

## PROYECTOS DE OPTIMIZACION DEL SISTEMA ELECTRICO ESPAÑOL. ACUMULADORES DE ENERGIA.

Gines Delgado-Calín

Ana Nieto-Morote

*Universidad Politécnica de Cartagena*

### **Abstract**

In Spain, in the last decade around 27.000 MW have been installed in Combined Cycle Power Plants with Gas Turbines (CCGT) and more than 20.000 MW at Wind Farms. This situation has generated a new scenario with opportunities to improve efficiency implementing new technologies. Renewable and combined cycle plants are complementary since the CCGTs due to their operational flexibility, they provide services that allow the continuous on off regime of such variable energy source like the wind is. At the same time, there is a progressive incremental of the fuel Price that makes long term interesting the study of the current options that technically and economically are feasible in order to optimize the energy sources usage and their economical proficiency. Besides, the excess of renewable power plants installed creates the serious need of installing electrical storage capacities that manages the variations and collects some of this energy than otherwise will be lost when the demand is low but renewable energy is producible. This paper analyzes the current situation in Spain and shows feasibility studies and state of the art in energy storage.

**Keywords:** *energy storage; projects; feasibility; renewable; power plants*

### **Resumen**

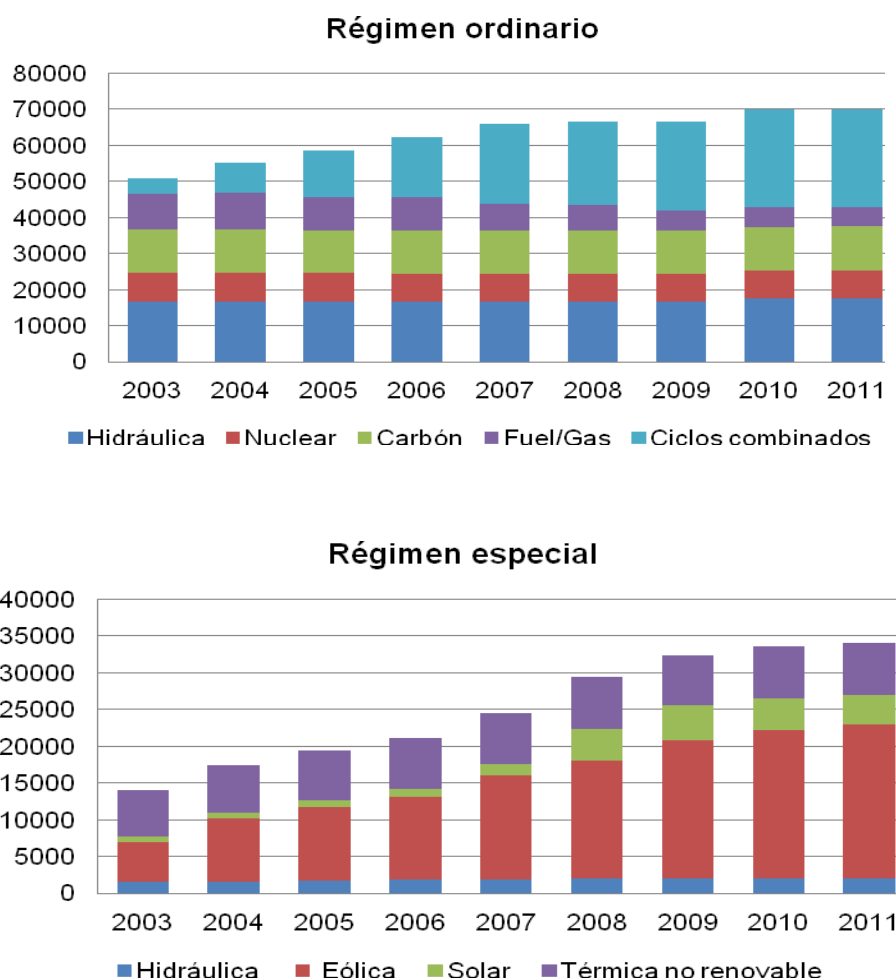
En España, en la última década se han instalado unos 27.000 MW en Ciclos Combinados con Turbinas de Gas y más de 20.000 MW en Energía Eólica. Esta penetración de renovables ha generado una serie de oportunidades de mejora en la eficiencia del sistema eléctrico español implementando nuevas tecnologías. Las energías renovables y los ciclos combinados se complementan pues estos últimos debido a su flexibilidad de operación permiten la entrada y salida de la fuente variable que es el viento. El incremento progresivo del precio del combustible hace también interesante el estudio de otras opciones técnica y económicamente viables que optimicen el uso de las distintas energías aumentando su rentabilidad. El exceso de renovables genera la necesidad de instalaciones de acumulación de energía eléctrica que amortigüen la variabilidad y almacenen los excesos de generación que se producen cuando siendo la demanda baja la fuente renovable se puede generar. Este artículo analiza la situación actual en España y muestra la viabilidad de algunas de las técnicas disponibles de almacenamiento de energía.

**Palabras clave:** *acumuladores de energía; proyectos; viabilidad; renovables; centrales eléctricas*

## 1. Introducción

Ante los compromisos internacionales de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> adquiridos en el ámbito de la Unión Europea y en el ámbito del Protocolo de Kioto, el sector de generación eléctrica español ha realizado una apuesta clara por las energías renovables y por el gas (ciclos combinados) como vectores de crecimiento de la capacidad de generación eléctrica del sistema español. De esta forma, el mix energético nacional ha experimentado profundas variaciones en la última década, pasando del tradicional peso dominante del carbón y la energía nuclear al predominio del gas natural y las energías renovables, como se aprecia en la Figura 1.

**Figura 1: Evolución de la potencia instalada en MW en régimen ordinario y régimen especial**



Nota: Datos extraídos de los informes anuales de REE ( Red Eléctrica de España)

Un análisis detallado de estos datos permite afirmar que, durante la última década, se han producido dos grandes renovaciones tecnológicas del parque generador: la instalación de más de 27.000 MW en ciclos combinados y más de 15.000 MW en instalaciones eólicas como se muestra en la Tabla 1. Sin embargo, el crecimiento tan significativo de estas dos tecnologías respecto al crecimiento de las demás tecnologías que conforman el mix energético español no se ha visto reflejado en su participación en el balance energético como se recoge en la Tabla 2. Así, a 31 de diciembre de 2011, mientras el 25,52% de la

potencia instalada corresponde a ciclos combinados sólo el 19,69% de la energía producida tiene su origen en esta tecnología. Y por otra parte, sólo el 15,04% de la energía producida es eólica cuando su potencial en cuanto a capacidad instalada representa el 19,64% de la capacidad total instalada en España.

**Tabla 1: Evolución de la potencia instalada en MW en ciclos combinados e instalaciones eólicas**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Ciclos combinados	4.394	8.285	13.134	16.410	22.107	23066	24.611	27.023	27.123
Instalaciones eólicas	5.491	8.507	9.928	11.279	14.058	16018	18.865	20.203	20.881

Nota: Datos extraídos de los informes anuales de REE

**Tabla 2: Potencia instalada y balance de energía a 31 de diciembre de 2011**

	Potencia instalada		Energía producida	
	MW	%	GWh	%
Hidráulica	17.538	16,5	27.650	9,89
Nuclear	7.777	7,32	57.670	20,62
Carbón	12.210	11,49	46.427	16,6
Fuel/gas	5.425	5,10	7.491	2,68
Ciclos combinados	27.123	25,52	55.074	19,69
<b>Total Régimen Ordinario</b>	<b>70.074</b>	<b>65,92</b>	<b>194.311</b>	<b>69,47</b>
Hidráulica	2.036	1,92	5.156	1,84
Eólica	20.881	19,64	42.060	15,04
Solar fotovoltaica	4.099	3,86	7.912	2,83
Solar termoeléctrica	949	0,89	2.209	0,79
Térmica renovable	1.142	1,07	4.640	1,66
Térmica no renovable	7.115	6,69	31.646	11,31
<b>Total Régimen especial</b>	<b>36.221</b>	<b>34,08</b>	<b>93.433</b>	<b>33,4</b>
<b>TOTAL</b>	<b>106.295</b>		<b>279.711</b>	

Nota: Datos extraídos del Informe 2011 de REE.

Estos datos demuestran que existen problemas reales de integración en el sistema eléctrico español de la tecnología de ciclo combinado y la eólica, lo que supone una importante pérdida en el aprovechamiento de la potencia total instalada.

## 2. Ciclos combinados como respaldo a renovables-eólica

Existe una fuerte correlación entre la generación por ciclos combinados y la eólica, cuya volatilidad es alta. La intermitencia en la producción de las energías renovables, especialmente la energía eólica, obliga a producir energía mediante centrales de ciclo combinado para garantizar el suministro eléctrico. Por ejemplo, durante el primer semestre de 2011, la máxima aportación por parte de los ciclos combinados (32% sobre la generación total en enero), coincide con una de las mínimas aportaciones de la energía eólica (8% sobre la generación total). Esta situación se repitió a la inversa en el mes de mayo, cuando en un momento de máxima generación eólica (38% sobre la generación total) los ciclos

combinados pasaron a estar disponibles ante cualquier eventualidad sin generar, con un 7% del total de la generación en ese momento.

Aunque el incremento de la potencia instalada de origen eólico, que ha conducido a batir records históricos de producción como los mostrados en la Tabla 3, puede resultar a priori un buen dato, el exceso de generación eólica ha provocado problemas de integración de generación eólica entre los que destacan el desacoplamiento de ciclos combinados e incluso la limitación de producción eólica como se recoge detalladamente en la Tabla 4.

**Tabla 3: Máximos históricos de energía eólica**

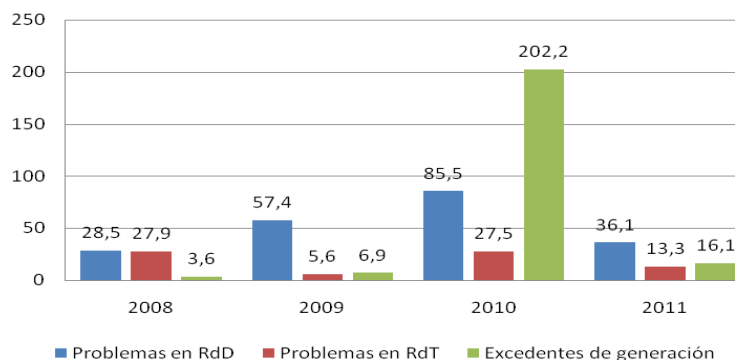
Fecha	Potencia (MW)	Energía horaria (MWh)	Energía diaria (MWh)	Cobertura de la demanda (%)
22/01/09	11.175	11.074	234.059	-
08/11/09	11.620	11.429	251.543	53,70
05/02/10	12.880	12.790	269.717	-
24/02/10	12.916	12.842	270.419	-
08/11/10	13.177	12.995		-
09/11/10	14.962	14.752	315.258	54,25
06/11/11	-	-	-	59,63

**Tabla 4: Integración en el mix energético**

Fecha	Incidencia	Instrucciones de REE
29/12/2009	Desvíos a bajar	Desacoplar tres ciclos combinados (675 MW).
30/12/2009	Falta de reserva a bajar. Elevada producción eólica	Desacoplar a seis ciclos combinados (1.253 MW) Limitar producción eólica a 10.600 MW. Desacoplar cinco ciclos combinados (1.165 MW).
01/01/2010	Desviación del programa de producción y demanda real	Limitar producción eólica a 6.981 MW.
14/02/2010	Desvíos a bajar	Desacoplar a nueve ciclos combinados y uno de carbón (2.348,5 MW)
06/02/2010	Desvíos a bajar	Desacoplar a cuatro ciclos combinados (703,4 MW)
21/02/2010	Desvíos a bajar	Desacoplar a cuatro ciclos combinados (705 MW)
22/02/2010	Desvíos a bajar	Desacoplar un ciclo combinado
23/02/2010	Desvíos a bajar	Desacoplar dos ciclos combinados

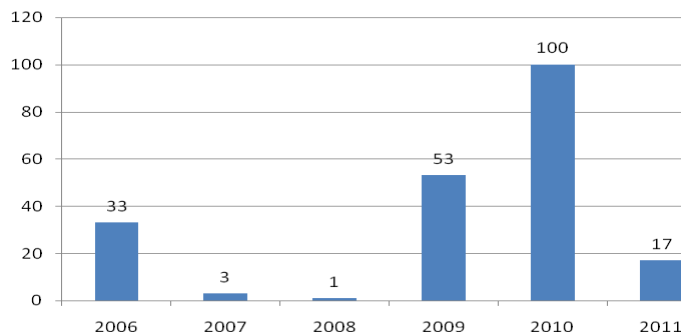
El exceso de generación eólica junto a problemas de integración en la red de transporte (RdT), en la red de distribución (RdD) ha supuesto la pérdida de más de 500GWh durante los últimos cuatro años como muestra la Figura 2, para poder garantizar la estabilidad de la red de distribución.

**Figura 2: Reducción de energía eólica en GWh**



Por otra parte, esta situación ha obligado a desacoplar un elevado número de centrales térmicas de ciclo combinado, como muestra la Figura 3, con el consiguiente desaprovechamiento de instalaciones generadoras de energía y las pérdidas económicas asociadas.

**Figura 3: Número de grupos desacoplados**



Ante esta situación, es necesario proponer soluciones que podrían centrarse en las siguientes líneas:

- Las mejoras de la previsión de la producción eólica con la mejora de los modelos de previsión meteorológica.
- Integración de los centros de control de instalaciones renovables y el CECRE de REE
- La futura construcción de nuevas líneas de conexión con Francia.
- Las mejoras introducidas en los procedimientos operativos de REE con la experiencia acumulada.
- Reforzar los bombeos.

Sin duda, los grandes perjudicados de la integración de las energías renovables en el mix energético español han sido los ciclos combinados, pues estas instalaciones y las empresas que las gestionan, después de haber realizado inversiones millonarias ven mermadas sus horas de producción anual, se ven obligadas al ciclado diario incrementando sus costes de operación y mantenimiento, reduciendo su eficiencia y, por tanto, su viabilidad económica. Así, resulta vital para la supervivencia, a largo plazo, de estas centrales, la introducción de mejoras tecnológicas que permitan incrementar su eficiencia reduciendo así sus costes de operación.

Por otra parte, se produce un fenómeno acumulativo de pérdida de energía eléctrica, pues al no disponer de tecnologías instaladas masivamente que permitan acumular el exceso de energía cuando la demanda es baja, lleva no solo a desconectar ciclos combinados, sino también a limitar la producción eólica.

Sin duda, el gran reto del sistema eléctrico español es poder acumular energía eléctrica cuando fluye el viento favorable, y poder descargarla después a conveniencia, incluso con rendimientos económicos muy interesantes, provocados por la diferencia de precios entre las horas pico y las horas valle de consumo.

Otro efecto que tiene la integración de generación eólica es el conocido en el sistema eléctrico como las restricciones técnicas por la contingencia de no disponer de suficiente reserva de potencia a subir en todas las zonas de generación del país. Esto conlleva el acoplamiento por restricciones de grupos térmicos produciendo así un sobrecoste y por lo tanto una subida del precio medio del mercado eléctrico debido a esta constante restricción sobre todo en los periodos horarios de pico.

Los acumuladores permitirán, a largo plazo, acumular energía aprovechando todas las ventajas medioambientales de tener un parque de generación eólica y renovable en general ampliamente instalado.

### **3. Acumuladores de energía**

Las baterías han sido usadas desde hace mucho tiempo y conectadas a red de transporte han ayudado en la estabilización del sistema eléctrico. Por ejemplo, en Puerto Rico se instaló un sistema con capacidad de 20 MW que descargaba en 15 minutos y se usaba para estabilizar frecuencia de la generación de la isla. En Alaska (Fairbanks) en el año 2003 se instalaron bancos de baterías de Níquel–Cadmio de capacidad 27 MW–15 minutos para sostener el voltaje al final de la red de transmisión.

La tecnología de acumulación es una tecnología generalmente considerada cara, con alto coste de mantenimiento y un corto plazo de duración en su vida útil. Sin embargo, se han ido desarrollando y mejorando tecnologías basadas en metales líquidos como las baterías de sulfuro de sodio instaladas en EEUU y Japón o las baterías de vanadio y de níquel cadmio instaladas en parques eólicos de Australia (Huxley Hill), Japón (Hokkaido) e Irlanda (Sorne). Por otra parte, en Japón se han instalado baterías avanzadas de alta temperatura con una capacidad de almacenamiento de 200 MW en polígonos industriales y subestaciones, regulando su carga/descarga día y noche.

Las empresas generadoras han dejado en un segundo plano estas tecnologías puesto que el coste, en principio, no justifica el beneficio obtenido, sin embargo los factores que apuntan a su uso masivo se están haciendo más poderosos cada día y se prevé un futuro muy halagüeño a estas tecnologías. La red norteamericana está día a día más congestionada, alimentándose este proceso por los trámites burocráticos para conseguir licencia para construir nuevas líneas que son cada vez más prohibitivos. La red europea que es más robusta, sin embargo está recibiendo un incremento imparable de renovables que también causa serios problemas.

Los costes de implantación de estas tecnologías son cada vez menores y aunque este hecho no garantiza que el almacenamiento de energía sea el único medio para resolver los problemas anteriormente mencionados, sí que sugiere que estas tecnologías, o algunas de ellas, serán clave en la resolución del problema.

Un estudio detallado del estado del arte del almacenamiento de energía nos muestra una gran diversidad de tipos y características. En esta ponencia revisamos al menos los 4 tipos que consideramos más interesantes en la actualidad.

- Batería ión litio.
- Batería redox de vanadio.
- Batería zinc-bromuro.
- Batería sulfuro de sodio

### 3.1 Batería Ión Litio

Los iones litio están en el cátodo formado por un óxido doble de cobalto y en el ánodo de carbono, la transferencia del ión litio se establece a través de una sal de litio como muestra la Figura 4. Sus características más significativas se recogen en la Tabla 5 donde destacan las ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

Figura 4: Esquema batería Ión-Litio

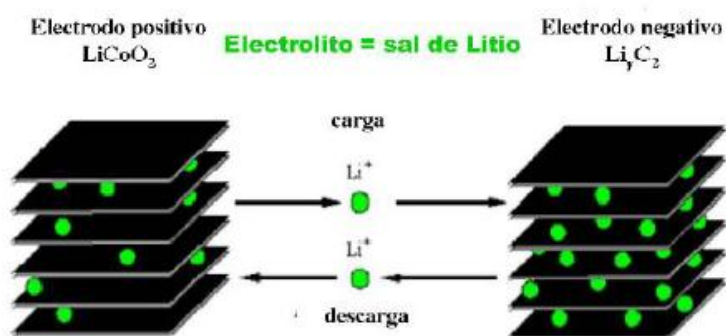


Tabla 5: Características baterías Ión-Litio

VENTAJAS	INCONVENIENTES
No requieren mantenimiento.	Necesita un circuito de protección.
Larga vida útil	Degradación a altas temperaturas.
Amplio rango de temperatura de trabajo	Pérdida de capacidad cuando sobrecarga
Baja tasa de autodescarga	Daños irreversibles en descarga bajo un límite.
Alta densidad de energía	
Capacidad de carga rápida.	
No presenta efecto memoria.	
Coste inicial moderado	

### 3.2 Batería Redox de Vanadio (VRB)

Está compuesta de dos electrodos de vanadio estando los electrolitos almacenados en tanques circulan a través de las celdas por sistema de bombeo como muestra la Figura 5. Sus características más significativas se recogen en la Tabla 6 donde destacan las ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

Figura 5: Esquema batería Redox de Vanadio

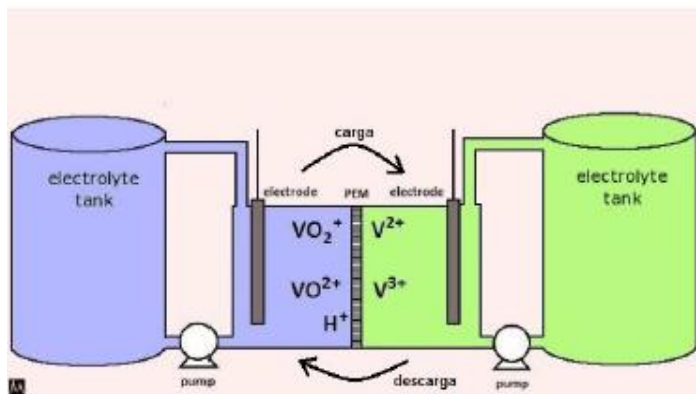


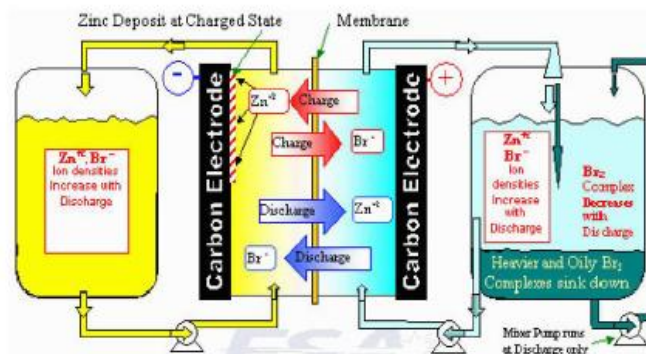
Tabla 6: Características baterías Redox de Vanadio

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Capacidad sin límite al aumentar el tamaño de los tanques de electrolito.	Densidad de energía pobre.
No se daña al permanecer descargada por largos periodos de tiempo.	Energía específica pobre.
Puede ser cargada por simple sustitución del electrolito.	Necesidad de sistema auxiliar para circulación y control de temperatura.
No se daña si accidentalmente se mezclan los electrolitos.	El diseño del sistema debe asegurar la seguridad de todas las baterías
Trabaja a temperatura ambiente.	

### 3.3 Batería de Bromuro de Zinc

Existen dos electrolitos, separados por una membrana que se almacenan en tanques y son bombeados hacia la celda donde tiene lugar la reacción como muestra la Figura 6. Sus características más significativas se recogen en la Tabla 7 donde destacan las ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

Figura 6: Esquema batería Bromuro de zinc





**Tabla 7: Características baterías Bromuro de Zinc**

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Buen nivel de energía específica.	Necesidad de sistema auxiliar para circulación y control de temperatura.
Buena eficiencia energética.	
Bajo impacto medioambiental.	
Trabaja a temperatura ambiente.	
Capacidad de carga rápida	
No se daña al realizar descargas 100%.	

### 3.4 Batería de Sulfuro de Sodio

Los dos electrodos de esta batería son uno de sodio (cátodo) y otro de azufre (ánodo) separados por un electrolito en cerámica (alúmina), capaz de conducir iones como muestra la Figura 7. Sus características más significativas se recogen en la Tabla 8 donde destacan las ventajas e inconvenientes de esta tecnología.

**Figura 7: Esquema batería Sulfuro de Sodio**



**Tabla 8: Características baterías Sulfuro de Sodio**

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Larga vida útil.	Muy elevada temperatura de trabajo
Baja tasa de autodescarga.	
No presenta efecto memoria.	
Alta energía específica y densidad de energía.	
Alta eficiencia.	

### 3.5 Análisis comparativo

Tras la presentación de las ventajas e inconvenientes más relevantes de estas 4 tecnologías, en la Tabla 9 se exponen los valores de cada una de las tecnologías presentadas correspondientes a los cinco parámetros que se consideran más significativos en relación a los estudios de viabilidad de cada aplicación. La densidad energética y la eficiencia quizás sean parámetros demasiado técnicos para los cálculos económicos, al igual que el estado de desarrollo comercial, sin embargo reflejen el riesgo en que se incurre al realizar la inversión. En cambio, la vida útil nos permite calcular en base a los ciclos de carga/descarga, y según el régimen de funcionamiento que se prevea, la duración de la instalación. El coste expresado en €/kw es un dato difícil de conseguir entre las referencias consultadas, y en realidad se debe considerar como orientativo, pues dependiendo del tamaño de la instalación y su localización en el planeta el coste puede variar tanto al alza como a la baja.

En España, las únicas instalaciones que el autor conoce son las de Endesa en las Islas Canarias, financiadas por el CDTI, con un coste de 14 MM € con 54% aportado por Endesa. La iniciativa probará tres tecnologías distintas de almacenamiento con baterías en La Palma, Gran Canaria y La Gomera, que en los tres casos buscan resultados distintos.

En La Palma, la opción seleccionada son los ultraconcentradores, que permiten almacenar una gran cantidad de potencia para descargar en muy poco tiempo. Con una capacidad de 4 MW para usar en tan sólo medio segundo, estas baterías se ubicarán en Los Guinchos (Tenerife), en el municipio de Breña Baja. Es una solución adecuada para aliviar problemas puntuales de la red si surge algún incidente en un grupo de generación o huecos de tensión o fluctuación de las renovables, evitando los apagones generales.

En La Gomera, la tecnología escogida es el Bromuro de Zinc, con 2,8 MW, que tiene muchos más ciclos de carga y descarga (hasta unos 13.000), lo que supone una vida útil, de emplearse todos los días, de cerca de 20 años. En este caso, la densidad energética es menor, pero la batería durará, previsiblemente, más del doble del tiempo medio actual.

En el caso de Gran Canaria, la batería será de Sulfuro de Sodio, similar a la que llevan los coches, pero con una capacidad de 1 MW que puede operar durante unas siete horas. Esto permitirá satisfacer una demanda importante, pero puntual, en la zona de La Aldea sin necesidad de instalar un grupo de generación o nuevas líneas. Este tipo de tecnología ya tiene 10 años de experiencia probada en el mundo y al ser de gran densidad de corriente, es una buena opción para "guardar" energía en el espacio de una habitación.

Los resultados de este tipo de proyectos son los que van a determinar la futura viabilidad de los acumuladores de energía.

**Tabla 9: Análisis comparativo**

Batería	Densidad energética (KW/Kg)	Eficiencia	Vida útil (ciclos de carga/descarga)	Coste (€/KW)	Estado actual de la tecnología
Ión litio.	150	0,85-0,95	3.000	1.300	Comercial y en desarrollo
Redox de vanadio	200	0,89-0,92	2.500	260	Comercial
Zinc-bromuro.	35	0,65-0,75	10.000	325	Instalada
Sulfuro de sodio.	75-85	0,75-0,8	2.000	1.500	Comercial

#### 4. Conclusiones

La instalación de acumuladores de energía, en sus distintas posibilidades tecnológicas es una necesidad a nivel mundial para garantizar el desarrollo sostenible y la implantación de energías renovables. Esta acumulación de energía, ayuda a resolver varios problemas del sector eléctrico: desacopla generación con la demanda, pudiendo diferir en el tiempo su actual dependencia y por lo tanto afectando a su precio y al mercado; aporta una capacidad extra de servicios de regulación del sistema eléctrico, pudiendo descargar o consumir unos MW que de otra forma se perderían (si hay más generación que demanda) o que habría que apagar incurriendo en sobrecostes.

En definitiva, los acumuladores son un vector que optimiza el sector eléctrico, son una realidad viable tecnológicamente y una opción económica dependiendo de la aplicación.

#### 5. Referencias

Bradford, Roberts. (2009 - July/August). Capturing Grid Power . Performance, Purpose and Promise of Different Storage Technologies – *IEEE power & energy magazine*.

DOE, Department of Energy. (2007,July) . Basic Research needs for electrical energy storage. Report of the Basic Energy Sciences Workshop for Electrical Energy Storage. Office of Basic Energy Sciences. [http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/EES\\_rpt.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/reports/files/EES_rpt.pdf)

EAC, Electricity Advisory Committee. (2008, December). Bottling electricity: Storage as a strategic tool for managing variability and capacity concerns in the modern grid.

Eyer, Jim & Brown, Ruben S. (2007). Guide to estimating benefits and market potential for Electricity Storage in New York.

Lee B. & Gushee D.. (2008, June). Massive electricity storage. *AICHE White Paper*  
McDowall. J. (2008). Understanding lithium-ion technology, BATTCON.  
<http://www.battcon.com/Archive Papers.htm#McDowall2008>

Nourai, A. (2007 Jun.) "Installation of the First Distributed Energy Storage System (DESS) at American Electric Power (AEP)," Sandia National Laboratories, SAND2007-3580,

Parliamentary Office of Science and Technology. (2008, April). Electricity storage.  
[www.parliament.uk/parliamentary-offices/post/pubs2008.cfm](http://www.parliament.uk/parliamentary-offices/post/pubs2008.cfm)

Rastler, D. (2008, Nov.). "New demand for energy storage," *Electric Perspectives*, vol. 33

Red Eléctrica Española. El sistema eléctrico español. Informes anuales 2001-2011.

Wide Area Energy Storage and Management system to Balance Intermittent Resources in the Bonneville Power Administration and California ISO Control Areas.

**Correspondencia (Para más información contacte con):**

D. Gines Delgado Calin  
Departamento de Electrónica, Tecnología de computadoras y Proyectos  
Dr Fleming s/n. 30202 Cartagena  
Phone: + 34 968 326575  
Fax: + + 34 968 326400  
E-mail: gines.delgado@upct.es