

Tras un primer capítulo introductorio de tipo conceptual y de resumen del libro, cada capítulo aborda las principales tecnologías englobadas en cada uno de los diferentes sistemas indicando en cada caso lo siguiente:

1. Los conceptos. De acuerdo con la voluntad divulgadora de la Fundación, este libro no da por conocido ningún concepto y se esfuerza por definirlos y explicarlos de la forma más pedagógica posible.
2. El funcionamiento detallado. En este apartado se ilustra, con el apoyo de un gran número de figuras y gráficos, cómo funciona cada tecnología de almacenamiento.
3. Los campos de aplicación. Cuando se habla de nuevas tecnologías, es muy importante tener siempre claro qué problemas resuelve o qué necesidad satisface, o si lo hace de una forma más eficiente que la existente hoy. La importancia relativa del tema a resolver nos mide la trascendencia de la tecnología analizada.
4. Los niveles de implantación. Pero los campos de aplicación pueden ser puramente teóricos. Por lo que es también básico conocer si esta aplicación potencial se ha realizado efectivamente en la práctica y hasta qué punto, mostrando ejemplos prácticos de su puesta en marcha.
5. La cuantificación de los resultados energéticos y la evaluación económica. El aspecto más importante del análisis de toda tecnología nueva es la evaluación de sus resultados energéticos (en términos de rendimiento) y de sus costes económicos (tanto en términos de inversión inicial como de explotación diaria). Muy a menudo ambos parámetros se hallan lejos del umbral de la rentabilidad y el principal objetivo es mejorar rendimientos y reducir costes.
6. Las ventajas y los inconvenientes. La Fundación insiste siempre, tanto en sus publicaciones como en su Museo del Gas, en la importancia de identificar siempre las ventajas y los inconvenientes de cada tecnología energética. No existen las “soluciones milagro”. Todas tienen sus aspectos positivos y negativos. Nuestro esfuerzo se dirige a ofrecer al ciudadano tantos datos de la realidad como nos sea posible, para que él pueda decidir según su propio criterio. Este libro no es una excepción.
7. Las claves para su desarrollo futuro. Finalmente, cada capítulo incluye un apartado final sobre el futuro de la tecnología en cuestión en términos de identificación de los elementos clave de los que depende su mayor o menor desarrollo en el inmediato futuro.



# Prólogo

Uno de los principales retos que tiene hoy el sector energético es el almacenamiento de electricidad. A diferencia de lo que ocurre con los combustibles (el gas natural, el petróleo o el carbón), no somos capaces todavía de almacenar la electricidad a precios y a rendimientos razonables. Esta incapacidad nos obliga a consumir la electricidad en el mismo momento que se genera, con todos los inconvenientes que ello supone.

Este problema se agrava cuando se trata de sistemas de generación discontinuos, como son la energía solar o eólica: no podemos almacenar la electricidad generada en los momentos de sol o viento para usarlos por la noche o en momentos sin viento, lo que obliga a disponer de sistemas de back-up para poder cubrir la demanda, con todo lo que ello representa en costes y complejidad en la operación de las redes de transporte y distribución.

Esta cuestión es también clave para el avance de los vehículos de transporte eléctricos: en efecto, la falta de sistemas de almacenamiento ligeros, económicos y muy eficientes están aplazando la irrupción de los vehículos eléctricos. La mejora ambiental relacionada con éstos está intrínsecamente ligada a la obtención de estas baterías.

Pero más allá de las energías renovables y de la electrificación del transporte, el almacenamiento es clave también para la mejora progresiva de las redes eléctricas y su interacción positiva con el cliente final: una electricidad “a la carta” es impensable sin eficientes sistemas de almacenamiento.

Por todo ello, la Fundación Gas Natural Fenosa decidió encargar al profesor Juan Ramón Morante la redacción de este libro, que pretende resumir el “estado del arte” de los sistemas de almacenamiento de electricidad en el mundo.

La información está organizada por los diferentes sistemas de almacenamiento: mecánicos, químicos, electroquímicos, electromagnéticos o térmicos. Se trata de un manual de referencia, con vocación de atlas o síntesis de todos los esfuerzos de investigación en marcha.





4.2. Funcionamiento detallado .....	175
4.3. Campos de aplicación .....	180
4.4. Ejemplos prácticos .....	180
4.5. Cuantificación de resultados energéticos y evaluación económica .....	187
4.6. Ventajas e inconvenientes .....	188
4.7. Claves para su desarrollo futuro .....	190
4.8. Tabla resumen .....	192
<b>5. Sistemas térmicos .....</b>	<b>193</b>
5.1. Conceptos .....	194
5.2. Funcionamiento detallado .....	194
5.3. Campos de aplicación .....	208
5.4. Ejemplos prácticos .....	210
5.5. Cuantificación de resultados energéticos y evaluación económica .....	216
5.6. Ventajas e inconvenientes .....	218
5.7. Claves para su desarrollo futuro .....	219
<b>6. Sistemas de superconducción .....</b>	<b>225</b>
6.1. Conceptos .....	226
6.2. Funcionamiento detallado .....	227
6.3. Campos de aplicación .....	227
6.4. Ejemplos prácticos .....	228
6.5. Cuantificación de resultados energéticos y evaluación económica .....	230
6.6. Ventajas e inconvenientes .....	231
6.7. Claves para su desarrollo futuro .....	232
<b>7. Electrónica de potencia .....</b>	<b>233</b>
7.1. Plantas de generación renovable .....	234
7.2. Redes inteligentes y microrredes .....	238
7.3. Vehículos eléctricos .....	240
7.4. Conclusiones .....	243
<b>8. Barreras a superar .....</b>	<b>247</b>
8.1. Barreras económicas y regulatorias .....	251
8.2. Barreras tecnológicas .....	260
8.3. Barreras geopolíticas .....	262
8.4. Barreras ambientales .....	269
8.5. Barreras sociales .....	273
8.6. Conclusiones .....	275
<b>9. Evaluación de costes económicos .....</b>	<b>281</b>
9.1. Modelo de evaluación de costes .....	281
9.2. Aplicación del modelo .....	284
9.3. Conclusiones .....	294
<b>Anexo. Glosario de términos técnicos .....</b>	<b>297</b>





# Índice

<b>Prólogo</b> .....	7
<b>1. Resumen ejecutivo. El almacenamiento de la electricidad</b> .....	11
1.1. El ciclo integral de la electricidad .....	11
1.2. La naturaleza efímera de la electricidad: la vinculación entre producción y consumo inmediato .....	13
1.3. El almacenamiento de la electricidad .....	17
1.4. La importancia del almacenamiento de electricidad .....	20
1.5. Las aplicaciones y usos del almacenamiento de electricidad .....	22
1.6. Estrategias funcionales de los sistemas de almacenamiento .....	23
1.7. Las tecnologías de almacenamiento: tipología .....	26
1.8. Criterios para evaluar las tecnologías de almacenamiento .....	47
1.9. Los principales retos para el desarrollo del almacenamiento eléctrico .....	49
1.10. Las tendencias de futuro: la no explotada capacidad del almacenamiento de electricidad .....	51
1.11. Tabla resumen .....	55
<b>2. Sistemas mecánicos</b> .....	61
2.1. Las centrales hidráulicas de bombeo .....	62
2.2. Sistemas de almacenamiento de energía por aire comprimido (CAES) .....	73
2.3. Volantes de inercia .....	83
2.4. Tabla resumen .....	89
<b>3. Sistemas electroquímicos</b> .....	91
3.1. Conceptos .....	93
3.2. Funcionamiento detallado .....	95
3.3. Campos de aplicación .....	97
3.4. Niveles de implantación .....	98
3.5. Cuantificación de resultados energéticos y evaluación económica .....	99
3.6. Ventajas e inconvenientes .....	101
3.7. Claves para su desarrollo .....	102
3.8. Las baterías de plomo-ácido .....	102
3.9. Las baterías secundarias con electrolito alcalino .....	111
3.10. Las baterías de sodio de alta temperatura .....	121
3.11. Las baterías de ion-litio .....	132
3.12. Las baterías de flujo redox .....	143
3.13. Nuevos tipos de baterías electroquímicas .....	155
3.14. Los condensadores electroquímicos .....	160
3.15. Tabla resumen .....	167
<b>4. Sistemas químicos</b> .....	171
4.1. Conceptos .....	173





### **Jaume Salom**

El Doctor Jaume Salom lidera el Grupo de Energía Térmica y Edificación del IREC desde el año 2010. Doctorado en Ingeniería Energética por la Universitat Politècnica de Catalunya. En el año 1999 fundó el proyecto AIGUASOL, el cual ha co-dirigido y convertido en una referencia internacional en el campo de la eficiencia energética térmica, energías renovables, desarrollo de software y análisis energéticos de edificios. Se trata de uno de los principales actores que ha participado en el desarrollo del software TRANSOL para la simulación y el diseño de sistemas solares térmicos y ha participado en varios cursos de postgrado como profesor invitado, así como participando y coordinando varios proyectos Internacionales.

### **Elena Fuentes**

Responsable del Laboratorio semi-virtual del IREC en Tarragona. Doctora en Ingeniería Química por la Universidad Politécnica de Valencia. Tiene más de 6 años de experiencia en el campo de la investigación como investigadora asociada en la Universidad de Manchester (UK). Ha participado en varios proyectos internacionales y es experta en la dirección de ensayos experimentales en laboratorios.

### **Lluís Trilla**

Ingeniero Industrial y doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universitat Politècnica de Catalunya. Ha trabajado en el desarrollo de proyectos de entroncamiento eléctrico en baja y media tensión y en el diseño de estrategias de control para actuadores eléctricos incluyendo su implementación y verificación. Actualmente trabaja en el IREC en las áreas de modelización y control de aerogeneradores, diseño de convertidores de potencia y en el análisis de integración a red de parques de generación eólica y undimotriz vinculados a proyectos industriales y públicos.

### **Francisco Díaz**

Recibió la licenciatura en Ingeniería Industrial en 2009 y se doctoró en Ingeniería Eléctrica en 2013 por la Universitat Politècnica de Catalunya. Desde septiembre de 2009 trabaja como investigador en el Área de Ingeniería Eléctrica del IREC. Además, durante la segunda mitad de 2012 colaboró como investigador en Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES, Kassel, Alemania). Su experiencia incluye aspectos de modelización, simulación y testeo experimental en laboratorio de sistemas mecánicos y eléctricos. Su dedicación actual se centra en el ámbito de la integración en red y desarrollo de nuevos conceptos para parques eólicos, incluyendo la aplicación de sistemas de almacenamiento de energía. Además, participa en actividades de divulgación sobre almacenamiento de energía y estudia su aplicación en proyectos en el ámbito de la fusión nuclear así como en el de los centros de datos.

### **Miguel Cruz**

Ingeniero Industrial por la Escuela Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, y Máster en Economía y Regulación de los Servicios Públicos por la Universitat de Barcelona. Desde 2006 ha estado implicado en numerosos proyectos de investigación en el ámbito de la Economía Energética, siendo miembro del Centro de Investigación CITCEA-UPC (2006-2007), de la Comisión Nacional de Energía (2008), y del IREC (2009 hasta la actualidad). Ha sido jefe de proyecto y/o investigador principal en más de 15 de estos proyectos. Sus áreas de interés son el análisis económico y regulatorio del sector eléctrico, y la aplicación de la investigación operativa para la operación y planificación de los sistemas energéticos. Ha publicado más de 10 artículos en conferencias científicas y revistas. Ha sido investigador visitante en el Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores do Porto, Portugal.





## Autores

---

### **Juan Ramón Morante**

El profesor Juan Ramón Morante es, desde 1985, catedrático de la Facultad de Física de la Universitat de Barcelona y desde 2009 es el director del Área de Materiales Avanzados para la Energía del Instituto de Investigación en Energía de Cataluña, IREC. Previamente ha sido vicedecano y decano de la Facultad de Física de la Universitat de Barcelona, director del Departamento de Electrónica de dicha universidad, jefe de estudios de Ingeniería Electrónica y co-coordinador del Máster interuniversitario entre la Universitat de Barcelona y la Universitat Politècnica de Catalunya sobre Ingeniería en Energía.

Actualmente es también director de la Red de la Generalitat de Catalunya sobre Materiales Avanzados para la Energía, Xarmae, vicepresidente de la Sociedad Europea para la Investigación en Materiales, E-MRS, y miembro de diferentes comités internacionales.

Sus actividades, inicialmente, se centraron en la Investigación y Desarrollo de Materiales y Dispositivos Electrónicos habiéndose focalizado en el campo de los sensores, actuadores, microsistemas y sistemas totalmente autónomos.

Actualmente, sus actividades de investigación se centran en los mecanismos de transferencia de energía implicando electrones, fotones, fonones y moléculas químicas, habiéndose centrado en su aplicación en las tecnologías en el campo de los dispositivos para energías renovables y los sistemas energéticos basados en el uso de nano materiales y su funcionalización. Asimismo, ha centrado sus desarrollos tecnológicos en el campo de la conversión y almacenamiento de la energía.

Es co-autor de más de 500 publicaciones y diversas patentes, ha dirigido 35 tesis doctorales, ha participado/coordinado numerosos proyectos en diferentes programas internacionales e industriales, ha sido organizador de diferentes conferencias científicas tecnológicas internacionales en el campo de sensores/microsistemas y de la “nano-energía” y ha sido distinguido

con la medalla Narcís Monturiol de la Generalitat de Catalunya.

### **Cristina Flox**

Doctora en Química por la Universitat de Barcelona, especializada en Electroquímica y Diseño de Reactores de Flujo.

Actualmente es investigadora dentro del Área de Materiales Avanzados para la Energía del IREC. Su actividad se basa en el diseño y síntesis de materiales avanzados nanoestructurados aplicados a nuevas tecnologías de almacenamiento de energía electroquímica, así como en el desarrollo de nuevos métodos para diagnosticar y pronosticar su tiempo de vida.

### **Marcel Skoumal**

Doctor en Química por la Universitat de Barcelona. Actualmente trabaja en el IREC en el Diseño y Caracterización de Prototipos de Baterías.

Se especializó en tratamientos químicos y electroquímicos para la eliminación de fármacos y productos de higiene personal de aguas para el consumo humano, y partir de 2010 su actividad se ha focalizado en el campo de la energía centrándose en las baterías de flujo para mejorar sus cualidades y estudiar variantes como las baterías de flujo de semisólidos, basadas en la química del ión litio.

### **Marc Vives**

Ingeniero de proyectos en el Área de Eficiencia del IREC. Ingeniero en Industrias Agrarias y Alimentarias y Máster en Energías Renovables. Es experto en energía solar térmica aplicada a viviendas y edificios así como grandes instalaciones aplicadas a la industria u otros grandes consumidores térmicos. Dispone de 8 años de experiencia en sistemas de energía renovable realizando tareas de ingeniería así como proyectos de consultoría técnica.





## Coordinación y dirección

---

**Juan Ramón Morante.** Director del Área de Materiales Avanzados para la Energía del Instituto de Investigación en Energía de Cataluña, IREC.

## Colaboradores del IREC

---

**Cristina Flox.** Doctora en Química, Área de Materiales Avanzados para la Energía.

**Marcel Skoumal.** Doctor en Química, Diseño y Caracterización de Prototipos de Baterías.

**Marc Vives.** Ingeniero de Proyectos, Área de Eficiencia.

**Jaume Salom.** Doctor en Ingeniería Eléctrica, Grupo de Energía Térmica y Edificación.

**Elena Fuentes.** Doctora en Ingeniería Química, Laboratorio semi-virtual en Tarragona.

**Lluís Trilla.** Ingeniero industrial y doctor en Ingeniería Eléctrica, Área de Modelización y Control de Aerogeneradores

**Francisco Díaz.** Doctor en Ingeniería Eléctrica, Área de Ingeniería Eléctrica.

**Miguel Cruz.** Ingeniero industrial, Área de Economía Energética.

## Edita

---

### **Fundación Gas Natural Fenosa**

Plaça del Gas, 8

08201 Sabadell (Barcelona)

Teléfono: 93 412 96 40 Fax: 93 745 03 20

[www.fundaciongasnaturalfenosa.org](http://www.fundaciongasnaturalfenosa.org)

1ª edición, 2014

ISBN: 978-84-695-9897-9

Depósito legal: B-9269-2014

Impreso en España

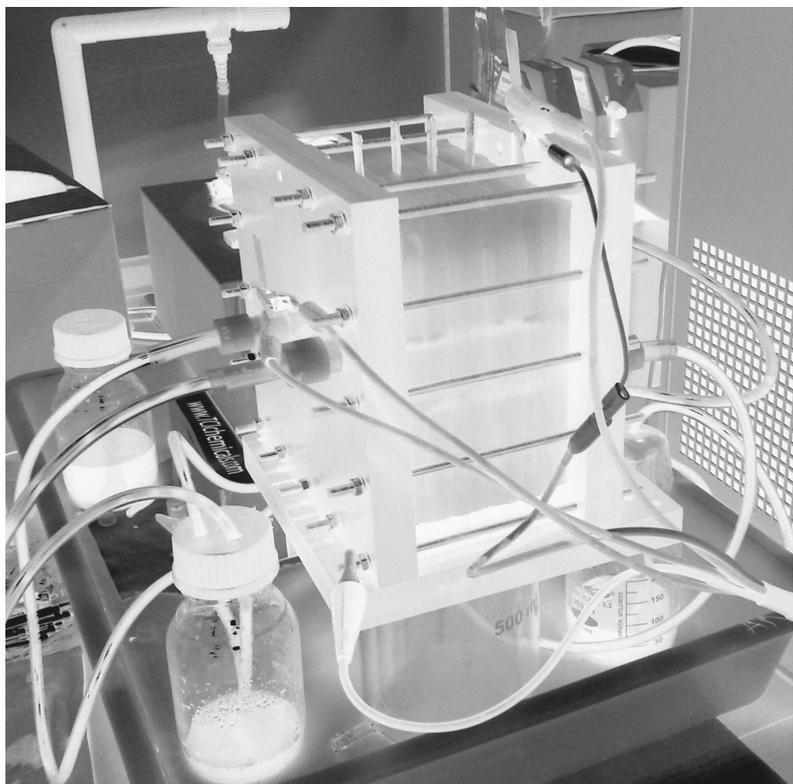


# El almacenamiento de la electricidad

Juan Ramón Morante

Energía y medio ambiente

26



# El almacenamiento de la electricidad

Juan Ramón Morante

Energía y medio ambiente

26

