



GOBIERNO  
DE ESPAÑA

MINISTERIO  
DE CIENCIA  
E INNOVACIÓN

**Ciemat**

Centro de Investigaciones  
Energéticas, Medioambientales  
y Tecnológicas



*Unidad  
de Formación*



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



# **TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS**

*23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022*

**Revisión general de tecnologías de  
almacenamiento de energía**

**Dr. Marcos Lafoz-Pastor**

**23/05/2022**

## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Chemical

Hydrogen

Synthetic Natural  
Gas

### Electrochemical

Classic Batteries

Flow Batteries

Lead Acid

Li-Ion

Vanadium  
Red-Ox

Zn-Br

Li-  
Polymer

Li-S

Metal Air

Na-Ion

Na-NiCl<sub>2</sub>

Na-S

Ni-Cd

Ni-MH

### Electrical

Capacitors

SMES

### Mechanical

Flywheels

Adiabatic  
Compressed Air

Pumped Hydro

Diabatic  
Compressed Air

Pumped Heat  
Electrical Storage

Cryogenic  
Energy Storage

### Thermal

Heat  
(Hot Water/PCM)

Molten salt  
(Heat/CSP thermal)

Packed-bed  
Heat Storage

Smart Electric  
Thermal Storage



*EASE-EERA*

# Tecnologías de Almacenamiento

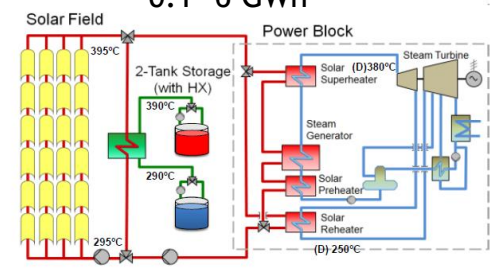
## Hidrobombeo

100-500 MW  
10 GWh

**Pumped Hydro Storage Systems**

## Almac. Térmico

50-300 MW  
0.1- 6 GWh



## Volantes de inercia

**STORNETIC**

100-1000 kW  
10-100 kWh

## Ultracondensadores

**SkelCap**  
ULTRACAPACITOR

SCA3000  
SCA3200

100 kW  
1 kWh

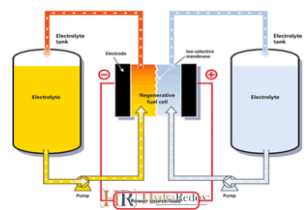
**SMES**

## Aire comprimido (CAES)

1.7MW 10 MWh

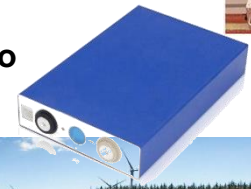
**Goderich Project (Canada)**

## Almacenamiento basado en hidrógeno



## Baterías de litio

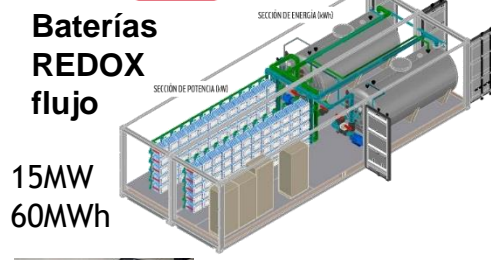
1MW/1MWh



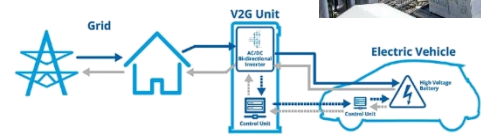
1 MW, 1 kWh

## Aire líquido (LAES)

0.350MW, 2.5MWh



15MW  
60MWh

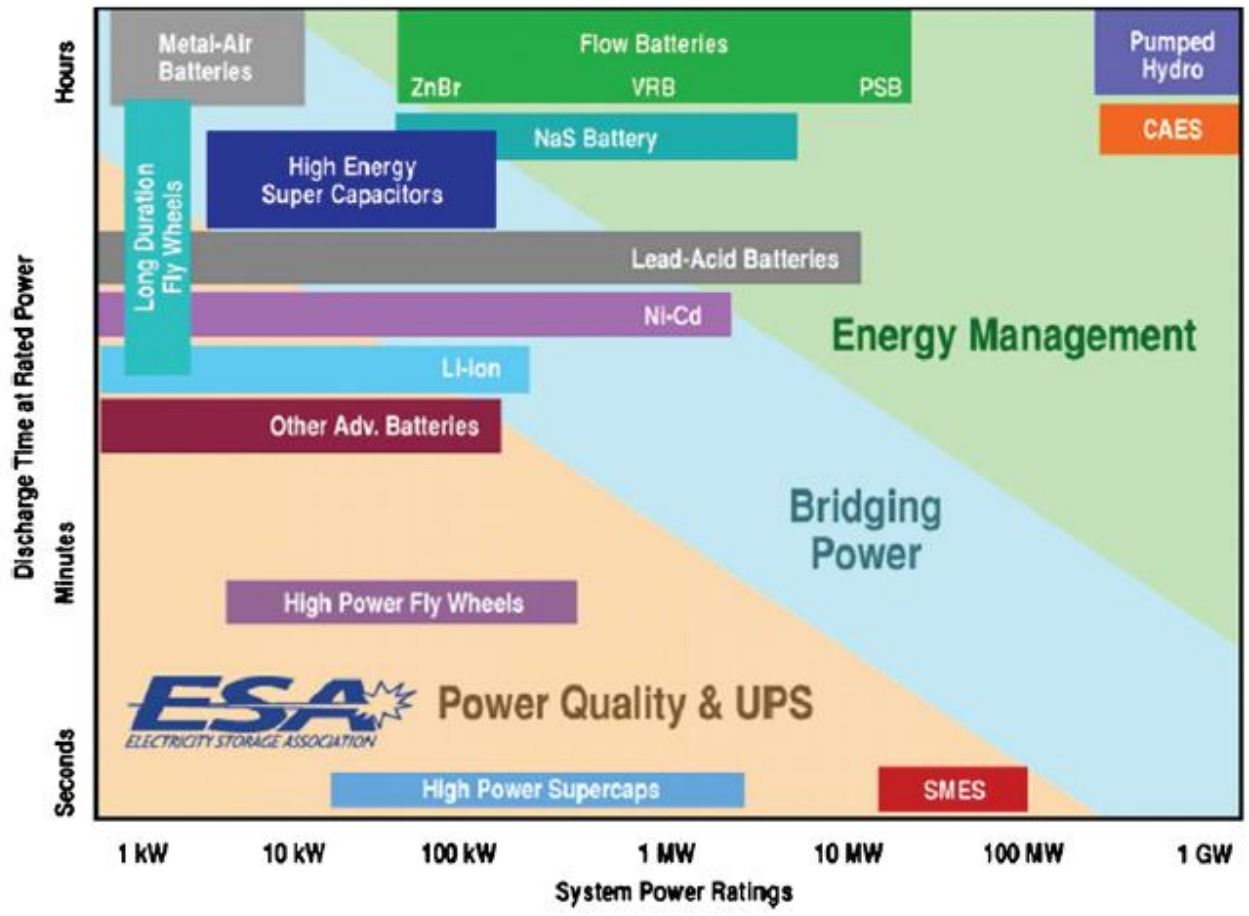


**Doméstico y Vehículo eléctrico**



## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Diagramas de Ragone

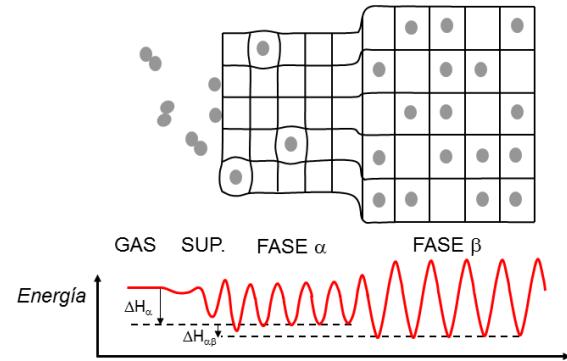


## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Tecnologías: 1. Almacenamiento químico - Hidrógeno

El almacenamiento en forma de hidrógeno se puede realizar:

En forma de gas (alta presión – 200 bar), líquido (baja temperatura – 21K) o sólido (hidruros)



Cada uno de estos tipos tiene sus características de presión, temperatura, necesidad de mantenimiento, estabilidad, etc.

## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

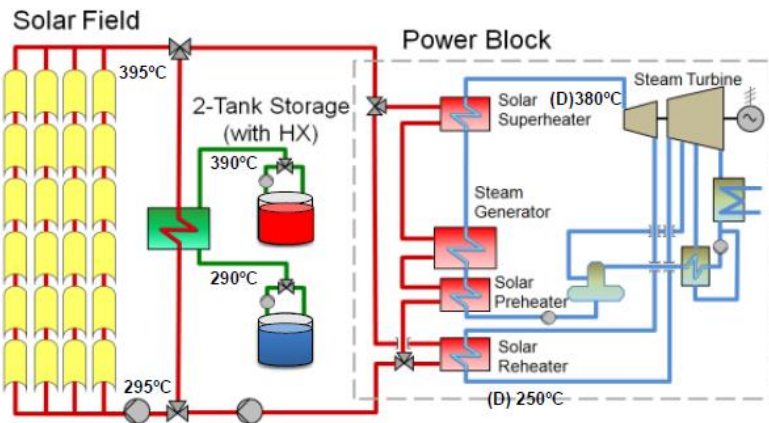
### Tecnologías: 2. Almacenamiento térmico de energía

Alta madurez tecnológica, larga escala de potencia y energía, larga vida útil, capacidad de 1GWh. Costes 20-55€/kWh.

*calor sensible* (incremento o decremento de la temperatura)  
*calor latente* (cambio de estado, sólido a líquido y viceversa)

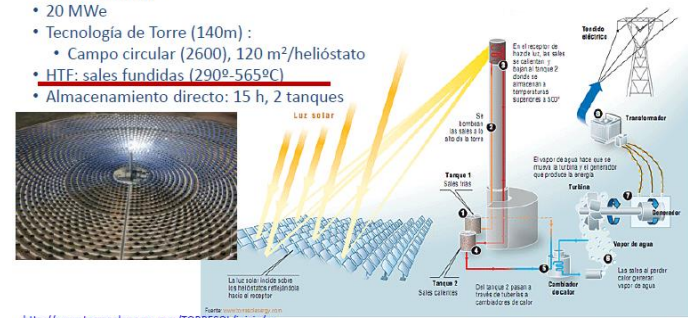
Disposición en dos tanques o en un único tanque (termoclinos)

Asociado principalmente a centrales de concentración solar o de cilindro parabólico.



#### GEMASOLAR

- Fuentes de Andalucía (Sevilla)
- Torresol Energy
- 20 MWe
- Tecnología de Torre (140m):
  - Campo circular (2600), 120 m<sup>2</sup>/heliostato
- HTF: sales fundidas (290º-565ºC)
- Almacenamiento directo: 15 h, 2 tanques

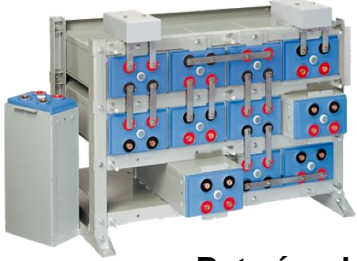


## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Tecnologías: 3. Almacenamiento electroquímico en forma de baterías

Tipos de baterías utilizadas para almacenamiento de energía:

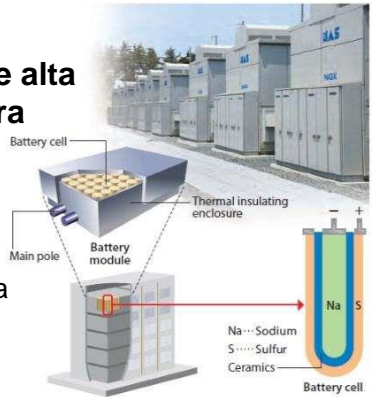
#### Baterías Pb-acid



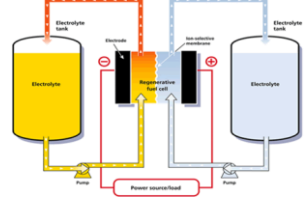
800RE  
EnergyCell  
48V 672Ah  
AGM Battery  
System

#### Baterías de alta temperatura (NaS)

Trabajan a temperatura en torno a 300 °C

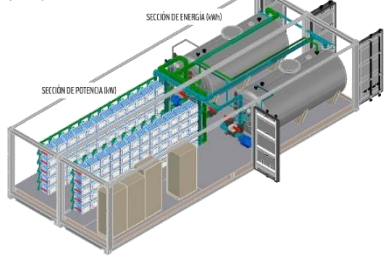


#### Baterías REDOX de flujo



Independencia de la potencia y la energía.

HR Hydrex



#### Baterías Li-ion



49MW Li-ion battery. Younicos

GRUPO	1	2	3	4
1	IA H 1.0079	IIA He 4.0026		
2	Li 6.941	Be 9.0122		
3	Na 22.990	Mg 24.305		
4	K 39.098	Ca 40.078		

- Distintas químicas y características
- Modelado considerando distintos ámbitos de aplicación
- Caracterización y validación



## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Tecnologías: 4. Almacenamiento mecánico de energía. Hidrobombeo, aire comprimido (CAES) y aire líquido (LAES)

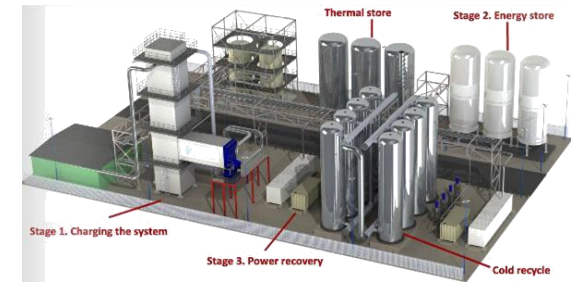
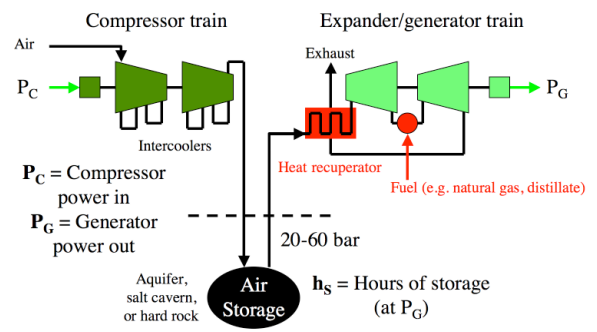
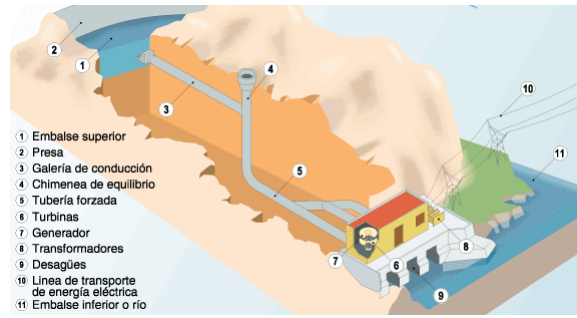
El hidrobombeo es una tecnología muy madura y cubre el 95% del almacenamiento de energía en operación.

El aire comprimido (CAES) es muy madura también y tiene aproximaciones interesantes portátiles. El LAES permite el desarrollo a gran escala sin necesidad de infraestructura especial.

Typical Power: 200 to 350 MW  
Cycle efficiency: 75-85%  
Energy capacity: 10 GWh

Typical Power: 50 to 350 MW  
Cycle efficiency: 50-70%  
Energy capacity: 1-15 GWh

Typical Power: ~ 5 to 500 MW  
Cycle efficiency: ~60%  
Energy capacity: 10 MWh to 7.8 GWh



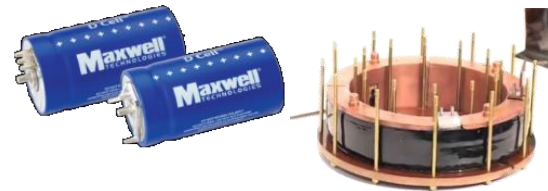


## 2. Clasificación de sistemas de almacenamiento de energía

### Tecnologías: 5. Sistemas de almacenamiento rápido - Supercondensadores, volantes de inercia y bobinas superconductoras

Nombre	Clase de Energía	Energía almacenada (formulación)
<b>VOLANTE DE INERCIA</b>	cinética	$E_{KES} = \frac{1}{2} J \omega^2$
Supercondensador <b>EDLC</b>	electrostática	$E_{EDLC} = \frac{1}{2} CV^2$
<b>SMES</b> Superconducting Magnetic Energy Storage	Magnética	$E_{SMES} = \frac{1}{2} L I^2$

- Respuesta de dinámica rápida
- Alta densidad de potencia
- Gran número de ciclos
- Alta eficiencia
- Menos influencia de la temperatura (que, por ejemplo, las baterías)



## 5.1. Sistemas de almacenamiento mecánico con volantes de inercia

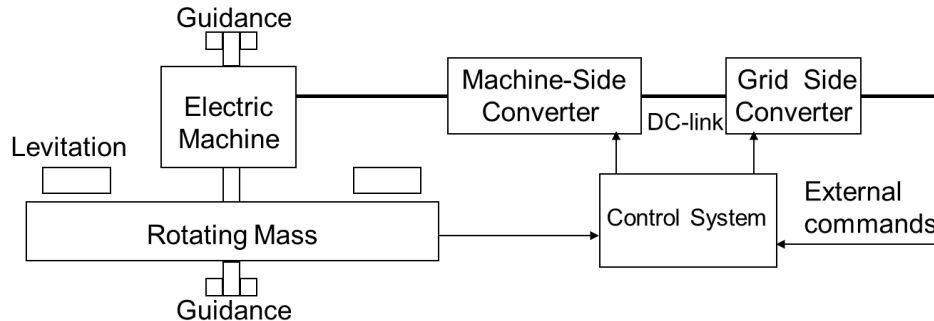
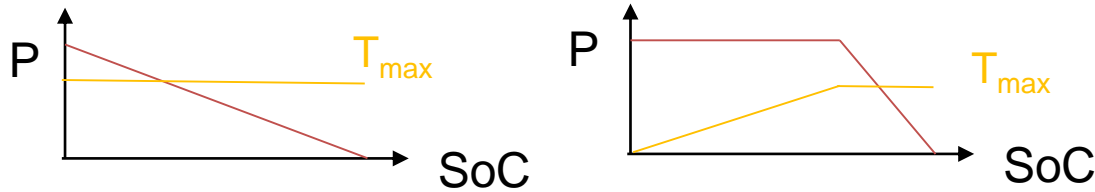
### Volantes de Inercia: Operación general y partes

Un Sistema de almacenamiento cinético de energía (conocido como volante de inercia o *flywheel*) se basa en el intercambio entre energía cinética y eléctrica a través de una máquina eléctrica.

**Motor** -> **Energía eléctrica a cinética**

**Generador** -> **Energía cinética a eléctrica**

$$P = T \cdot \omega$$

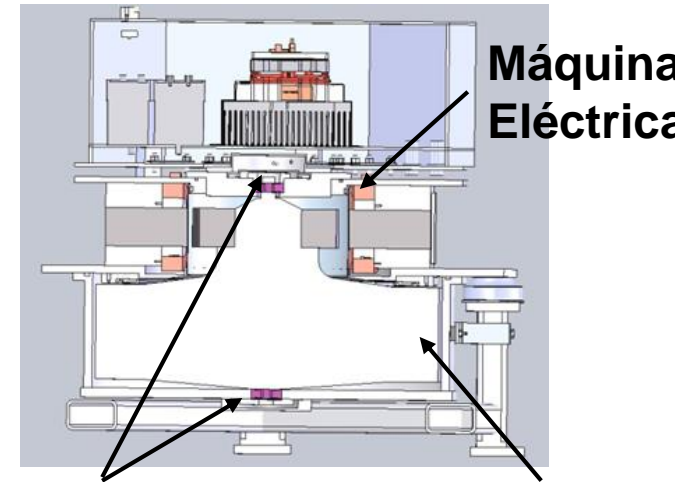


$$E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Energía eléctrica en la carga:

$$E_{carga} = \eta_{ciclo} \cdot \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{max}^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{k} \right)^2 \right]$$

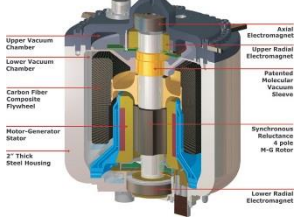
$$k = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$$



Rodamientos

Masa  
rodante

## 5.1. Sistemas de almacenamiento mecánico con volantes de inercia



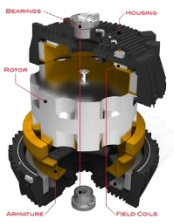
190 kW, 0.63 kWh  
(USA)



100 kW, 50 kWh  
(USA)



700 kW, 12 kWh  
(Germany)



250 kW  
0.9 kWh  
(USA)



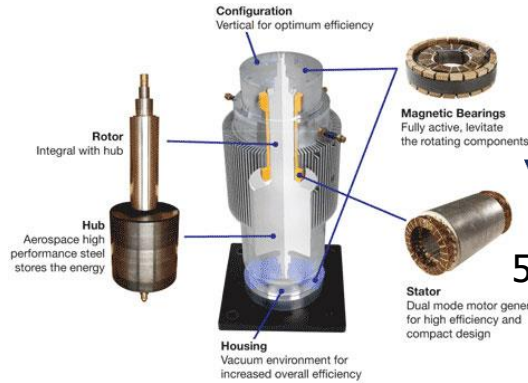
25 kW, 0.069 kWh  
(UK)



700 kW, 12 kWh  
(Germany)



1600 kW  
4 kWh  
(Germany)



500 kW, 0.83 kWh  
(USA)



80 kW, 3.6 kWh  
(Germany)

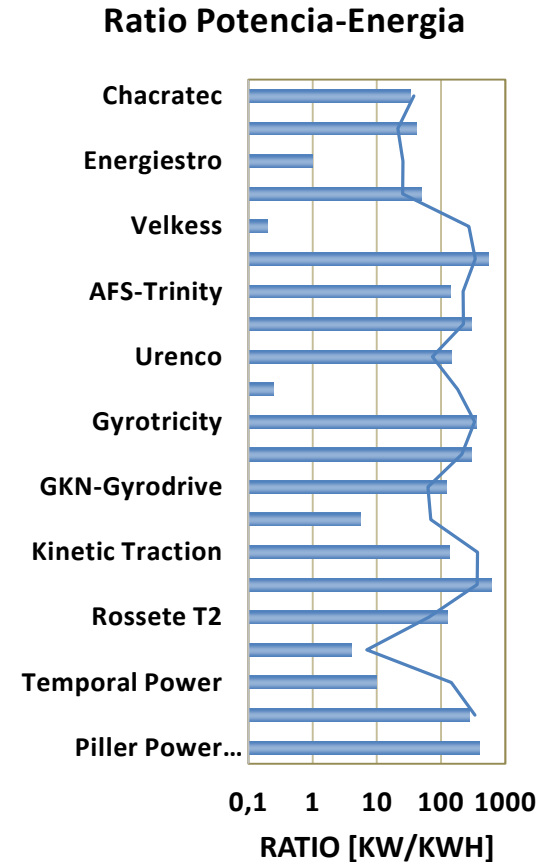
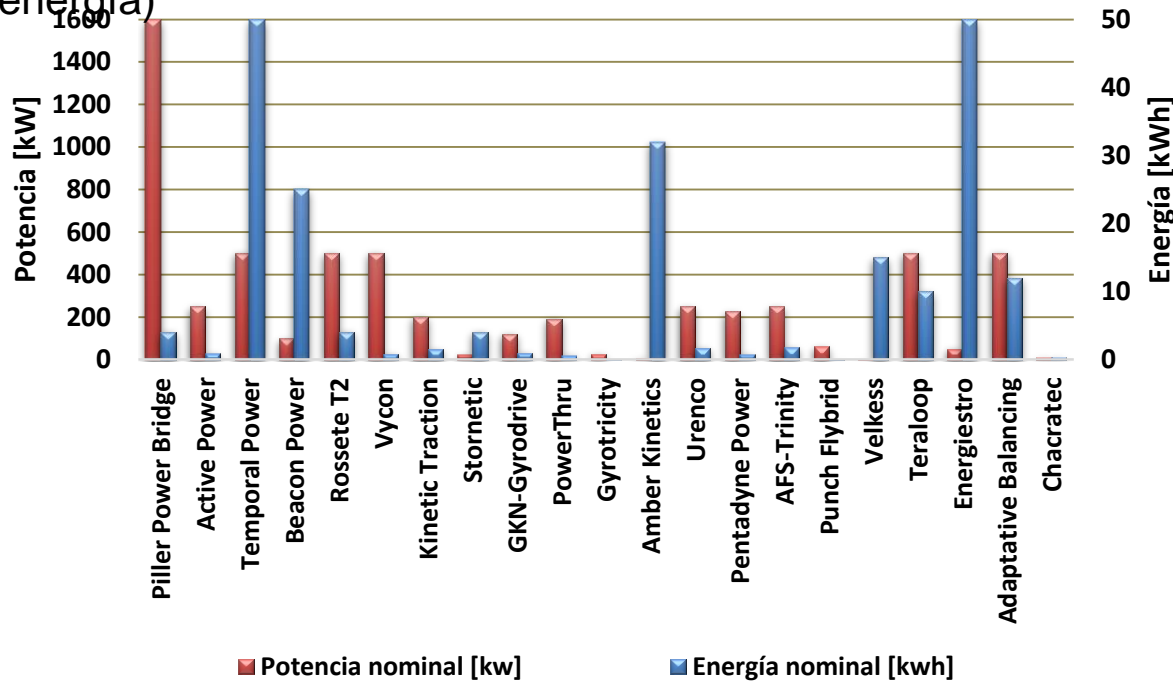




## 5.1. Sistemas de almacenamiento mecánico con volantes de inercia

A la vista de los productos que ofrecen los fabricantes, no hay un acuerdo entre la potencia y la energía.

Esto es debido al desacoplo que ofrece entre ambos parámetros la tecnología (máquina eléctrica es responsable de la potencia y masa rodante es la responsable de la energía)



## 5.2. Sistemas de almacenamiento electroquímico con supercondensadores

### EL SUPERCONDENSADOR. CONCEPTO Y CARACTERÍSTICAS

**Condensador:** dispositivo electrónico que almacena carga entre dos superficies conductoras separadas por una aislante. La energía se almacena dentro de ella. La energía almacenada depende de la superficie del electrodo, la constante dieléctrica del electrodo e inversamente proporcional a la separación de los electrodos.

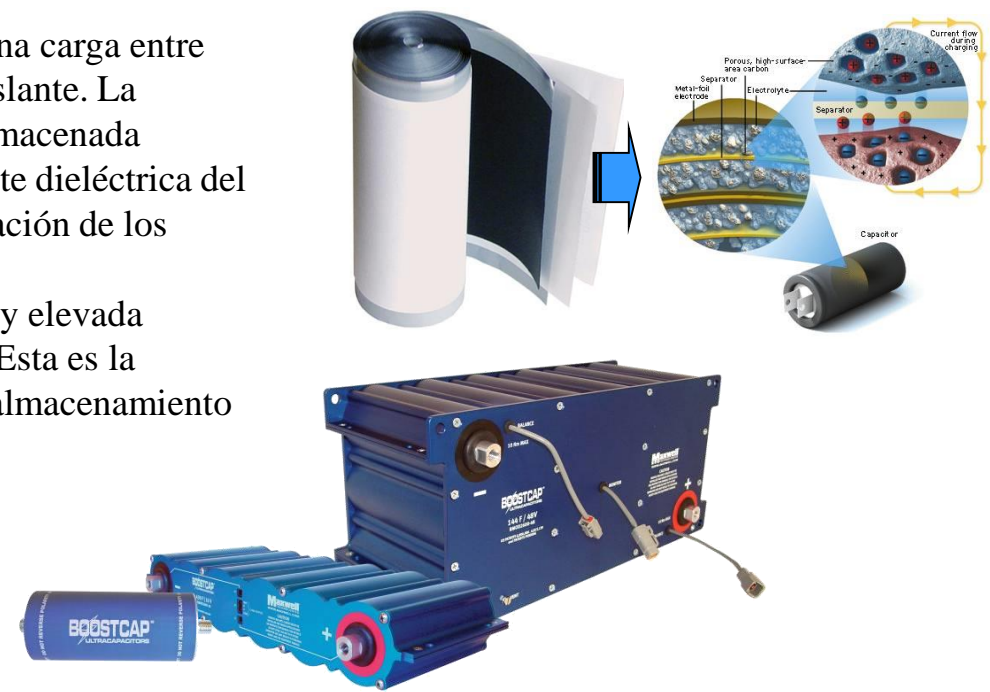
Un **Supercondensador** está formado por una muy elevada superficie equivalente de electrodos de carbono. Esta es la característica que les hace tener la capacidad de almacenamiento de energía.

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$$

*Ejemplo:* Un supercondensador de 3000F, 2.8V (para 200A) en celda de 725g y 0.6l.

$$E_{teórica} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot 2.8^2 = 11.76kJ = 3.26Wh$$

$$P_{max} = U \cdot I = 2.8 \cdot 200 = 560W$$



Conseguir esta capacidad en términos de *d* y *A* de un condensador electrolítico de doble capa:

$$d = 3.5nm \quad A = 3.63 \cdot 10^5 m^2 \approx 36ha$$

## 5.2. Sistemas de almacenamiento electroquímico con supercondensadores



Ioxus (USA)  
3150F, 2.85 V



3200F,  
2.85 V  
(Estonia)



Eaton (UK)  
3000F, 2.7V



LS (China)  
3000F, 2.8 V

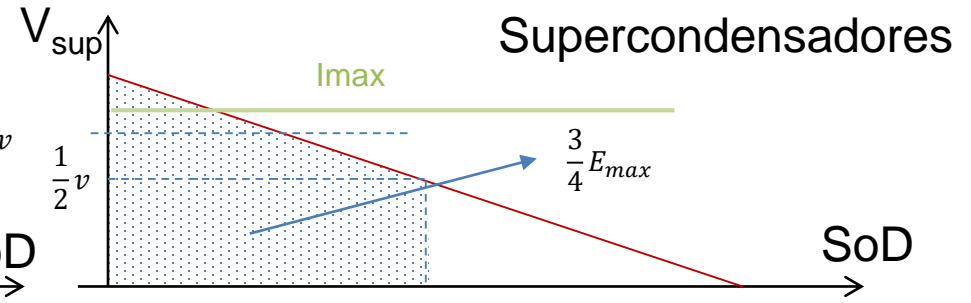
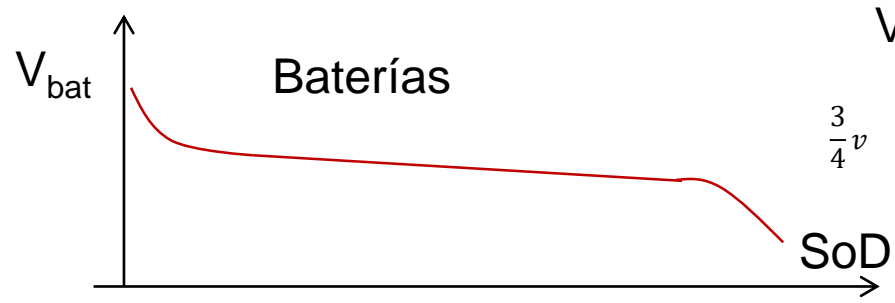


Maxwell (USA)  
3000F, 2.85V



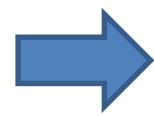
## 5.2. Sistemas de almacenamiento electroquímico con supercondensadores

### UTILIZACIÓN DE SUPERCONDENSADORES

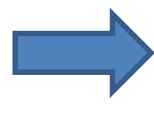


$$E_{real} = \frac{3}{4} \frac{1}{2} C \cdot (U)^2 = \frac{3}{4} \frac{1}{2} \cdot 3000 \cdot (2.8)^2 = \frac{3}{4} 11.76kJ = 8.82kJ = 2.45Wh$$

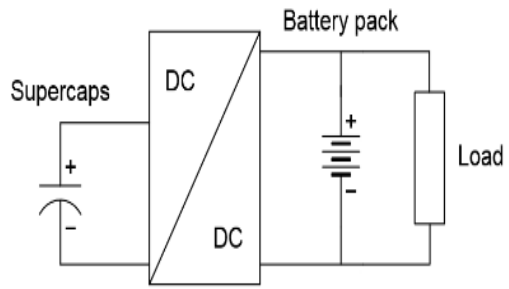
$$P_{promedio} = \frac{3}{4} U \cdot I = 2.1 \cdot 200 = 420W$$



Cuando se usan supercondensadores es necesaria la utilización de DC/DC



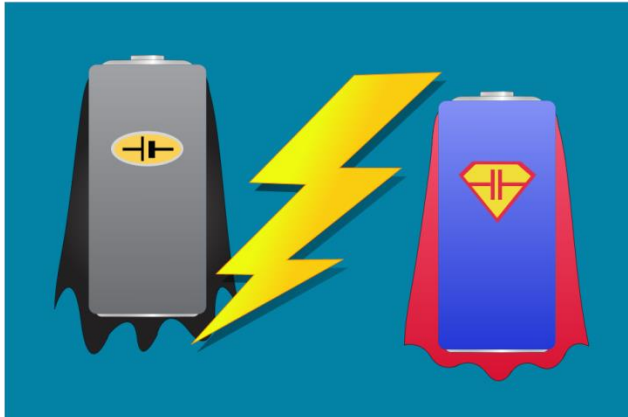
Mantener la tensión del bus DC principal constante mientras varía la tensión en el sistema de almacenamiento



Una aplicación interesante de los DC/DC es cuando se utilizan sistemas híbridos de almacenamiento de energía en un vehículo. A veces interesa combinar las prestaciones de dos sistemas distintos de almacenamiento (Ej. baterías y supercondensadores)

## 5.2. Sistemas de almacenamiento electroquímico con supercondensadores

Es habitual la comparativa de supercondensadores y baterías de Litio...

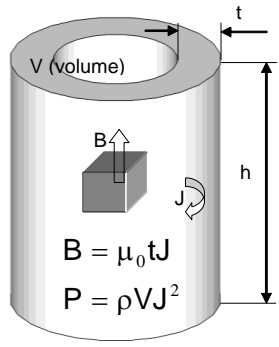


**No son competencia, hay que buscar la aplicación más adecuada para cada uno. Incluso son complementarios.**

	Li-ion Battery	Supercapacitor
Gravimetric energy (Wh/kg)	100 - 265	4 - 10
Volumetric energy (Wh/L)	220 - 400	4 - 14
Power density (W/kg)	1,500	3,000 - 40,000
Voltage of a cell (V)	3.6 - 4.5	2.7 - 3
ESR (mΩ)	500	40 - 300
Efficiency (%)	75 - 90	98
Cyclability	500 - 1,000	500,000 - 10,000,000
Self-discharge (% per month)	2	40 - 50
Charge T <sup>a</sup>	0 to 45°C	-40 to 65°C
Discharge T <sup>a</sup>	-20 to 60°C	-40 to 65°C
Cost per kWh		

### 5.3. Sistemas de almacenamiento magnético en bobinas superconductoras (SMES)

La parte esencial de un SMES es el imán superconductor. Para almacenar elevadas energías, es necesario que el imán desarrolle un intenso campo magnético, o lo que es equivalente, que esté atravesado por una intensa corriente.



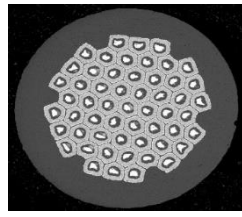
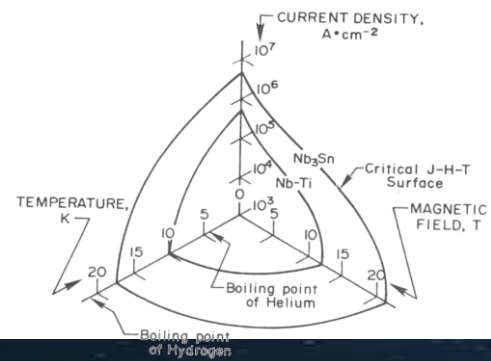
Si quisiéramos crear un campo de, por ejemplo, 10T en un imán resistivo, con una densidad de corriente de 2 Amm<sup>-2</sup>, necesitaríamos un imán de 8m de diámetro, 20m de longitud, que disiparía alrededor de 70 MW de potencia.



**Un material superconductor permite corrientes muy elevadas sin pérdidas resistivas**

La superconductividad depende de:  
La densidad de corriente  
El campo magnético  
La temperatura de trabajo.

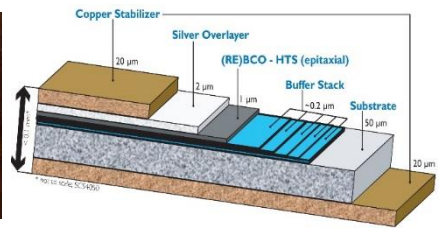
Hay dos familias de superconductores:  
Tc~4K (Baja Temperatura Crítica)  
Tc~80 K (Alta Temperatura Crítica).



Cable de Nb<sub>3</sub>Sn



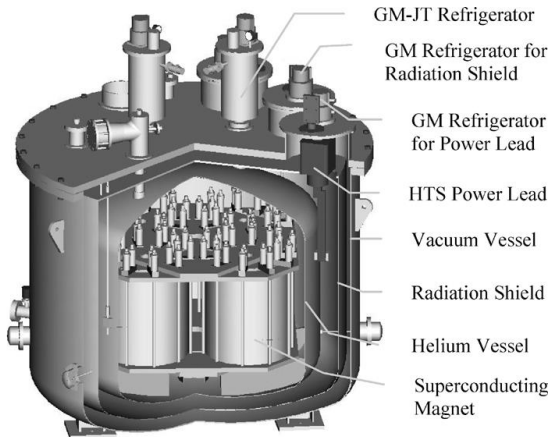
Cable de MgB<sub>2</sub>



Cinta de YBCCO



## 5.3. Sistemas de almacenamiento magnético en bobinas superconductoras (SMES)



GM-JT Refrigerator  
GM Refrigerator for  
Radiation Shield  
GM Refrigerator  
for Power Lead  
HTS Power Lead  
Vacuum Vessel  
Radiation Shield  
Helium Vessel  
Superconducting  
Magnet

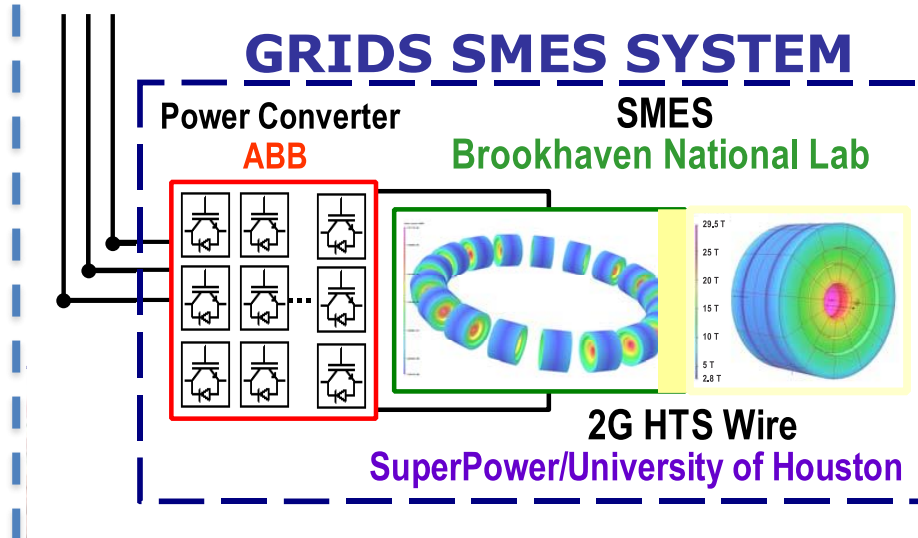
### El SMES de Kameyama (Japón)

Potencia	5 MVA
Energía	7.4 MJ
Tensión	6600 V
Enganche	
Tipo SC	Baja Tc

### El SMES de Kameyama

En el año 2004 se instaló en una planta de pantallas de plasma en Japón un SMES para compensar huecos en la tensión de suministro de la instalación.

Solenoides superconductores de NbTi.



### El proyecto de SMES del ARPA-E

Proyecto en EEUU orientado al desarrollo de un SMES de campo ultraelevado (30T) de forma que la densidad de energía almacenada pueda incrementarse 30 veces sobre los valores actuales.

Superconductores de Alta Temperatura Crítica.

# Gracias por su atención

Dr. Marcos Lafoz Pastor

[marcos.Lafoz@ciemat.es](mailto:marcos.Lafoz@ciemat.es)