Tecnologías y sistemas de almacenamiento (I): electromecánicos

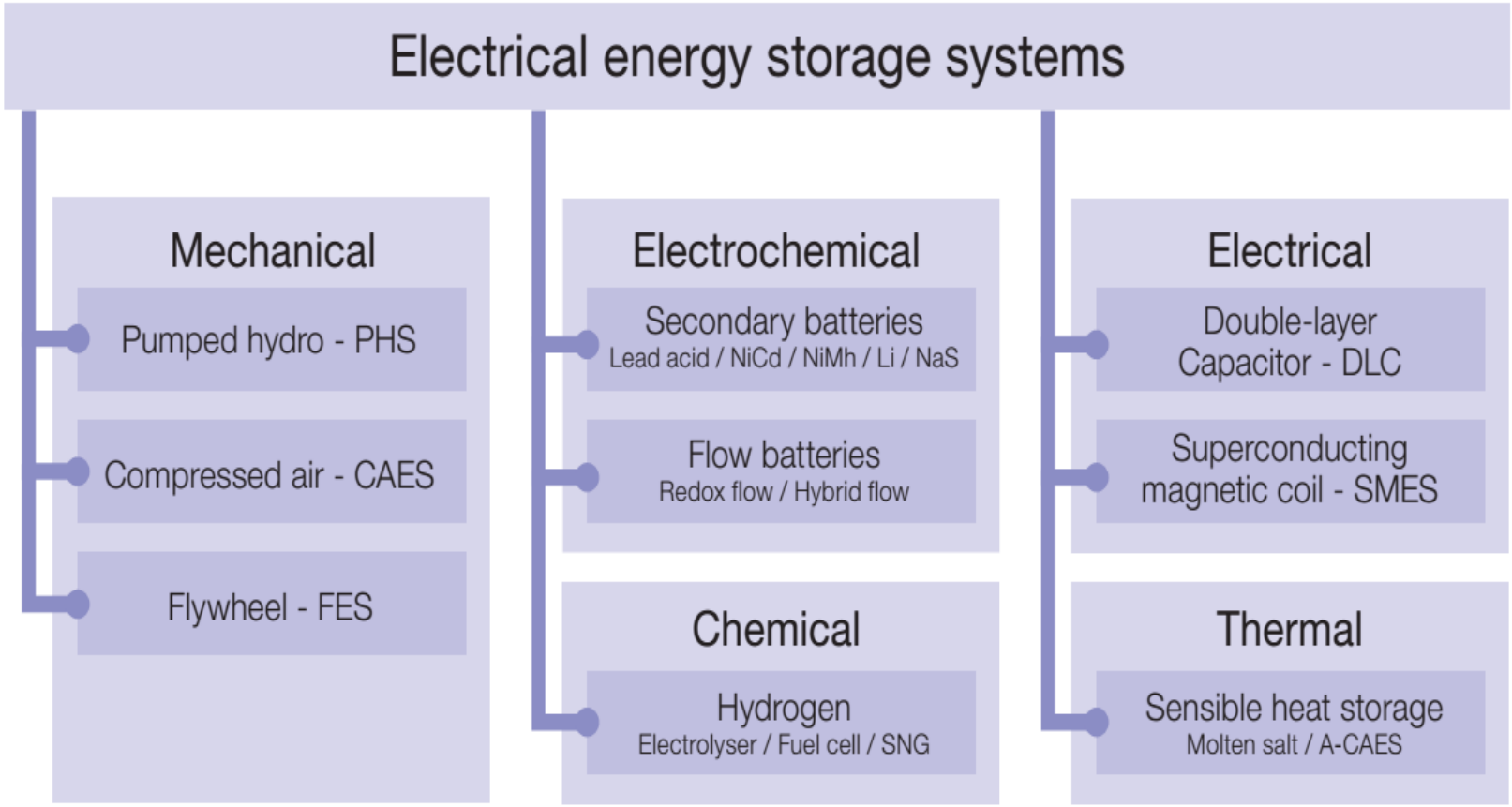
José Luis Martínez Ramos

Catedrático de Ingeniería Eléctrica

Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla

Almacenamiento de energía eléctrica

Clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

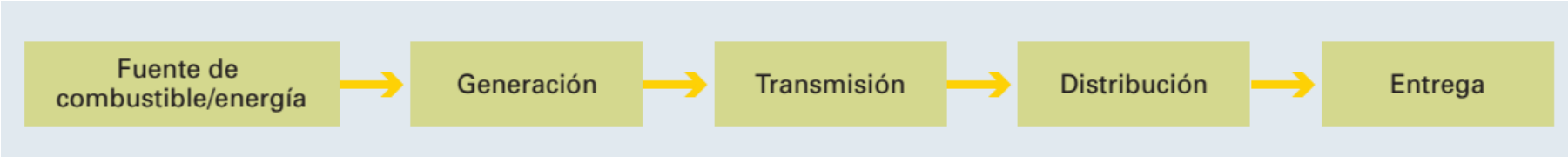


Fuente: Fraunhofer ISE

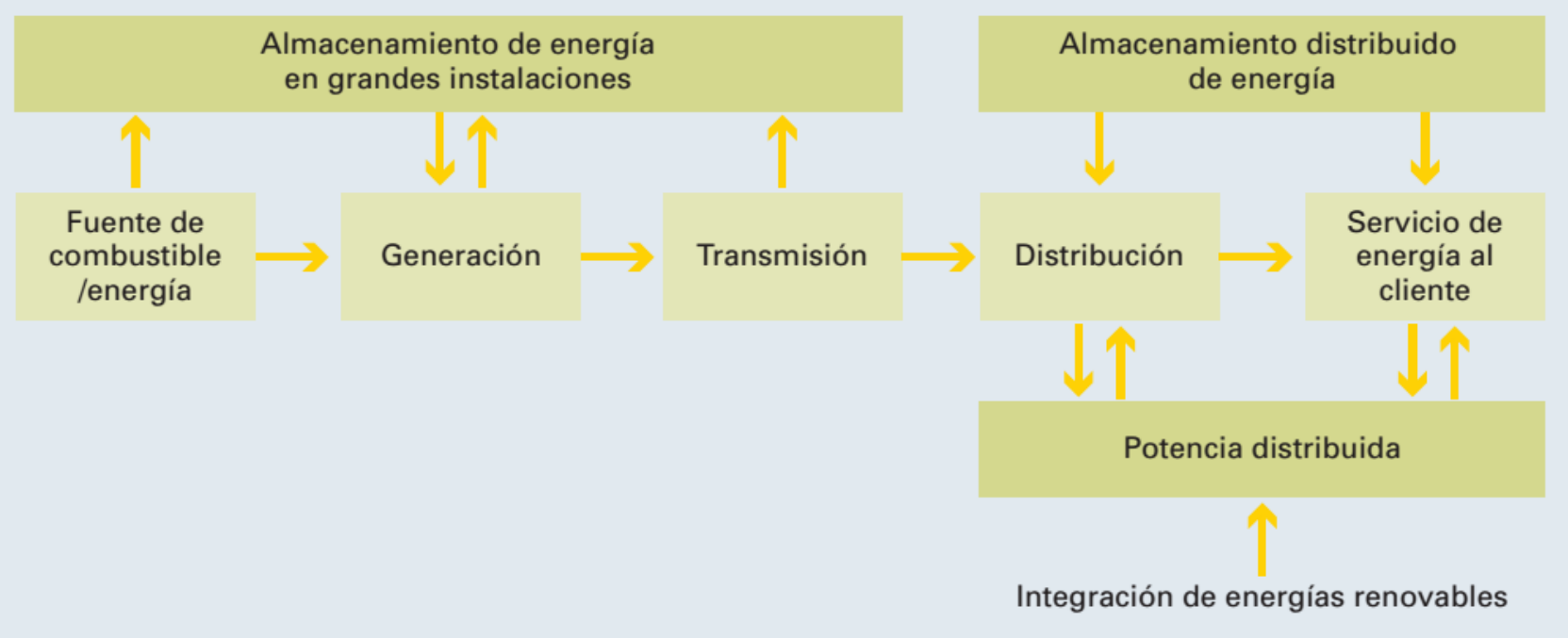
Almacenamiento de energía eléctrica

Usos de los sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas

Cadena tradicional de suministro de energía eléctrica



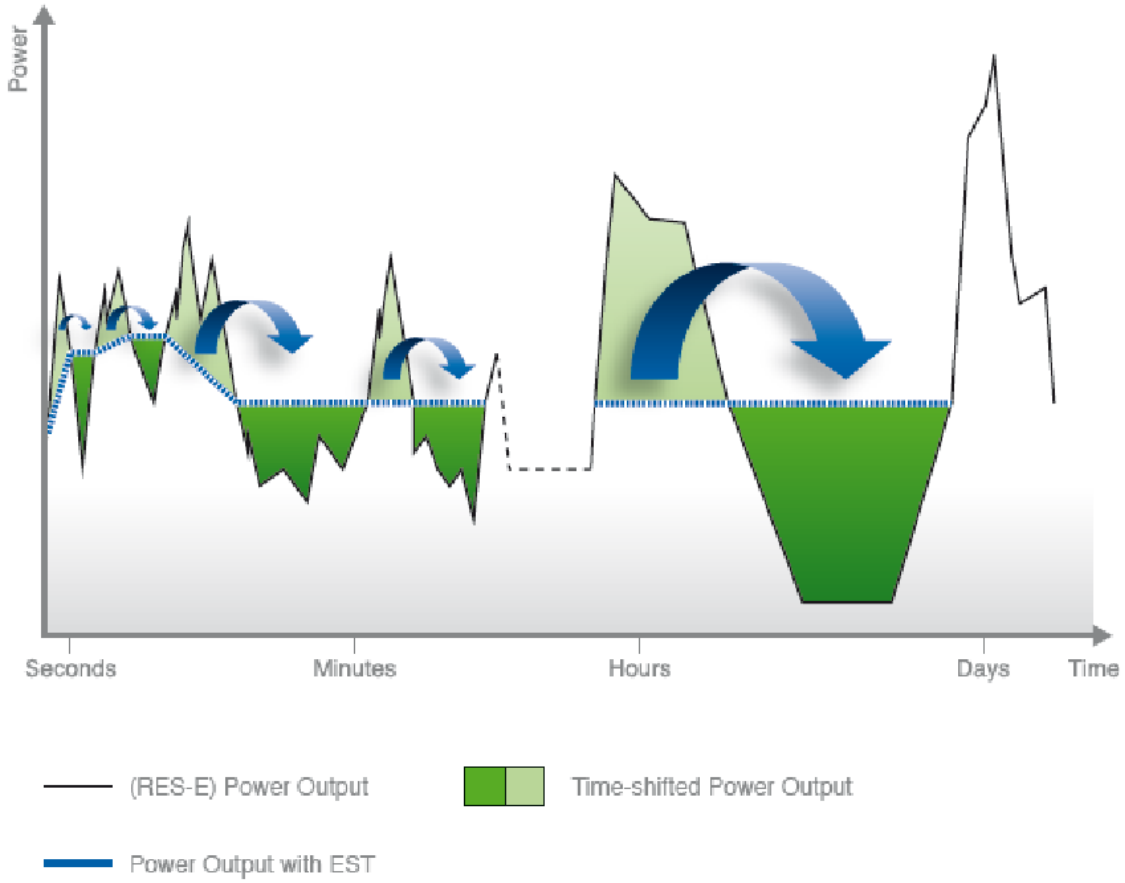
Cadena de suministro con recursos de almacenamiento y generación distribuida



Almacenamiento de energía eléctrica

Usos de los sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas

Storage capacities and response times of EST (Electricity Storage Technologies)

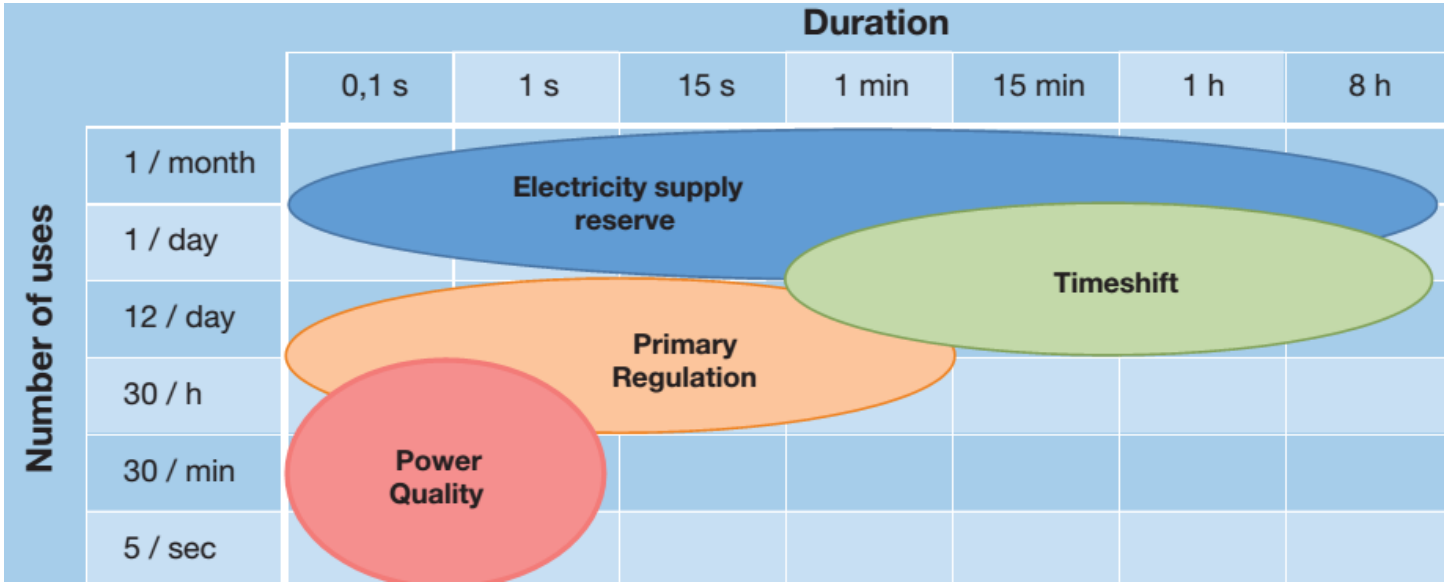


Fuente: stoRE project, www.store-project.eu

Almacenamiento de energía eléctrica

Usos de los sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas

Different uses of electrical energy storage in grids, depending on the frequency and duration of use

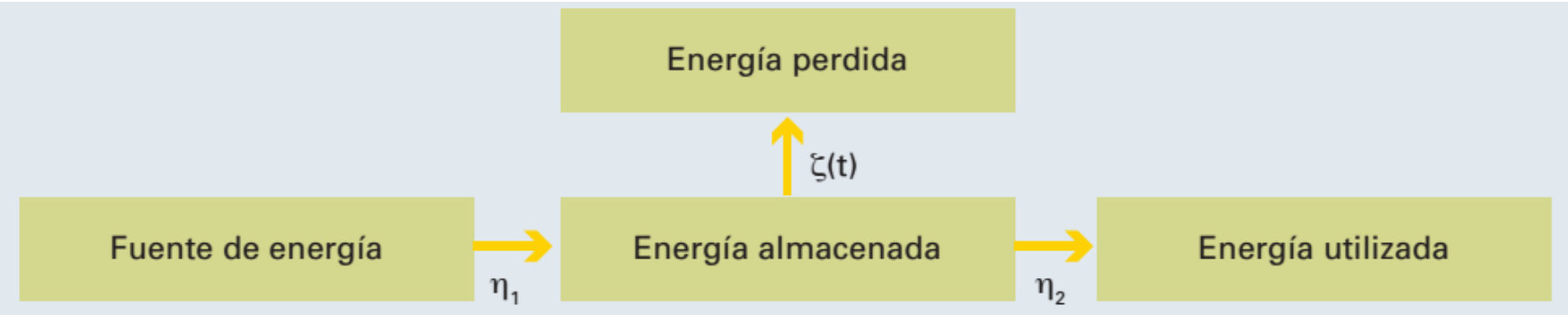


Fuente: IEC White paper on Electrical Energy Storage

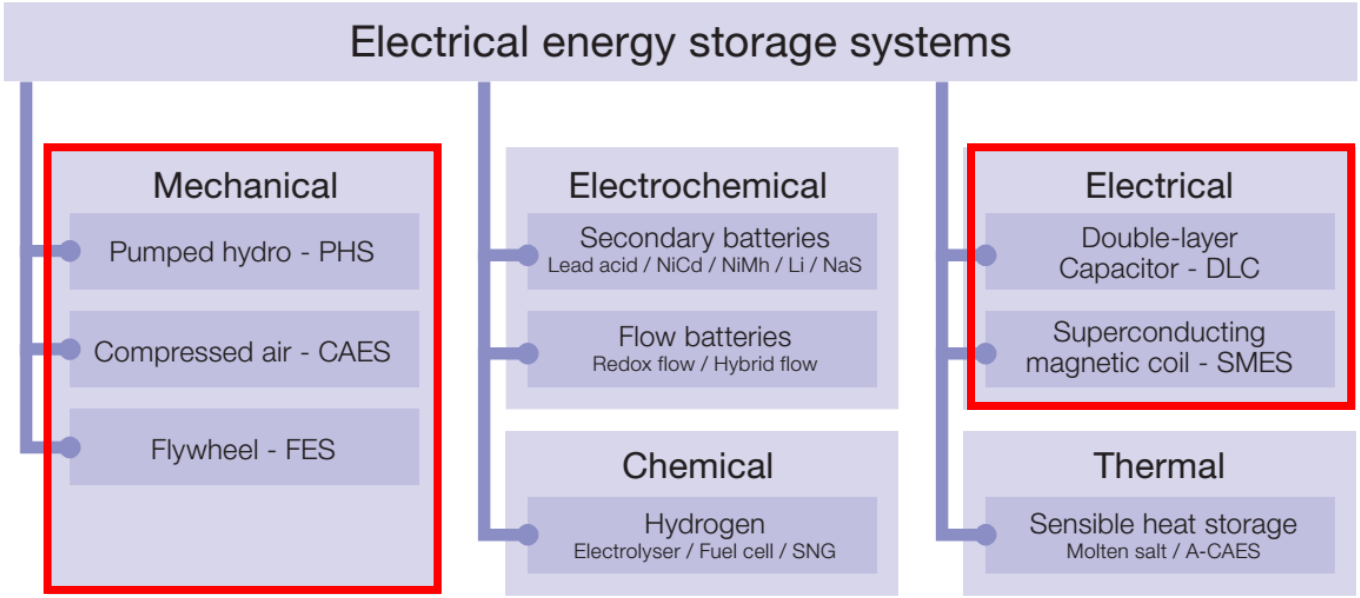
Almacenamiento de energía eléctrica

Parámetros que definen los sistemas de almacenamiento

1. Capacidad de almacenamiento (MWh): máxima energía almacenada
2. Potencias máximas en carga y descarga (MW).
3. Tiempo de descarga (segundos, horas, días): Emax / Pmax
4. Eficiencia del ciclo de almacenamiento (%): Energía generada / Energía consumida
5. Durabilidad: Número máximo de ciclos de carga/descarga
6. Tiempo de autodescarga: descarga debida a las pérdidas propias del sistema



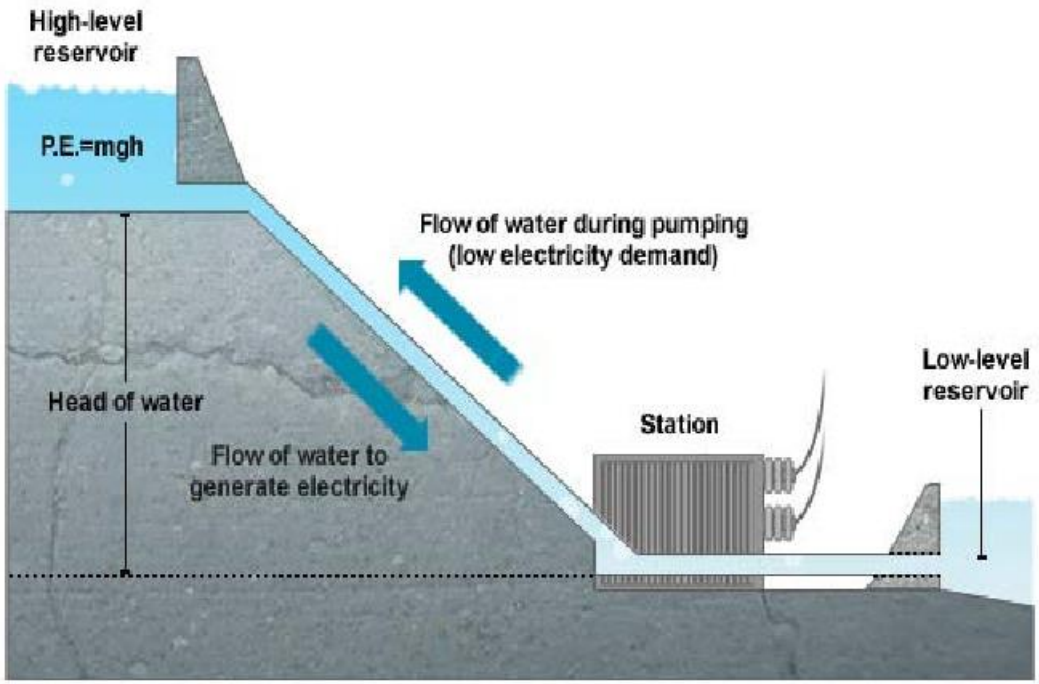
Contenido



- Almacenamiento electromecánico: hidráulico, aire comprimido y volantes de inercia
- Almacenamiento electromagnético: bobinas superconductoras y supercondensadores
- Comparativa de tecnologías

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico



$$E_{pumping} = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V}{\eta_p}$$

$$E_{generator} = \rho \cdot g \cdot h \cdot V \cdot \eta_g$$

Fuente: Global Energy Network Institute (GENI)

Se basa en almacenar energía en forma de energía potencial de un volumen de agua en un embalse en altura, consumiendo energía eléctrica en el bombeo, para posteriormente generar electricidad a partir del caudal de agua embalsada.

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico

En **España**: 24 centrales

Potencia actual: **4.500 MW**
Objetivo: **6.000 MW**

La Muela, Río Júcar
Central de bombeo puro
Capacidad: **1500 MW (10GWh)**

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico

Centrales de bombeo mixto
(aportación externa de agua)

Villarino, Río Tormes
Central de bombeo mixto
Potencia: **857 MW**
Capacidad: **3,3 millones de MWh**
Capacidad de embalse: **2650 Hm^3**

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico

Central de bombeo de Tajo de la Encantada

360 MW, 7 horas de descarga

Rango de potencia: 100-5.000 MW

Rango de energía: 1-24 h

Tiempo de respuesta: s-min

Densidad de energía: 0,04 Wh/l - 1,5 Wh/l

Autodescarga: ~0%/día

Temperatura de operación: >0 °C

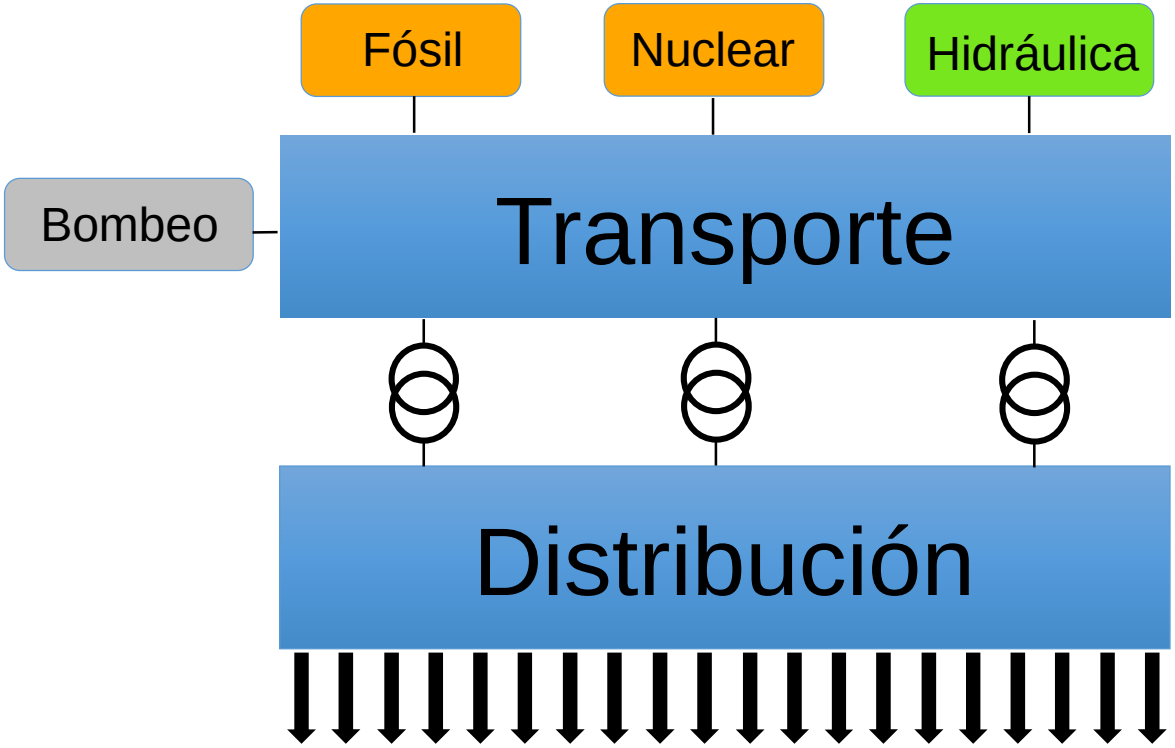
Rendimiento ciclo carga/descarga: alrededor del 75%

Vida media: 50-100 años

Número de ciclos: estimaciones de 2-5 × 10^4

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico



Grandes centrales de bombeo en la red de transporte para modular la demanda diaria (estacional, régimen hiperanual)

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico

Sistema eólico-hidraúlico instalado en la isla de El Hierro (España)

10 MW eólicos, con 9.9 MW de generación hidroeléctrica y 6.4 MW de potencia de bombeo

Fuente: REE

Almacenamiento electromecánico

Centrales de bombeo hidráulico

Mejoras tecnológicas:

- Accionamientos de velocidad variable
  - Permiten regular frecuencia tanto en turbinado como en bombeo
  - Permiten ampliar el rango de funcionamiento (potencias)
  - Mejoran la eficiencia y la capacidad de almacenamiento

- Centrales de agua de mar

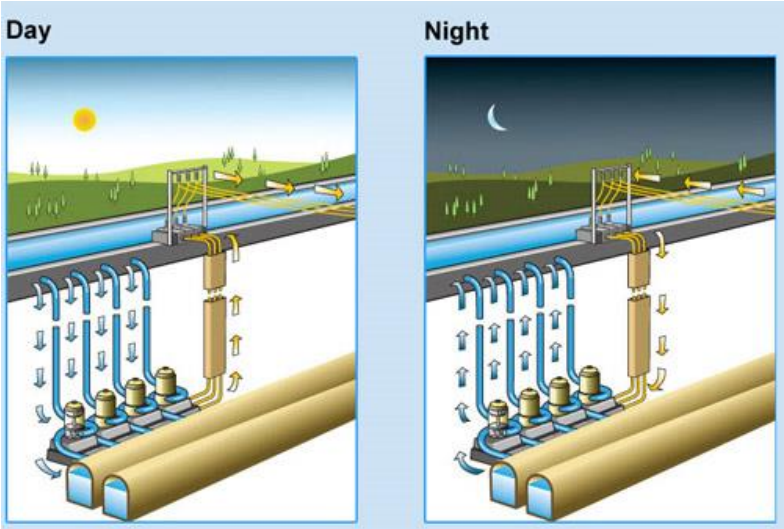
Okinawa Yanbaru Seawater Pumped Storage Power Station (31 MW)

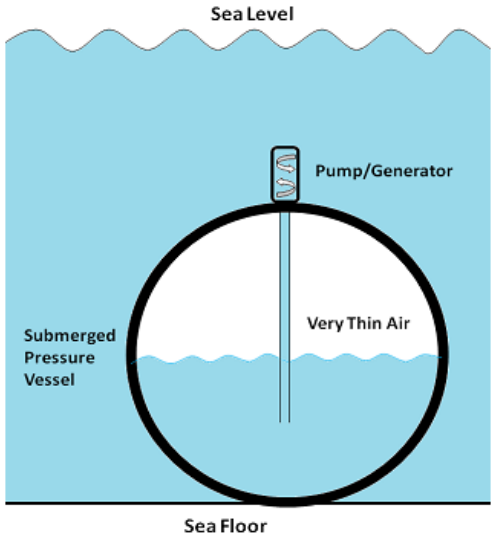
Almacenamiento electromecánico

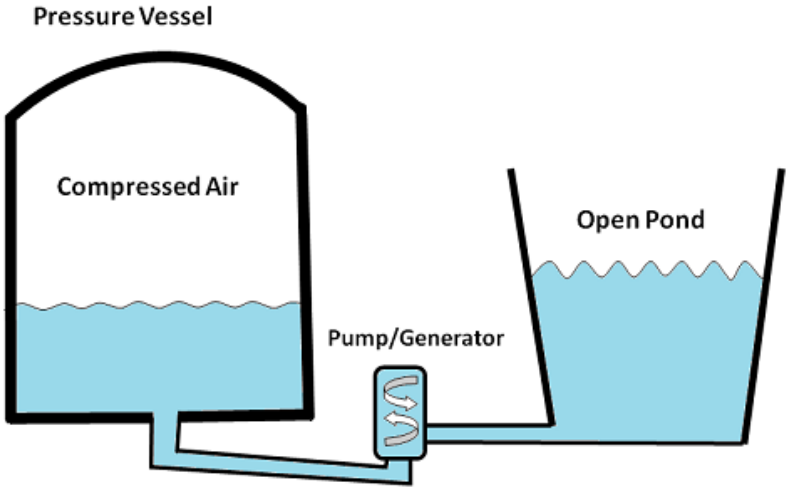
Centrales de bombeo hidráulico

Mejoras tecnológicas en estudio:

- Depósitos subterráneos
- Depósitos submarinos
- Depósitos herméticos (aire comprimido)

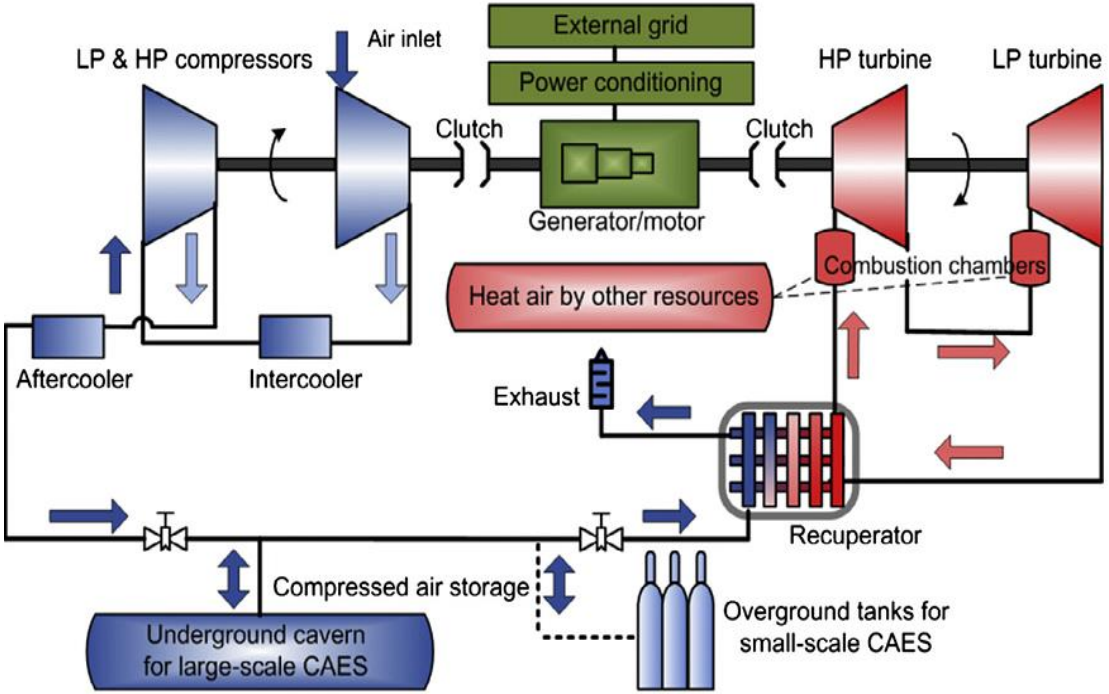






Almacenamiento electromecánico

Centrales de Aire Comprimido



$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(K-1)/K}$$

T: Temperature
P: Absolute pressure
K: Polytropic index of the irreversible compression.
Subscripts 1 and 2: indicate the initial and final state of compression, respectively.

Se basa en almacenar energía en aire comprimido a presiones de hasta 100 bares a temperatura ambiente. La recuperación de la energía almacenada se realiza mediante turbinas que accionan un alternador conectado a la red.

El aire comprimido se enriquece con gas natural, y la mezcla resultante se quema en cámaras de combustión de forma previa a su expansión en las turbinas.

Almacenamiento electromecánico

Centrales de Aire Comprimido

Rango de potencia: 100-300 MW

Rango de energía: 1- más de 24 h

Tiempo de respuesta: 5-15 min

Densidad de energía: 30-60 Wh/kg

Autodescarga: ~0%/día

Temperatura de operación: sin límites

Rendimiento ciclo carga/descarga: 40% (sistemas mejorados)

Vida media: 25-40 años

Número de ciclos: ~10^4

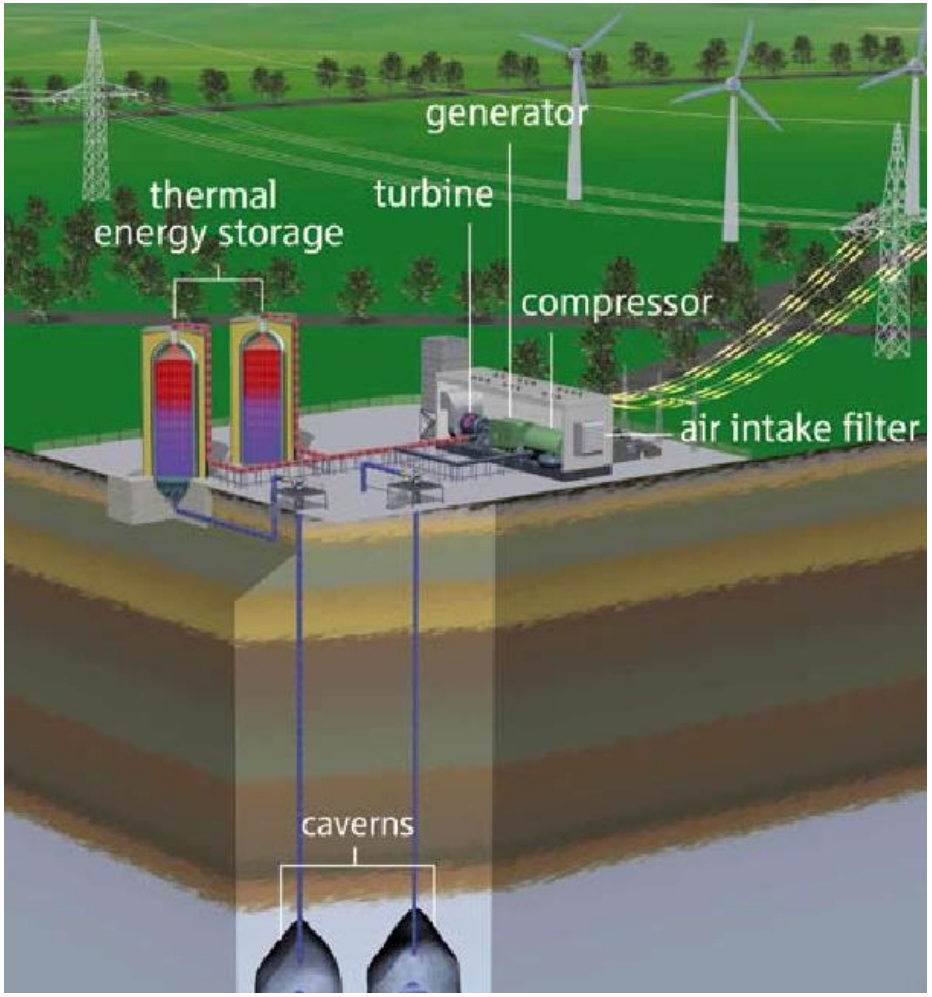
Central de aire comprimido de

Kraftwerk Huntorf (Alemania)

321 MW / 642 MWh

Almacenamiento electromecánico

Centrales de Aire Comprimido: Mejoras tecnológicas



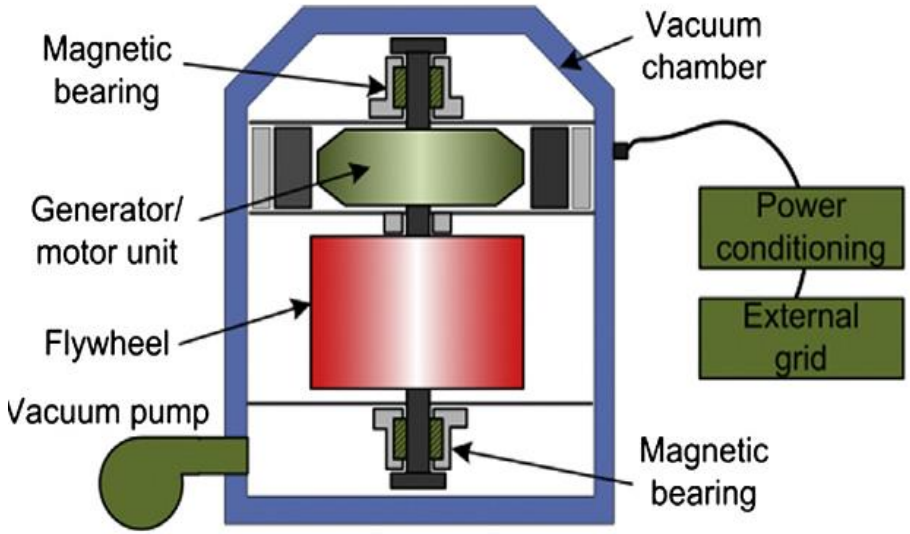
Sistemas de almacenamiento adiabático: utilización de un sistema de almacenamiento térmico para la reutilización del calor producido durante la compresión del aire.

El calentamiento del aire previo a su expansión permite eliminar la necesidad del sistema de combustión aire-gas natural, minimizando el impacto medioambiental y aumentando el rendimiento (75% previsto).

ADELE Project, Alemania: 300 MW, 1000 MWh

Almacenamiento electromecánico

Volantes de inercia



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

I: Inertia momentum of the flywheel
ω: Angular speed

Se basa almacena energía en forma de energía cinética, mediante un cilindro de inercia que gira acoplado a un motor / generador. El consumo o generación se controla mediante la velocidad de giro del volante de inercia.

Dos tipos: de baja velocidad (miles de revoluciones por minuto) y de alta velocidad (hasta 100.000 revoluciones por minuto)

Almacenamiento electromecánico

Volantes de inercia

Rango de potencia: 0,002-20 MW

Rango de energía: s-15 min

Tiempo de respuesta: s

Densidad de energía: 5-130 Wh/kg

Autodescarga: 20-100%/día

Temperatura de operación: -20 ºC a +40 ºC

Rendimiento ciclo carga/descarga: alrededor del 85-95%

Vida media: más de 20 años

Número de ciclos: estimaciones de hasta 10^7

Almacenamiento electromecánico

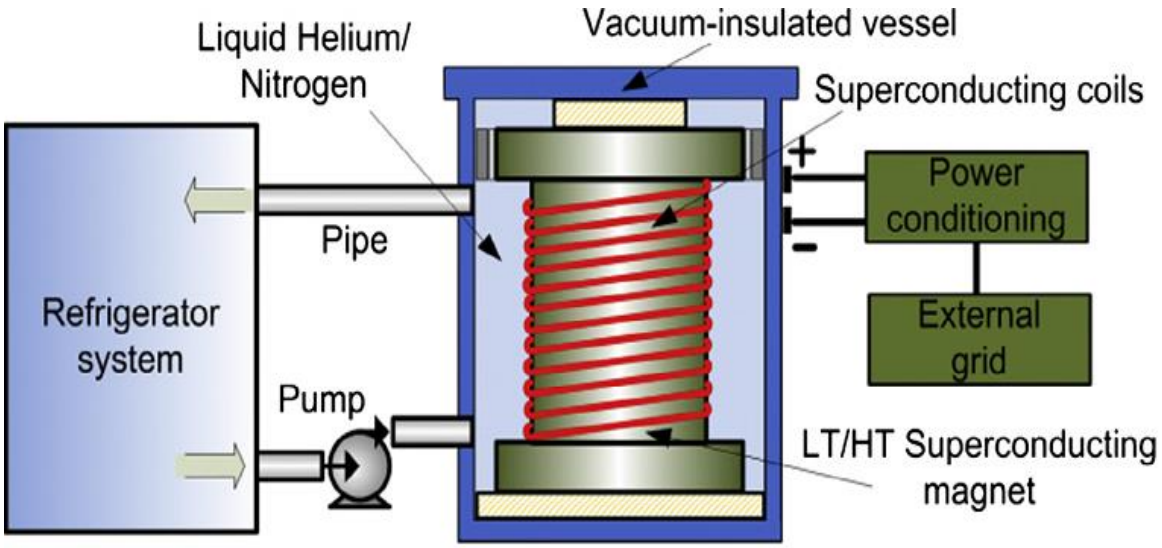
Volantes de inercia

Planta de almacenamiento de 1 MW y 250 kWh para regulación de frecuencia con volantes de inercia en Stephentown (EE.UU.).

Cada volante de inercia tiene una potencia de 100 kW y una capacidad de almacenamiento de 25 kWh (tiempo de descarga 15 minutos).

Almacenamiento electromagnético

Bobinas superconductoras



$$E = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

L: Inductance coefficient
I: Current

En los sistemas basados en bobinas superconductoras o SMES (Superconducting magnetic energy storage), la energía se almacena como campo magnético creado por una corriente eléctrica que circula a través de la bobina superconductora, que es mantenida a la temperatura necesaria para mantener la superconductividad del material conductor (SMES de alta temperatura, 70 K, y de baja temperatura, 5 K).

Almacenamiento electromagnético

Bobinas superconductoras

Rango de potencia: 0,01-10 MW

Rango de energía: ms - 5 min

Densidad de energía: 0,5-5 Wh/kg

Tiempo de respuesta: milisegundos

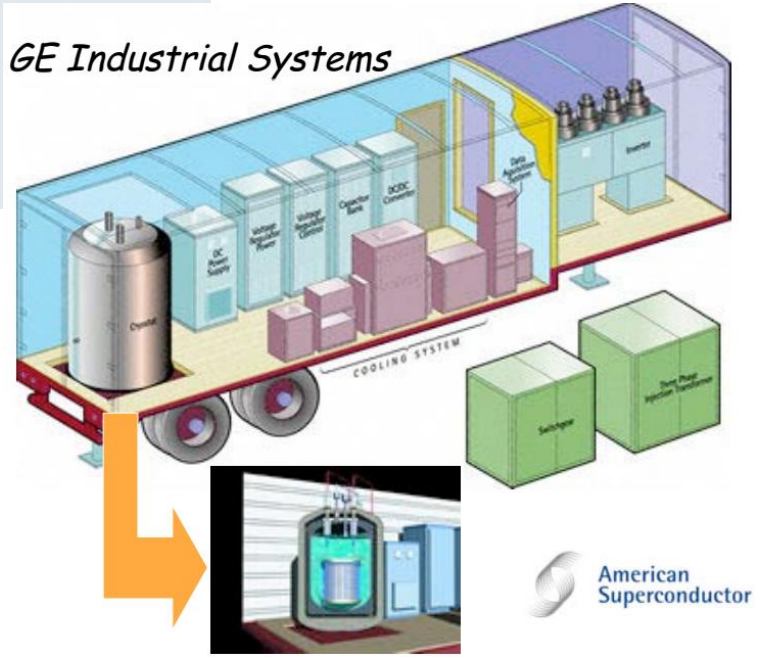
Autodescarga: ~ 10%/día

Temperatura de operación: superconductividad de altas temperaturas

Rendimiento: ~ 95%

Vida media: más de 20 años

Número de ciclos: más de 10^4



SMES comercial de

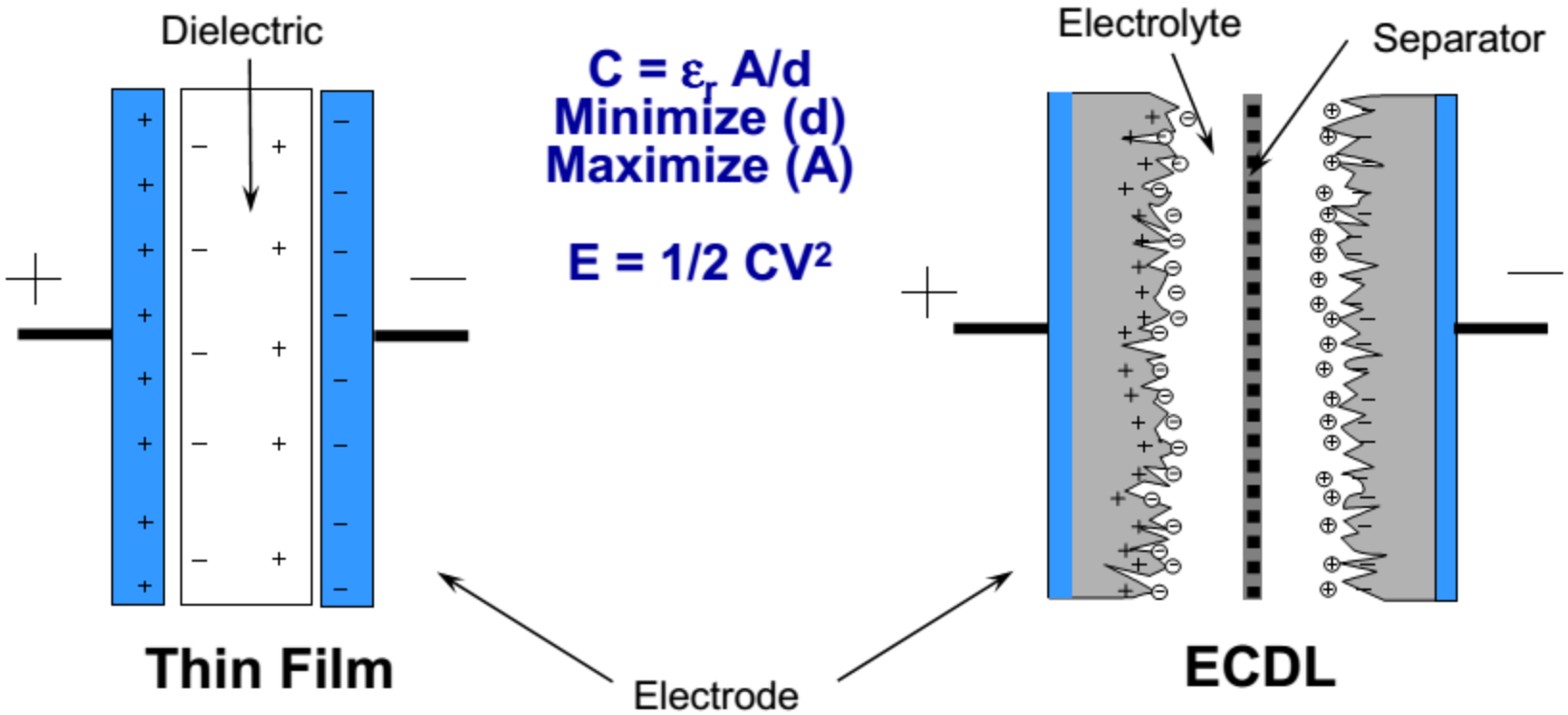
1.3 MW / 0,833 kWh

2,3 seg de tiempo de descarga

Actuación frente a huecos de tensión (~ 0,1 seg)

Almacenamiento electromagnético

Supercondensadores y Ultracondensadores

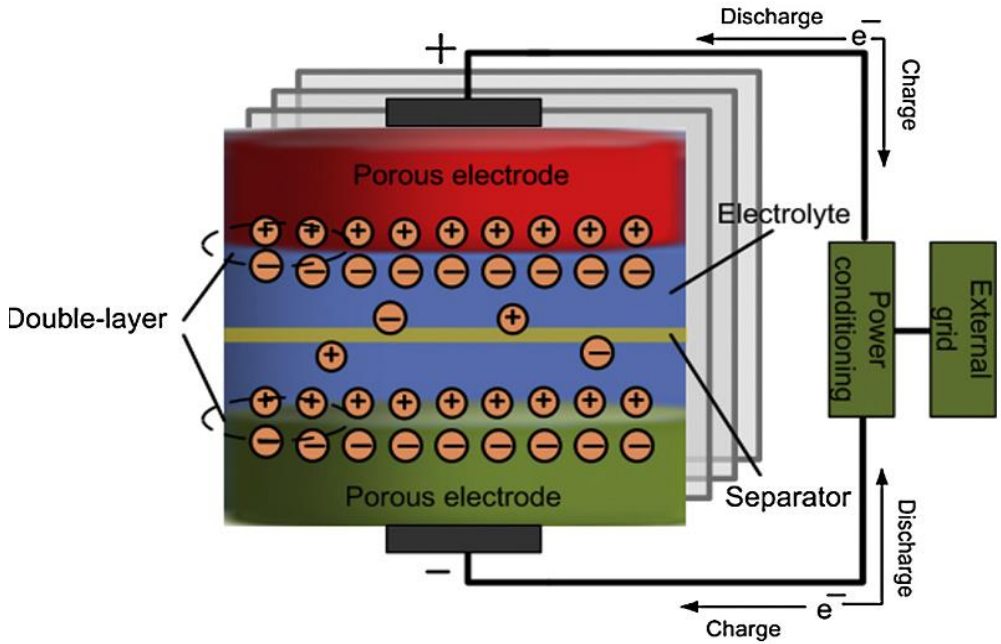


Para aumentar la capacidad, se disminuye la distancia en la distribución de cargas y se aumenta el área mediante electrodos de elevada porosidad.

La distribución de cargas se logra mediante la polarización del electrolito.

Almacenamiento electromagnético

Supercondensadores y Ultracondensadores



$$C = C_0 + K \cdot u$$

$$C_u = K \cdot u$$

$$E = \frac{1}{2} C u^2$$

La energía eléctrica se almacena en la superficie de contacto entre electrodo y electrolito (Doble Capa).

BC Series (Power & Energy)

- 120, 140, 310, 350 F
- Modules and packs rated at 15 V

MC Series (Power & Energy)

- 650, 1200, 1500, 2000, 2600, 3000 F
- Modules rated at 16 V and 48 V

Almacenamiento electromagnético

Supercondensadores y Ultracondensadores

Rango de potencia: 0,01-1 MW

Rango de energía: ms-mins

Densidad de energía: 0,1-15Wh/kg

Tiempo de respuesta: milisegundos

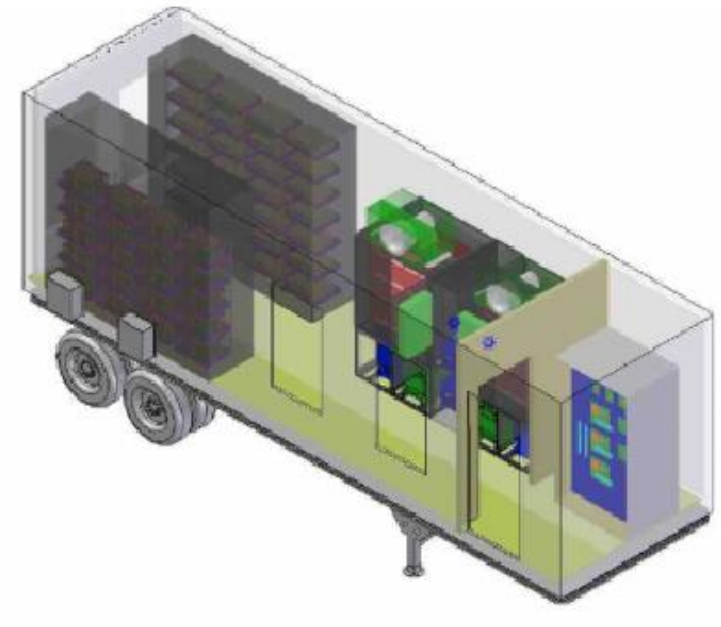
Autodescarga: ~ 2-40%/día

Temperatura de operación: de -40 a +85

Rendimiento: ~ 95%

Vida media: más de 20 años

Número de ciclos: 10^4-10^8



Sistema de ultracondensadores para control de tensiones en la red

263 kW / 0,833 kWh

11,4 segundos de tiempo de descarga

Mejoras tecnológicas

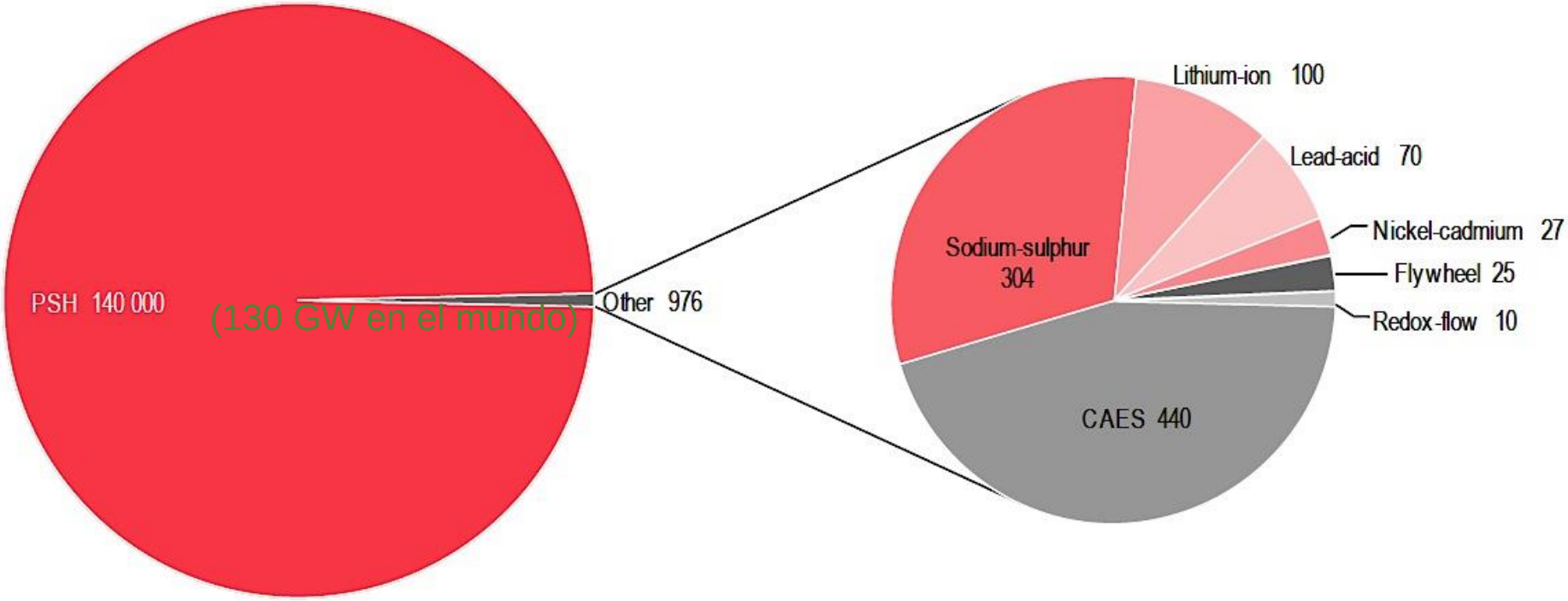
Volantes de inercia, bobinas superconductoras y supercondensadores

- Volantes de inercia (KESS)
  - Materiales compuestos para volantes de inercia de alta velocidad
  - Rodamientos magnéticos con bajas pérdidas (bobinas superconductoras)
  - Motor/generador de alta velocidad de giro
- Bobinas superconductoras (SMES)
  - Reducción de costes de bobinas superconductoras y sistemas criogénicos asociados
  - Materiales superconductores de alta temperatura
- Supercondensadores (Supercaps, Double-layer caps, Ultracaps)
  - Nuevos materiales para los electrodos (similares a los utilizados en baterías)
  - Materiales compuestos por nanopartículas

Almacenamiento de energía eléctrica

Estado actual a nivel mundial

Potencia instalada en marzo de 2014: **141 GW**



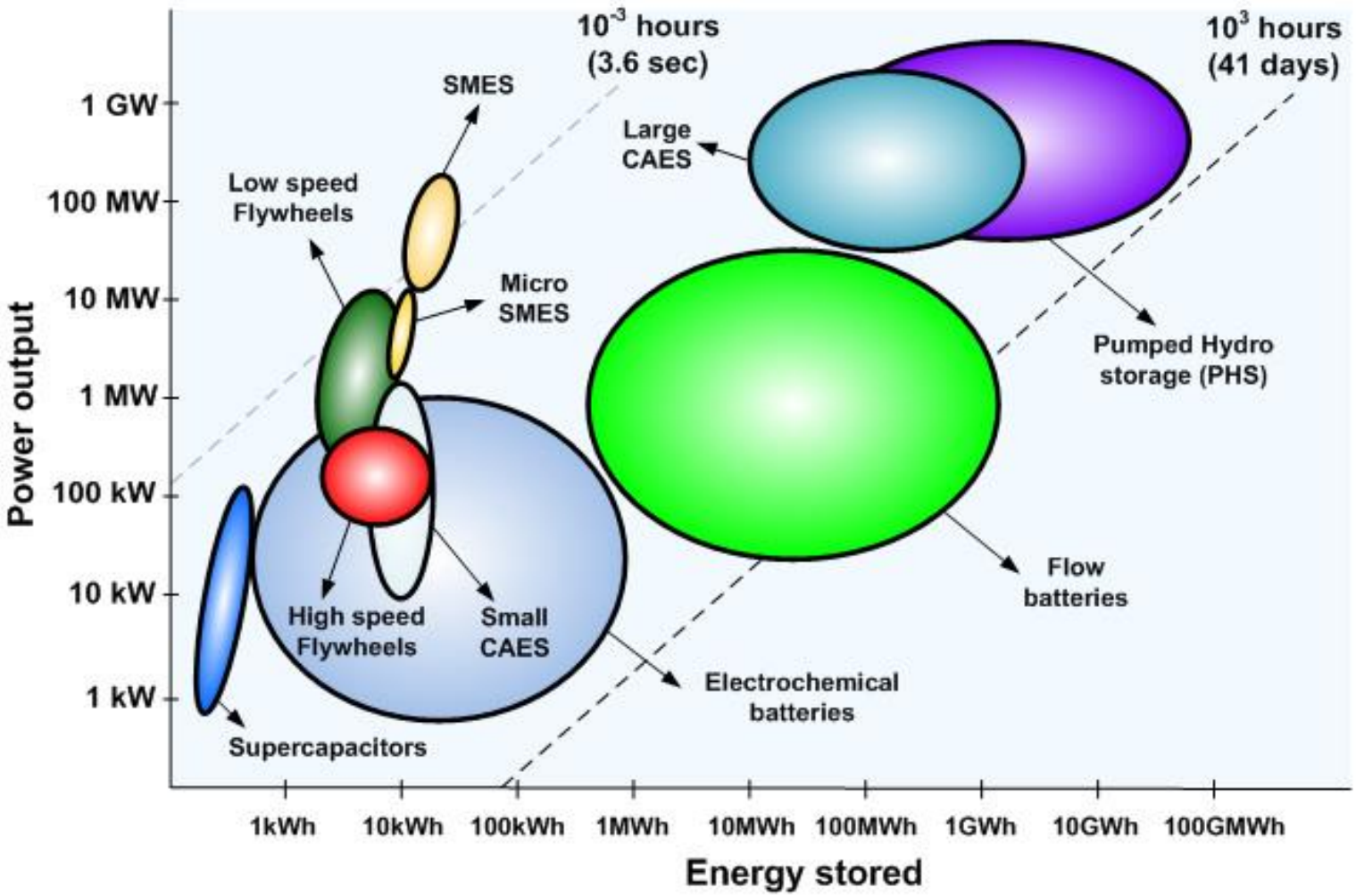
Fuente: IEA, 2014

Actualmente: **145 GW**

Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento:

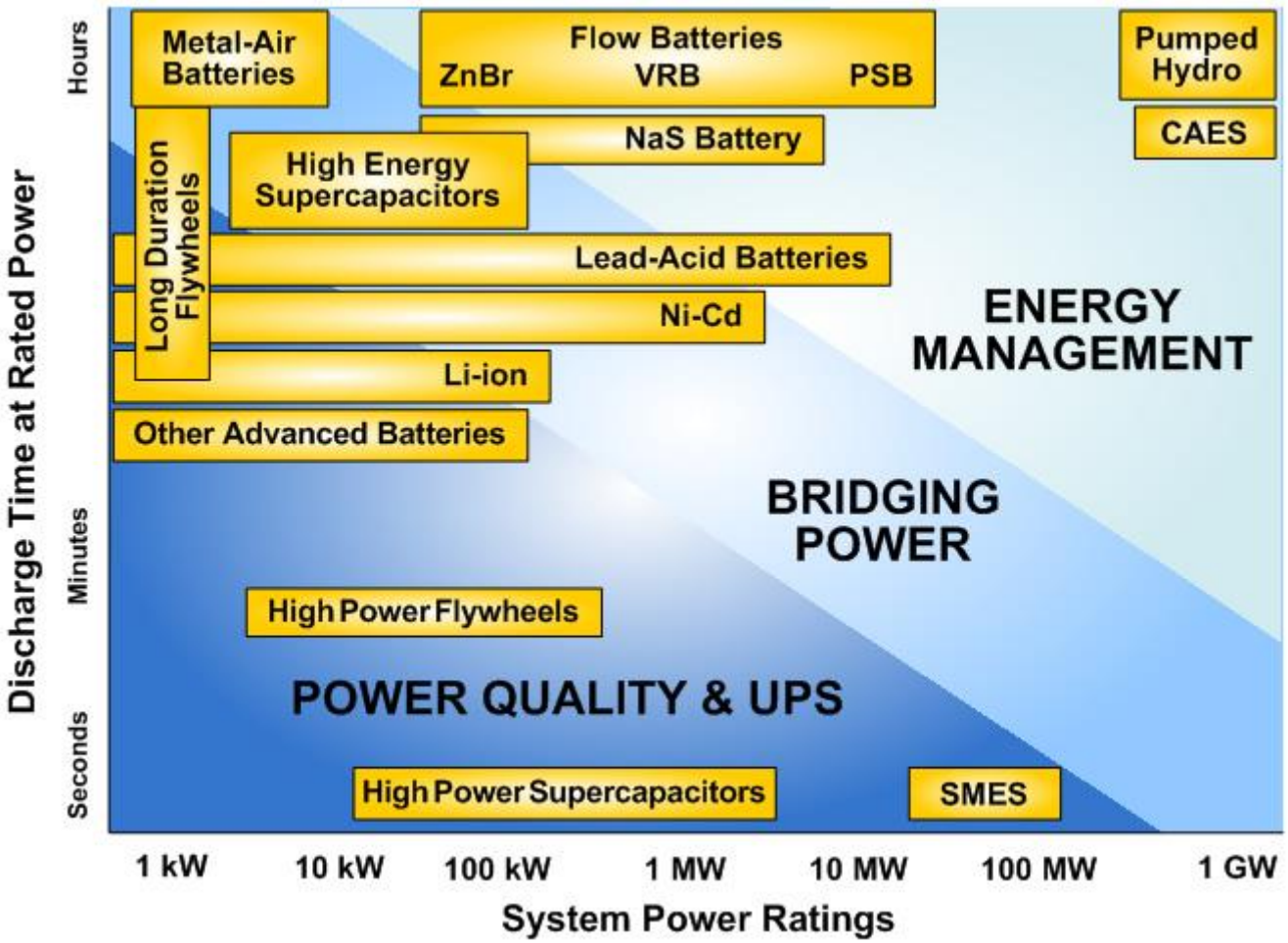
Energía almacenada, potencia nominal y tiempo de descarga



Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento:

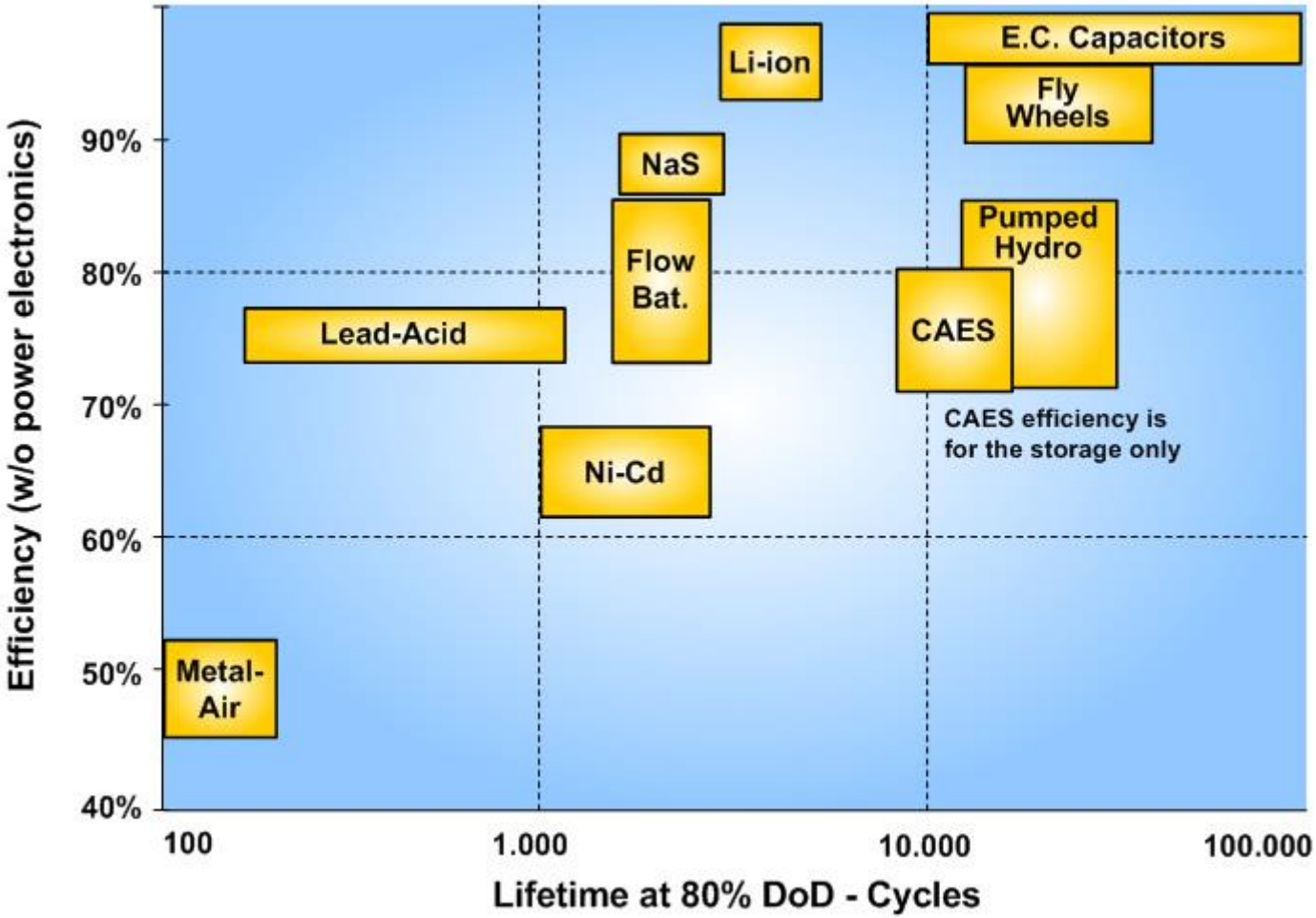
Potencia nominal y tiempo de descarga



Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento:

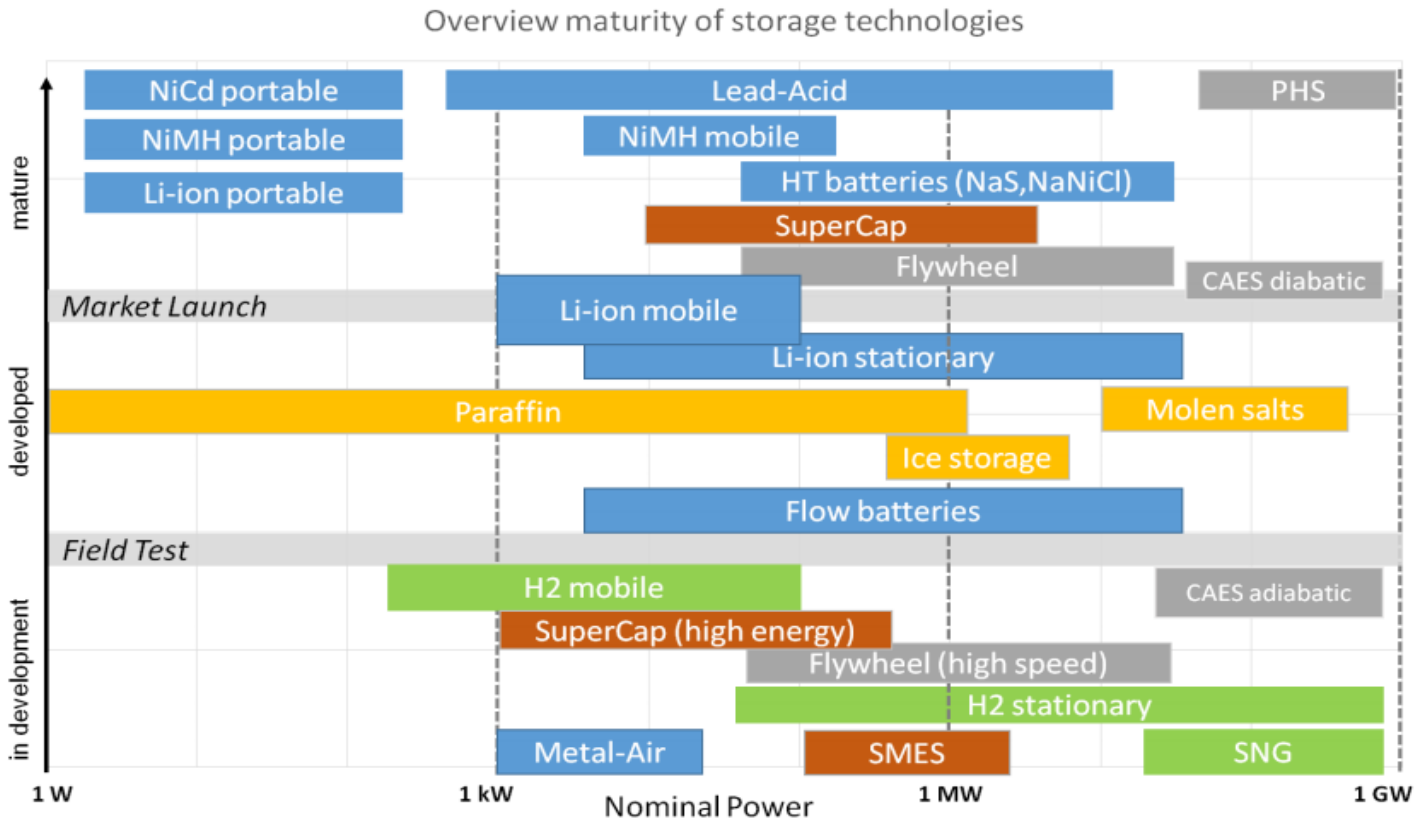
Eficiencia del ciclo de almacenamiento de las principales tecnologías



Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento:

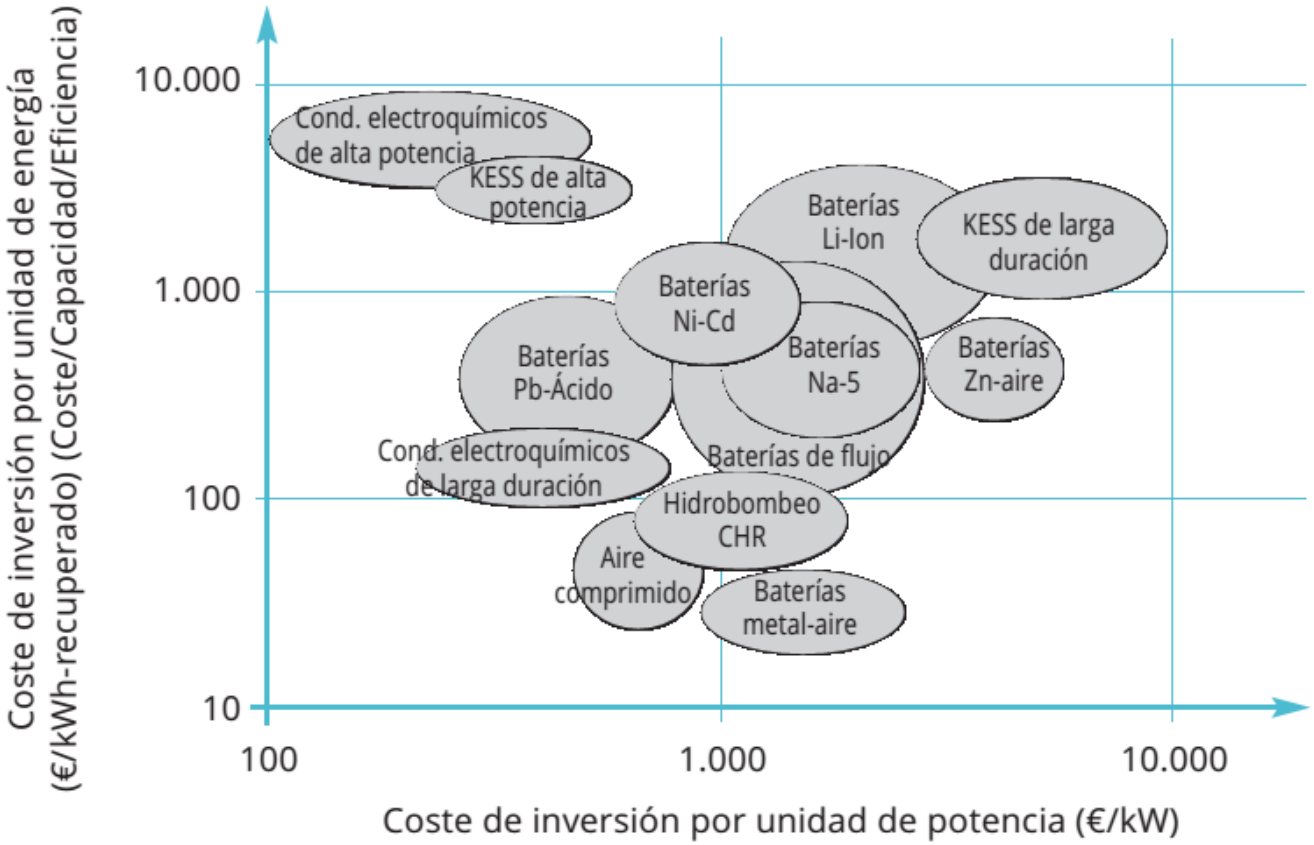
Madurez tecnológica de las distintas tecnologías



Almacenamiento de energía eléctrica

Sistemas de almacenamiento:

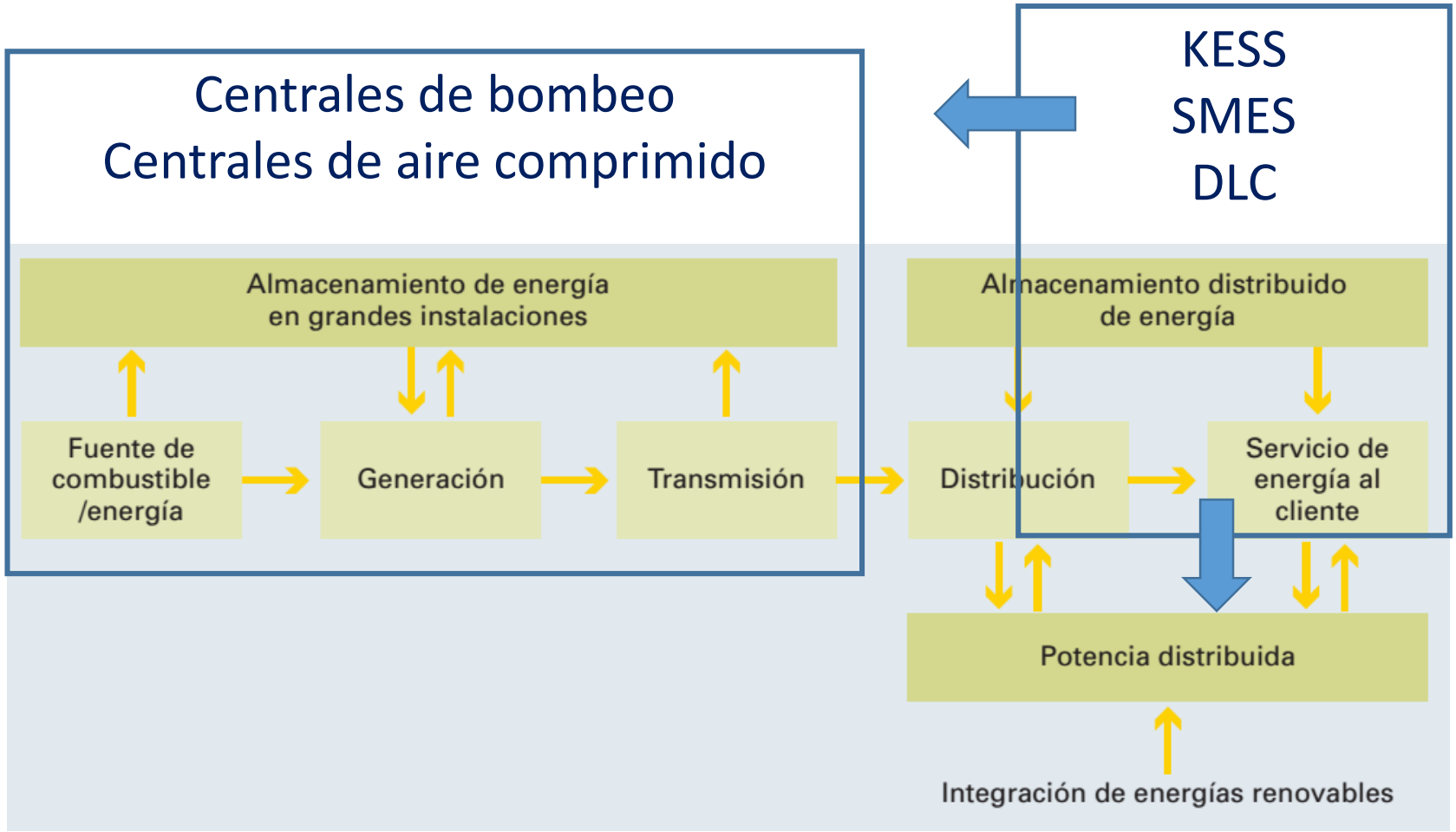
Costes de inversión de las distintas tecnologías



Fuente: FutuRed GIA

Almacenamiento de energía eléctrica

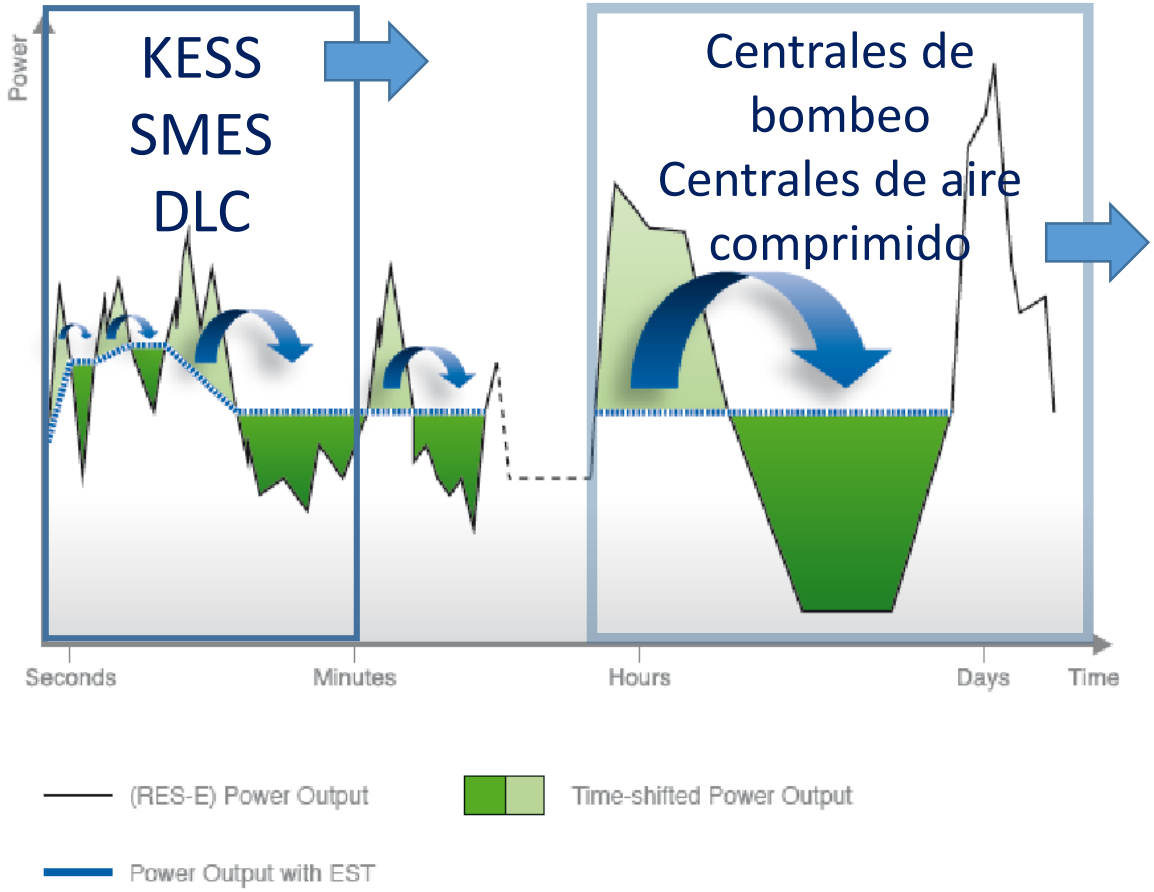
Usos de los sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas



Almacenamiento de energía eléctrica

Usos de los sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas

Storage capacities and response times of EST (Electricity Storage Technologies)



Fuente: stoRE project, www.store-project.eu

Tecnologías y sistemas de almacenamiento (I): electromecánicos

José Luis Martínez Ramos