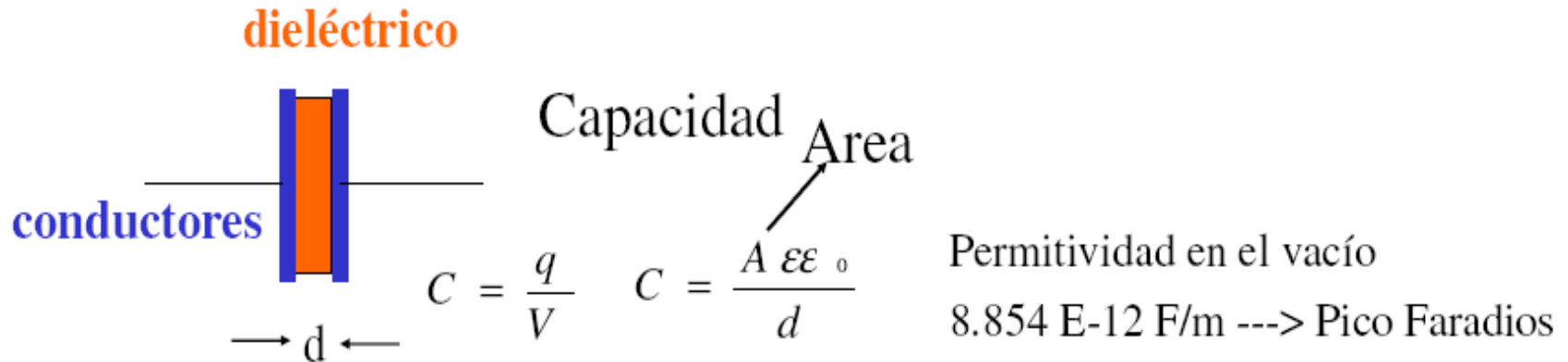
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

$\kappa$  es adimensional, su valor es siempre mayor que 1 y depende del material considerado: es característica de cada material.

| <b><u>Table I. Relative dielectric constants "k" for various dielectrics</u></b> |                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Dielectric material</b>                                                       | <b>Relative dielectric constant "k"</b> |
| Air or vacuum                                                                    | 1.0                                     |
| Polypropylene                                                                    | 2.2                                     |
| Polyester (Mylar)                                                                | 3.0                                     |
| Mica                                                                             | 6.0                                     |
| Aluminum oxide                                                                   | 8.5                                     |
| Tantalum pentoxide                                                               | 27                                      |
| Niobium oxide                                                                    | 41                                      |
| Water                                                                            | 80.08                                   |
| Barium titanate                                                                  | 1,000 - 10,000                          |

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Influencia de la geometría de un condensador sobre su capacidad:

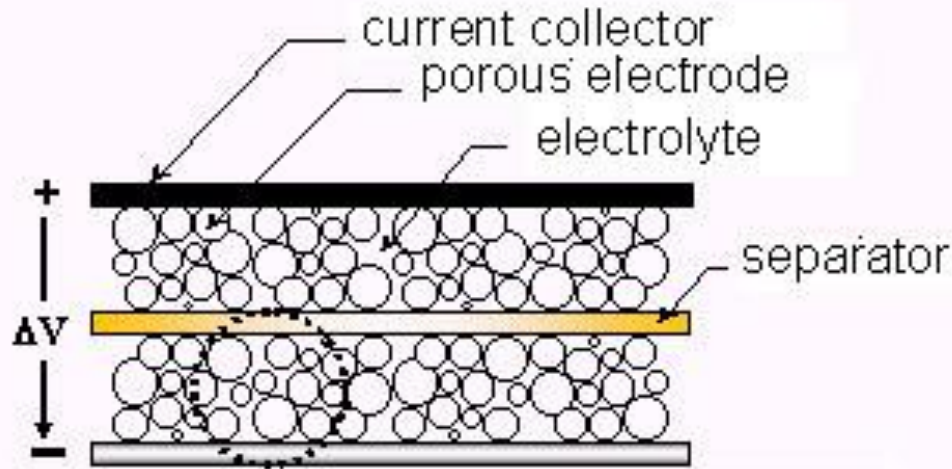


Aumentar A  
disminuir d

Supercondensadores

Doble capa eléctrica ( $d \text{ \AA}$ )

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento



Schematic of electric double layer capacitor

Las **partículas de Carbón poroso** están inmersas en el electrolito y conectadas a los metales colectores de corriente.

Este material combina una **gran área superficial** en contacto con el electrolito, **alta conductividad electrónica** y **alta estabilidad química** y electroquímica con un **bajo coste**.

Los condensadores convencionales alcanzan capacidades de  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6}$ ) ó  $\rho\text{F}$  ( $10^{-9}$ )

Los supercondensadores alcanzan los miles de Faradios ( $10^3$ ).

Los supercondensadores son un puente entre los condensadores convencionales y las baterías.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

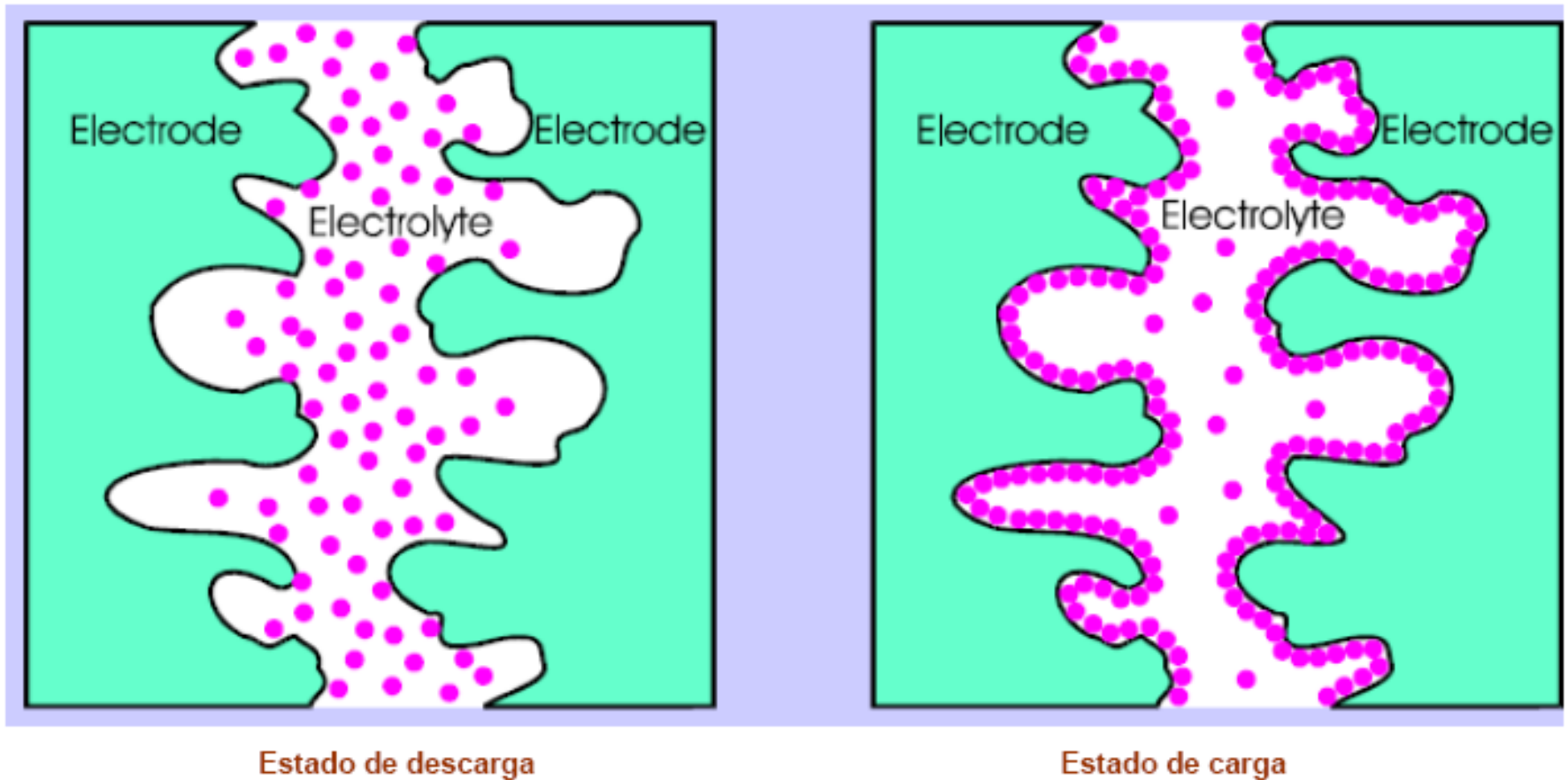


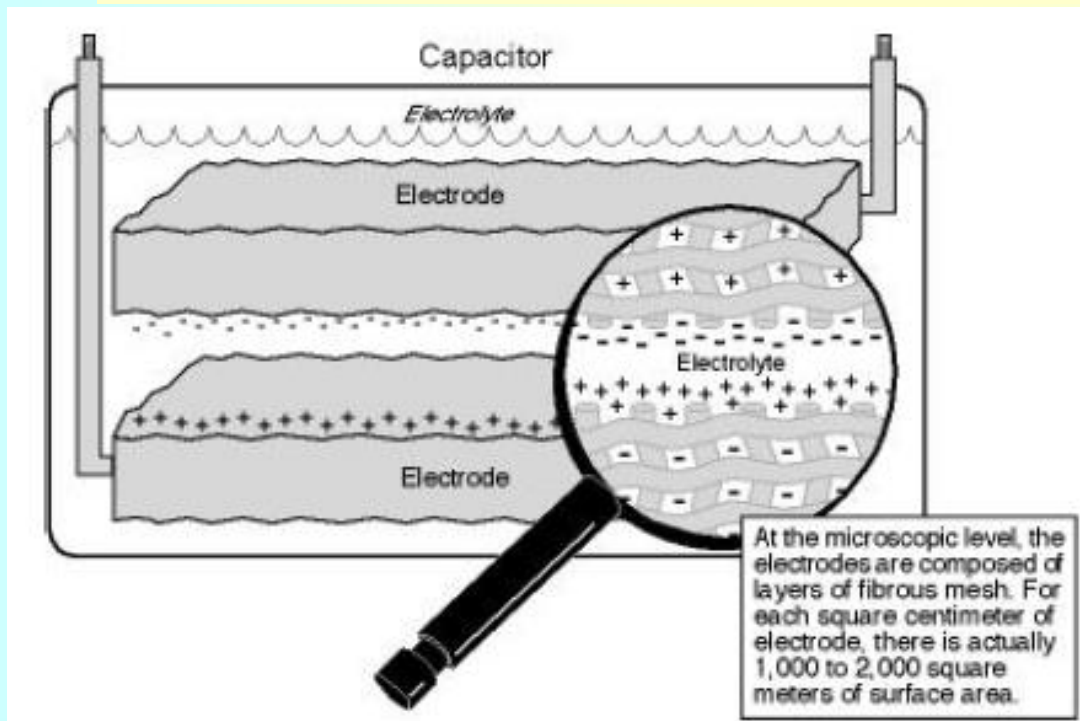
Fig. 19. Esquema del funcionamiento de un supercondensador de doble capa.<sup>2</sup>

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Condensadores Electroquímicos.

**Condensadores simétricos:** dispositivos compuestos por dos electrodos de carbono con grandes áreas superficiales.

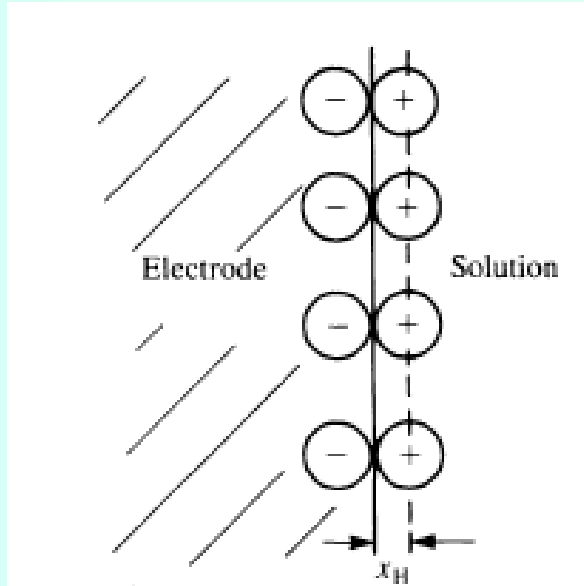
**Condensadores Asimétricos:** combinan un electrodo de carbono con un electrodo redox, usados normalmente en baterías. Puede ser un cátodo de Hidróxido de Ni con un ánodo de carbono.



Ambos usan un electrolito líquido, aunque también puede ser sólido, y un separador



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento



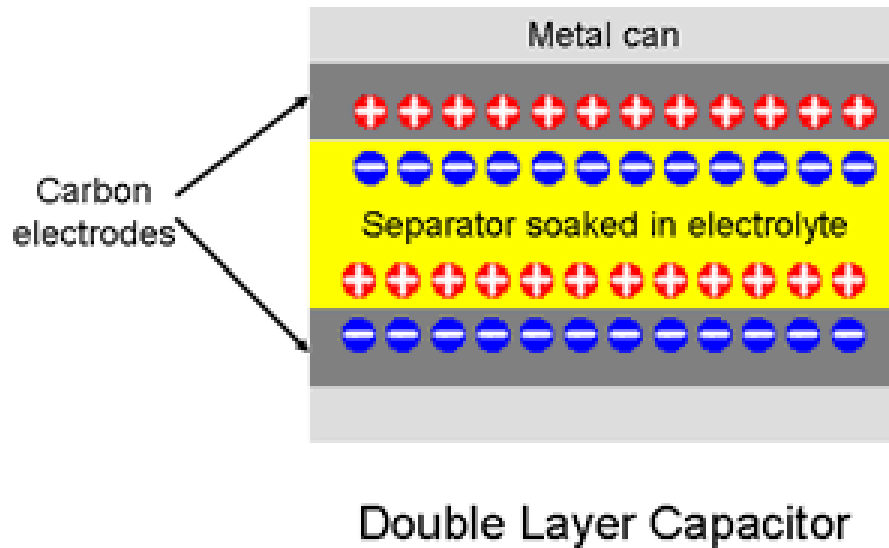
Doble capa eléctrica

Cuando un electrodo se introduce en una disolución de electrolito, se forma una doble capa eléctrica: se acumulan iones en la interfase metal-disolución y sobre el metal se acumulan electrones.

Dependiendo del signo de la carga depositada sobre el metal, iones negativos o positivos serán adsorbidos sobre el electrodo. Así, si tenemos dos electrodos, las cargas se concentrarán sobre ambos electrodos, desplazándose los cationes hacia un electrodo y los aniones hacia el otro.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

El **separador** impide el contacto electrónico entre las placas, pero permite el flujo de iones durante la carga y descarga.



El voltaje obtenido con **electrolitos acuosos** es de 1 V, al estar limitado por el rango de potenciales donde el electrolito es estable. Con un **electrolito orgánico**, el voltaje máximo conseguido es de 2.7 V.

**Energía almacenada en el condensador:**

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

Los **electrolitos orgánicos** permiten alcanzar un voltaje mayor, por tanto, la energía almacenada en el dispositivo aumentará.

Sin embargo, forman una **doble capa con menor capacidad** y presentan una **peor conductividad** (resistividad ~100 veces mayor que en disolución acuosa), por lo que la respuesta de estos condensadores será más lenta que en electrolitos acuosos.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

Los Condensadores Electroquímicos operan de una forma muy parecida a las baterías. Se puede esquematizar por un simple circuito:



Para condensadores en serie se sabe que:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c}$$

$C_a$  y  $C_c$  son las capacidades de las dobles capas del ánodo y el cátodo, mientras que  $R_i$  es la resistencia interna de la celda.

Para el caso de  $C_a = C_c$ , como es de esperar para un supercondensador, se tiene

$$C = \frac{1}{2} C_a$$

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

**Procesos de carga y descarga de un condensador simétrico** que tiene dos electrodos de carbón con la misma área sumergida en un electrolito, acuoso o no.

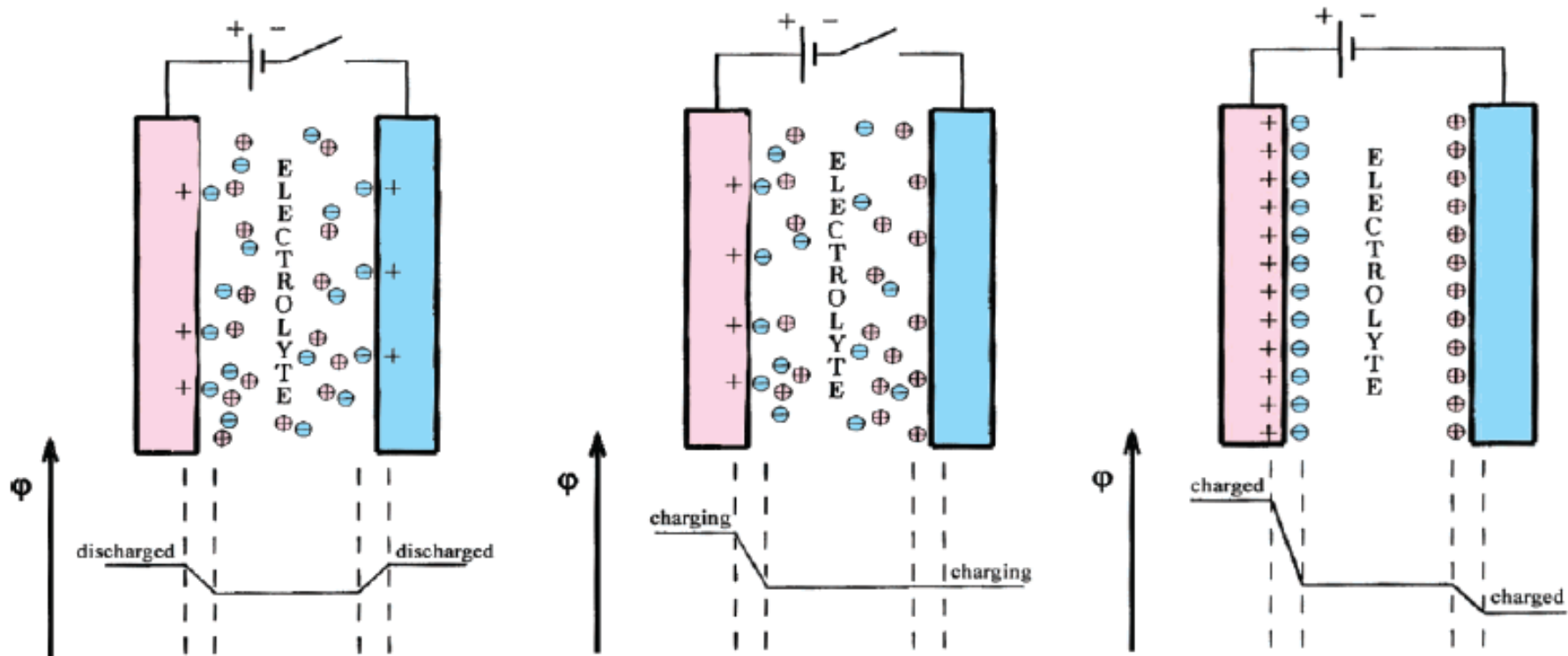


Figure 29. Depiction of the charging process of a symmetric capacitor.

La máxima diferencia de potencial, voltaje, es alcanzada cuando uno de los electrodos alcanza el límite de estabilidad del electrolito.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

En los **Condensadores electroquímicos asimétricos**, uno de los electrodos es de los habitualmente usados en baterías. Es decir, en este electrodo se produce una reacción redox, lo que lleva asociada una capacidad 10 veces superior a la de la doble capa eléctrica.

En este caso la capacidad del condensador aumenta considerablemente. Por ejemplo, si sustituimos uno de los electrodos (cátodo) de carbono del condensador, por un cátodo de Níquel (NiOOH), la capacidad del condensador se modificará de la siguiente forma:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{10C_a} \rightarrow C \approx C_a$$

**Por tanto, la capacidad de este condensador es prácticamente el doble de la de un condensador simétrico.**

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

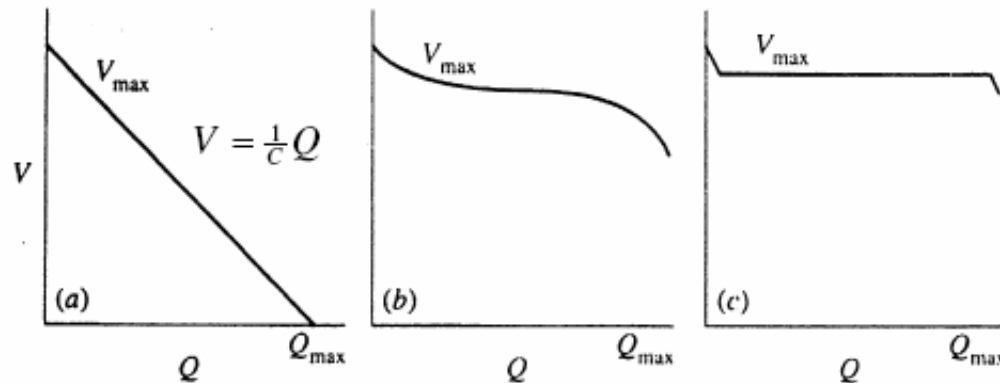


Figure 2. Relationship between potential and charge delivered for three different types of energy storage mechanisms: (a) electrical double-layer system; (b) insertion reaction system; (c) reconstitution reaction system.

Estos tipos de condensadores suelen llamarse condensadores híbridos. En ellos, debido a su alta capacidad, el voltaje del dispositivo varía poco durante la carga y descarga, comparado con un condensador simétrico de C-C.

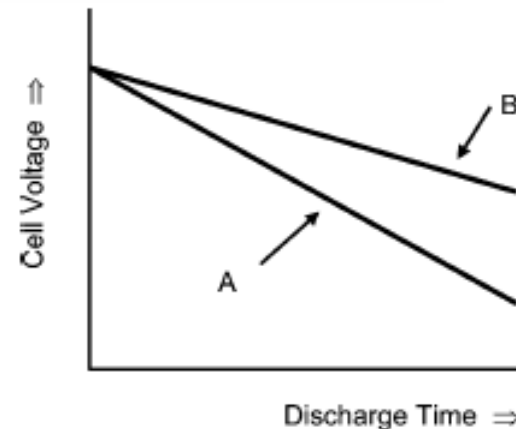


Figure 30. Operation principle of an EC in the discharged state, during charging, and in the charged state: (A) for a symmetric construction and (B) for an asymmetric construction.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Diferencias entre Condensadores y Baterías

1) Los condensadores clásicos sólo almacenan carga sobre la superficie de los electrodos, en vez de en el interior del mismo, ellos tienden a tener bajas capacidades de almacenamiento de energía y **pequeñas densidades de energía**. Sin embargo, la **capacidad de respuesta** al cambio de carga es muy alta, lo que permite proporcionar una **alta potencia específica, aunque sólo por un corto periodo de tiempo**.

Sobre un electrodo, la formación y destrucción de la doble capa son procesos casi instantáneos ( $\sim 10^{-8}$  s). Además, la estructura de esta doble capa permite una **respuesta instantánea** a los cambios de potencial que se produzcan. Esto es debido a que únicamente **se produce un reordenamiento de cargas y no a una reacción química**.

Sin embargo, en una **batería o celda de combustible**, la respuesta es más lenta debido a que en los electrodos **se producen reacciones químicas**, las cuales disminuyen el tiempo de respuesta hasta los  $10^{-2}$ - $10^{-4}$  s.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Diferencias entre Condensadores y Baterías

2) La otra gran diferencia entre baterías o celdas de combustible y los supercondensadores es la **reversibilidad de los procesos**. A parte de la lentitud de la respuesta, las reacciones secundarias que se producen en las baterías reduce el número de ciclos a lo largo de la vida de ésta y disminuye la estabilidad del dispositivo.

Los supercondensadores pueden alcanzar el **millón de ciclos**, mientras que las baterías el número de ciclos es muy inferior.

Sin embargo, se han conseguido algunos electrodos que presentan una reversibilidad y rapidez de respuesta similar a la de los electrodos no electroquímicos.

Electrodos delgados del tipo de **intercalación de Li**, como el de  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ , presentan una alta reversibilidad y rápidas cinéticas.

También el **depósito de  $\text{RuO}_2$  sobre electrodos de carbono** muestra buen comportamiento de carga y descarga, con cinéticas rápidas, alta capacidad y una larga vida. Pueden producir capacidades de  $200 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ .



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Diferencias entre Condensadores y Baterías

- 3) Existe una importante diferencia entre la recarga de un condensador y una batería. En el primero, el voltaje siempre crece a medida que lo hace la carga, o desciende cuando se descarga, debido a la ecuación:

$$C = \frac{q}{V} \rightarrow q = C \cdot V$$

Sin embargo, en una batería el voltaje se mantiene prácticamente constante a lo largo de la descarga y de la recarga, excepto cuando nos acercamos al 0 o al 100% de carga.

- 4) Energía almacenada:

**condensador**

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \rightarrow E = \frac{1}{2} qV$$

**batería**

$$E = q \cdot \Delta V$$

**La energía suministrada por una batería es el doble de la de un condensador con el mismo voltaje.**

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Ventajas de Condensadores-Supercondensadores:

- Generación de alta potencia
- Obtención de alta densidad de potencia.
- Métodos simples de carga. No requieren cargadores especiales.
- Sumamente alta velocidad de carga y descarga.
- No sufre sobrerrecarga.
- Larga vida útil (10-12 años).
- Elevado número de ciclos de carga y descarga efectuados totalmente.
- No implica reacciones químicas.
- Baja impedancia.

### Inconvenientes:

- Descenso lineal del Voltaje durante la descarga. No permite ser utilizado en muchas aplicaciones.
- La potencia puede ser suministrada durante un corto periodo de tiempo.
- Baja capacidad.
- Baja densidad energética.
- Alta velocidad de autodescarga. Mucho mayor que en las baterías.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Capacitor / Battery Comparison

| Device     | Energy density<br>Wh/L | Power density<br>W/L | Cycle life<br>Cycles | Discharge time<br>Seconds |
|------------|------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| Batteries  | 50-250                 | 150                  | $1 - 10^3$           | > 1000                    |
| Capacitors | 0.05 - 5               | $10^5 - 10^8$        | $10^5 - 10^6$        | <1                        |

# Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

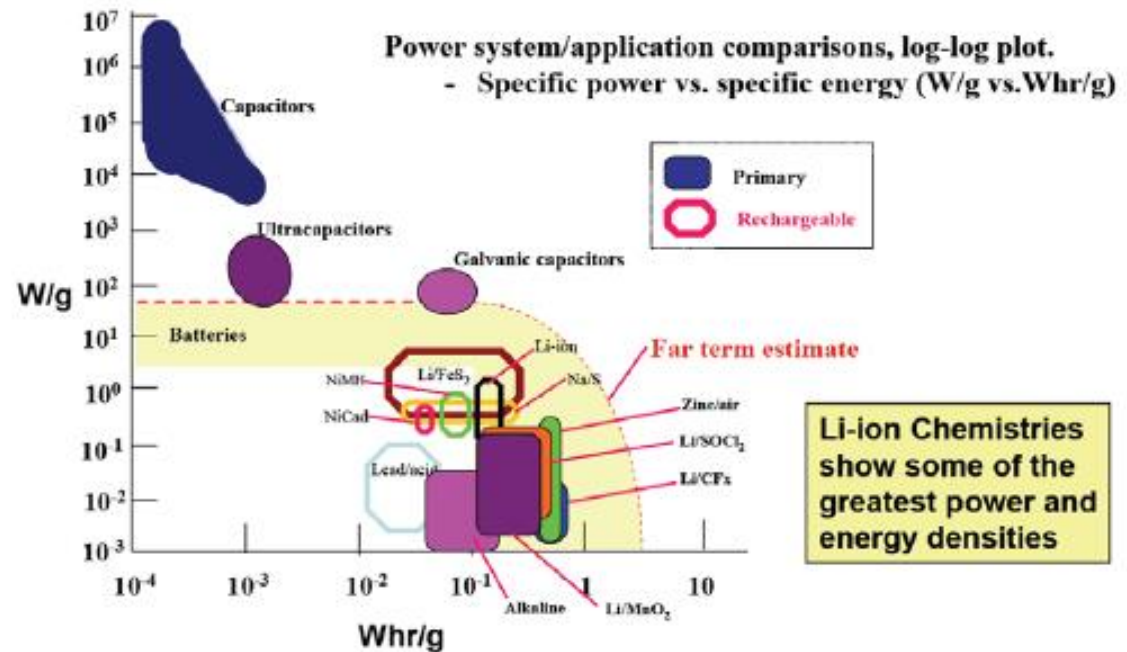
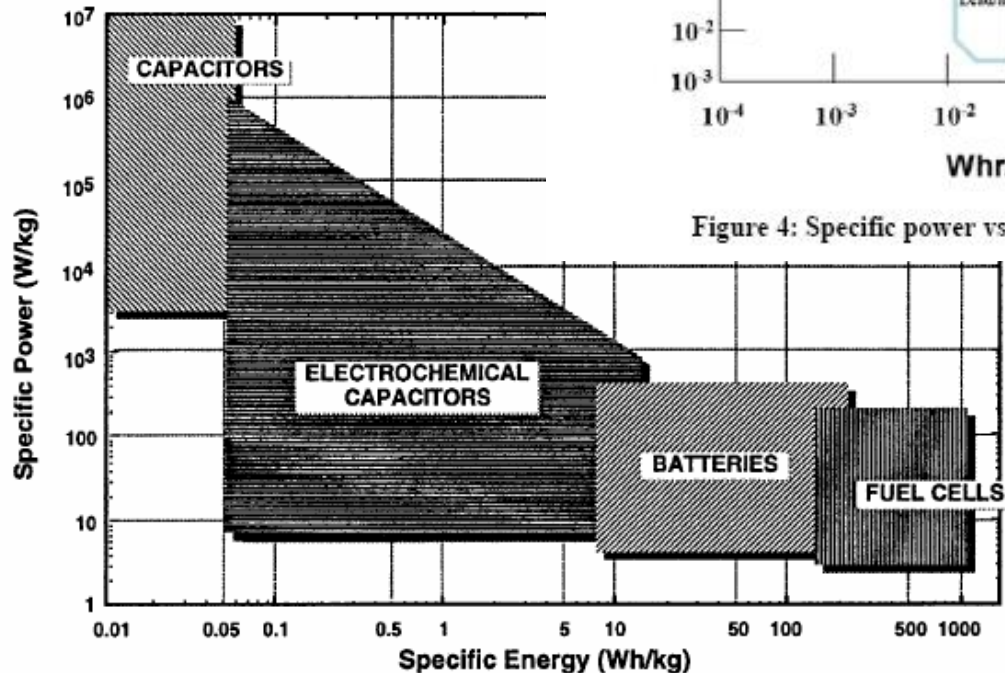


Figure 4: Specific power vs. specific energy of several energy storage technologies.<sup>12</sup>



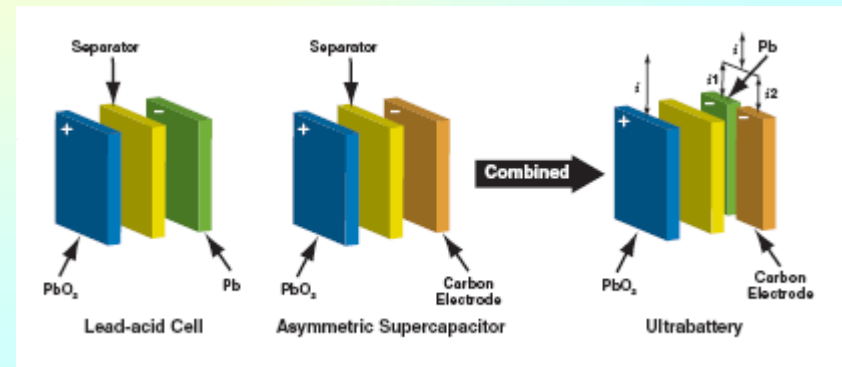
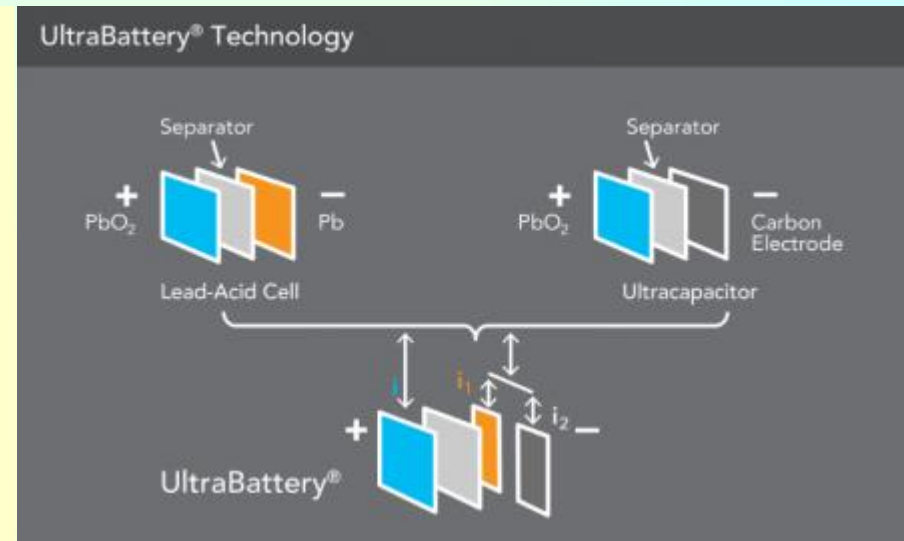
# Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

## Combinación de Supercondensador con una Batería. UltraBattery®

La Ultrabatería es un **dispositivo híbrido** en el que se combina las propiedades de un supercondensador, como la velocidad de carga/descarga y su alta vida media, con las de una batería de Pb-ácido. Este dispositivo es una alternativa de bajo coste a las baterías de Ni-MH o Li-Ion.

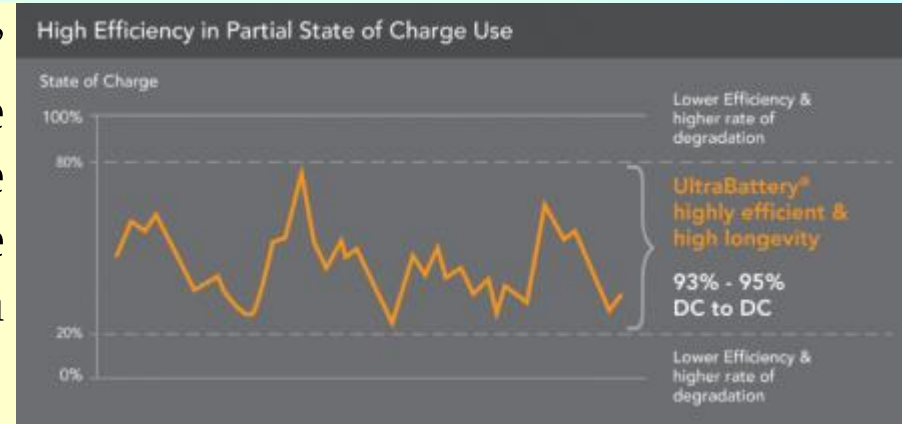
Se combina un electrodo de carbono, usado habitualmente en los supercondensadores, con el electrodo negativo, Pb, de la batería de Pb-ácido y usando un único electrolito común, en una misma celda.

Con esto se consigue regular mejor el flujo de energía durante la carga y descarga.



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

El supercondensador actúa como un “buffer” mientras se carga/descarga la batería, de manera que se opere siempre en un rango de estado parcial de carga. (PSoC-Partial State of Charge). Con esto se consigue aumentar la potencia y la vida de la batería.



En las baterías de Pb convencionales los cristales de  $\text{PbSO}_4$  crecen durante la descarga y se redisuelven durante la carga. Con el tiempo suele ocurrir la sulfatación: se forman grandes cristales que no se redisuelven, lo que incrementa la resistencia de la batería, a la vez que decrece la capacidad, potencia y eficiencia de la misma.

El supercondensador permite que la batería trabaje con alta eficiencia en un estado parcial de carga, lo que reduce la sulfatación.

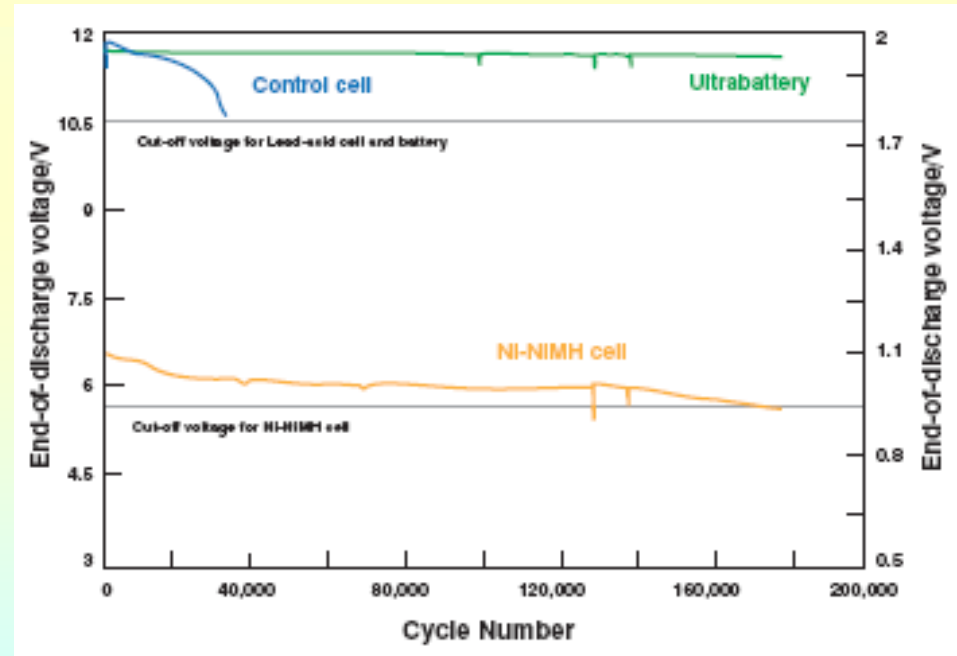
Además, trabajando en estado parcial de carga la electrólisis del agua ocurre en mucha menor medida, lo que evita la corrosión y la disminución del nivel de electrolito.

Estas características hacen que la Ultrabatería pueda usarse en aplicaciones de potencia variable, como puede ser en VE ó PV

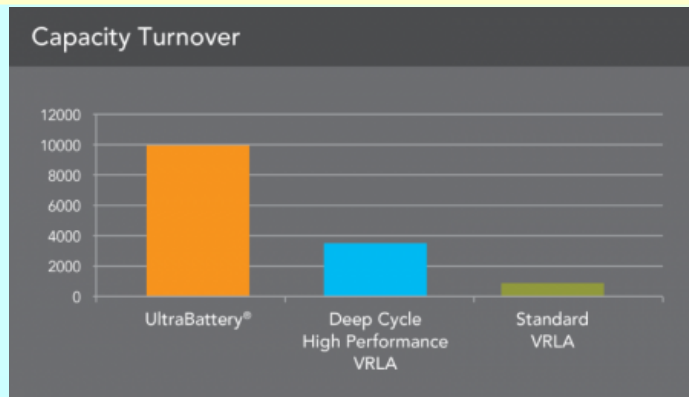
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

La Ultrabatería nos proporciona mayores valores de energía a lo largo de la vida. Se ha demostrado que la capacidad suministrada es 4 veces, o más, que la de las baterías VRLA convencionales. Esto se debe a que el número de ciclos de carga/descarga es muy superior (casi 200.000) y la vida media de uso también, por lo que se necesita reemplazar menos frecuentemente.

Por otra parte, debido a que la Ultrabatería opera en rangos de PSoC, la aceptación de carga es mucho más eficiente. La eficiencia de los ciclos de carga descarga se encuentra en un 86–95% en contraste con las VRLA convencionales que alcanza un 70%



Ciclos de Carga/descarga de una batería convencional de Pb-ácido, una Ultrabatería y una de Ni-MH





## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Aplicaciones

UltraBattery® technology se ha aplicado ya con éxito en aplicaciones de potencia variable, como vehículos eléctricos híbridos y baterías estacionaria en plantas Fotovoltaicas o Eólicas.

Este dispositivo actúa modulando la corriente que será integrada en la red eléctrica. Además, también puede almacenar excesos de energía para ser inyectada a la red en los momentos de mayor demanda.



Planta Eólica de Ecoult en Australia



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

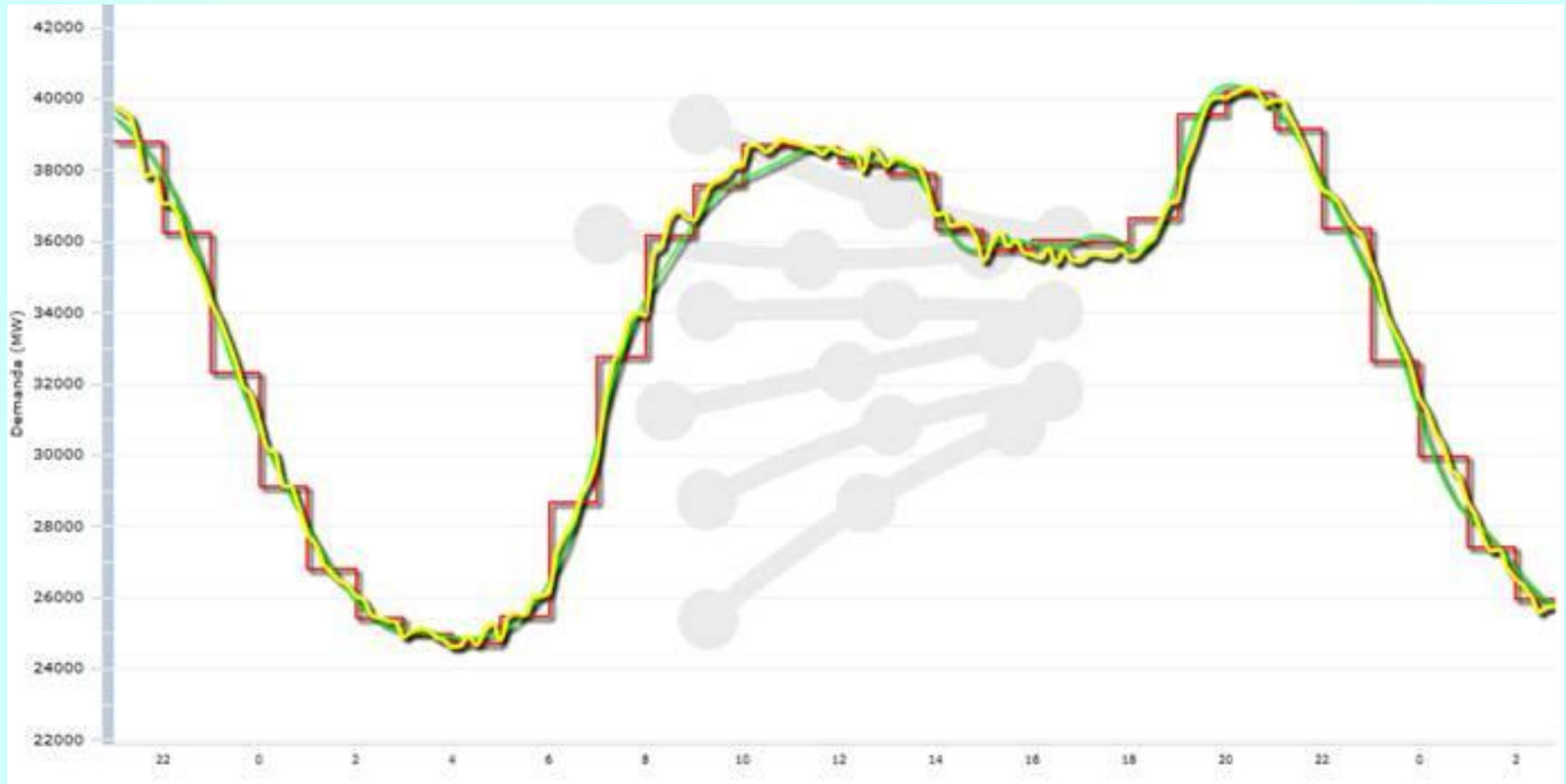
La demanda eléctrica varía constantemente, y es necesario que las centrales eléctricas generen la cantidad de energía que se demanda en cada situación. Se suele llamar **horas punta** a las de alta demanda eléctrica y **horas valle** en las que el consumo se reduce al mínimo.

El coste de la electricidad también varía según la demanda existente.

Muchas centrales eléctricas, debido al tipo de tecnología que emplean, no pueden variar fácilmente la energía generada, como es el caso de las centrales nucleares, otras suelen pararse cuando hay exceso de energía, centrales eólicas, mientras que otras centrales, como las centrales térmicas convencionales, tienen diversas restricciones técnicas y económicas sobre estas variaciones.

**Se necesitan métodos que permitan almacenar los excedentes de energía producidos y que posteriormente sean recuperados en las horas de mayor demanda**, lo que suaviza la curva de la demanda, reduciendo las variaciones de energía que tienen que generar las tecnologías menos apropiadas para ello. A parte de las baterías, celdas de combustible y condensadores existen otras metodologías que responden a este objetivo.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento



Curva amarilla. Representa la demanda real.

Curva verde. Representa la previsión de la demanda.

Curva roja. Representa la producción programada para los grupos de generación a los que se haya adjudicado el suministro de energía en la casación de los mercados.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Almacenamiento de Energía en forma de Aire Comprimido

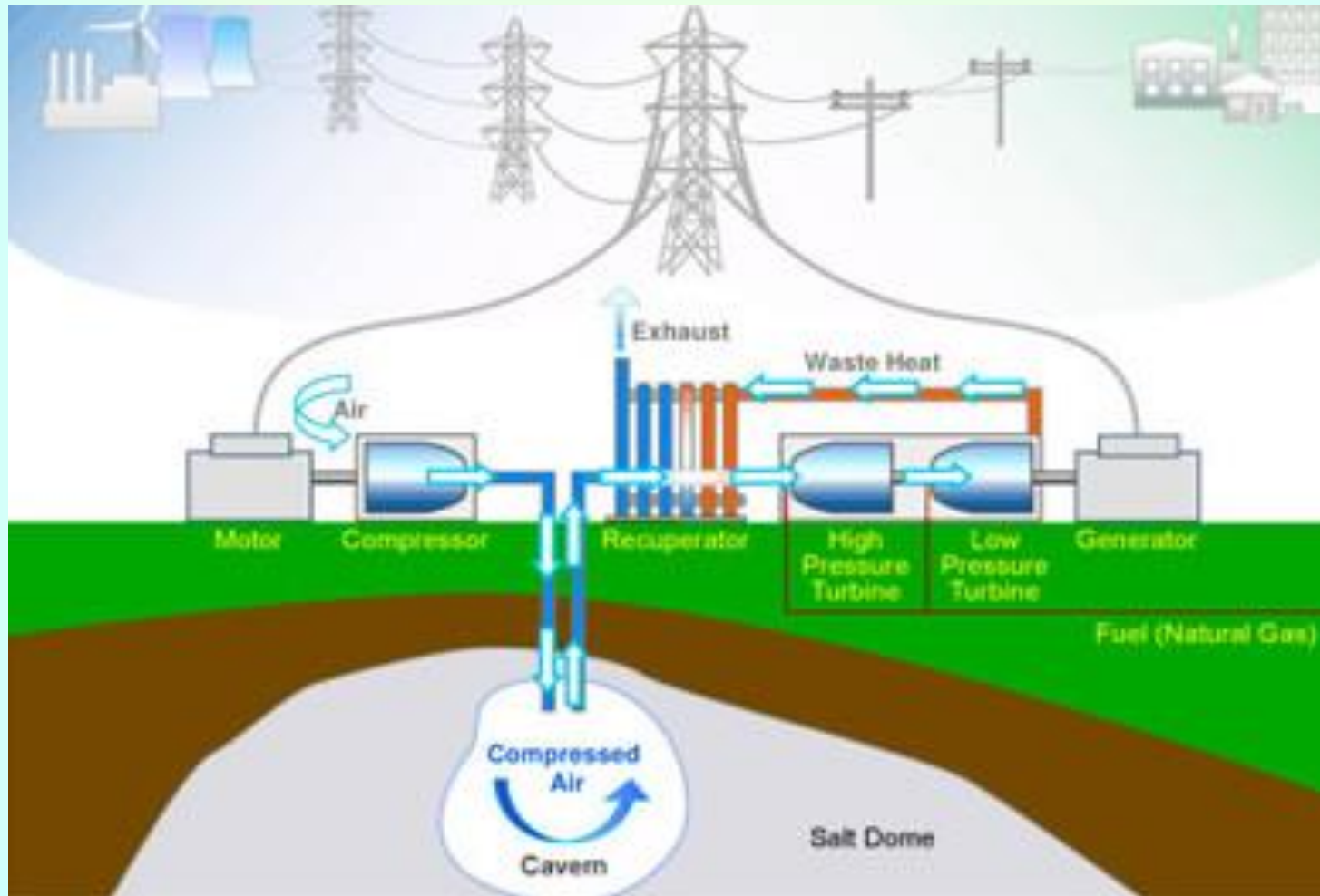
Un sistema barato para almacenar el exceso de energía eléctrica producida en las horas en las que baja la demanda de electricidad. El proceso consiste en usar un compresor para almacenar aire comprimido en un depósito normalmente subterráneo. Pueden aprovecharse **cuevas o minas** con las características geológicas necesarias.

Cuando es necesaria de nuevo la energía, periodos de mayor demanda eléctrica, el aire comprimido se usa para alimentar una turbina que produce energía eléctrica, la cual se inyecta en la red.

El uso de este tipo de almacenamiento es muy rentable para plantas que producen unos 100 MWh de exceso, o para almacenar energía durante unas 5 horas. En algunos casos un almacenamiento más largo, hasta 10 horas, podría ser también rentable dependiendo del diseño de la planta.

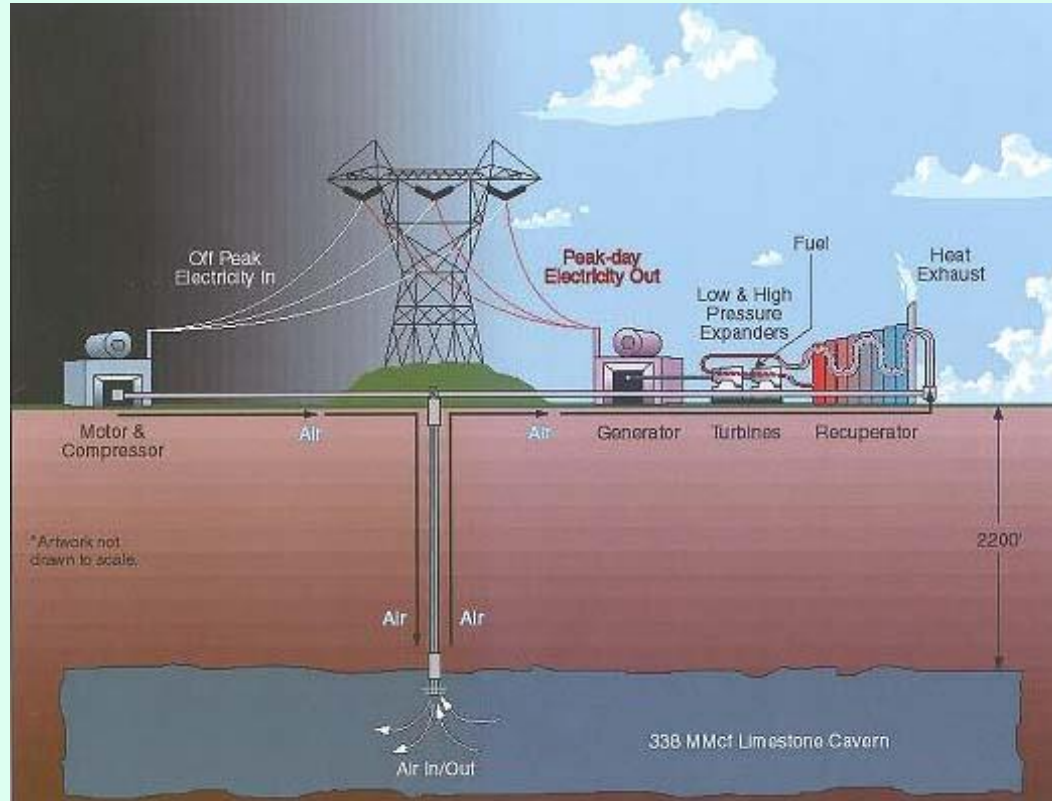
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Almacenamiento de Energía en forma de Aire Comprimido



Se suele usar gas natural para evitar el efecto de enfriamiento que sufre el aire al expandirse

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

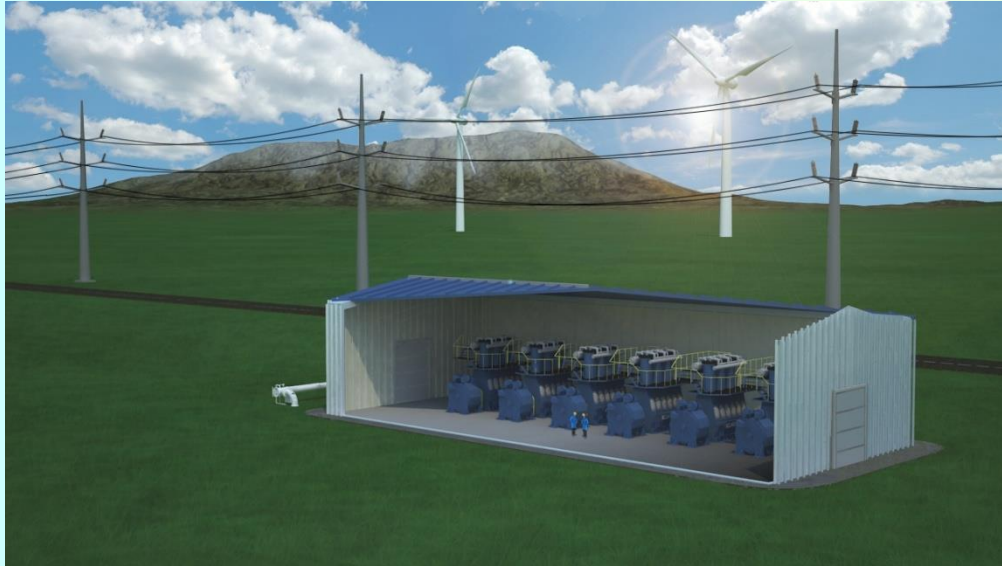


Instalación de este tipo en el estado de Alabama, USA. Características:

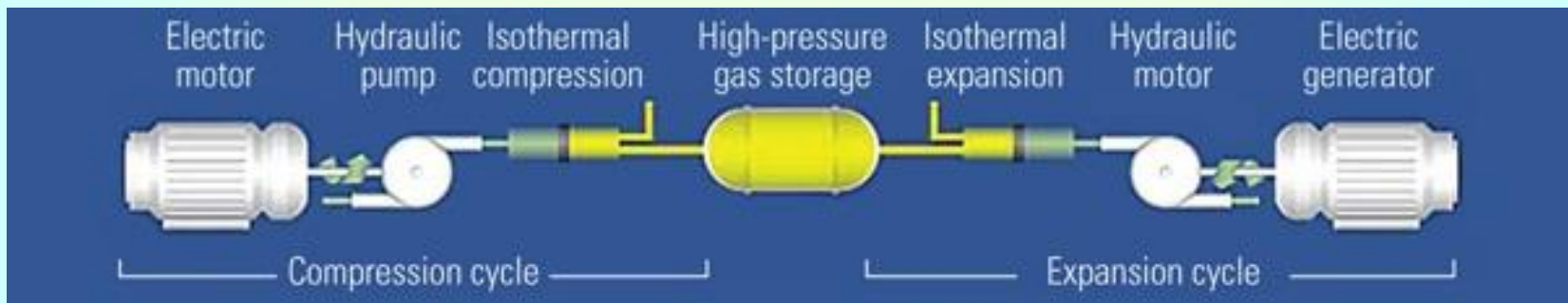
- Potencia: 110MW
- Capacidad máxima: 26 horas
- Relación: 1,7 hora de compresión por hora de generación
- Rendimiento: 75-76,1 %
- Coste: 500 U\$S/KW (1988)



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento



Se ha modificado y mejorado el proceso de compresión y los sistemas de almacenamiento. Se mantiene el aire a temperatura constante durante compresión, almacenamiento y expansión, lo que mejora la eficiencia del ciclo. El ciclo completo está próximo a un ciclo isotérmico. Desarrollado por **SustainX, Inc.** Permite una instalación flexible.



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Vehículo de Aire Comprimido (CAC):

#### Ventajas:

- Su peso. Es ligero. Pueden tener unos 350 Kg.
- El aire no es inflamable y no explota en caso de accidente como la gasolina, sino que sólo produce un fuerte ruido al expandirse.
- Velocidad máxima de 110 km/h y una autonomía de 200 kilómetros (en condiciones ideales)
- Su repostaje se realiza en pocos minutos en estaciones equipadas con unidades de aire comprimido con un coste de unos dos euros. Utilizando el compresor incorporado en el propio coche se llena el tanque en cerca de cuatro horas.
- En vehículos híbridos de aire se podría recuperar la energía de frenada.



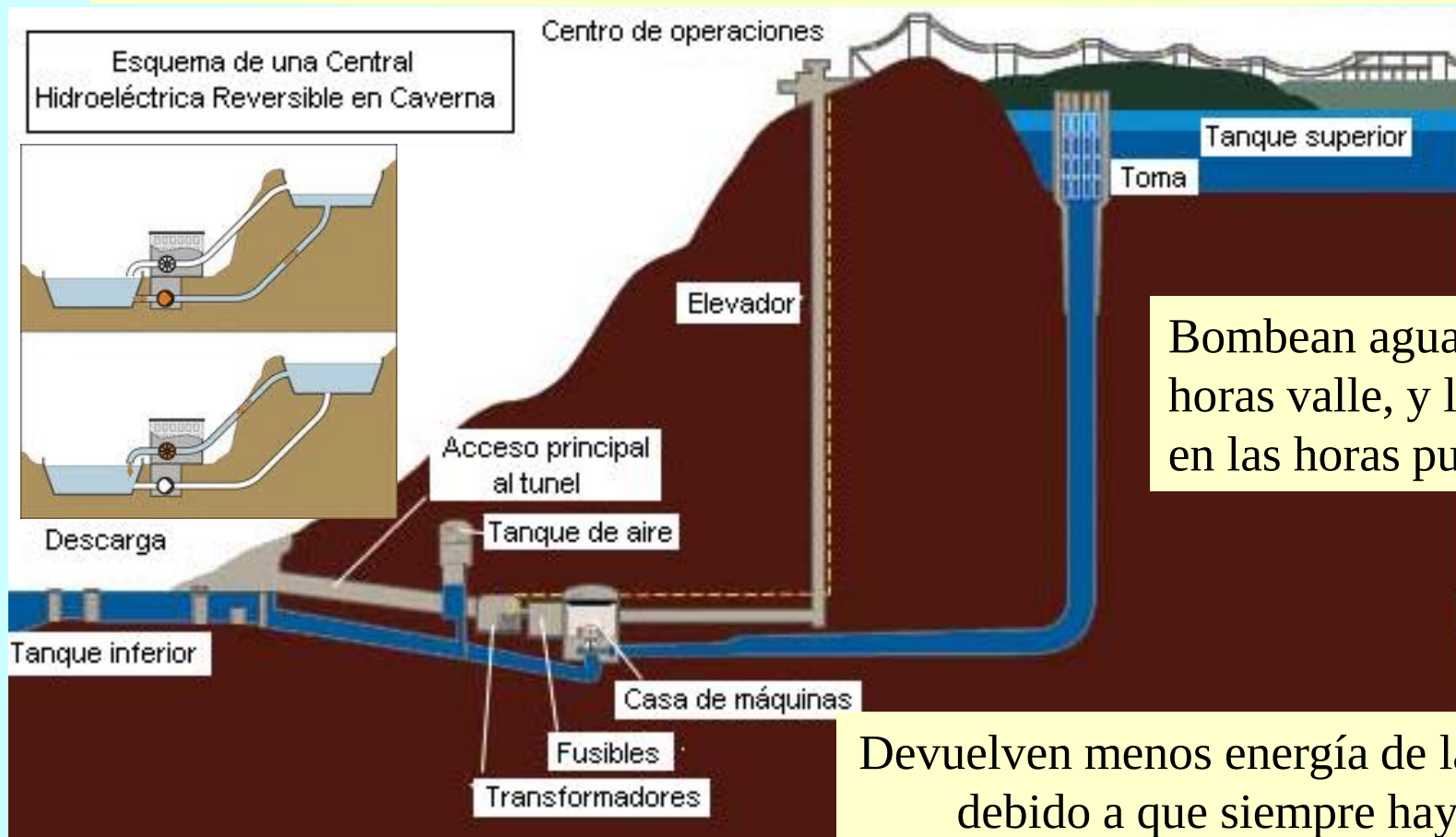
#### Desventajas:

- Un automóvil evidentemente ligero con un tanque conteniendo aire comprimido a 300 bares es desde el punto de vista de la seguridad, inaceptable según las normas reguladoras.
- El rendimiento energético es de un orden de magnitud menor al de un vehículo eléctrico. Hay pérdidas por calentamiento del aire o el motor del compresor.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Centrales Hidroeléctricas Reversibles

Almacenamiento de Energía Potencial. Bombear agua hacia arriba cuando se dispone de energía que no se usa en ese momento, para hacerla caer de nuevo cuando se necesita y producir Energía eléctrica con ayuda de una Turbina.



Bombear agua en las horas valle, y la dejan caer en las horas punta.

Devuelven menos energía de la que absorben debido a que siempre hay pérdidas.



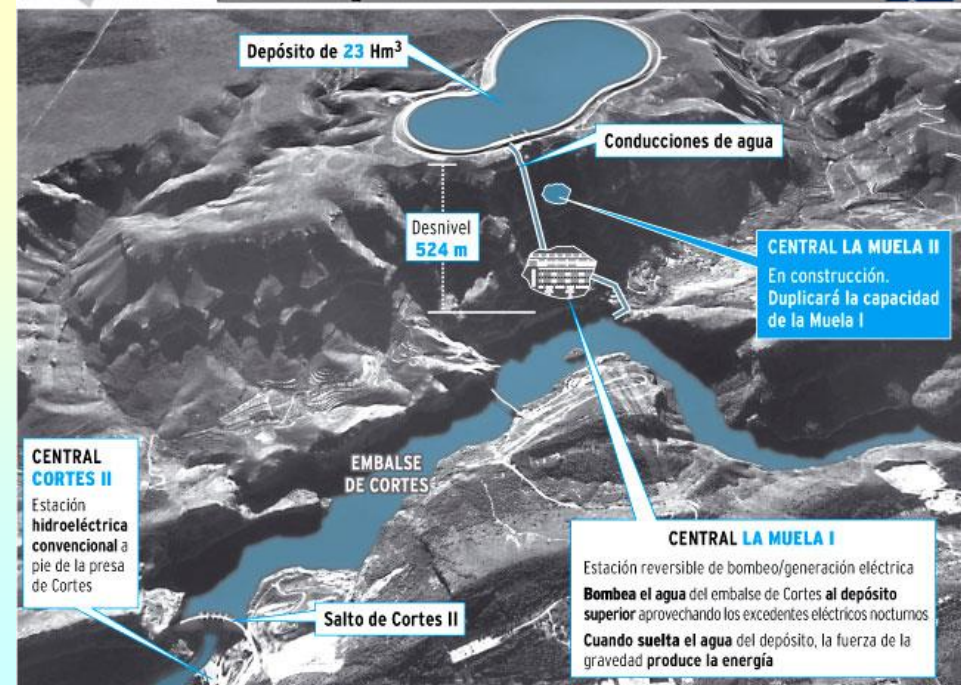
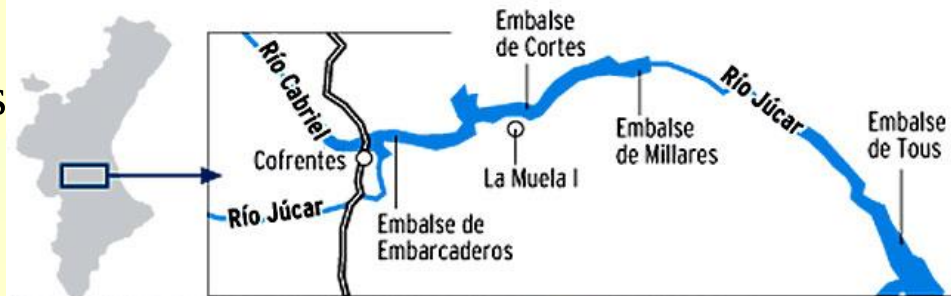
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Centrales Hidroeléctricas Reversibles

En España hay unas 24 centrales reversibles

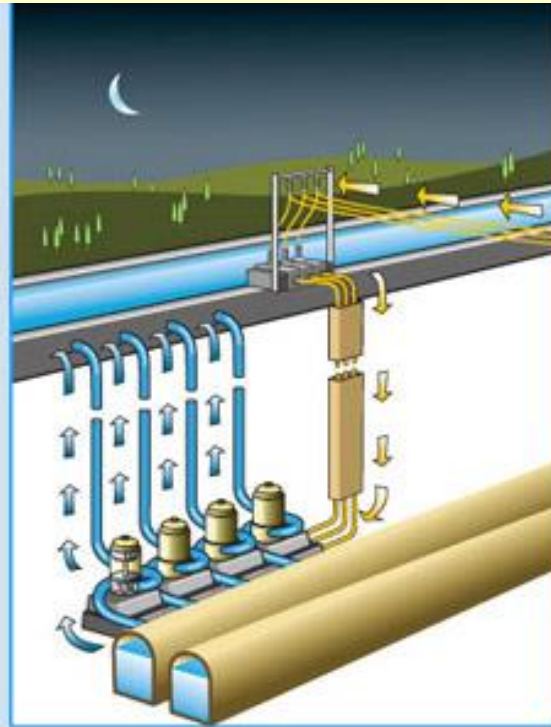
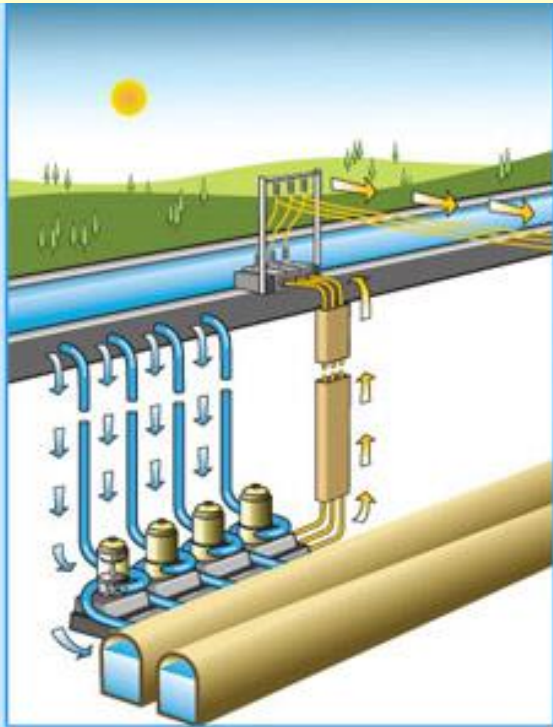


### EL COMPLEJO CORTES-LA MUELA



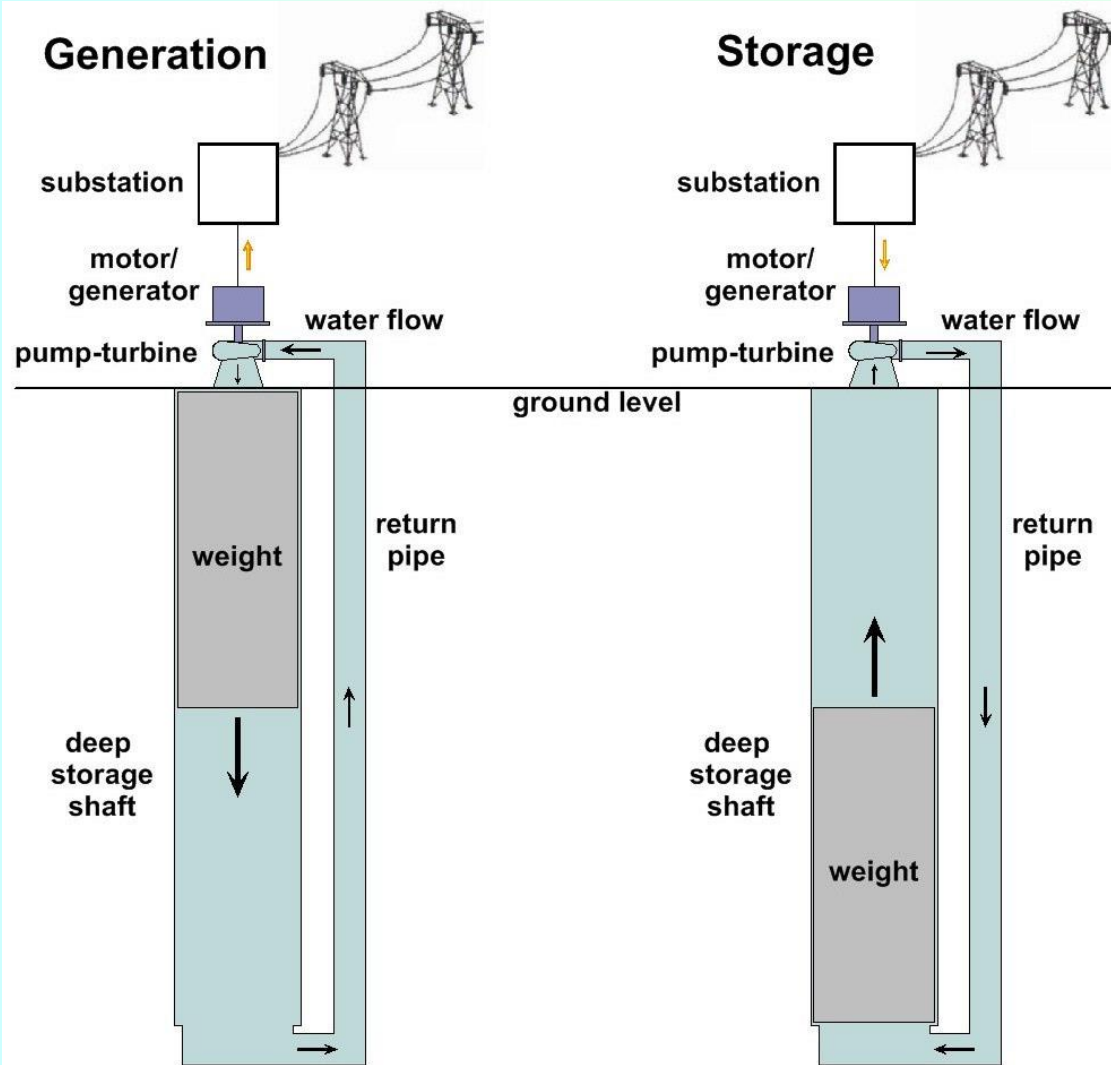
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

**Riverbank Power** (empresa canadiense) almacena parte de la energía eólica producida en forma de Energía potencial. En lugar de usar colinas o lugares elevados para hacer subir el agua, la guarda en el subsuelo e invierte el proceso. La tecnología de Aquabank deja caer el agua por gravedad hacia el subsuelo moviendo una turbina y produciendo electricidad. Esa electricidad producida durante el día se inyecta en la red eléctrica. Durante la noche, cuando hay exceso de viento, se utiliza esa energía sobrante para bombear agua hacia la superficie.



Profundidad: 600 metros  
4 turbinas  
Se mueve 37.854.096 hl de agua para producir 6 h. de electricidad y cuesta 8 h. subirla de nuevo a la superficie.  
3 instalaciones en EEUU

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento



### Almacenamiento Gravitatorio

Utiliza el mismo concepto que una central hidroeléctrica reversible, pero en lugar de bombear agua hacia arriba, la bombean hacia abajo. La **eficiencia** del sistema es del 75%-80%.

**Bajo Costo:** una planta de unos 200 MW es de unos 150 dólares/KWh.

Fácil instalación.

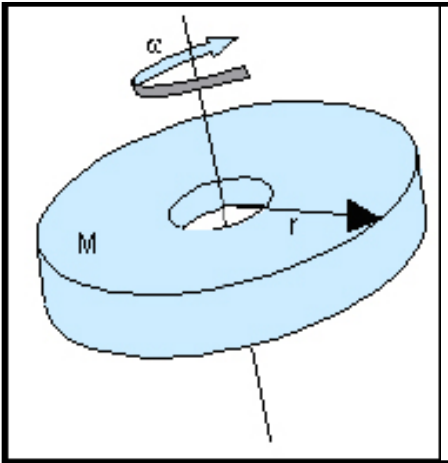
Ya existe un equipo a pequeña escala operando y a finales del 2013 se espera tener operando una planta en Texas.

Desarrollado por **LaunchPoint Technologies**.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Almacenamiento de Energía Cinética en Volantes de Inercia

Basado en un disco con gran momento de inercia rotacional.



Energía

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

Momento de Inercia (disco)

$$I = \frac{1}{2} M r^2$$

$$E = \frac{1}{4} M r^2 \omega^2 = \frac{1}{4} M v^2$$

$\omega$ : velocidad rotacional y  $v$ : veloc. lineal de la circunferencia exterior

Un incremento de la energía almacenada se consigue aumentando la masa,  $M$ , y aún mayor, aumentando la velocidad,  $v$ . Sin embargo, el diseño del volante estará limitado por la resistencia del material usado al stress del movimiento de rotación.



## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Almacenamiento de Energía Cinética en Volantes de Inercia

Los volantes son cargados y descargados a través de un **motor/generador**. El motor/generador toma energía de la red eléctrica para hacer girar el rotor del volante. Durante un corte de servicio o baja tensión el motor/generador genera energía.

La energía cinética almacenada en el rotor es transformada en corriente continua por el **generador** y luego en corriente alterna gracias a un **inversor** y un sistema de control.

Los volantes más avanzados están fabricados de **fibra de carbono**, en vez de acero. Esto ha supuesto un gran incremento de la energía específica suministrada.

En satélites se usa para almacenar la energía suministrada por células fotovoltaicas.

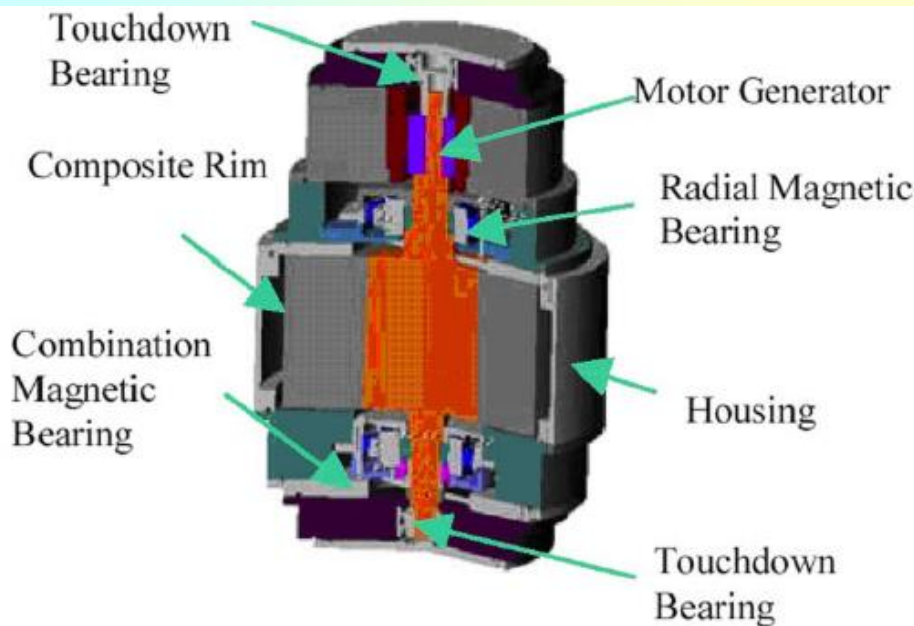


Figure 13-3  
Cross-Section of a Flywheel Module (Courtesy NASA Glenn Research Center)

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Ventajas :

- Energía específica 5-10 veces mayor que baterías
- Larga vida (~15 años)
- Elevado número de ciclos de carga/descarga
- Mínimo mantenimiento
- Alta velocidad de carga y descarga
- Eficiencia 85-95 %

### Desventajas:

- Variación de la velocidad de rotación durante la carga y descarga.
- Pérdidas de fricción. Se construyen en vacío
- Pérdidas por calentamiento.
- Poco tiempo de almacenamiento.



### Otras aplicaciones:

- Absorber la energía de frenado de un vehículo, de modo que se reutilice posteriormente en su aceleración (Kers).
- Se opone a las aceleraciones bruscas en un movimiento rotativo.

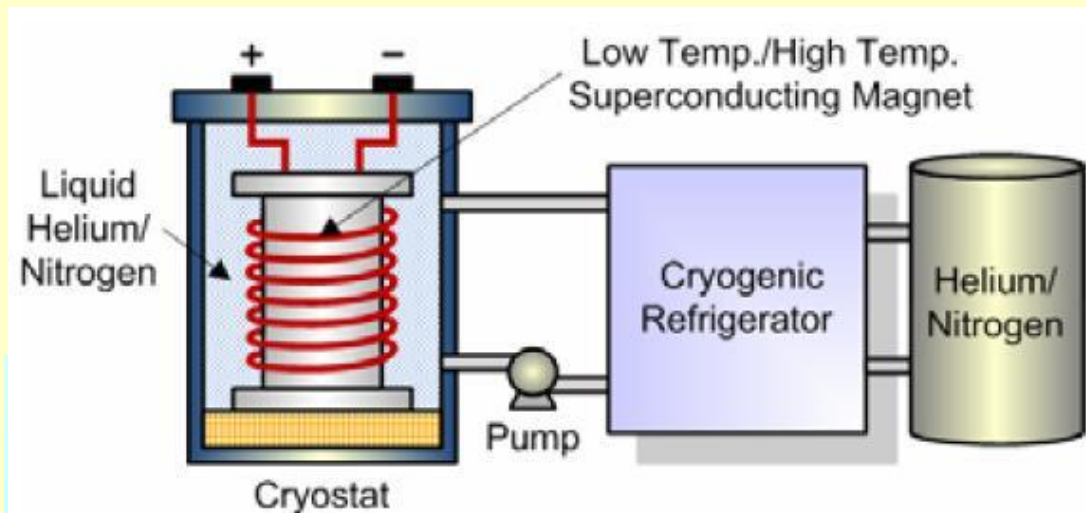
## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Almacenamiento de Energía Magnética por Superconductividad (SMES=Superconducting Magnetic Energy Storage)

Un SMES es un dispositivo que almacena energía en un campo magnético generado por el flujo de corriente eléctrica en una bobina superconductora (SC). La bobina es enfriada criogénicamente a una temperatura más baja que su temperatura crítica, a la que muestra esta propiedad superconductora.

Una vez cargada la bobina, **la corriente no decae y la energía magnética puede ser almacenada indefinidamente**. Este almacenamiento de energía puede ser inyectada a la red eléctrica por simple descarga de la bobina.

Debido a los altos costes de los materiales superconductores y del sistema de refrigeración, se utiliza para el almacenamiento de energía de corta duración. Su aplicación más común es la mejora de la calidad de onda en las redes públicas de distribución de electricidad.

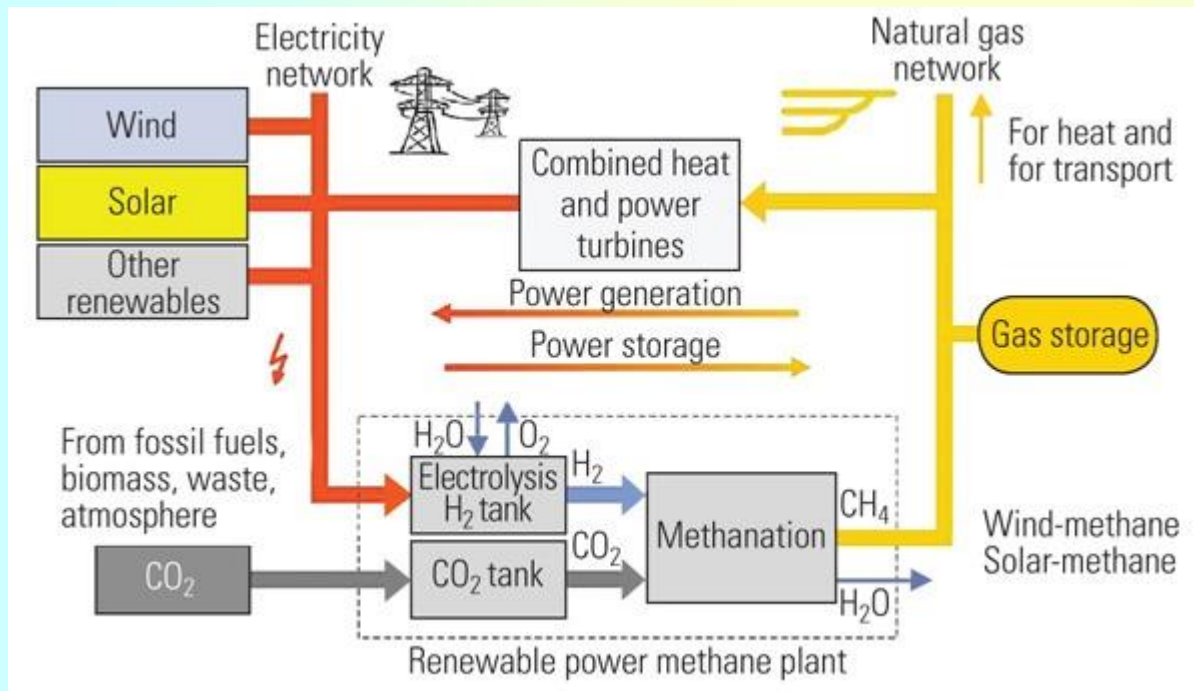




## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Conversión de Energía en Gas Natural.

Este sistema utiliza el excedente de las energías renovables para mediante electrólisis separar hidrógeno y oxígeno . Posteriormente una reacción química de hidrógeno con dióxido de carbono genera el metano (gas natural)



**Eficiencia de más del 60%.**

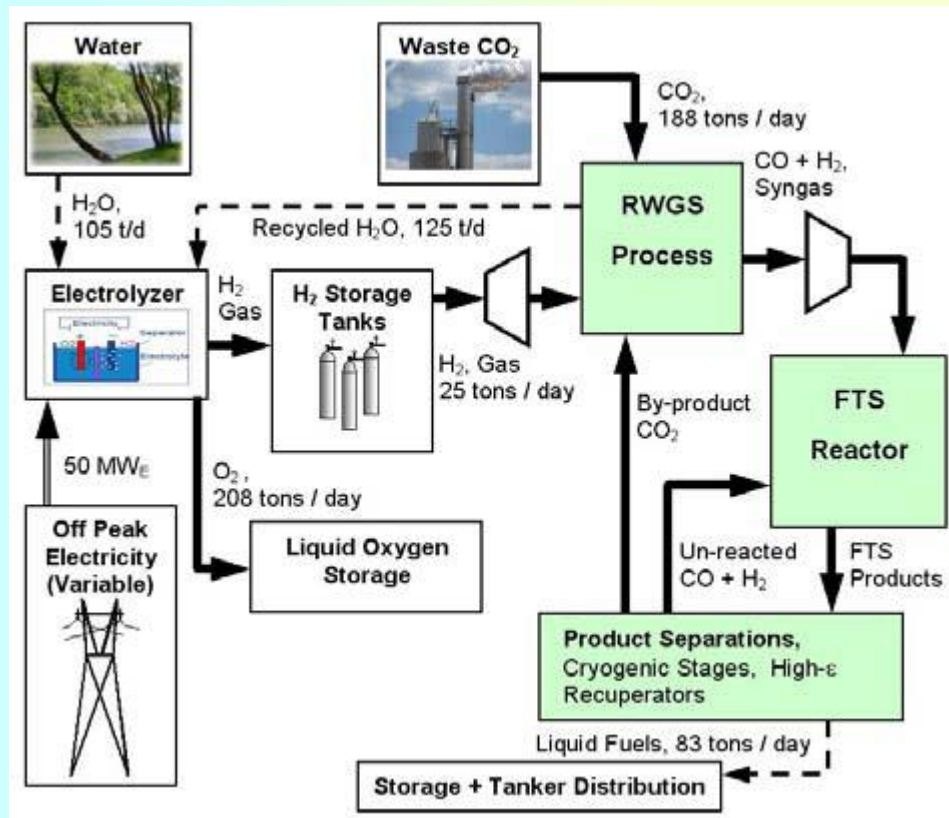
Debido a la eficiencia la electrólisis (75%) y de la reacción de H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>(80%).

**A parte de recuperar excedentes de electricidad, se elimina CO<sub>2</sub>.**

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

### Conversión de Energía en Diesel o Gasolina.

Sistema similar al anterior, pero el hidrógeno de la electrólisis se usa para la producción de diesel o gasolina, en vez de metano.



El hidrógeno se combina con el CO<sub>2</sub> para generar monóxido de carbono, CO. Seguidamente el CO y H<sub>2</sub> reaccionan y generan los hidrocarburos.

### Eficiencia del 60%.

El proceso puede ser competitivo cuando el barril de petróleo está por encima de 80 dólares/barril y la Energía renovable sobrante pico a 16 dólares/MW

A parte de los Combustibles, se genera Oxígeno que puede ser vendido.

## Tema 9. Otros Métodos de Almacenamiento

