ESCUELA DE ENERGÍA
UIMP-ENDESA

ALMACENAMIENTA ELÉCTRICO: EL ESLABÓN PERDIDO DE LA SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA

Panorámica actual y casos de estudio de sistemas de almacenamiento

Jesús Riquelme Santos
Catedrático de la Universidad de Sevilla

Índice:

- Evolución histórica y geográfica
- Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos
- Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.
- Distribución por punto de conexión de las tecnología de los proyectos
- Distribución por uso de las tecnología de los proyectos
- Experiencias concretas en diferentes países
- Conclusiones

Evolución histórica y geográfica

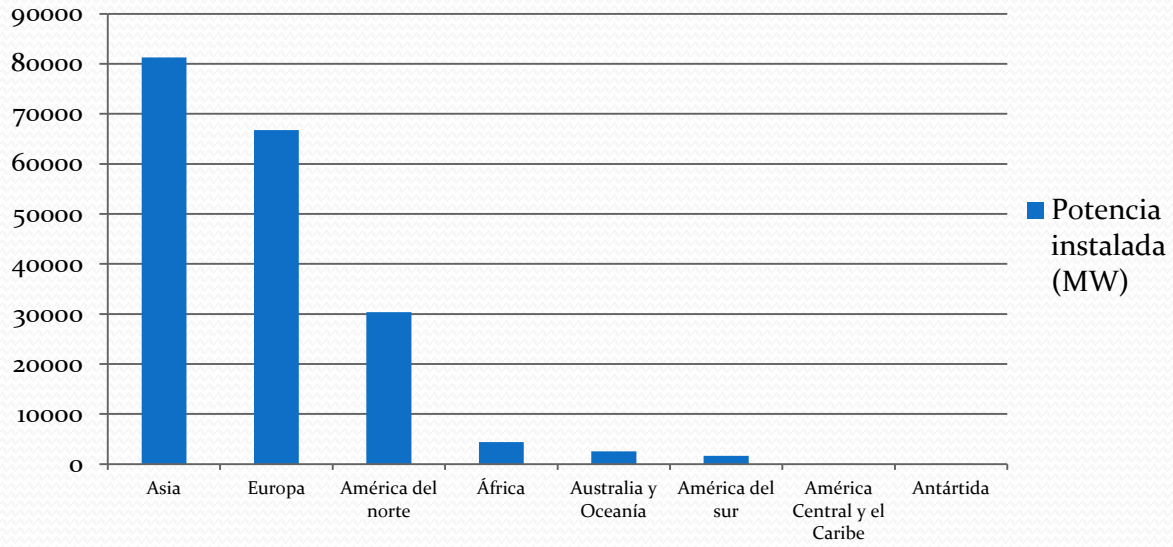
- **Departamento de Energía de EEUU:**

28 de octubre del 2015 existen 1354 proyectos 186.246 MW (Operación+Construcción+…)

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Potencia instalada (Operación+Construcción) por continentes (MW).



ASIA

1) China 33.318 MW

3) Japón 28.861 MW

AMÉRICA DEL NORTE

2) Unidos de América 29.738 MW

EUROPA

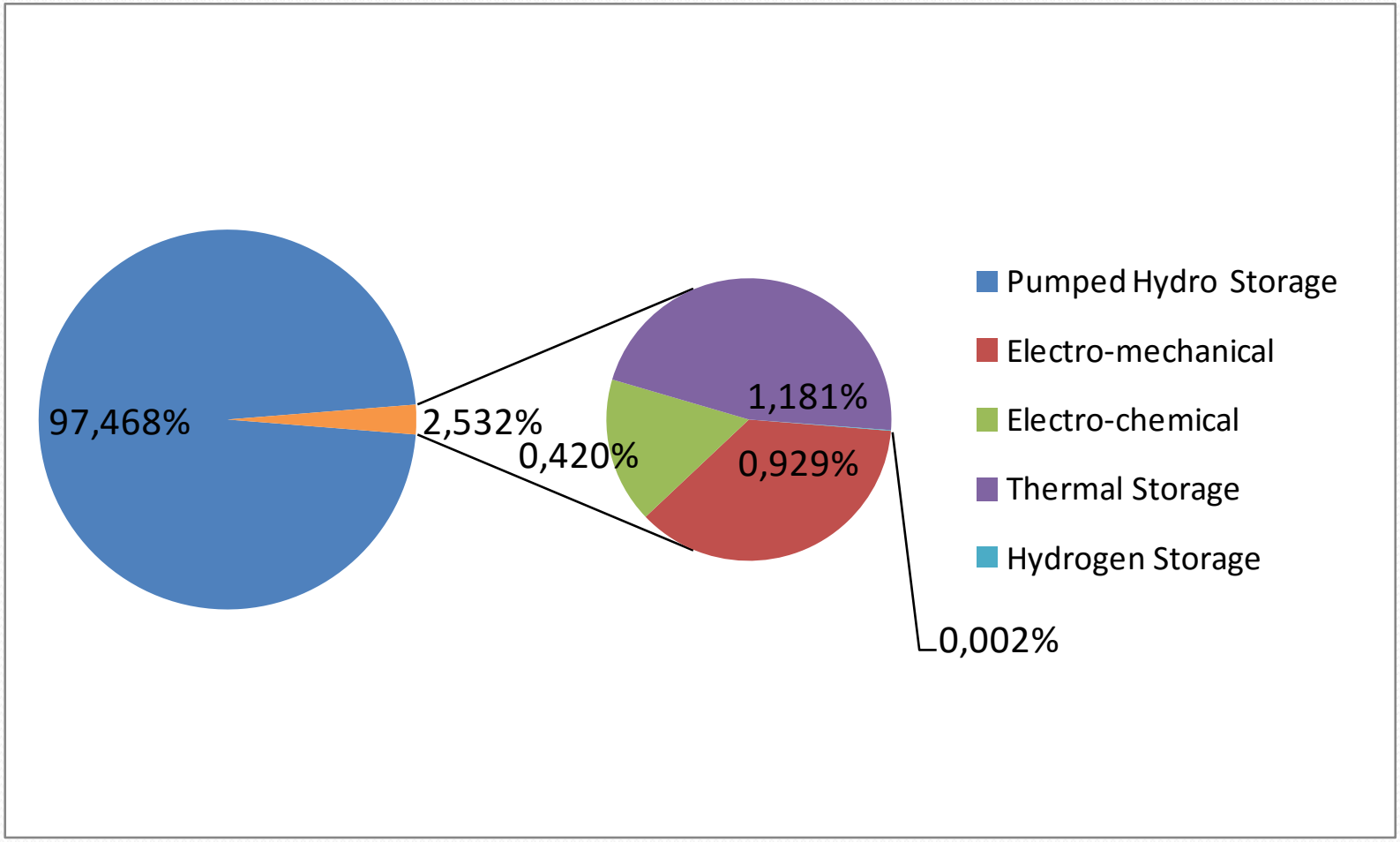
4) España 9.046 MW

5)Alemania 7.771 MW

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Sólo operación 944 (1354) proyectos 145.778 MW (186.246 MW)



Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

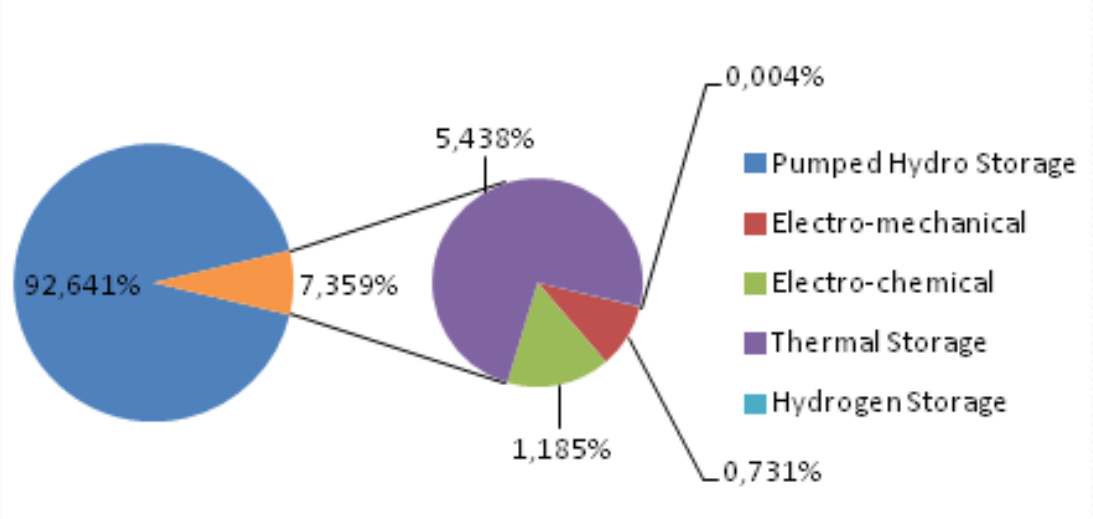
202 proyectos en construcción (28.314 MW)

Mismas zonas geográficas

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

202 proyectos en construcción (28.314 MW)



Pumped Hydro Storage	97,468%
Electro-mechanical	0,929%
Electro-chemical	0,420%
Thermal Storage	1,181%
Hydrogen Storage	0,002%

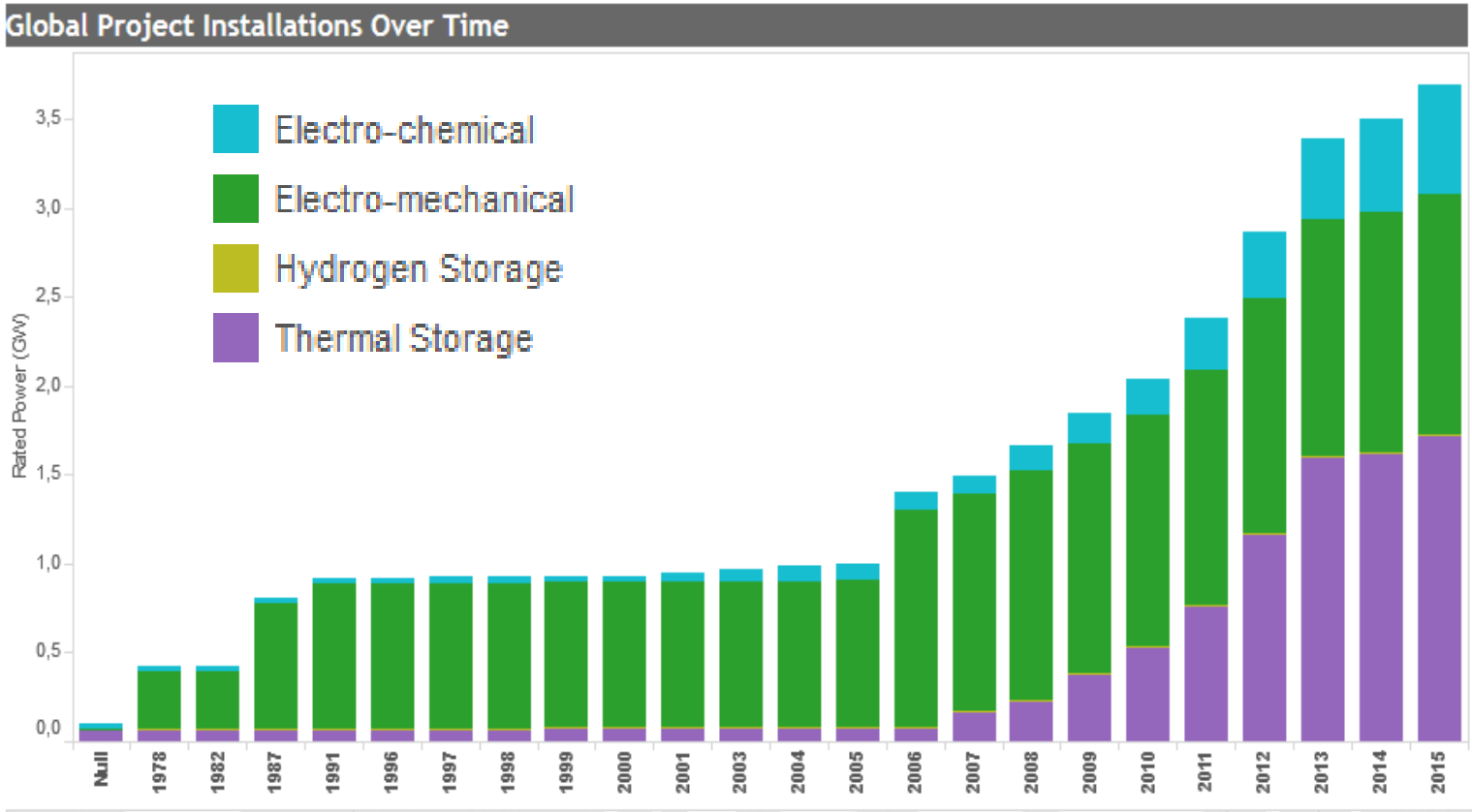
Operación

- Predominio del almacenamiento de bombeo.
- El almacenamiento electroquímico ha duplicado su peso.
- El térmico ha casi quintuplicado su importancia
- Almacenamiento electromecánico retroceso

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Distribución temporal de los proyectos en operación (652) eliminando los de bombeo



610 MW

1350 MW

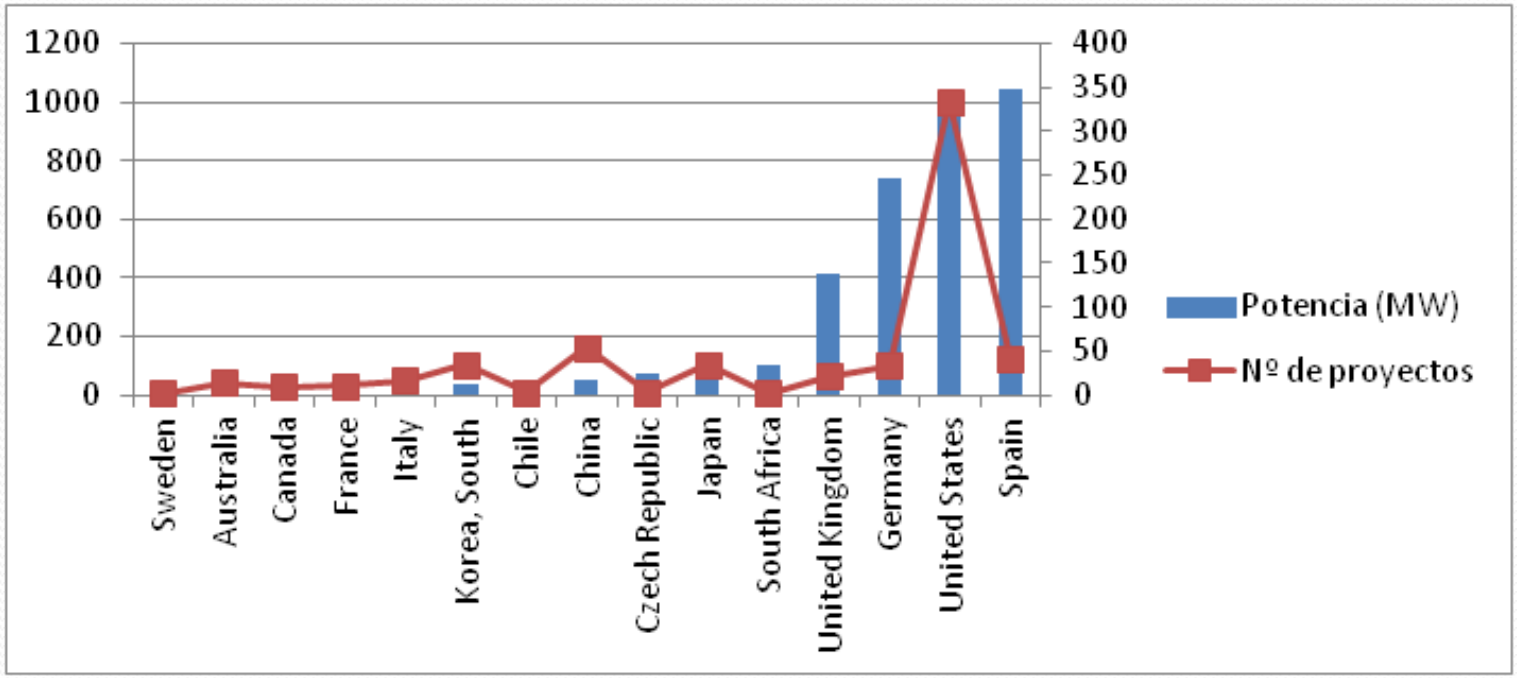
1720 MW

- 2006-2016 el almacenamiento electro-mecánico ha sufrido un estancamiento desarrollándose principalmente el térmico y en segundo lugar el electro-químico

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Distribución geográfica de los proyectos en operación (Nº 652 y 3.691 MW) eliminando los de bombeo

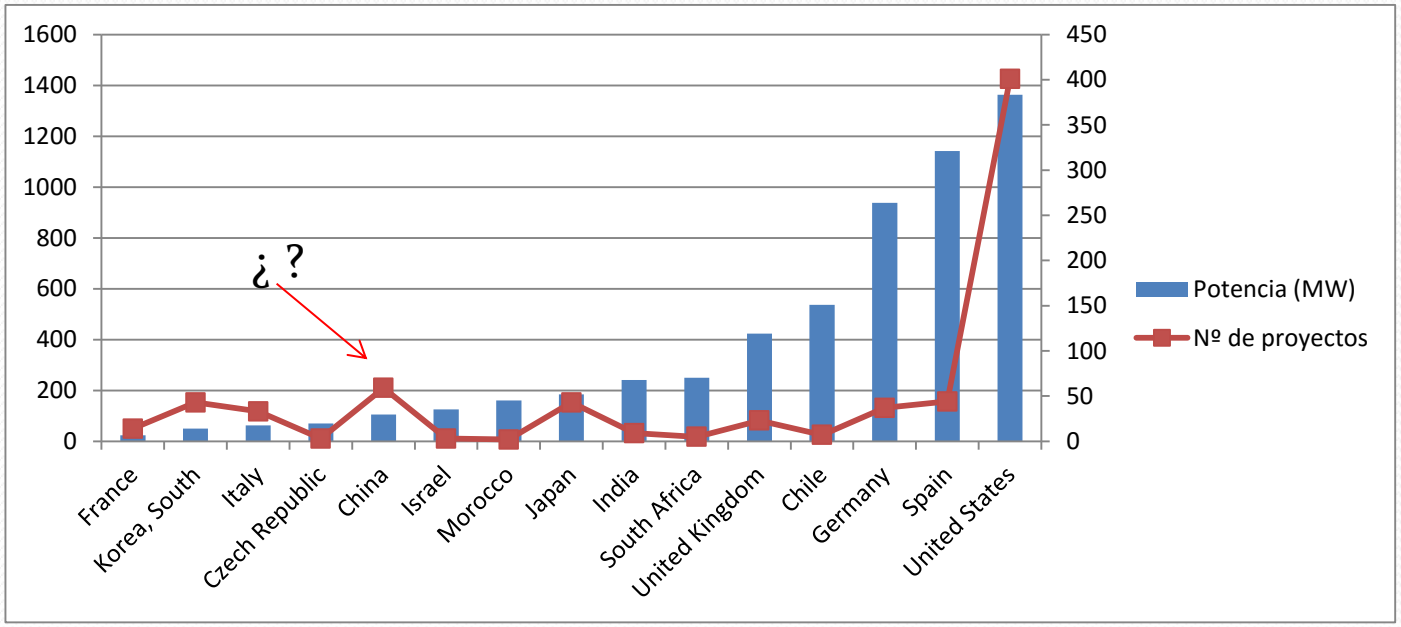


- Quince países concentran 611 proyectos de estos 652 proyectos, que constituyen el 99.2%
- España posee 40 proyectos con una potencia instalada de 1.0141 MW mientras que Estados Unidos tiene casi igual potencia con 334 proyectos.

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Distribución geográfica de los proyectos en operación y construcción (nº 822 y 5.774 MW) eliminando los de bombeo



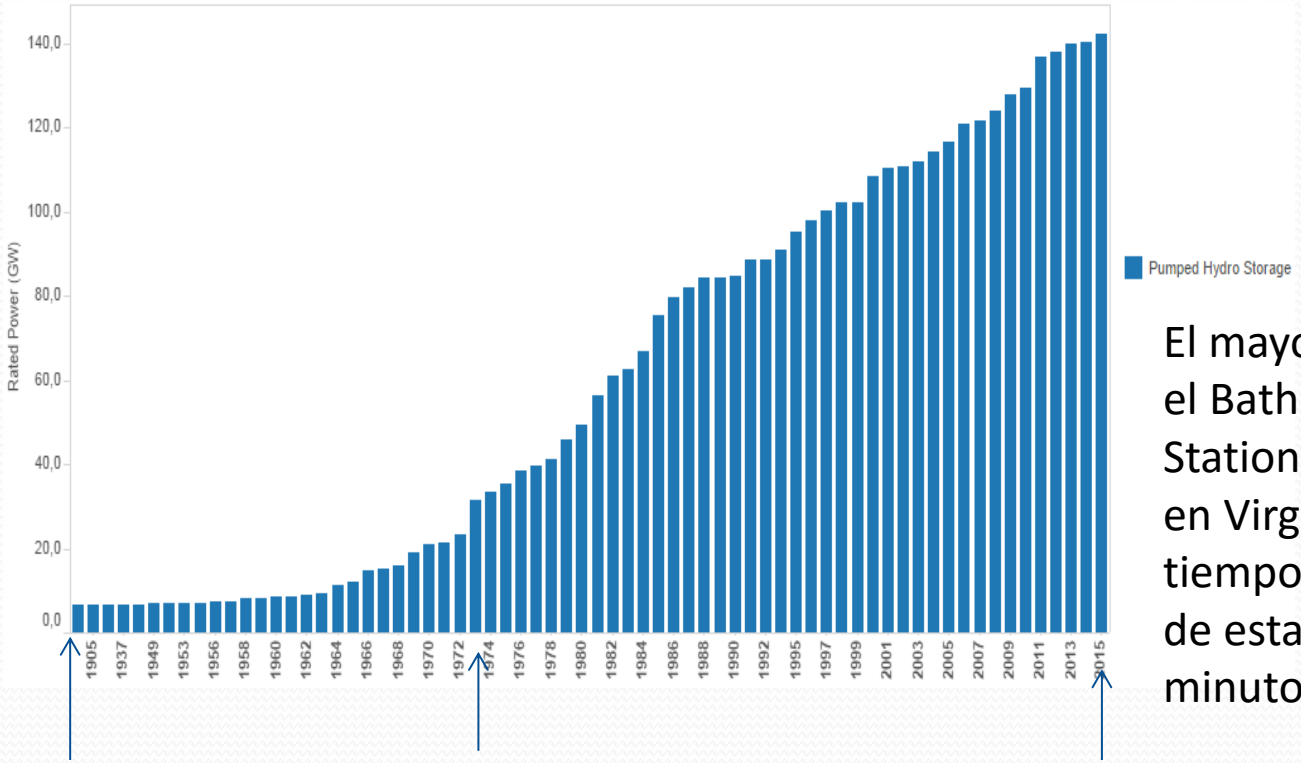
- Quince países concentran 726 proyectos (98.2%)
  - España posee +4 proyectos con una potencia instalada de 1.142 MW (+101 MW)
  - Estados Unidos 1.363 MW (+340 MW).
  - Alemania +200 MW y Chile +494 MW
  - Japón 3.380 MW (Bombeo)+88 MW (Electro-químico)
  - China 9.618 MW (Bombeo)

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

Distribución temporal de los proyectos de bombeo

1890 Italia y Suiza



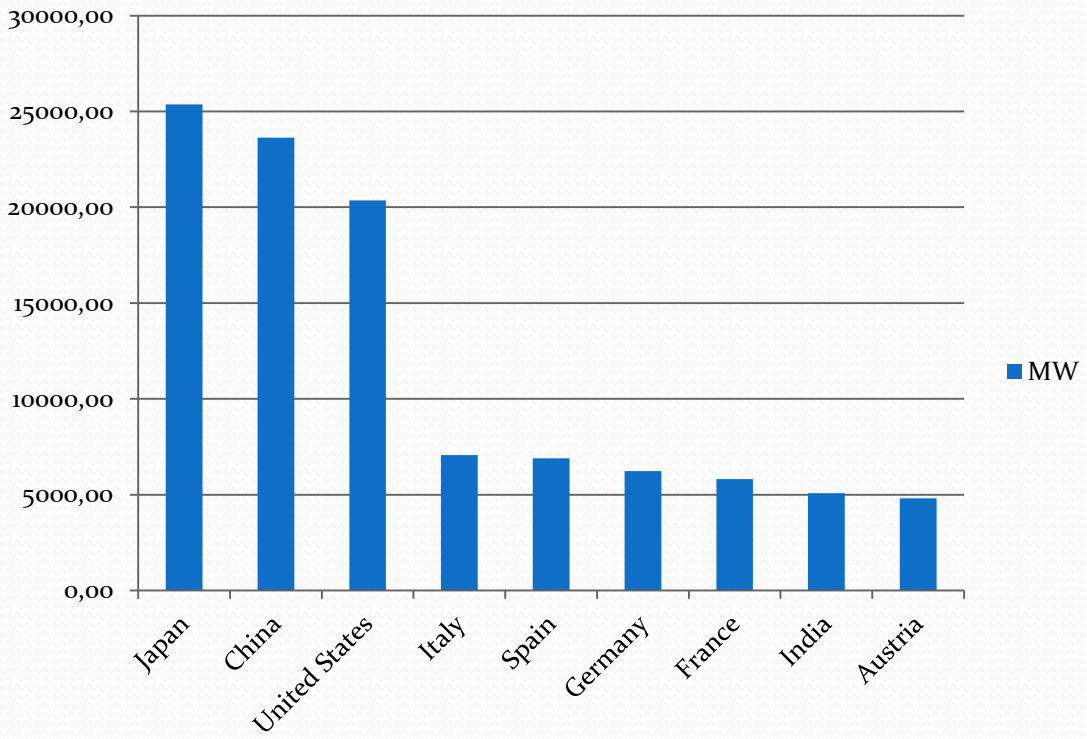
El mayor proyecto en el mundo es el Bath County Pumped Storage Station (3003 MW). Se encuentra en Virginia, Estados Unidos. El tiempo de duración de descarga de esta planta es de 10 horas y 18 minutos a plena carga.

6,41 GW 31,49 GW 142GW (292 proyectos)

Evolución histórica y geográfica

- **Departamento de Energía de EEUU:**

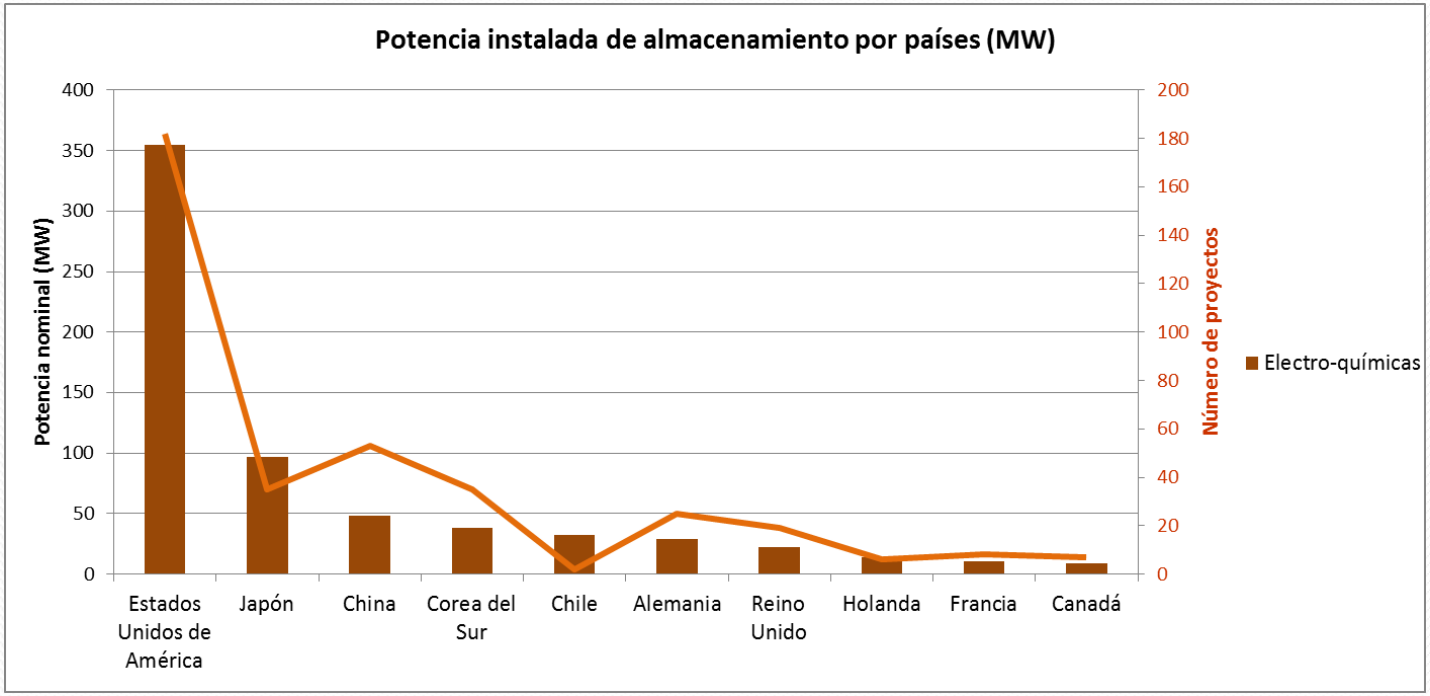
Distribución geográfica de los proyectos de bombeo (operativos)



105 GW (74%)

Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:



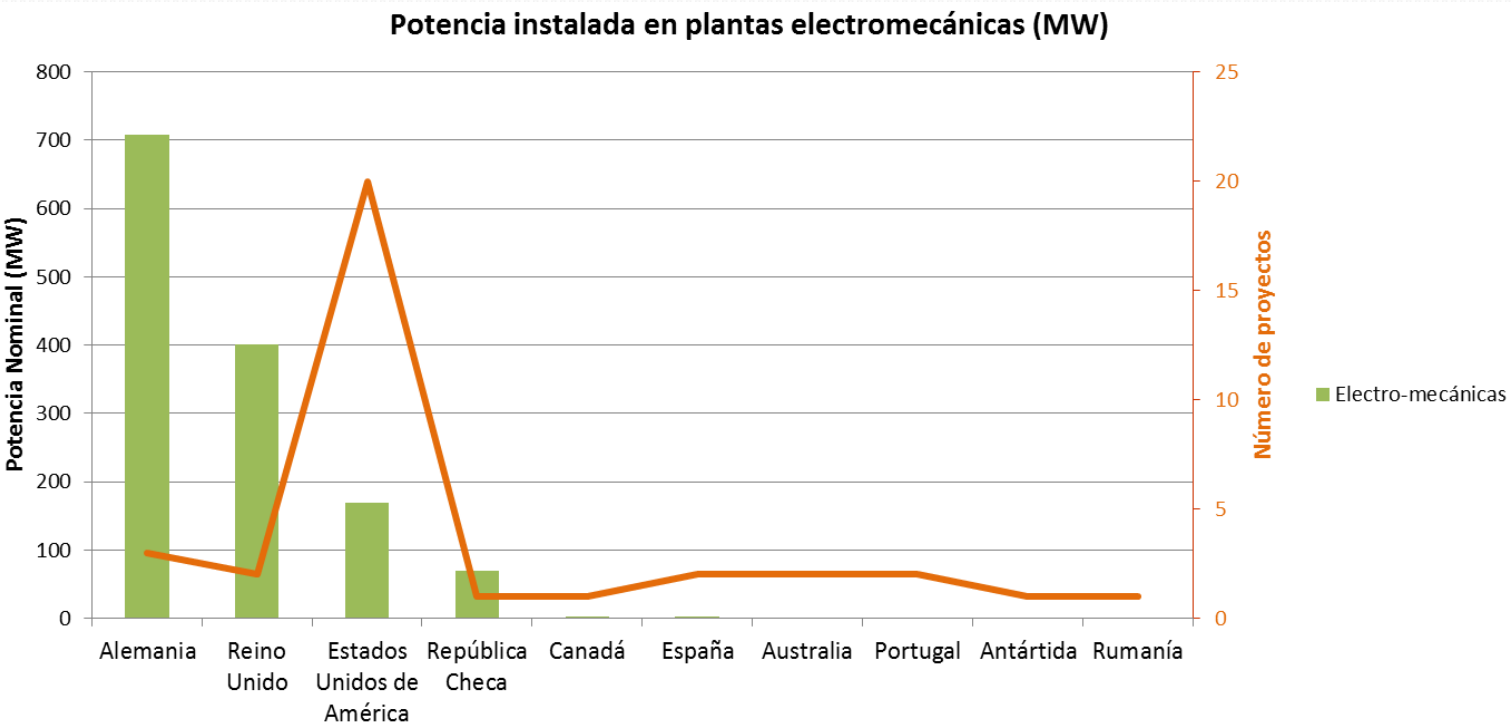
Chile quinto país (32 MW) con dos proyectos:

AES Los Andes Battery Energy Storage System (12 MW)

AES Angamos Storage Array (20 MW)

Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:



Alemania 3 proyectos:

Max Planck Institute : Volate de Inercia 387 MW
Kraftwerk Huntorf Aire comprimido 321 MW
DuraStor Volante de Inercia de 0,42 MW

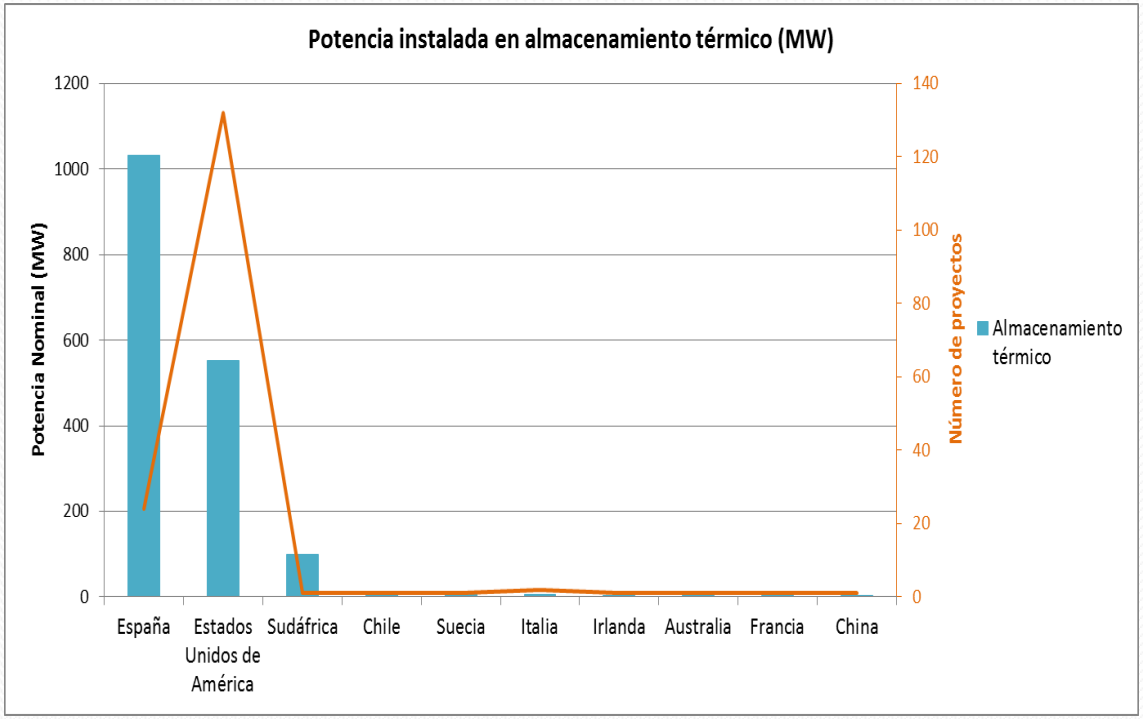
Reino Unido 2 proyectos:

Highview Pilot Plant Aire comprimido 0,350 MW
EFDA JET Fusion Flywheel 400 MW

.

Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:



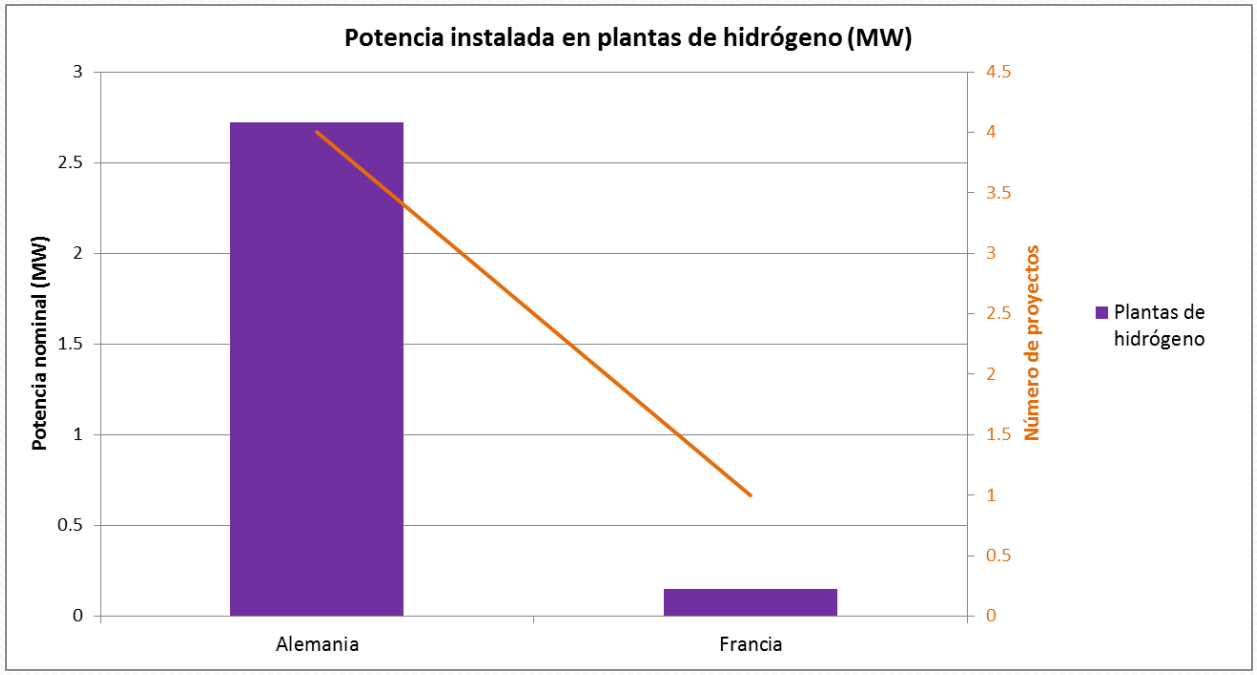
Estados Unidos 132 Proyectos (media 4MW)

Solana Solar Generating Plant (280 MW)

España 24 proyectos (media 50 MW)

Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos

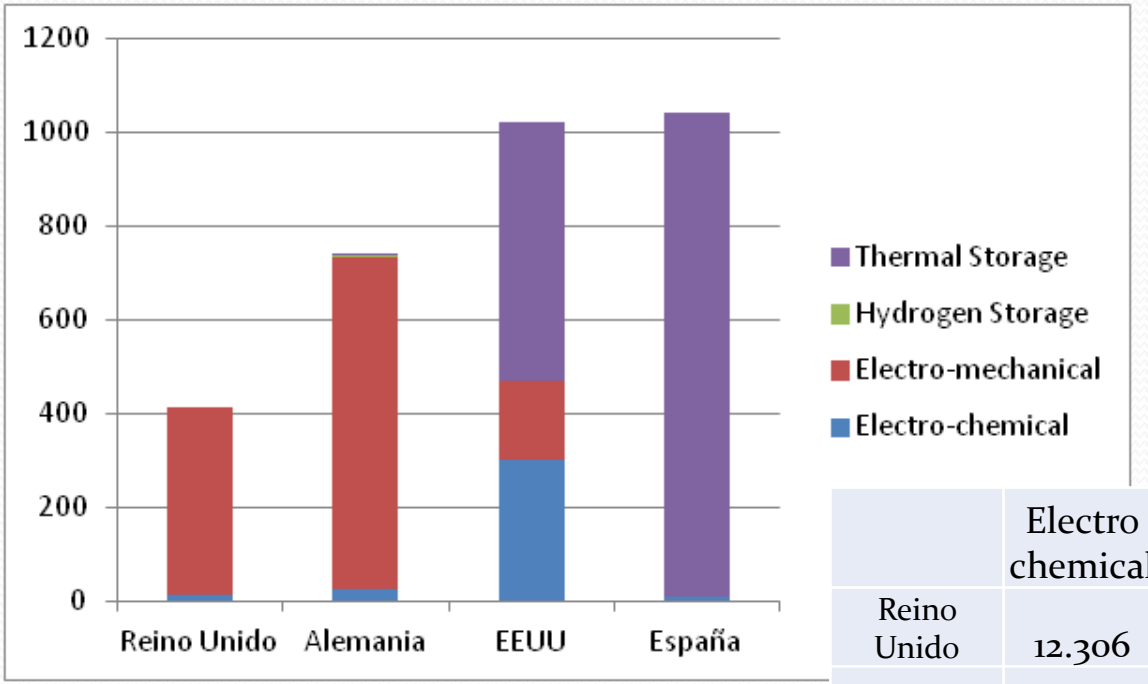
Departamento de Energía de EEUU:



Proyecto	Potencia (MW)	País
EnBW Hydrogen Testing Facility	0,4	Germany
E.ON "Power to Gas" Pilot Plant Falkenhagen	1	Germany
Thüga-Demonstrationsprojekt Strom zu Gas	0,32	Germany
Univeristy of Corsica MYRTE Test Platform	0,15	France
140 MW Wind Park with 1 MW Power to Gas System	1	Germany

Distribución geográfica y por tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:



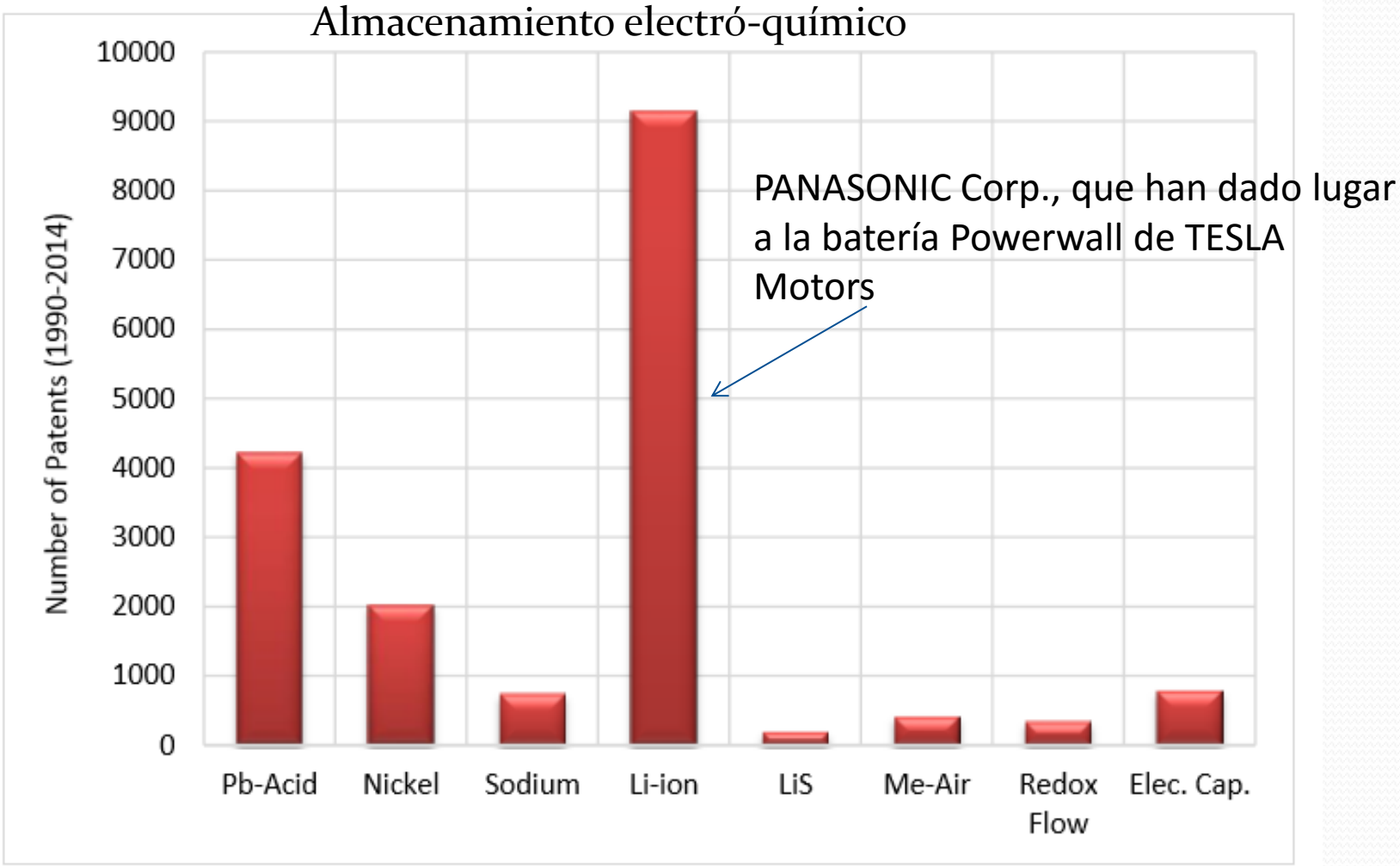
4 Países con más potencia instalada eliminando bombeo

	Electro chemical	Electro mechanical	Hydrogen Storage	Thermal Storage
Reino Unido	12.306	400.35		
Alemania	25.217	708.42	2.72	1.5
EEUU	300.161	169.18		553.401
España	8.026	2.1		1031.7

- Estados Unidos mayor diversidad.

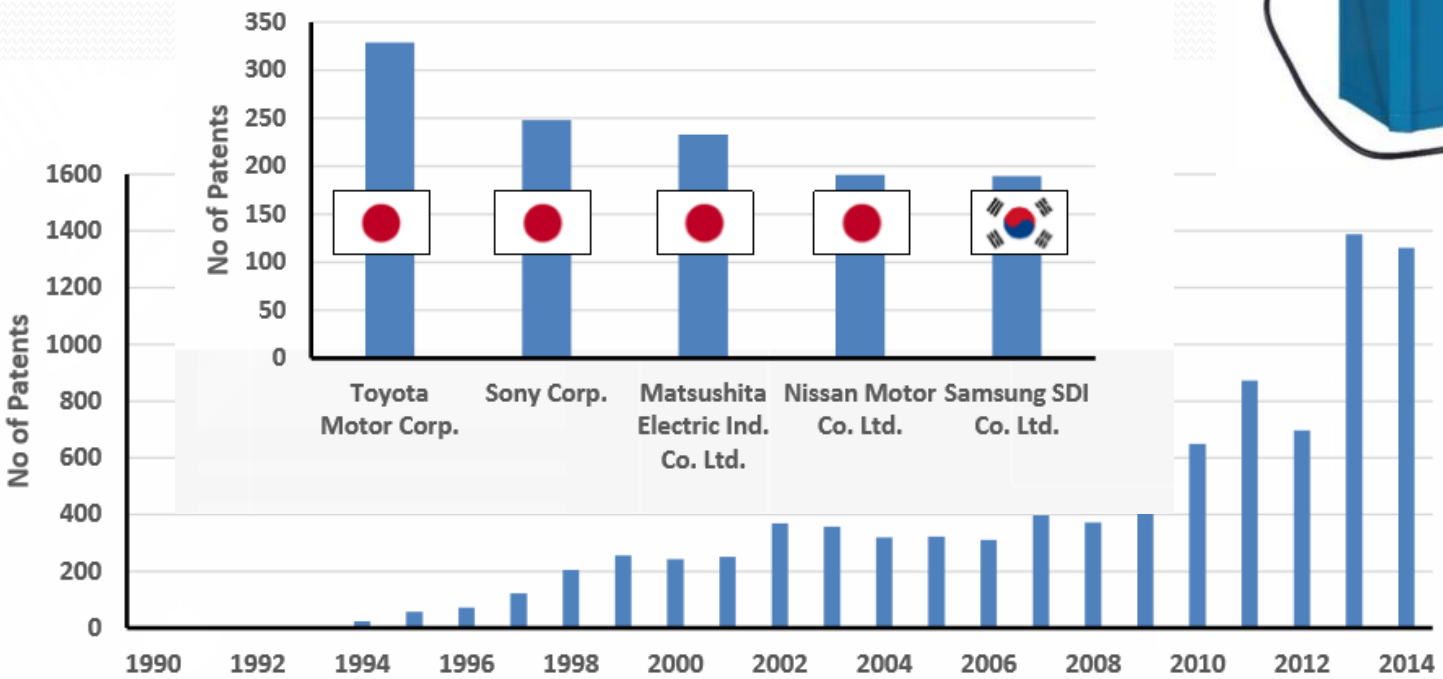
Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED



Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

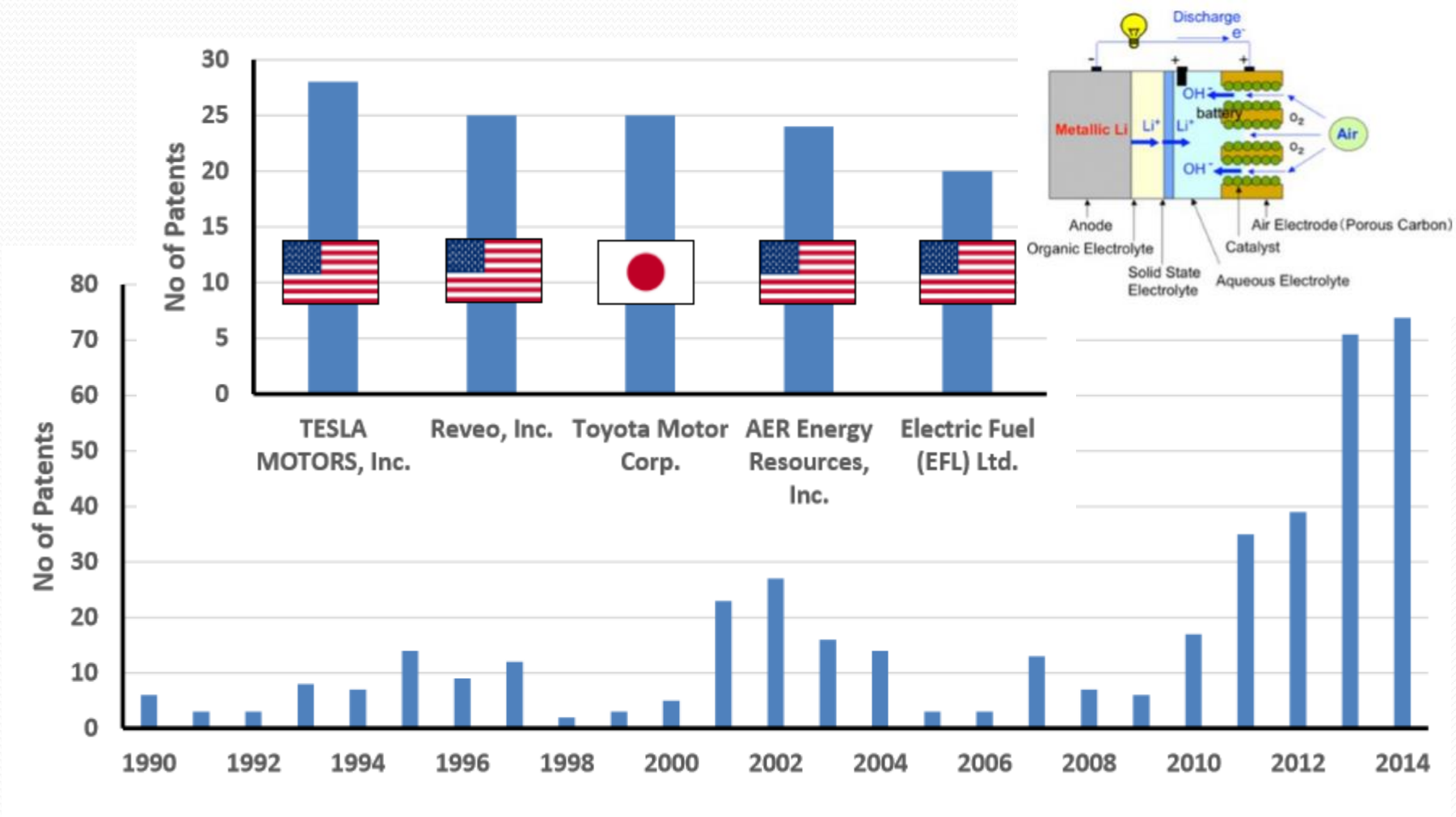
Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED



Patentes de baterías Ión-Litio

Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

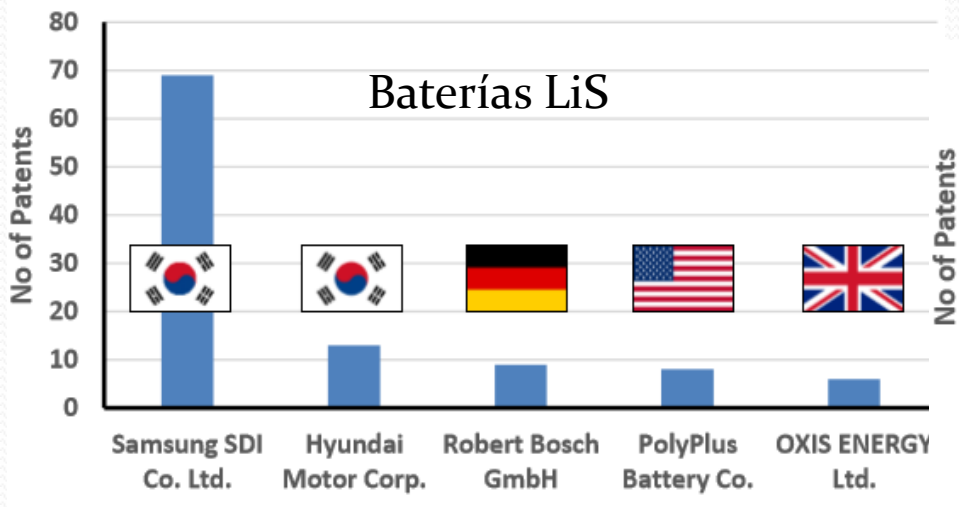
Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED

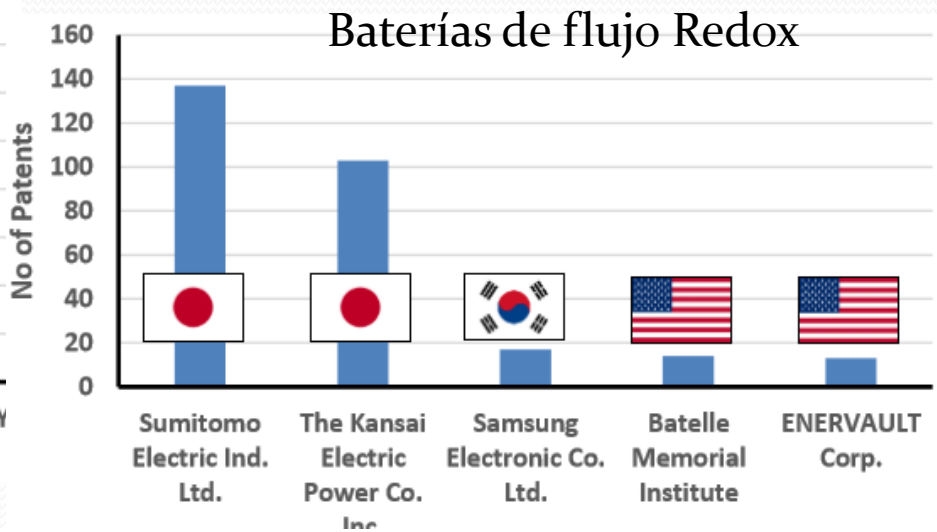


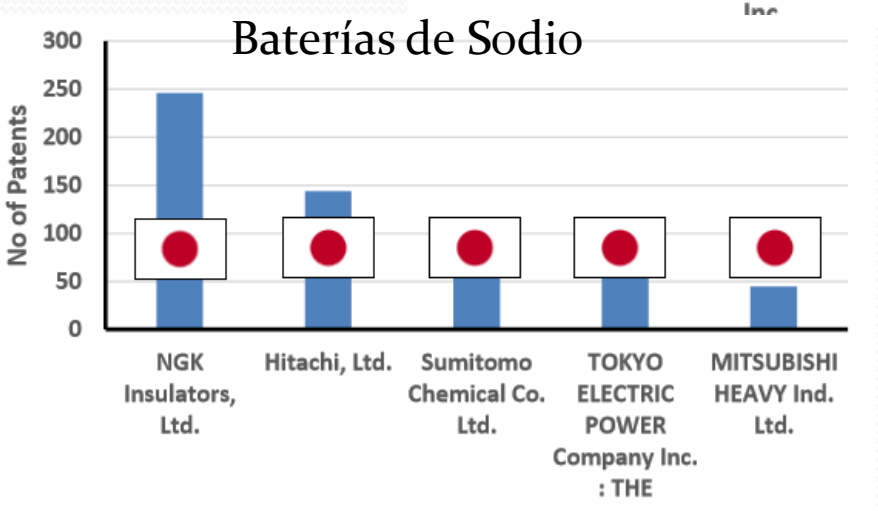
Baterías metal aire

Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED



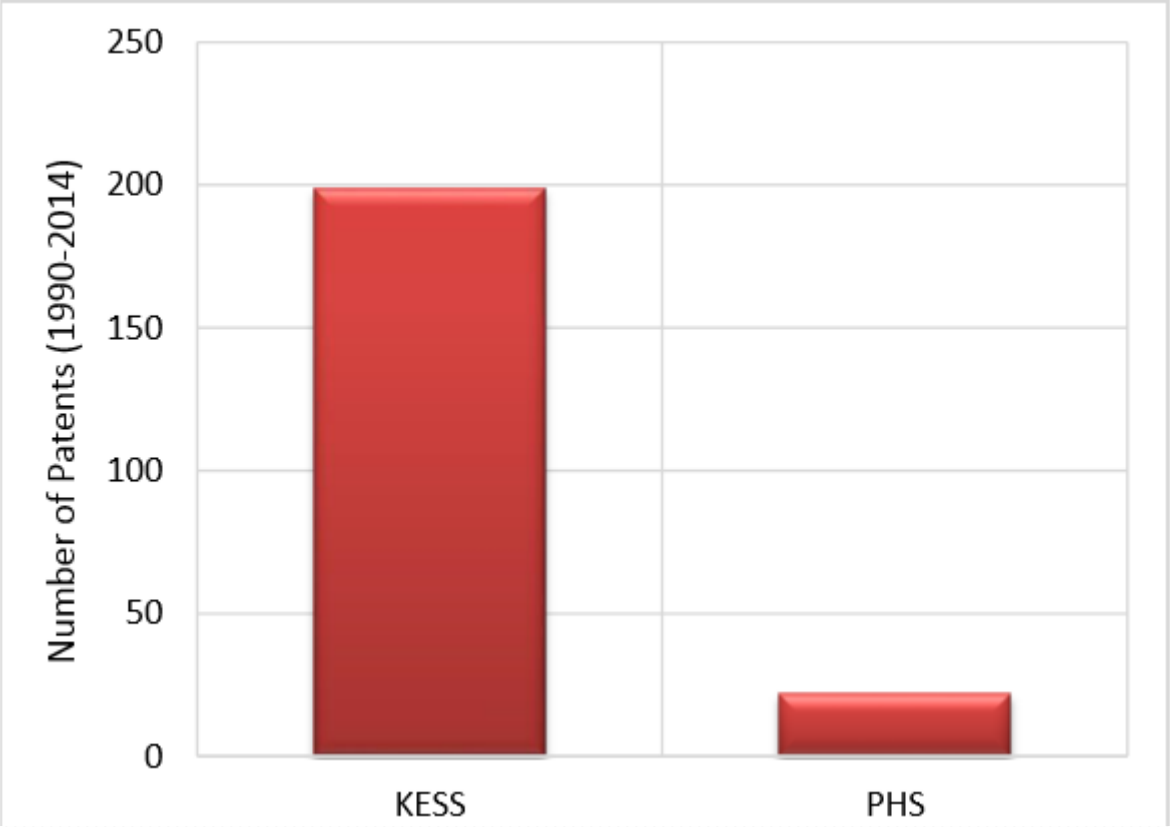




Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

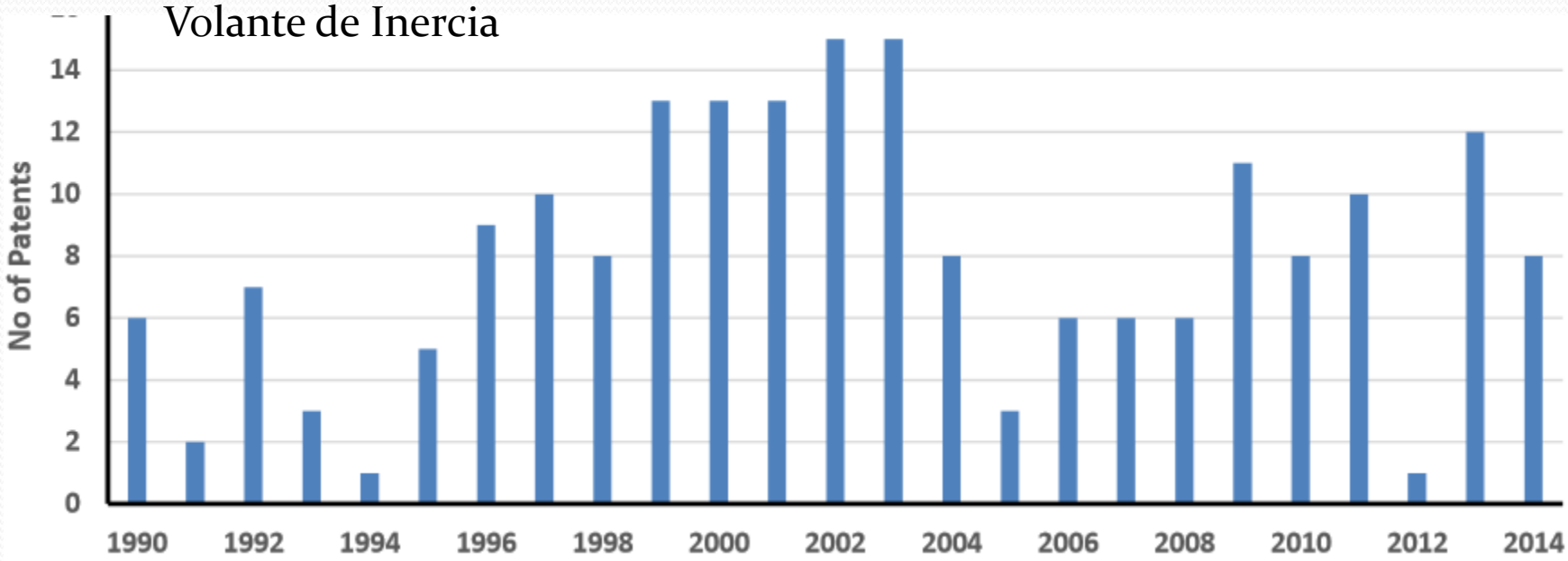
Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED

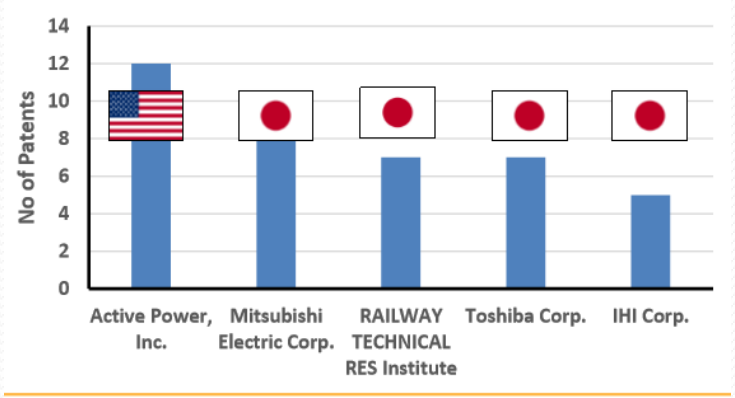
Almacenamiento electró-mecánico



Distribución de patentes por geográfica y por tecnología.

Plataforma Española de Redes Eléctricas - FUTURED





Distribución por punto de conexión de las tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:

Número de proyectos en operación y potencia media según la tecnología.

	Nº de Proyectos	Potencia Media (MW)
Pumped Hydro Storage	292,0	486,60
Electro-mechanical	35,0	38,71
Electro-chemical	444,0	1,38
Thermal Storage	168,0	10,25
Hydrogen Storage	5,0	0,57

Número de proyectos en operación y potencia media según punto de conexión

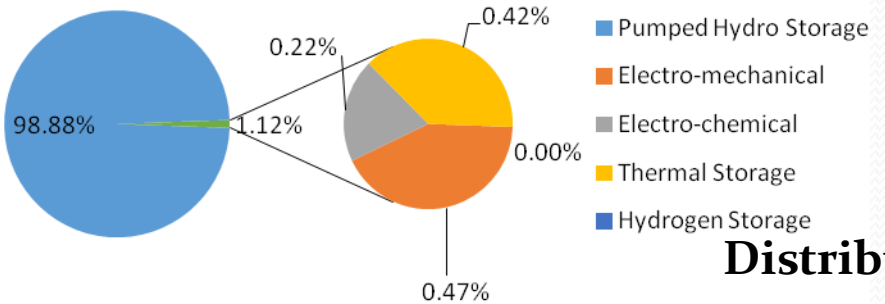
	Nº proyectos	Potencia (MW)	Potencia Media
Red Secundaria Distribución	127	81	0,64
Red Primaria Distribución	56	3.482	62,18
Red de Transporte	230	99.722	433,57
Desconocido	531	42.494	80,03

Distribución por punto de conexión de las tecnología de los proyectos

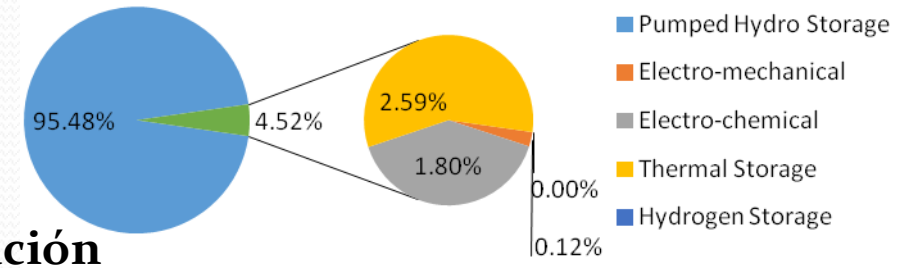
Departamento de Energía de EEUU:

Distribución de la potencia almacenamiento en operación conectados a la red

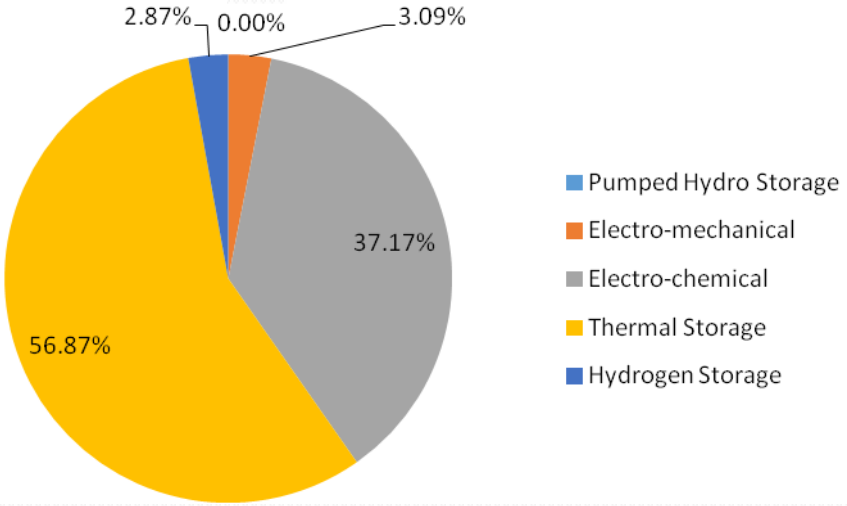
Transporte



Reparto

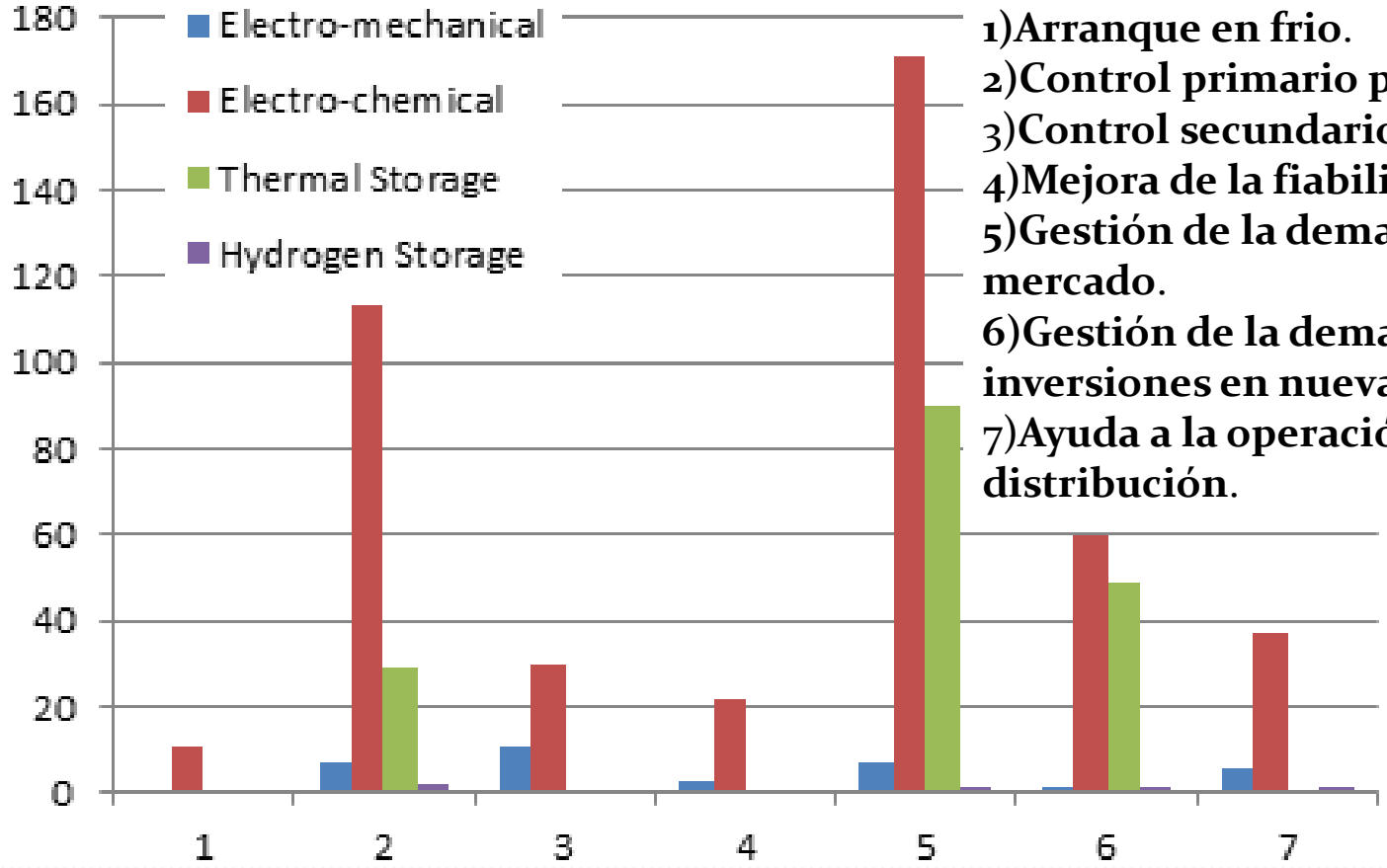


Distribución



Distribución por uso de las tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:



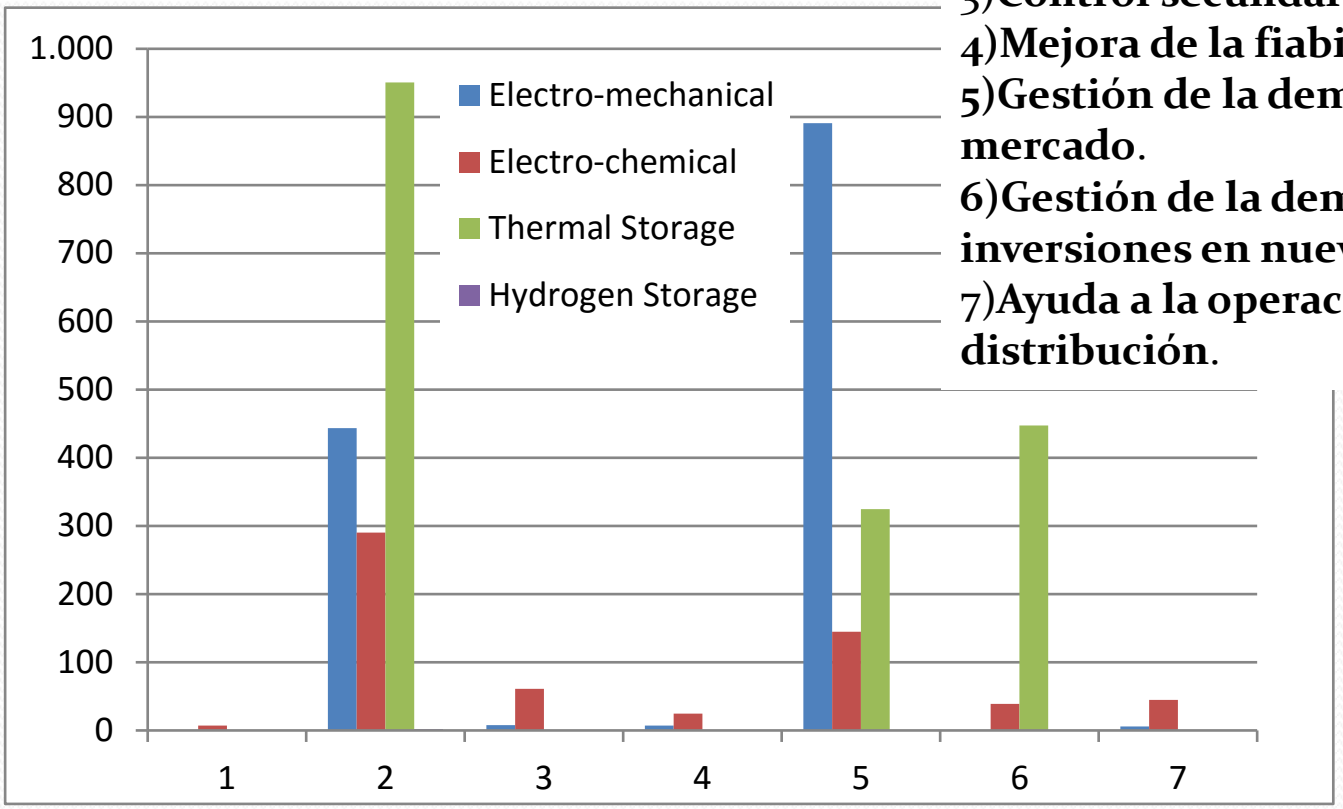
1)Arranque en frio.
2)Control primario potencia frecuencia.
3)Control secundario y terciario.
4)Mejora de la fiabilidad y calidad de la onda.
5)Gestión de la demanda por incentivos de mercado.
6)Gestión de la demanda para retrasar inversiones en nuevas infraestructuras.
7)Ayuda a la operación del transporte y la distribución.

Número de proyectos según tecnología (eliminando el almacenamiento hidráulico)

Distribución por uso de las tecnología de los proyectos

Departamento de Energía de EEUU:

1)Arranque en frio.
2)Control primario potencia frecuencia.
3)Control secundario y terciario.
4)Mejora de la fiabilidad y calidad de la onda.
5)Gestión de la demanda por incentivos de mercado.
6)Gestión de la demanda para retrasar inversiones en nuevas infraestructuras.
7)Ayuda a la operación del transporte y la distribución.



Potencia de proyectos según tecnología (eliminando el almacenamiento hidráulico)

Experiencias concretas en diferentes países

Energía hidroeléctrica de acumulación por bombeo. La estación está situada en la esquina norte de Bath County, Virginia, (3.003 MW).

La estación se compone de dos depósitos separados por unos 1.260 pies (380 m) de altura.

La construcción de la central eléctrica, con una capacidad inicial de 2.100 megavatios, se inició en marzo de 1977 y se terminó en diciembre de 1985 con un coste de $ 1,6 mil millones.

Entre 2004 y 2009, se aumentó la generación de energía a 500,5 MW y la potencia de bombeo a 480 megavatios para cada turbina.

Experiencias concretas en diferentes países

Los depósitos superior e inferior son creados por tierra y presa de materiales sueltos de roca-llenado.

El embalse superior es de 140 m de alto, 670 m de largo y tiene una superficie de 107 ha y la capacidad de almacenamiento de 43,911,000 m^3.

El embalse más bajo es de 41 m de altura y 730 m de longitud y tiene una superficie de 225 ha y la capacidad de almacenamiento de 34.447.000 m^3 Conexión del depósito superior a la central son tres conductos de agua entre 940-1,100 m de largo.

En funcionamiento, el nivel de agua fluctúa en más de 30 m en el depósito superior y 20 m en el depósito inferior.

Su caudal máximo en modo generación alcanza 852 m^3/s, lo que le capacita para desembalsar 3.06 hm^3 de agua cada hora (algo más de 3000 millones de litros de agua cada hora). A su vez, llega a bombear 801 m^3/s, unos 2.88 hm3 de agua cada hora. De esta manera, se podría llenar el embalse superior en algo menos de 5 horas.

Experiencias concretas en diferentes países

Solana Solar Generating Plant

La mayor planta cilindroparabólica del mundo 280 MW, (Gila Bend, Arizona), ocupa 780 ha. Un sistema de almacenamiento térmico que permite operar la planta a la máxima potencia durante seis horas cuando no hay sol.

El sistema de almacenamiento basado en sales consta de dos tanques de 122 pies de diámetro y 34 pies de profundidad. Las sales se mantienen constantemente a una temperatura de 288 ºC. La eficiencia total del ciclo de almacenamiento llega a ser del 99%.

Comenzó su construcción a finales de 2010 y ha entrado en operación en 2013.

Coste estimado $2 billion y de producción 994 GWh

Año	GW·h
2013	89.25
2014	603.57
2015	718.84

Experiencias concretas en diferentes países

JET, Joint European Torus, es el mayor reactor del mundo de confinamiento magnético de plasma experimental, ubicado en el Centro Culham de la energía de fusión en Oxfordshire, Reino Unido

Los requisitos de energía del JET durante el pulso de plasma son alrededor de 500 MW [con un pico de más de 1.000 MW. Debido a que el consumo de energía de la red principal se limita a 575 MW, dos grandes generadores de volante de inercia se construyeron para proporcionar la potencia pico necesaria.

Cada volante 775 toneladas y nueve metros puede girar hasta 225 rpm y almacenar 3,75 GJ (1,04 MWh). A este ritmo de giro, el borde del volante gira a una velocidad de 380 km/h.

Experiencias concretas en diferentes países.

Cada volante utiliza un motor eléctrico de 8,8 MW - más potente que el motor de los trenes de alta velocidad como el TGV o Eurostar – para ser acelerado.

Puede generar 400 MW durante 9,3 segundo.

En un día típico de los volantes se pueden utilizar 22 veces.

Experiencias concretas en diferentes países

Plantas de regulación de volantes de inercia de Beacon Power en Stephentown

Se trata de un sistema de almacenamiento de 20 MW (15 minutos) constituido por 200 volantes de inercia de 500 kW y conectados a 69 kV en Stephentown y operando desde el primer cuatrimestre de 2011. Proporcionan servicios de regulación de frecuencia al operador NYSO ante cambios en la demanda, participando para ello en el **mercado de regulación primaria**. Su tiempo de respuesta es hasta 100 veces más rápido que la generación convencional, ejecutando al año entre 3.000 y 5000 ciclos de plena carga/descarga en su participación en el mercado de regulación de frecuencia. Esta planta cubre hasta el 30% de la capacidad de corrección del error de control de área (ACE) de la zona, con una eficiencia demostrada de hasta el 95%.

Experiencias concretas en diferentes países

Almacenamiento mediante aire-comprimido en Kraftwerk Huntorf

Se trata de la primera planta comercial de almacenamiento de aire comprimido funcionando desde 1978, de potencia nominal 321 MW/642 MWh.

Almacena energía procedente de una planta nuclear durante las horas nocturnas para devolver parte de la misma durante las horas diurnas de máxima demanda.

Provista de dos cavernas de almacenamiento de un total de 300.000 metros cúbicos a 600 y 850 metros de profundidad, la segunda se mantiene para arranque en frio de la central nuclear. Es capaz de conseguir el arranque en frio en solo 6 minutos. La eficiencia del ciclo es del 42%.

Experiencias concretas en diferentes países.

Mcintosh Power Plant Natural Gas Combustion Compressed Air

Almacenamiento mediante aire comprimido en una caverna de sal. La caverna es de 220 pies de diámetro y 1.000 pies de altura, para un volumen total de 10 millones de pies cúbicos. En carga completa, la caverna se presuriza a 1100 psi, y se descarga hacia abajo para 650 psi.

Durante la descarga, 340 libras de aire fluyen hacia fuera de la caverna cada segundo. La caverna se puede descargar durante 26 horas, produciendo una potencia pico 110-MW.

La unidad de turbina también hace uso de un intercambiador de calor aire-aire para precalentar el aire de la caverna con el calor residual de la turbina.

El sistema de recuperación de calor residual reduce el consumo de combustible en aproximadamente un 25%. En comparación con las turbinas de combustión convencionales, el sistema alimentado-CAES puede poner en marcha en 15 minutos en lugar de 30 minutos, utiliza solamente 30% a 40% del gas natural.

Experiencias concretas en diferentes países

Sistema de almacenamiento de baterias NaS en Presidio

Se trata de un sistema de **baterías NaS de 4MW/32 MWh instalado en 2010** como apoyo a la la ciudad de Presidio en Texas, alimentada por una línea de alta tensión en T de 69 kV y 60 millas de longitud.

Esta instalación, además de garantizar la continuidad en el suministro **durante 8 horas** en caso de pérdida de la línea de transmisión de abastecimiento, o incluso durante labores de mantenimiento de la misma, **ha permitido posponer la inversión** en nuevas líneas de transporte, además de aportar beneficios en relación a la **calidad y fiabilidad** de la señal eléctrica suministrada gracias a la rápida actuación de la batería. Hay que tener en cuenta que las características de la alimentación a dicha ciudad con una única línea con más de 50 años en servicio propiciaba numerosas interrupciones en el suministro a las que se sumaban la elevada frecuencia de tormentas eléctricas que se producen en la zona (cerca de la frontera con Méjico). A modo de ejemplo, entre 2001 y 2006 hubo 247 cortes de suministro, suponiendo nueve de ellos una interrupción en el servicio de más de 6,8 horas de media. Además, entre el 8 de julio y el 8 de septiembre de 2007 se registraron 81 eventos con una muy pobre señal de tensión.

En su día fue **la primera batería en USA de esta tecnología** y la más grande

Proyectos por tecnología.

Proyecto de almacenamiento en el parque eólico Rokkasho

En la subestación de conexión de un parque eólico de 51 MW (31*1,5 MW)se instaló en el 2008 una de las batería NaS más grandes del mundo, de **34 MW/238 MWh**, la cual permite una **producción continua** del parque independientemente de la disponibilidad o no del recurso eólico, además de **gestionar las rampas** pronunciadas de subida/bajada del parque.

Proyectos por tecnología.

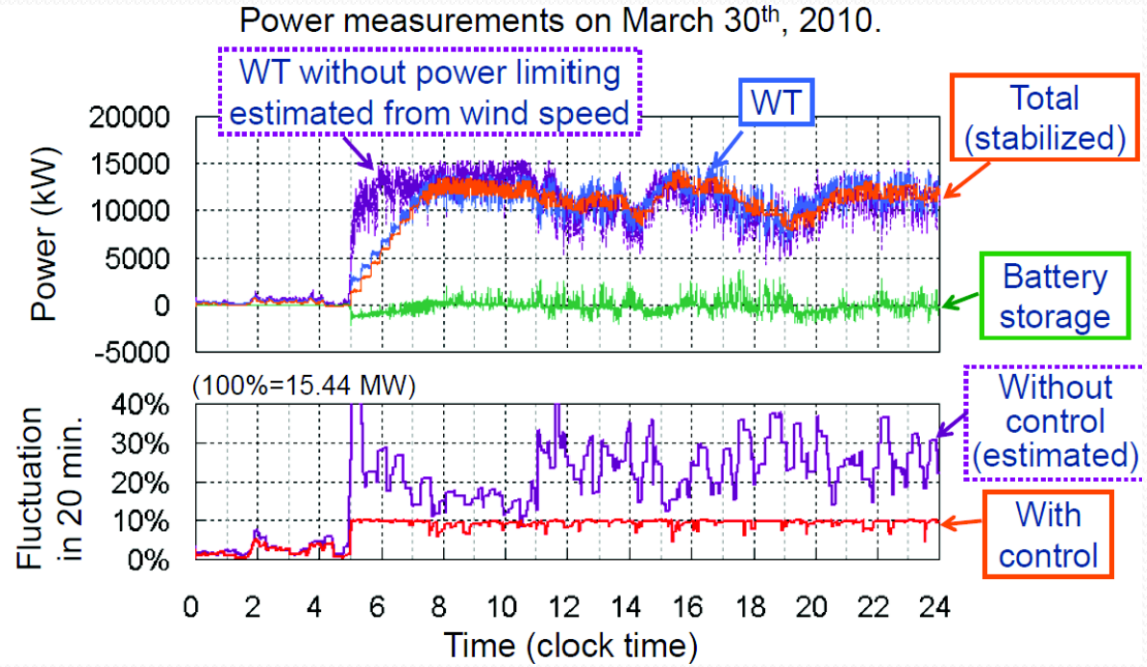
Proyecto de almacenamiento en el parque eólico Rokkasho

Un total de **17 conjuntos** de unidades de baterías NaS de 2 MW (40 unidades de 50kW)
cada una son monitorizadas e integradas junto a la gestión de los 51 MW eólicos del parque a través de un control centralizado. Las baterías están confinadas en un recinto cerrado para protegerlas del aire salino altamente corrosivo de la zona.

La temperatura de trabajo de este sistema se mueve entre los 300 y 350 ºC. El sistema de almacenamiento suele cargarse de noche cuando la demanda es baja, vertiendo dicha energía a la red en las horas pico de demanda. La eficiencia del ciclo se estima entre el 89% y el 92%.

Proyectos por tecnología.

Parque eólico Shiura (15,44 MW)



Batería de Plomo de 4.5 MW (2h y 20 minutos) en 2010 para la **regulación de la producción del parque**. Conectado a una subestación 22 kV/33 kV, se estima una vida útil de la batería de 17 años. Su dimensionamiento se obtuvo para cumplir los códigos de red locales

Estabilización de la producción de potencia del parque,

Experiencias concretas en diferentes países

Kokam's 56 Megawatt Energy Storage Project

Corea del Sur (8 de marzo, 2016). Ha desplegado con éxito dos baterías de litio níquel manganeso cobalto (NMC) y Óxido Energy Storage Systems : **24 MW / 9 MWh** y **16 MW / 6 MWh**.

Anteriormente (agosto de 2015) se tenía un sistema de óxido litio y titanio (LTO) (**16MW / 5MWh**). Por tanto, Korea Electric Power Corporation (KEPCO) posee 56 MW de capacidad de almacenamiento de energía para la **regulación de frecuencia**. Estos tres sistemas son parte del mayor proyecto de regulación de frecuencia ESS del mundo, que está previsto que se desplegado con **500 MW** de almacenamiento de energía a base de **batería electro-química** cuando se haya completado en 2017.

Experiencias concretas en diferentes países

Isla El Hierro: sistema de generación híbrido hidráulico-eólico

El parque **eólico** posee una potencia instalada de **11,5 MW** con 5 aerogeneradores de 2,3 MW. La **planta hidráulica** a través de 4 turbinas Pelton de 2,83 MW y 8 grupos de bombeo (dos de 1,5 MW y seis de 0,5 MW) proporcionan una potencia total de **11,32 MW**. Finalmente las centrales térmicas-diesel añaden una potencia nominal de **11,36 MW**. **Coste 82 M€**

Un sistema híbrido **eólico-hidráulico** que sustenta entre el **70% y el 80%** de las necesidades energéticas de la isla. Tras el año de operación "eventual" de prueba al que ha estado sometida hasta junio de 2015, se ha pasado en julio de 2015 a un periodo de prueba "regular", habiéndose conseguido como hito significativo un 100% de cobertura renovable de la demanda durante unas horas del domingo 9 de agosto de 2015.

Ver cobertura en tiempo real: https://demanda.ree.es/visionaCan/VisionaHierro.html#

Experiencias concretas en diferentes países

Proyecto "STORE", el más importante de Europa sobre almacenamiento de energía en entornos insulares, con una inversión total de 11 millones de euros.

Municipio de **La Aldea de San Nico**lás, es de almacenamiento electroquímico mediante **baterías IonLi, de 1MW/3 MWh**, y busca probar las capacidades reales para aportar **servicios complementarios** como una unidad de generación convencional, permitiendo gestionar la demanda, aportar inercia y potencia activa al sistema, regular tensión, y participar en la regulación secundaria.

Los equipos de almacenamiento que se han instalado en el **municipio de Alajeró**, en **La Gomera** mediante un sistema de **volante de inercia** de 0.5MW/18MWs, aportan inercia y potencia activa para la regulación primaria, además de conseguir una estabilización continua de la **frecuencia** de la isla.

En Breña Alta, en **La Palma**, la instalación de la tecnología de **ultracondensadores de 4MW/20MWs a**porta estabilidad a **la frecuen**cia del sistema, y valida su capacidad para evitar pérdidas del suministro ante averías imprevistas, dotando al sistema de mayor robustez y calidad de suministro.

Experiencias concretas en diferentes países

Futuros proyectos significativos

Apex Bethel Energy Center (Tennessee Colony, Texas, United States): Aire comprimido subterráneo. 317 MW (96 horas). Prevista para 2020

Eldorado Pumped Storage(Clark County, Nevada, United States): Planta de bombeo de 1 GW (10 horas). Anunciada en 2010

30 MW SK Innovation BESS (Magdeberg, Saxony-Anhalt, Germany): Electro química de 30 MW, anunciada en 2014.

Advanced Rail Energy Storage Nevada (Pahrump, Nevada, United States): Almacenamiento gravitacional. 50 MW (15 minutos). En construcción en 2015

Anchorage Area Battery Energy Storage System (Anchorage, Alaska, United States): Electro química de Ion-litio. 25 MW (34 minutos). Prevista para 2016.

PSE 2 MW Glacier (Glacier, Washington, United States): Electro química de Ion-litio. 2 MW que pueden ser mantenidos hasta 18 horas. Anunciada en 2014.

Kathu 100 MW Solar Thermal Park (Kathu, Northern Cape, South Africa): Almacenamiento térmico en sales de 100 MW (4 horas y 30 minutos). Anunciada en 2015.

MID Primus Power Wind Firming EnergyFarm (Modesto, California, United States): batería de flujo de 28 MW (4 horas) anunciada en 2013

Conclusiones

- El almacenamiento electro-mecánico está decayendo su importancia.
- El almacenamiento por hidrógeno es incipiente.
- El térmico importante pero restringido a plantas solares.
- El bombeo sigue manteniendo su primacía, aunque tiene el inconveniente de su dependencia orográfica.
- El electro-químico es el que se está desarrollando más.
- Respecto a las patentes dominio de Japón, Corea y USA.
- Estados Unidos mayor potencia instalada, mayor número de proyectos y más diversidad en tecnología.
- China primera potencia si se considera bombeo.
- España líder almacenamiento térmico, casi inexistente en baterías electroquímicas.

Bibliografía

- http://www.energystorageexchange.org/
- http://www.futured.es/documentos/GIA.pdf https://www.euro-fusion.org/2011/08/jets-flywheels/
- http://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/Overview-of-Current-Development-on-Compressed-Air-Energy-Storage_EERA-report-2013.pdf
- http://www.goronadelviento.es/index.php?accion=galeria&IdSeccion=87
- http://www.powersouth.com/files/CAES%20Brochure%20[FINAL].pdf
- http://nozebra.ipapercms.dk/vestas/vestaswind/es/n0162009/?Page=12
- https://demanda.ree.es/visionaCan/VisionaHierro.html#