

Estudio

# ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL ALMACENAMIENTO DETRÁS DEL CONTADOR EN ESPAÑA

008



[www.idae.es](http://www.idae.es)



ANÁLISIS DEL  
ESTADO ACTUAL DEL  
ALMACENAMIENTO  
DETRÁS DEL CONTADOR  
EN ESPAÑA



Madrid, junio 2021  
NIPO: 665-21-013-3

**IDAE**  
**Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía**

Autor: KMO Energy S.L.  
Revisión de la edición: IDAE  
Edita: IDAE  
Diseño y Maquetación: Composiciones RALI, S.A.

# ÍNDICE

1. Introducción .....	7
1.1. Almacenamiento detrás del contador.....	8
2. Tecnologías de almacenamiento detrás del contador .....	11
2.1. Almacenamiento electroquímico.....	12
2.1.1. <i>Li-ion</i> .....	12
2.1.2. <i>Resto de tecnologías de almacenamiento electroquímico</i> .....	14
2.1.3. <i>Comparativa de tecnologías</i> .....	15
2.2. Almacenamiento térmico .....	16
2.2.1. <i>Almacenamiento de calor sensible</i> .....	16
2.2.2. <i>Otras tecnologías de almacenamiento térmico</i> .....	18
2.3. Otras tecnologías de almacenamiento.....	19
2.3.1. <i>Almacenamiento eléctrico</i> .....	19
2.3.2. <i>Almacenamiento mecánico</i> .....	20
3. Retos para el desarrollo del almacenamiento detrás del contador en España .....	21
3.1. Retos derivados de la estructura actual de los mercados eléctricos .....	21
3.2. Retos regulatorios .....	24
3.3. Retos tecnológicos .....	25
3.4. Retos económicos .....	27
3.5. Otros retos: seguridad, estandarización y reciclaje .....	27
4. Rentabilidad de los sistemas de almacenamiento detrás del contador .....	29
5. Modelos de negocio .....	35
5.1. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor sin acceso a mercado .....	36
5.2. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor con acceso a mercado.....	41
5.3. Dispositivos de almacenamiento propiedad de terceros.....	44
6. Cadena de valor industrial.....	47
7. Conclusiones .....	51
8. Agradecimientos.....	53
9. Bibliografía .....	55
ANEXO .....	57



# 1 Introducción

Las políticas de energía y clima en el ámbito de la Unión Europea (UE) han evolucionado hacia una regulación cada vez más ambiciosa desde la creación de los objetivos «20-20-20» en el año 2009<sup>1</sup>. En el Consejo Europeo de octubre de 2014 los Estados miembros de la UE acordaron el marco de actuación de la UE en materia de clima y energía hasta el año 2030, que incluía al menos un 40% de reducción de emisiones de efecto invernadero respecto al año 1990, al menos un 27% de energía proveniente de renovables y al menos un 27% de mejora de la eficiencia energética. Posteriormente, los Acuerdos de París de noviembre del año 2015 (COP21) marcaron el contenido de las directrices europeas del conocido como Paquete de Energía Limpia<sup>2</sup>, que ponen al consumidor en el centro del sistema energético y promueven cambios profundos en la manera en la que se produce y consume la energía. Las directivas recogidas en el Paquete de Energía Limpia aumentan la ambición de los objetivos (que pasan a ser a escala UE en lugar de nacionales) hasta un 32% en el caso de las energías renovables y a un 32,5% en el caso de la eficiencia energética. Además, en virtud de los Acuerdos de París y en línea con el compromiso con la acción climática global, la UE aspira a ser climáticamente neutral (cero emisiones netas de gases de efecto invernadero) en el año 2050<sup>3</sup>.

En el ámbito español, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030<sup>4</sup> define los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, de penetración de energías renovables y de eficiencia energética con el objetivo de consolidar una trayectoria de neutralidad climática de la economía y la sociedad en el horizonte 2050. En este sentido, el Plan prevé el desarrollo del almacenamiento como una de las herramientas clave para otorgar flexibilidad al sistema eléctrico de cara a dar apoyo al crecimiento significativo en generación renovable, así como contribuir a la gestión de las redes eléctricas, la participación de la ciudadanía en el cambio de modelo energético y una mayor competencia e integración en el mercado eléctrico.

El Consejo de Ministros aprobó el 9 de febrero de 2021 la Estrategia de almacenamiento<sup>5</sup> que tiene como objetivo abordar el análisis técnico de las distintas alternativas de generación, la diagnosis de los retos actuales del almacenamiento energético, las líneas de acción para avanzar en el cumplimiento de los objetivos previstos y las oportunidades que supone el almacenamiento para el sistema energético y para el país. Además, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, incluye la transición energética como una de las diez políticas palanca que promover en el escenario poscovid. Dentro de esta política, se identifica la necesidad de impulsar proyectos en infraestructuras eléctricas, promoción de redes inteligentes y despliegue de la flexibilidad, que, entre otros, favorecerán el despliegue de las tecnologías de almacenamiento para acelerar en la senda de la descarbonización, al tiempo que se impulsarán nuevos modelos de negocio y proyectos innovadores en integración sectorial inteligente.

---

1 Comisión Europea: 2020 Climate & Energy Package, 2009. Objetivos del documento: 20% de reducción de emisiones de efecto invernadero respecto al año 1990, 20% de energía proveniente de renovables y 20% de ahorro energético.

2 Comisión Europea: Clean energy for all Europeans Package, 2019.

3 Comisión Europea: A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, 2018.

4 Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

5 Estrategia de Almacenamiento Energético: [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento\\_tcm30-522655.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf)

A finales de junio 2021, se publicó el Real Decreto 477/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba la concesión directa a las comunidades autónomas y a las ciudades de Ceuta y Melilla de ayudas para la ejecución de diversos programas de incentivos ligados al autoconsumo y al almacenamiento, con fuentes de energía renovable, así como a la implantación de sistemas térmicos renovables en el sector residencial, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. Este Real Decreto establece un marco de apoyo, entre otros, para el almacenamiento detrás del contador.

La Estrategia de Almacenamiento presenta una cuantificación de las necesidades mínimas de almacenamiento para España, derivadas de los objetivos del PNIEC y de la Estrategia de Descarbonización a Largo Plazo (ELP) 2050. Así, se define que se debería pasar de los 8,3 GW disponibles en la actualidad a unos valores de alrededor de 20 GW en 2030 y 30 GW en 2050 de potencia de almacenamiento total disponible en esos años, incluyendo un mínimo de 400 MW de baterías detrás del contador. Esta cuantificación incluye el almacenamiento a gran escala diario y semanal, almacenamiento detrás del contador y almacenamiento estacional, según el estado actual de la tecnología.

El objetivo de este informe es el de poner el foco en el estado de los sistemas de almacenamiento detrás del contador en España, es decir, aquellos sistemas asociados a consumidores residenciales, comerciales o industriales. Es importante diferenciar este tipo de sistemas de los que se sitúan delante del contador, que incluyen aquellos sistemas conectados directamente a las redes de distribución o transporte y con un mayor tamaño asociado, una de las variables clave a la hora de definir la rentabilidad de las distintas tecnologías de almacenamiento disponibles. En este sentido, el documento no entra en la descripción de aquellas soluciones que están ganando protagonismo en las instalaciones a mayor escala, como puede ser el almacenamiento energético mediante sales fundidas o el hidrógeno, aunque en el futuro la evolución tecnológica y económica del mercado puede abrir la posibilidad de que estas nuevas tecnologías sean también coste-eficientes para el consumidor final.

A continuación se presenta una definición de los sistemas de almacenamiento detrás del contador. En el capítulo 2, se lleva a cabo un análisis de las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía, haciendo hincapié en aquellas tecnologías más susceptibles de ser empleadas en las instalaciones de los consumidores finales. Posteriormente, en el capítulo 3, se describen las barreras tecnológicas, del mercado eléctrico, económicas, regulatorias y de operación existentes en la actualidad para el desarrollo de este tipo de sistemas. En el cuarto apartado se analiza la rentabilidad de los sistemas de almacenamiento en diferentes sectores. En el capítulo 5 se definen y se muestran diversos ejemplos de nuevos modelos de negocio vinculados a los sistemas de almacenamiento situados detrás del contador, y en el sexto se muestran la cadena de valor y el posicionamiento del sector industrial español en esta. Finalmente, en el séptimo y último capítulo, se muestran las conclusiones del documento.

## 1.1. Almacenamiento detrás del contador

Los sistemas de almacenamiento de energía pueden clasificarse entre sistemas delante del contador o *in front of the meter* y sistemas detrás del contador o *behind the meter*. En la literatura, estos conceptos se pueden definir de diversas maneras en relación con diferentes características de los sistemas: su localización física en la red eléctrica, su relación con el consumidor, los servicios que prestan y la propiedad de dicho sistema.

La ubicación de los sistemas de almacenamiento en la red eléctrica es una de las características más empleadas en la literatura a la hora de diferenciar entre los sistemas delante y detrás del contador.

La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), por ejemplo, describe en un informe<sup>6</sup> los sistemas detrás del contador como instalaciones localizadas en los centros de consumo de energía o cerca de ellos y detrás del punto de conexión entre los operadores del sistema eléctrico y los consumidores, ya sean residenciales, comerciales y/o industriales. En cambio, los sistemas delante del contador están conectados directamente a las redes de distribución y transporte o asociados a plantas de generación conectadas a estas redes y se emplean para proveer de servicios requeridos por los operadores del sistema (servicios de ajuste, regulación de frecuencia, etc.) o realizar actividades de arbitraje en los mercados de energía, entre otros. La posibilidad de ofrecer este tipo de servicios va a dejar de ser una diferenciación, en tanto en cuanto la normativa española ya recoge la figura del agregador<sup>7</sup>, a través del cual los sistemas de almacenamiento detrás del contador también podrán proveer este tipo de servicios.

Además de diferenciar entre sistemas ubicados detrás o delante del contador, otra característica importante es que haya un consumidor de energía asociado a la instalación donde esté ubicado el sistema de almacenamiento. Como ejemplo, un informe del Instituto Orkestra<sup>8</sup> define los sistemas detrás del contador como equipamientos localizados tras el contador del consumidor, y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL), en otro informe<sup>9</sup>, también diferencia entre sistemas localizados a ambos lados del contador eléctrico del consumidor.

Otro factor diferenciador entre los sistemas delante y detrás del contador se puede encontrar en las aplicaciones para las que se utilizan. En el informe de IRENA citado anteriormente se describen los sistemas delante del contador como proveedores de servicios requeridos por los operadores del sistema para aplicaciones de mejora de las redes de distribución y transporte. En cambio, los sistemas detrás del contador, aunque, como se ha comentado anteriormente, también pueden ofrecer servicios requeridos para la mejora de la operación de las redes eléctricas, normalmente se emplean para optimizar los costes energéticos de sus propietarios (autoconsumo en horas sin producción solar, venta de energía en horas más caras, reducción de picos de demanda, etc.).

Por último, existe otro rasgo distintivo entre los sistemas mencionados, y es la propiedad de estos. De manera general, se puede decir que las instalaciones delante del contador son operadas por empresas proveedoras de servicios energéticos, mientras que los sistemas detrás del contador son generalmente propiedad de los clientes (exceptuando los sistemas detrás del contador en propiedad de terceros que ofrecen el almacenamiento como servicio; véase el capítulo 5). En Europa, los propietarios de las instalaciones delante del contador excluyen a los operadores de las redes de distribución, los cuales únicamente pueden poseer dichas instalaciones como excepción, en los supuestos que recoge la Directiva 2019/944<sup>10</sup>, y que se deberán definir en el contexto español en el marco del recientemente aprobado Real Decreto-ley 23/2020.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de sistema de almacenamiento detrás del contador conectado a la red:

6 Behind-the-meter batteries - Innovation landscape brief. IRENA 2019.

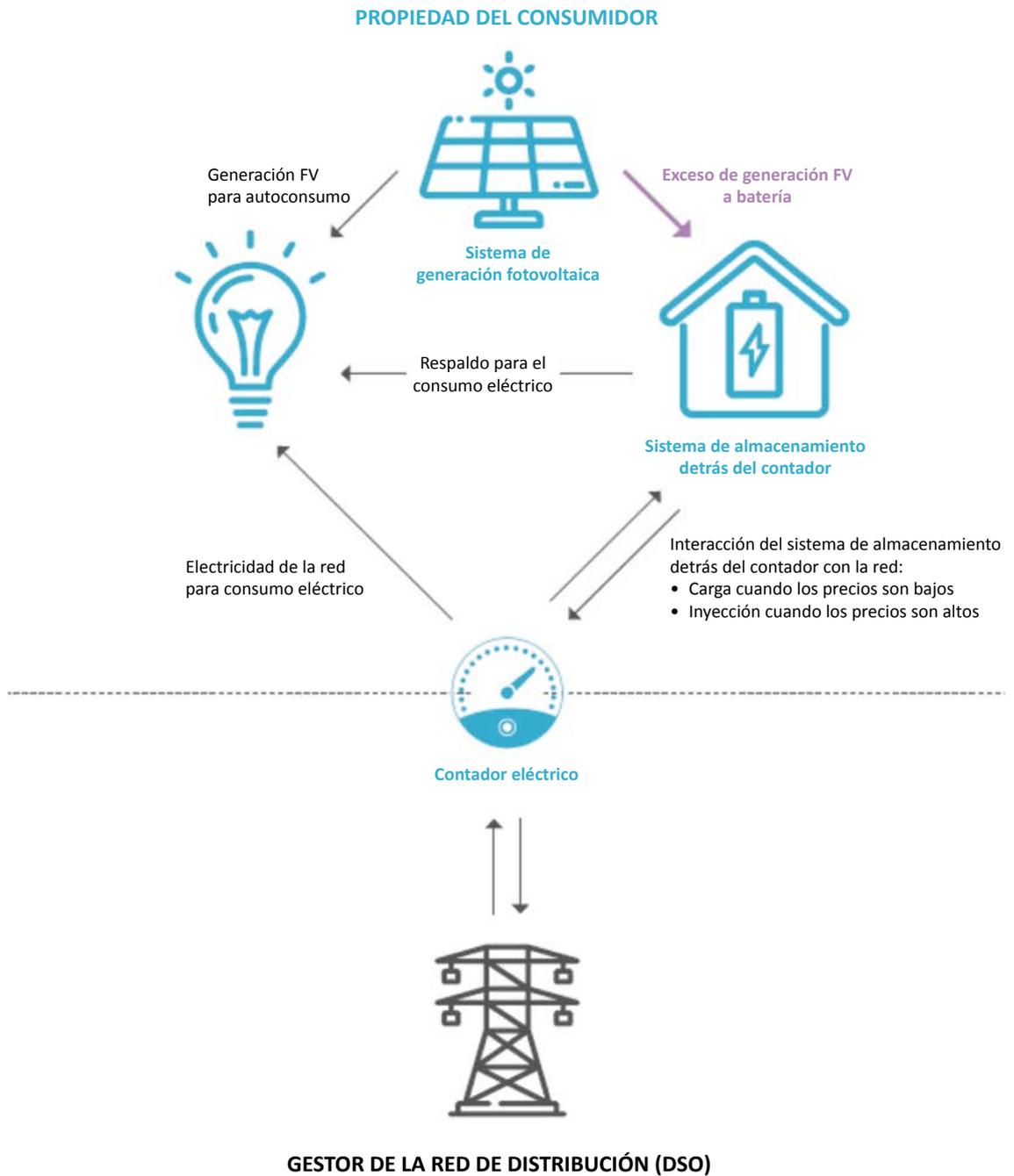
7 Real Decreto-ley 23/2020, por el que se aprueban medidas en materia de energía y en otros ámbitos para la reactivación económica.

8 *Modelos de negocio en recursos distribuidos de electricidad*. Cuadernos Orkestra - Instituto Vasco de competitividad (Fundación Deusto), 2020.

9 *An overview of behind-the-meter solar-plus-storage regulatory design*. USAID - NREL 2020.

10 Directiva (UE) 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de junio de 2019, sobre normas comunes para el mercado interior de la electricidad y por la que se modifica la Directiva 2012/27/UE.

Figura 1. Ejemplo de configuración detrás del contador



Fuente: Behind-the-meter batteries - Innovation landscape brief, IRENA. 2019.

## 2 Tecnologías de almacenamiento detrás del contador

De la totalidad de tecnologías de almacenamiento existentes, en el presente documento se han analizado aquellas consideradas como detrás del contador (asociadas a consumidores en el sector residencial, comercial e industrial), las cuales se describen en este apartado.

Entre las tecnologías que no se han analizado se encuentran, por ejemplo, algunos sistemas de almacenamiento mecánico, como el bombeo, el aire líquido y el aire comprimido, los cuales se han descartado por ser sistemas que, hoy por hoy, necesitan grandes infraestructuras y disponen de capacidades energéticas muy elevadas como para ser consideradas detrás del contador. Asimismo, las plantas solares termoeléctricas (ampliamente utilizadas en el almacenamiento energético mediante sales fundidas) se han considerado también como sistemas delante del contador ya que a día de hoy son instalaciones vinculadas a grandes instalaciones junto con la generación. Lo mismo se aplica en el caso de las tecnologías de almacenamiento químico como el hidrógeno o el gas natural sintético.

Las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía detrás del contador que se han considerado en el presente documento se clasifican en el siguiente esquema:

Figura 2. Tecnologías de almacenamiento de energía detrás del contador

Almacenamiento electroquímico	Almacenamiento térmico	Almacenamiento eléctrico	Almacenamiento mecánico
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Li-ion</li> <li>• Plomo ácido</li> <li>• Flujo</li> <li>• Alta temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calor sensible</li> <li>• Calor latente</li> <li>• Termoquímico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Supercondensadores</li> <li>• Superconductores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volantes de inercia</li> </ul>

Fuente: elaboración propia.

El *almacenamiento electroquímico* se basa en la acumulación de energía química que se emplea para convertirla en energía eléctrica mediante procesos electroquímicos de oxidación y reducción que suceden en los electrodos (ánodo y cátodo) con la ayuda del electrolito. Existen diversas tecnologías, las cuales se pueden clasificar entre baterías convencionales y baterías de flujo, de características muy diferentes por la variedad de materiales utilizados.

El *almacenamiento térmico* consiste en acumular la energía por medio del aprovechamiento térmico. Se diferencian tres tecnologías: las que se basan en el calor sensible (cambios de temperatura), las que emplean el calor latente (cambios de fase) y aquellas basadas en reacciones termoquímicas.

El *almacenamiento eléctrico* se divide en sistemas electrostáticos y magnéticos. Los sistemas electrostáticos utilizan supercondensadores que almacenan la energía en el campo eléctrico entre dos

electrodos, mientras que los magnéticos utilizan materiales superconductores (SMES) que almacenan la energía como campo magnético creado por una corriente eléctrica a través de una bobina superconductora.

El *almacenamiento mecánico* se refiere a volantes de inercia (*flywheels*) que almacenan energía cinética mediante un disco de inercia que gira mecánicamente acoplado a un servomotor.

En los siguientes apartados se lleva a cabo una descripción del principio de funcionamiento, principales características, contextualización actual y perspectivas de las tecnologías de almacenamiento consideradas apropiadas para aplicaciones detrás del contador, entre las cuales predominan por su elevado grado de madurez las baterías electroquímicas (especialmente las de tipo Li-ion). tanto en aplicaciones estacionarias como en vehículos eléctricos, y el almacenamiento de calor sensible (por ejemplo, sistemas ACS en el sector residencial).

## 2.1. Almacenamiento electroquímico

### 2.1.1. Li-ion

Algunas tipologías de las baterías de Li-ion empleadas tanto en instalaciones estacionarias como en movilidad (vehículo eléctrico) son las siguientes:

- Litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC).
- Litio-manganeso óxido (LMO).
- Litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA).
- Litio-hierro-fosfato (LFP).
- Litio-titanio (LTO).

En general, las baterías Li-ion disponen de densidades de potencia y energía elevadas en comparación con otros tipos de baterías. Además, otras características como una muy buena eficiencia y un ciclo de vida relativamente largo hacen que este tipo de baterías sean las más ampliamente utilizadas en aplicaciones detrás del contador. Se debe tener en cuenta, no obstante, que la eficiencia disminuye entre un 0,5 y un 1,5% por cada 1.000 ciclos durante su vida útil. Algunas desventajas son el riesgo de deflagración y el elevado coste en comparación con la tecnología de plomo ácido.

Otra característica importante que se debe tener en consideración es su degradación. A temperaturas y estados de carga elevados la capacidad energética puede disminuir incluso sin utilizar la batería por un fenómeno que atrapa los iones de litio en el ánodo. Otro tipo de degradación sucede durante el funcionamiento normal de la batería y consiste en la formación de una capa metálica en la superficie del ánodo a causa de reacciones químicas no deseadas. Se deben evitar corrientes elevadas y bajas temperaturas para impedir este tipo de degradación.

En relación con las materias primas de este tipo de baterías, cabe destacar la importancia en la utilización de mezclas con componentes abundantes y no contaminantes. De las cinco tipologías mencionadas, hay dos que utilizan componentes tóxicos, como el níquel y el cobalto (baterías NMC y NCA). Además, las reservas mundiales de este último material son escasas. Sin embargo, el resto de las mezclas (baterías LMO, LFP y LTO) emplean materiales abundantes y no tóxicos.

### Ejemplo 1: AUTOCONSUMO FOTOVOLTAICO CON BATERÍA DE LI-ION

A continuación, se muestra un caso real en el sector residencial de un sistema con una instalación fotovoltaica y batería de tecnología Li-ion de segunda vida fabricada por la empresa española BeePlanet Factory.

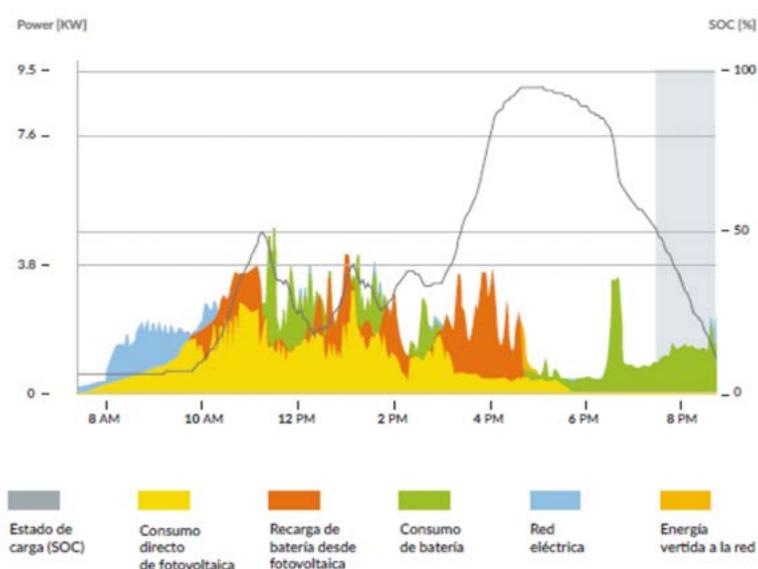
Características de la instalación:

- Castilla y León.
- Vivienda unifamiliar de 270 m<sup>2</sup>.
- 2 personas.
- 1 vehículo eléctrico.
- Instalación fotovoltaica de 5,6 kWp.
- BeeBattery Home de 4 kWh.
- Inversor Ingeteam de 6 kW.

Figura 3. SEQ Figura \\* ARABIC 3. Datos técnicos de la batería y ejemplo de monitorización de la instalación

		4kWh	8kWh	12kWh
<b>BATERÍA</b>	Tipo de batería	EV Second Life		
	Química	LMO		
	Número de módulos	12 módulos	24 módulos	36 módulos
	Capacidad nominal (Wh)	4000 Wh	8000 Wh	12000 Wh
	Capacidad nominal (Ah)	45 Ah	90 Ah	135 Ah
	Potencia nominal	4000 W	5000W	5000W
	Tensión nominal	90 V		
	Tensión de trabajo	72 V - 100 V		
	Corriente máxima	50 A		
	Profundidad de descarga (DoD)	90 %		
Número de ciclos estimado (90% DoD, 25°C)	> 2200 ciclos			

Consumo	PV Consumo	Descarga batería	Red	Ratio de autoconsumo
24,79 kWh	11,37 kWh	5,7 kWh	7,72 kWh	68,84 %



Fuente: BeePlanet Factory.

Además de sistemas estacionarios, este tipo de baterías también se emplean de forma mayoritaria en los vehículos eléctricos (VE), los cuales también pueden actuar como sistemas de almacenamiento detrás del contador mediante las tecnologías conocidas como V2G (*vehicle-to-grid*, en inglés) y V2B (*vehicle-to-building*, en inglés). Estas se basan en la carga inteligente mediante la conexión bidireccional entre la red eléctrica y el VE.

El V2G consiste en un sistema en el que la energía almacenada en el VE puede ser devuelta a la red eléctrica, posibilitando la interacción entre las baterías y la red con diversos objetivos, como conseguir beneficios económicos de los consumidores finales (comprar electricidad en horas baratas y vender en horas caras), optimizar la regulación de las redes eléctricas y/o ayudar en la integración de las energías renovables (recarga de VE mediante excedentes provenientes de instalaciones renovables).

Por su parte, el V2B es una variante de la tecnología anterior en la que las baterías de los VE se pueden emplear como fuente de alimentación de edificios o viviendas, permitiendo la optimización de la factura energética de los usuarios finales y/o la utilización de las baterías como sistema *back-up* en el caso de haber problemas de suministro desde la red.

### 2.1.2. Otras tecnologías de almacenamiento electroquímico

El resto de las tecnologías de almacenamiento electroquímico (plomo ácido, baterías de flujo y baterías de alta temperatura) se emplean hoy en día de manera muy reducida en instalaciones detrás del contador por diversos motivos. Aun así, cabe considerar que algunas de ellas fueron ampliamente desplegadas en el pasado, como las baterías de plomo ácido, pero las características de las baterías Li-ion y su coste decreciente las han ido desplazando incrementalmente del mercado.

Las baterías de alta temperatura basadas en sodio (NaS) tienen como principal desventaja la temperatura de funcionamiento, característica que las hace inadecuadas para su utilización en gran parte de aplicaciones detrás del contador (sectores residencial y comercial). En cambio, sí pueden tener cabida en el sector industrial debido a que la escala y la naturaleza de estas instalaciones son más variadas que en las escalas residencial y comercial.

Las baterías de flujo, en cambio, a pesar de tener densidades de energía y potencia y una eficiencia inferiores a las baterías de Li-ion, sí cuentan con ejemplos de aplicación residencial y comercial. Por ejemplo, la empresa australiana Redflow ofrece una solución de almacenamiento detrás del contador de 3 kW/10 kWh con un 100% de profundidad de descarga diaria disponible y una garantía de diez años.

Por último, la tecnología de plomo ácido, que es la más antigua de entre todas las baterías y es la más ampliamente utilizada en el mercado internacional para diversas aplicaciones, se emplea en el sector eléctrico principalmente para instalaciones desconectadas de la red y aplicaciones de emergencia y respaldo de energía. En los últimos años ha sido en gran medida reemplazada por la tecnología Li-ion en aplicaciones detrás del contador, como sistemas fotovoltaicos con almacenamiento y/o instalaciones residenciales, debido, entre otros factores, a sus bajos niveles de eficiencia y profundidad de descarga (respecto a las baterías de Li-ion).

### 2.1.3. Comparativa de tecnologías

A continuación, se muestran unas tablas con el resumen de las características técnicas principales de las diferentes tecnologías de almacenamiento electroquímico en la actualidad y las esperadas en el futuro (año 2030):

Tabla 1. Comparativa de las características técnicas de las diferentes tecnologías de baterías en la actualidad (2020). Fuente: adaptación de *Electricity storage valuation framework*, IRENA, 2020

Parámetro	Li-ion				Plomo-ácido	Flujo		Alta temperatura	
	NMC/LMO	NCA	LFP	LTO	VRLA	VRFB	ZBFB	NaS	NaNiCl2
Eficiencia (%)	92%	92%	86%	96%	81%	72%	72%	81%	85%
Tiempo de descarga (h)	0,5-4	1-4	0,5-4	0,1-4	0,5-10	4-8	4-8	6-8	6-8
Profundidad de descarga (%)	90%	90%	90%	95%	50%	100%	100%	100%	100%
Densidad de potencia (W/l)	5.050	5.050	5.050	5.050	355	2	13	140	210
Densidad de energía (Wh/l)	470	410	410	410	75	42,5	45	220	215
Coste de inversión (€/kWh)	311	261	429	809	208	246	640	401	297
Coste de operación (€/kWh)	7	7	7	6	3	10	14	7	7
Vida útil (ciclos)	3.500	1.500	3.500	10.000	500	10.000	4.000	5.000	3.500
Madurez de la tecnología	C	C	C	CI	M	CI	CI	C	D

**Notas:** C = en fase de comercialización; CI = en fase de comercialización inicial; M = madura; D = en fase de demostración.

Tabla 2. Perspectivas a futuro (año 2030) de las características técnicas de las diferentes tecnologías de baterías. Fuente: adaptación de *Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030*, IRENA, 2017

Parámetro	Li-ion				Plomo-ácido	Flujo		Alta temperatura	
	NMC/LMO	NCA	LFP	LTO	VRLA	VRFB	ZBFB	NaS	NaNiCl2
Eficiencia (%)	97%	97%	94%	98%	83%	78%	78%	85%	87%
Profundidad de descarga (%)	90%	90%	90%	95%	50%	100%	100%	100%	100%
Densidad de potencia (W/l)	5.050	5.050	5.050	5.050	355	2	13	140	210
Densidad de energía (Wh/l)	470	410	410	410	75	42,5	45	220	215
Coste de inversión (€/kWh)	167	145	224	478	132	119	309	162	161
Vida útil (ciclos)	3.800	1.900	4.700	19.000	3.200	13.000	10.000	7.500	4.500

## 2.2. Almacenamiento térmico

### 2.2.1. Almacenamiento de calor sensible

Es la tecnología de almacenamiento térmico más utilizada en aplicaciones de escalas residencial e industrial. Su funcionamiento se basa en aumentar o disminuir la temperatura de un material líquido o sólido con una elevada capacidad calorífica con el objetivo de almacenar y liberar la energía térmica para aplicaciones de baja temperatura.

A escala residencial, una opción muy común es la utilización de termos de agua caliente sanitaria (ACS). Estos dispositivos, que almacenan la energía en forma de calor sensible del agua, se pueden combinar junto con captadores fotovoltaicos para aprovechar los excedentes de generación renovable. Además, en caso de añadir control inteligente, estos dispositivos pueden gestionarse de manera agregada para dar servicios de flexibilidad al sistema. En esta categoría también podrían incluirse otros elementos de climatización como son las bombas de calor, cuando estas están acopladas a algún tipo de almacenamiento térmico, como pueden ser los acumuladores.

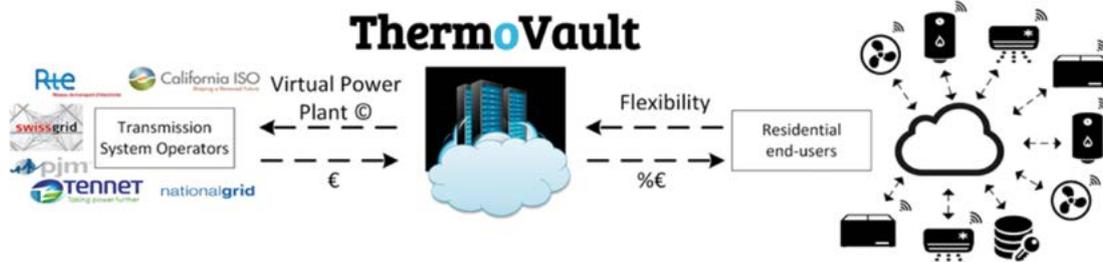
#### **Ejemplo 2: THERMOVAULT**

ThermoVault es una *start-up* afiliada a EnergyVille (Bélgica) y UC Berkeley (California). La compañía ofrece una solución de *software* y *hardware* para habilitar servicios energéticos procedentes de equipos térmicos residenciales, como calentadores de agua eléctricos, climatizadores y bombas de calor. ThermoVault se creó con el objetivo de ofrecer una solución rentable de almacenamiento, facilitando una mayor integración de renovables en el sistema.

La solución de retroadaptación propuesta para los termos de agua y otros dispositivos térmicos existentes genera ahorros directos en el consumo de energía de los clientes residenciales (19,8% de media), así como ingresos derivados de la participación agregada en los mercados de electricidad disponibles. La solución también dispone de un sistema de alertas para la gestión de los dispositivos que permite mejorar el confort de los usuarios, así como avisarles cuando su equipo está consumiendo una cantidad excesiva de energía o necesita atención técnica.

La planta de energía virtual (VPP) de ThermoVault se utiliza para ofrecer servicios de red al operador de transporte (TSO) belga (Elia), transformando a los usuarios finales en partes interesadas, activas y rentables de la transición energética. De media, los usuarios finales recuperan la inversión de la instalación de los dispositivos de control y gestión del sistema de ThermoVault en un período inferior a tres años.

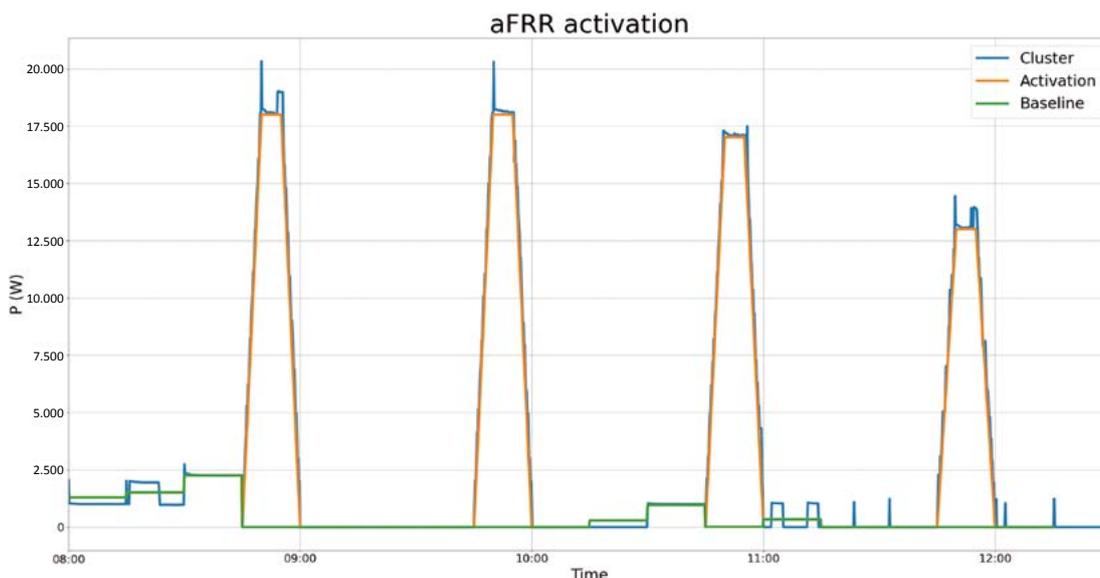
Figura 4. Esquema del producto



Fuente: ThermoVault.

El gráfico que sigue muestra la respuesta de un grupo de sistemas de ACS en el mercado de reserva secundaria belga (aFRR). En este caso, los calentadores pertenecen a un grupo heterogéneo de dispositivos y la activación a bajar («Activation») de los dispositivos muestra la contribución requerida por el mercado a este grupo en particular. La señal de «Cluster» muestra la respuesta de los calentadores a este requerimiento específico de activación por parte del mercado.

Figura 5. Participación de calentadores eléctricos en el mercado aFRR de Elia (Bélgica)



Fuente: ThermoVault.

De manera análoga al caso residencial, en el sector industrial también se podrán gestionar las consignas de funcionamiento de cámaras frigoríficas y otros sistemas de almacenamiento térmico (aprovechamiento del calor proveniente de diversos procesos industriales) mediante dispositivos de control inteligente, convirtiéndolos en elementos capaces de dar flexibilidad al sistema eléctrico. Además, los sistemas de almacenamiento térmico pueden ayudar a mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales y a integrar la generación de electricidad mediante las energías renovables.

## 2.2.2. Otras tecnologías de almacenamiento térmico

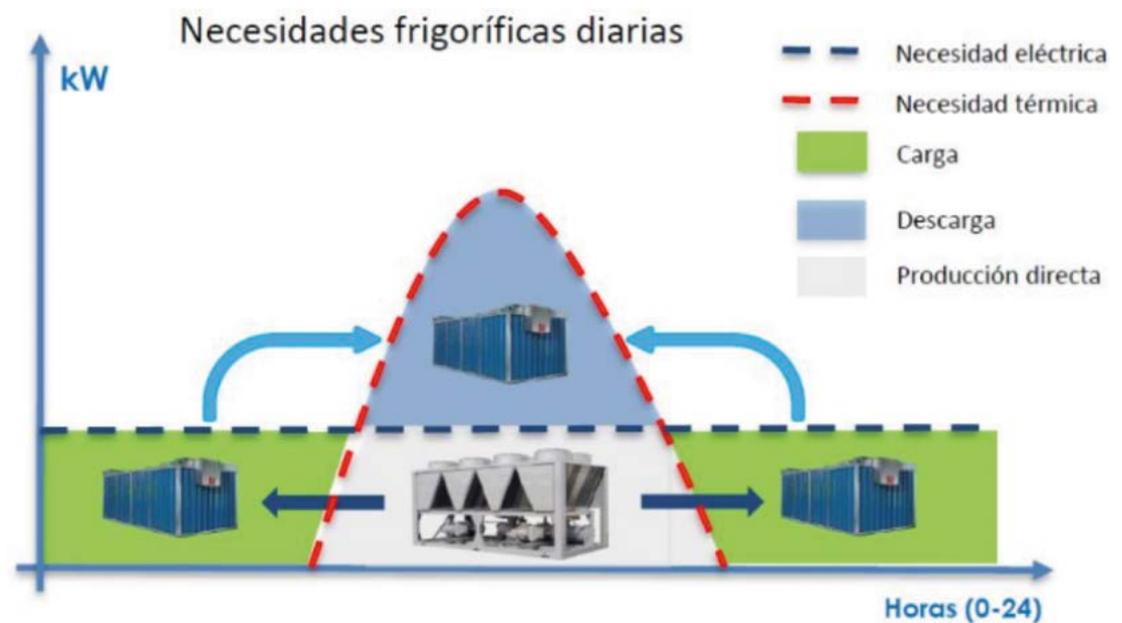
### Almacenamiento de calor latente

Los materiales de almacenamiento de calor latente son conocidos como materiales de cambio de fase por su capacidad de absorber y liberar energía durante el cambio de estado físico. Esta tecnología, cuya densidad energética es superior respecto a la tecnología de calor sensible, se puede dividir entre sistemas directos e indirectos. Los sistemas directos transfieren la energía térmica mediante el contacto entre el fluido de transferencia de calor y el material de almacenamiento, mientras que los indirectos disponen de un separador entre el fluido y el material de cambio de fase. Los materiales de cambio de fase se pueden emplear para almacenamiento de corta y larga duración y existen diversos sistemas y materiales. Un ejemplo de aplicación detrás del contador para esta tecnología sería el almacenamiento de hielo para la refrigeración en edificios o industrias para evitar picos de potencia o poder reducir la potencia instalada en las máquinas de frío.

#### Ejemplo 3: ALMACENAMIENTO DE HIELO

ICEBAT es un sistema de almacenamiento de energía en forma de hielo, fabricado por la compañía de soluciones energéticas Fafco, que utiliza el calor latente de la solidificación del agua en el hielo. Este sistema, que permite eliminar, reducir y/o programar el consumo energético necesario para refrigerar edificios o procesos industriales, es escalable para ofrecer capacidades energéticas entre 150 kWh y 18 MWh. Permite períodos de carga de 8 horas y tiempos de descarga entre 45 minutos y 10 horas.

Figura 6. Esquema de funcionamiento del sistema ICEBAT



Fuente: Clever Green.

## Almacenamiento termoquímico

Con esta tecnología se pueden obtener densidades energéticas más elevadas que en el almacenamiento de calor sensible y latente y puede operar mediante reacciones químicas donde la energía se almacena en el calor de los procesos químicos reversibles y mediante procesos de adsorción y absorción. Estos sistemas emplean la energía térmica para disociar un determinado compuesto en dos productos reactivos. La recombinación de estos elementos reactivos produce una reacción exotérmica que libera la energía almacenada anteriormente. La principal aplicación detrás del contador de este tipo de sistemas se puede llevar a cabo en el sector industrial en procesos de calor y secado. Por ejemplo, la compañía española Inerco y la sueca SaltX Technology están desarrollando una planta piloto de almacenamiento termoquímico con una potencia de 5 MW. El sistema servirá para acumular energía procedente de recursos renovables en períodos de baja demanda y permitirá descargar la energía en forma de calor para la generación eléctrica o uso directo en los procesos industriales en períodos de mayor demanda.

## 2.3. Otras tecnologías de almacenamiento

### 2.3.1. Almacenamiento eléctrico

#### Supercondensadores

Los supercondensadores son componentes electrónicos pasivos que permiten el almacenamiento de energía en pequeños períodos de tiempo. Esta tecnología se basa en el almacenamiento de energía asociado a la acumulación de carga eléctrica entre capas del condensador gracias al medio aislante. El área de superficie y la distribución y tamaño de los poros en el electrodo determinan la capacidad de almacenamiento de estos dispositivos. La energía almacenada por los supercondensadores es mucho mayor que la de los condensadores convencionales debido a la elevada área de superficie del electrodo, basado en material poroso de carbono.

Esta tecnología es adecuada para aplicaciones en las que se necesite mucha potencia en breves períodos de tiempo, y esta es la razón del aumento de su utilización en los edificios, asociado a maquinarias de ascensores y montacargas.

#### Superconductores (SMES)

Los superconductores almacenan la energía en campos magnéticos generados por una corriente eléctrica en bobinas superconductoras. Estos sistemas necesitan temperaturas criogénicas para su funcionamiento, permitiendo el almacenamiento de energía con mínimas pérdidas eléctricas debido a la despreciable resistencia del material. Los elementos básicos de los SMES son una bobina superconductora, un sistema criogénico, un sistema electrónico de control de la bobina y la electrónica de potencia para almacenar la energía proveniente de la red y retornarla.

La tecnología de superconductores podría tener aplicación en sistemas detrás del contador como grandes industrias consumidoras de energía, donde la calidad de la energía y la estabilidad de la

red son de gran importancia. Además, la combinación de los superconductores con baterías puede proporcionar sistemas con densidades de energía y potencia elevadas con una larga vida útil y una reducción de los costes totales.

### 2.3.2. Almacenamiento mecánico

#### **Volantes de inercia**

El volante de inercia es un dispositivo capaz de almacenar energía cinética mediante un disco de inercia que gira mecánicamente acoplado a un motor. Durante la carga, la energía proporcionada por la red provoca el movimiento del rotor del volante hasta alcanzar su velocidad nominal. En la descarga, la energía mecánica almacenada se transforma en energía eléctrica mediante el generador, disminuyendo la velocidad del rotor del volante hasta su valor mínimo de diseño.

En lo referente a las aplicaciones detrás del contador, los volantes de inercia se pueden utilizar como sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) en industrias o en el sector sanitario.

# 3 Retos para el desarrollo del almacenamiento detrás del contador en España

La Estrategia de Almacenamiento Energético aprobada por el Consejo de Ministros el 9 de febrero de 2021 identifica distintos retos a los que se enfrenta el desarrollo del almacenamiento en España<sup>11</sup>. Entre ellos se incluyen retos regulatorios y de mercado, de modelo de negocio, de interoperabilidad y ciberseguridad, entre otros. A continuación, se presenta en más detalle cómo algunos de estos retos afectan particularmente al desarrollo del almacenamiento detrás del contador.

Respecto a los retos de mercado y regulatorios, la Estrategia apunta que en el contexto de un mercado eléctrico y su regulación diseñados originalmente para una generación principalmente térmica convencional, gestionable y centralizada, sin grandes necesidades de almacenamiento, existe cierta dificultad inherente para las instalaciones de almacenamiento a la hora de participar en los mercados de electricidad, lo cual dificulta su rentabilidad.

## 3.1. Retos de mercado

Las barreras del mercado eléctrico para el desarrollo de los sistemas de almacenamiento detrás del contador y su integración en el sistema eléctrico son diversas. A partir de la discusión con algunos de los actores principales del sector<sup>12</sup>, se identifican las siguientes:

- La definición de los distintos servicios que pueden proporcionar los sistemas de almacenamiento y adaptación correspondiente de los mercados.
- Los límites en la participación de estos sistemas en los diferentes mercados eléctricos.
- El rol y la participación del agregador en los diferentes mercados eléctricos.
- Los requisitos técnicos de telemida y control de los recursos energéticos distribuidos.
- El sistema actual de tarificación, peajes y cargos y sistema de compensación de la energía excedentaria.
- La granularidad espacial y temporal de precios.

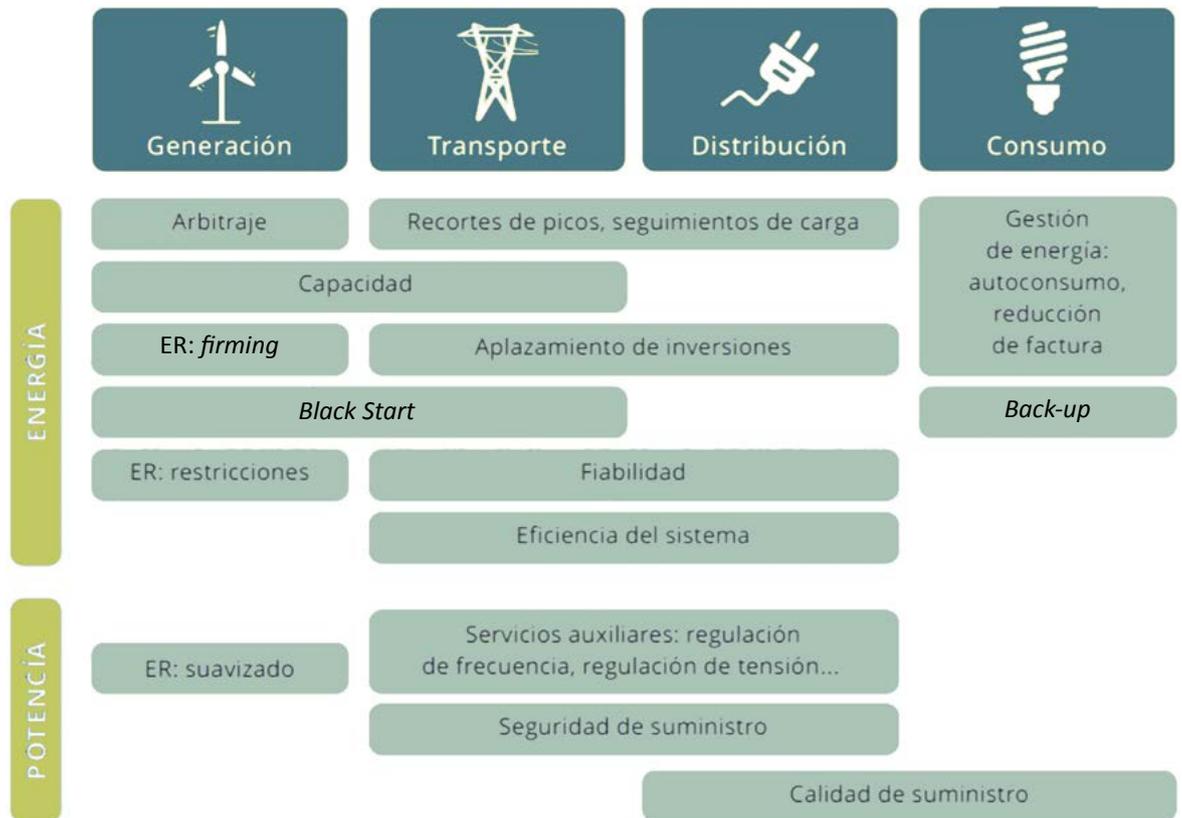
Algunos de estos elementos se encuentran en desarrollo y evolución normativa en el momento de redacción de este informe, por lo que se deberá seguir la evolución de las normativas correspondientes.

En primer lugar, se considera necesario definir y poner en valor la tipología de servicios que las tecnologías de almacenamiento son capaces de dar.

11 Estrategia de Almacenamiento Energético. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Febrero de 2021.

12 A lo largo de la elaboración de este informe se han realizado consultas/entrevistas con múltiples agentes del sector (véase el apartado de agradecimientos).

Figura 7. Aplicaciones de los sistemas de almacenamiento



Nota: Las aplicaciones relacionadas con las energías renovables se indican con las letras "ER". Así, por ejemplo, ER *firming* se refiere a la obtención de una potencia de salida constante mediante la aportación de energía cuando la producción está por debajo del valor previsto.

Fuente: *Futured* (2016).

Esta definición específica es importante ya que los productos del mercado eléctrico actuales fueron diseñados para generadores convencionales y por ello pueden presentar barreras relevantes y/o resultar poco atractivos para los sistemas de almacenamiento. Además, algunas características de los sistemas de almacenamiento (rápida respuesta, capacidad energética limitada) podrían ofrecer valores adicionales al sistema.

Por ejemplo, algunos aspectos particulares de las tecnologías de almacenamiento y su interacción con distintos mercados/servicios se presentan a continuación:

- El almacenamiento, a diferencia de los generadores convencionales, tiene una capacidad limitada, es decir, no pueden prestar un servicio de forma indefinida en la misma dirección (bien carga o descarga). Por ejemplo, el servicio de regulación secundaria, a día de hoy, se organiza en un mercado que cierra el día D-1 para las 24 horas del día D. Esta operativa implica grandes dificultades y limitaciones para el almacenamiento, ya que se trata de un servicio estocástico y que no incluye mecanismos para adecuar el estado de carga (SOC) del sistema de forma ágil y efectiva. En último término, esto provoca tener que sobredimensionar ampliamente el almacenamiento o participar en un número muy limitado de horas. Para evitar esto, otros países han creado productos de balance que, por ejemplo, permiten adecuar el SOC en los períodos en los que no se requiere respuesta del sistema y/o modular la respuesta en función del SOC.

- Actualmente no se aprovecha la rápida capacidad de respuesta del almacenamiento, ya que las constantes de tiempo de respuesta exigidas por el mercado son grandes y no se prima la velocidad de respuesta.
- El incremento de energías renovables en el sistema eléctrico provocará una reducción de la generación síncrona y, por tanto, de la inercia del sistema, y también de la capacidad de proporcionar regulación primaria. En este sentido el almacenamiento puede proporcionar este servicio de forma efectiva. Así, se considera necesario el desarrollo de incentivos y/o productos de mercado para los servicios de respuesta inercial y regulación primaria, que actualmente son de carácter obligatorio y no remunerado.

En segundo lugar, se deben ir resolviendo los límites en la participación en los distintos mercados tanto de los recursos de almacenamiento como del agregador, que es un agente muy relevante para la participación de aquellos sistemas de menor tamaño.

En España, tras la resolución de la CNMC del 10 de diciembre de 2020, por la que se aprueba la adaptación de los procedimientos de operación del sistema a las condiciones relativas al balance aprobadas por resolución de la CNMC de 11 de diciembre de 2019, se abre la puerta a la posibilidad de que el almacenamiento participe en los servicios de balance, de manera individual o agregada.

Este es un paso inicial muy importante para la participación del almacenamiento en los mercados. Aun así, se debe asegurar que el resto de mercados (mayoristas, otros servicios de ajuste como las restricciones técnicas, futuros mercados locales de flexibilidad, etc.) se abren a la participación de los recursos de una manera adecuada. Y no solo su apertura, sino también facilitar el acceso de estos recursos al resto de mercados de manera acumulativa, así como que todos los servicios sean remunerados (p. ej. la reserva primaria). Finalmente, la creación de nuevos mercados de capacidad ayudaría a poner en valor la flexibilidad y la firmeza de los sistemas de almacenamiento.

En tercer lugar, el desarrollo del almacenamiento detrás del contador también requiere un desarrollo efectivo de la agregación y de la figura del agregador independiente. Entendiendo por efectivo la definición de unas condiciones técnicas de agregación adaptadas a elementos de pequeña potencia y detrás del contador y facilitando modelos de participación estables y económicamente viables y que permitan a los nuevos entrantes acometer inversiones. Por ello sería muy positivo que se potenciara el desarrollo de esta figura desde una perspectiva de activación de la flexibilidad de los recursos distribuidos y los pequeños consumidores, y de fomento de la innovación y la competencia. Según la última actualización de la Hoja de Ruta de REE, se espera que la figura del agregador independiente entre en funcionamiento el Q2 2022.<sup>13</sup>

En cuarto lugar, los requisitos necesarios para acceder a los distintos mercados deberían reconocer las particularidades de los recursos distribuidos detrás del contador respecto a los activos de generación convencionales situados delante del contador. Por ejemplo, actualmente los requisitos de teled medida y control son iguales independientemente del tamaño del recurso (planta de generación convencional o pequeño recurso distribuido). Otro ejemplo sería el requisito de adherirse a una zona de regulación para prestar servicios de regulación secundaria, las cuales están generalmente en manos de las principales empresas del mercado y en las que únicamente operan activos propios.

---

13 Hoja de Ruta MIE del Sistema Eléctrico Peninsular Español a 18/3/2021: <https://api.esios.ree.es/documents/619/download?locale=es>.

El anexo II del PO3.1 prevé la creación de unidades de programación de almacenamiento específicas, no asociadas a instalaciones de generación o demanda.

Finalmente, para mejorar la remuneración de la flexibilidad inherente de los sistemas de almacenamiento se debería también considerar la introducción de cambios en el diseño de los mercados en términos de granularidad temporal de los períodos de liquidación y las unidades de mercado, así como el acercamiento del cierre del acceso de mercado a la entrega a tiempo real en los mercados mayoristas. La granularidad espacial también podría ayudar a poner en valor la flexibilidad de estos sistemas, mediante la implementación de un sistema de precios nodal o zonal que incentivase la inversión en activos de almacenamiento detrás del contador en las zonas más beneficiosas para el sistema. En resumen, los incentivos para el despliegue de sistemas de almacenamiento de energía son mayores cuanto más granulares son. Este es un campo donde el desarrollo de proyectos de demostración regulatoria podría tener especial sentido.

### 3.2. Retos regulatorios

Se ha dado un paso muy importante con el Real Decreto-ley 23/2020, de 23 de junio, por el que se reconocen específicamente los «titulares de instalaciones de almacenamiento» como nuevos sujetos del sector eléctrico, a la vez que se reconoce que el resto de agentes, como los productores, consumidores o titulares de redes eléctricas, pueden utilizar también instalaciones de almacenamiento energético. Este RD será un elemento clave para la integración del almacenamiento dentro del sistema eléctrico como un sujeto independiente de manera similar a los generadores y consumidores. A partir de esta definición, se deben definir también aquellos aspectos adicionales sobre la interacción de esta nueva figura con el sistema eléctrico, sus derechos y obligaciones, el papel que van a jugar las distribuidoras y el operador del sistema o la definición específica de la figura del agregador independiente, entre otros.

Esta definición específica permitirá reconocer a los titulares de instalaciones de almacenamiento como agentes propios del sistema eléctrico, posibilitando desarrollar mecanismos específicos para fomentar su despliegue, y reconocer la entidad propia de estos recursos en los distintos mercados a medida que estos se vayan abriendo a su participación. En este sentido, la reciente aprobación de las condiciones relativas al balance para los proveedores de servicios de balance y los sujetos de liquidación responsables del balance en el sistema eléctrico peninsular español permite explícitamente la participación de los recursos de demanda y almacenamiento en los mercados de balance de Red Eléctrica, de forma individual o agregada. Este representa un primer paso, pero cabe regular su participación en el resto de mercados.

Por otra parte, el despliegue masivo de recursos distribuidos, incluyendo los sistemas de almacenamiento detrás del contador, tendrá un impacto significativo en los roles y responsabilidades de los operadores de las redes de distribución. Estos pasarán de ser únicamente portadores de electricidad en el sistema actual a tener un rol activo en la operación de la red. Este nuevo rol de los distribuidores, incluido en la Directiva de mercado interior de electricidad 2019/944 del Parlamento Europeo y del Consejo en su artículo 32, también incluirá la contratación de servicios de red de los recursos energéticos distribuidos, como los recursos de almacenamiento detrás del contador, para optimizar las infraestructuras existentes y evitar nuevas inversiones futuras. El proyecto IREMEL, en el que se enmarca este informe, tiene como objetivo avanzar en el desarrollo de los mercados loca-

les de electricidad para resolver problemas de congestión en las redes de distribución del sistema eléctrico español.

Más allá del impacto en los operadores del sistema de distribución, el almacenamiento también va a jugar un papel muy importante en la participación del consumidor. Por un lado, a través de los sistemas de almacenamiento asociados a sistemas de autoconsumo, y, por otro, a través del vehículo eléctrico (VE). Para ello es clave la definición específica del marco de operación del agregador. También es importante asegurar un marco regulatorio adecuado para el desarrollo las comunidades energéticas locales que contemple tanto los sistemas de almacenamiento como los VE, de manera que al ciudadano se le proporcionen herramientas que le faciliten un papel más activo en el sistema.

Por último, un elemento clave para el desarrollo de los sistemas de almacenamiento detrás del contador en España serían los programas de ayuda o pilotos estratégicos que se puedan otorgar no solo a su implementación (medidas que han tenido mucho éxito en otros mercados como Alemania o Italia), sino también al desarrollo de la cadena de valor industrial, como la fabricación y ensamblaje de piezas/componentes clave de los sistemas a nivel nacional, así como a la I+D+i en tecnologías no maduras.

### 3.3. Retos tecnológicos

#### Almacenamiento electroquímico

Los principales objetivos a corto y medio plazo de la mayoría de las tecnologías dentro del almacenamiento electroquímico son la reducción de costes y el aumento de la vida útil de los sistemas.

La tecnología de baterías de Li-ion, aunque asentada comercialmente, tiene margen de mejora en el rendimiento y en la reducción de costes para posibilitar la viabilidad de nuevas aplicaciones en la red eléctrica. La reducción de costes se obtendrá gracias a mejoras en los procesos de fabricación, la reestructuración de la cadena de valor, la utilización de materiales más baratos, el aumento de la energía específica, el aumento de la vida útil y la reutilización de baterías provenientes del sector de movilidad. Otro campo de investigación importante se encuentra en la hibridación con otras tecnologías de almacenamiento para obtener sistemas capaces de abarcar más aplicaciones. En el caso de las baterías Li-ion, tecnología preferentemente orientada a almacenar energía y de relativamente pocos ciclos, la hibridación con volantes de inercia podría dar como resultado un sistema de alta potencia y energía y con un elevado número de ciclos. Otros retos importantes que considerar son la posibilidad de deflagración, la baja tasa de reciclaje (menor al 40%) de los materiales de estos dispositivos y la escasez y toxicidad de algunos componentes presentes en algunas tipologías de baterías Li-ion.

En cuanto al resto de tecnologías electroquímicas, las baterías de plomo ácido tienen como principal reto el aumento en los ciclos de carga y descarga, así como mejorar la densidad de potencia para ser más competitivas en aplicaciones con altos índices de carga y descarga (almacenamiento de respuesta rápida), y la eficiencia de carga, posibilitando la carga rápida. Para los sistemas basados en sodio, cuya barrera tecnológica más importante es la operación a altas temperaturas, se espera un progreso tanto en la característica de densidad energética como en los ciclos de vida mediante el desarrollo de diseños más simples y procesos industriales más eficientes. Finalmente, las baterías de flujo, cuyas principales fortalezas son los elevados ciclos de vida y la capacidad de separar el

parámetro de potencia y energía, deben superar barreras como la mejora de la vida útil de algunos elementos (por ejemplo, membrana separadora) y el aumento de las densidades de energía y potencia.

### **Almacenamiento térmico**

Este tipo de almacenamiento dispone de un gran potencial de hibridación con otras tecnologías energéticas, especialmente con la generación eléctrica mediante energías renovables en procesos industriales y sistemas de calefacción/refrigeración de edificios.

Los principales retos tecnológicos que se deben superar para la mayor implementación de la tecnología de calor sensible son desarrollar sistemas flexibles e inteligentes de integración del almacenamiento térmico, desarrollar sistemas de gestión de la demanda y técnicas de operación y control para aplicaciones tanto industriales como residenciales, investigar en nuevos materiales de almacenamiento, reducir los costes del sistema, buscar nuevos materiales para poder operar en otros rangos de temperatura y mejorar el aislamiento de los sistemas.

En cuanto al resto de tecnologías de almacenamiento térmico, en la de calor latente se debería investigar en el desarrollo de sistemas que utilicen los mismos materiales de cambio de fase para el almacenamiento de calor sensible y latente, para, de esta manera, obtener mayores densidades de almacenamiento energético, y la termoquímica debe superar las barreras del coste, la complejidad del diseño y la necesidad de mejorar las propiedades de los materiales para una mayor estabilidad del sistema.

### **Otras tecnologías de almacenamiento**

Dentro de las tecnologías de almacenamiento eléctrico, los supercondensadores se enfrentan a retos tecnológicos como la capacidad de los electrolitos (el reto es conseguir capacidades por encima de los 3 V) y el grado de toxicidad de estos. En este sentido, es importante la investigación en electrolitos sólidos que permitan simplificar los métodos de fabricación mejorando la seguridad y la estabilidad y eliminando los riesgos de pérdida de electrolito. En cuanto a la otra tecnología de almacenamiento eléctrico, los superconductores tienen como mayores barreras tecnológicas la relación coste/operación y el elevado coste de mantenimiento de los sistemas de refrigeración. Con el objetivo de superar estas barreras las investigaciones se centran en mejorar las propiedades de los materiales utilizados, reducir el coste de estos y de otros elementos del sistema como bobinas y la electrónica (mejorando la eficiencia).

Por último, el mayor reto técnico del almacenamiento por volantes de inercia es el elevado coste de inversión. La elevada tasa de autodescarga también es un reto importante ya que dificulta el almacenamiento de larga duración. Para afrontar estos retos se debe trabajar en la reducción de costes mediante el diseño de máquinas eléctricas con menor presencia de imanes que encarecen el sistema, el incremento de la densidad energética mediante el desarrollo de nuevos materiales del volante, el desarrollo de sistemas de reducción de peso de los volantes y la mejora de la eficiencia reduciendo las pérdidas energéticas en momentos de reposo.

### 3.4. Retos económicos

Como consecuencia de retos presentados anteriormente, el despliegue de los sistemas de almacenamiento detrás del contador se enfrenta a un reto enorme a la hora de justificar los costes de inversión, así como encontrar referencias de casos comerciales viables.

La viabilidad económica de un sistema de almacenamiento detrás del contador puede variar significativamente dependiendo del caso de uso y de si está o no asociado a una planta FV.

Aunque los costes de los sistemas de almacenamiento detrás del contador se han ido reduciendo en los últimos años, la instalación de estos sistemas aún requiere una alta inversión inicial y a día de hoy no existe un esquema de incentivos específico para la promoción de este tipo de tecnologías en el contexto español. Para 2021, teniendo en cuenta el descenso de precios acelerado que se observa en el sector, el ratio de inversión para instalaciones de almacenamiento de pequeño tamaño (pudiéndose asimilar de alguna manera a clientes residenciales) sería de 225-325 €/kWh, y para instalaciones medianas o grandes el ratio sería de 150-225 €/kWh<sup>14</sup>.

A esto se debe añadir la baja rentabilidad que se puede obtener de la inyección a la red de la energía procedente de este tipo de dispositivos (actualmente la inyección de energía procedente de una batería se compensa únicamente como excedente de una instalación de autoconsumo, según el precio del mercado mayorista en cada momento). Como se apunta en uno de los apartados anteriores, se debería permitir la participación del almacenamiento detrás del contador en todos los mercados eléctricos y de ajuste disponibles, de manera agregada e idealmente acumulativa, con el objetivo de maximizar las posibles fuentes de ingresos y aumentar de esta forma su rentabilidad.

Actualmente, la mayor fuente de rentabilidad económica de los sistemas de almacenamiento procede de la capacidad de optimizar los costes energéticos de los consumidores. En algunos casos, para clientes que disponen de sistemas de autoconsumo fotovoltaico, un consumo energético elevado y una diferenciación horaria en sus tarifas, los sistemas de almacenamiento, y particularmente aquellos que disponen de un sistema inteligente de gestión para optimizar su funcionamiento, pueden proporcionar una independencia de la red de más del 70% y una rentabilidad económica interesante.

Aun así, se espera una evolución positiva en el retorno de la inversión en sistemas de almacenamiento en los próximos años a medida que se reduzcan los costes de la tecnología y se vayan implementando reformas regulatorias que fomenten la participación del almacenamiento y el agregador en todos los mercados eléctricos. La evolución de los precios de los mercados eléctricos también tendrá un impacto importante en la rentabilidad de estos sistemas, particularmente si su volatilidad se incrementa con una mayor penetración de recursos renovables.

### 3.5. Otros retos: seguridad, estandarización y reciclaje

El despliegue masivo de muchas de las tecnologías de almacenamiento presentadas en los apartados anteriores depende de su capacidad de interactuar de manera eficiente y segura con el sistema eléctrico y los mercados disponibles. Para ello, es clave que estos sistemas integren elementos de

14 Fuente: IDAE. European Battery Alliance (2020). *How stationary batteries further trigger the storage boom*.

control, comunicación, análisis de datos y gestión de intercambios energéticos, tanto a nivel individual como a nivel agregado.

Esta digitalización e interconectividad de un mayor número de elementos del sistema eléctrico (e. g., sistemas de almacenamiento, generación fotovoltaica, vehículos eléctricos, etc.) conlleva grandes ventajas, pero también genera nuevos retos, como la ciberseguridad. Al tener la necesidad de compartir información y datos a través de Internet o las redes de comunicación locales, estos se convierten en la puerta de entrada a potenciales ciberataques.

Adicionalmente, la evolución de las diferentes tecnologías de almacenamiento identificadas requerirá adecuar sus estándares a múltiples niveles: técnico, de comunicaciones y control, de calidad, de seguridad, etc. Esta estandarización facilitará una reducción en los riesgos de los proyectos en busca de financiación, ayudando a aumentar la seguridad de los inversores en relación con el valor que se puede obtener de un sistema, su amortización, así como su valor residual o potencial de segunda vida.

Finalmente, es importante promover la recogida efectiva y el reciclaje de los sistemas de almacenamiento. Todo sistema de almacenamiento ha de ser reciclado para intentar recuperar y poner en el mercado sus componentes y/o materiales con el objetivo de evitar la sobreexplotación de los recursos naturales y el daño potencial al medio ambiente y la salud humana derivados de un tratamiento de los residuos incorrecto, como, por ejemplo, la contaminación de suelos y agua por vertidos incontrolados, así como disminuir la dependencia exterior de materias primas. En lo que respecta a baterías de segunda vida y con el objetivo de facilitar y activar este negocio de economía circular, es fundamental que las certificaciones requeridas para las baterías para su primer uso en automoción se consideren válidas para su nuevo uso estacionario. De esta forma estas baterías no tendrán que ser recertificadas para su uso en estacionario, volviendo a tener que pasar nuevos ensayos, realizar cambios de diseño, etc., que en el fondo no aportan ninguna característica técnica ni seguridad adicional, pero que, sin embargo, incrementan el coste y perjudican el modelo de negocio respecto a las baterías nuevas.

# 4 Rentabilidad de los sistemas de almacenamiento detrás del contador

Tal como se ha descrito en el capítulo anterior, para la implementación masiva de los sistemas de almacenamiento detrás del contador se deben superar varias barreras, la mayoría de las cuales acaban impactando de alguna manera en su rentabilidad. A continuación, se exponen dos ejemplos que muestran la rentabilidad de este tipo de dispositivos en los sectores residencial y comercial hoy día en España. Es importante destacar que los estudios económicos presentados a continuación pertenecen a casos singulares facilitados por proveedores del sector que se ofrecen como ejemplos específicos de sistemas de almacenamiento detrás del contador y no como casos representativos del sector.

## **Ejemplo 4: VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DETRÁS DEL CONTADOR DE UN CLIENTE RESIDENCIAL**

Se muestra un cálculo de viabilidad de una batería de la empresa Sonnen para un cliente residencial. Los datos que se muestran a continuación han sido facilitados por el instalador Webatt, y se corresponden con los de una instalación que se encuentra actualmente en uso.

Se asumen las siguientes consideraciones:

- La batería se instala junto a una instalación fotovoltaica.
- La mayor parte del consumo energético de la vivienda está electrificada (calefacción, ACS, etc.).
- Tarifa contratada: 2.0 DHA.
- Potencia contratada: 6,9 kW.

Análisis de viabilidad:

• Capacidad nominal de la batería:	5,5 kWh
• Coste total batería (sin IVA):	6.400 €
• Coste de instalación fotovoltaica (sin IVA):	7.200 €
• Coste total instalación autoconsumo (sin IVA):	13.600 €
• Coste total instalación autoconsumo (con IVA):	16.500 €
• Vida útil baterías Sonnen (garantía de 10 años/10.000 ciclos):	25 años
• Consumo anual del cliente sin autoconsumo:	7.000 kWh/año
• Consumo anual del cliente con autoconsumo:	1.869 kWh /año
• Factura eléctrica anual aproximada sin autoconsumo:	1.800 €
• Factura eléctrica anual aproximada con autoconsumo:	600 €

• Ratio de autosuficiencia del consumidor:	74%
• Retorno de la inversión (sin IVA):	11,3 años
• Retorno de la inversión (con IVA):	13,7 años
• Rendimiento de la inversión (TIR a 25 años):	8,86%

Cabe apuntar dos factores no reflejados en el análisis de este caso de negocio. Por un lado, se debería tener en cuenta la evolución esperada del precio de la energía consumida de la red eléctrica en los próximos años, que, si nos fijamos en la evolución de los últimos años, puede mejorar significativamente los ahorros esperados de un sistema de autoconsumo. Por otro lado, el análisis presentado no incluye la compensación de los excedentes del autoconsumo, que hoy en día se compensa a 50 €/MWh, cifra que muchos instaladores obvian a la hora de presentar el caso de negocio de las baterías a sus clientes debido a su poco impacto en el retorno de estas instalaciones.

### **Ejemplo 5: VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DETRÁS DEL CONTADOR DE UN NEGOCIO FAMILIAR**

Se muestra un cálculo de viabilidad de una batería inteligente Ampere T-Pro para un cliente comercial. Los datos que se exponen a continuación han sido facilitados por Ampere Energy.

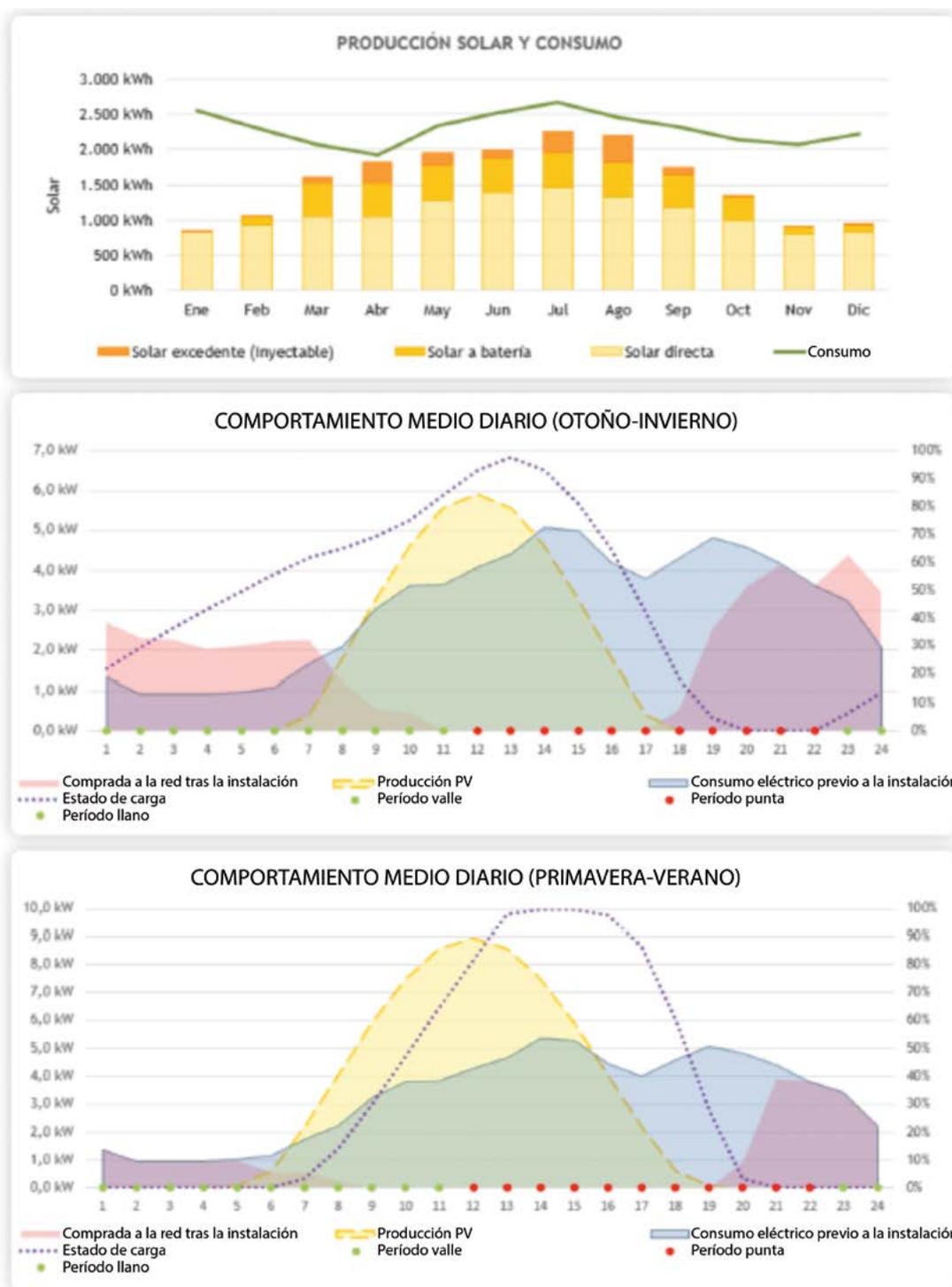
Se asumen las siguientes consideraciones:

- La batería se instala junto a una instalación fotovoltaica de 12 kWp.
- La mayor parte del consumo energético está electrificado.
- Tarifa contratada: 2.0 DHA.
- Potencia contratada: 4,4 kW.
- Incremento del 5% anual en la factura eléctrica.

Análisis de viabilidad:

• Capacidad nominal de la batería:	36 kWh
• Coste total batería (sin IVA):	15.350 €
• Coste de instalación fotovoltaica (sin IVA):	15.600 €
• Coste total instalación autoconsumo (sin IVA):	30.950 €
• Coste total instalación autoconsumo (con IVA):	37.450 €
• Vida útil batería (garantía Ampere de 10 años):	20 años
• Consumo anual del cliente sin autoconsumo:	27.600 kWh/año
• Consumo anual del cliente con autoconsumo:	10.900 kWh/año
• Factura eléctrica anual aproximada sin autoconsumo:	6.000 €
• Factura eléctrica anual aproximada con autoconsumo:	1.000 €
• Ratio de autosuficiencia del consumidor:	60%
• Retorno de la inversión (sin IVA):	6,2 años
• Retorno de la inversión (con IVA):	7,5 años
• Rendimiento de la inversión (TIR a 20 años):	11%

Figura 8. Datos de la instalación de autoconsumo con un sistema de almacenamiento asociado



Fuente: Ampere Energy.

Un elemento importante que tener en cuenta para la mejora del rendimiento de estos sistemas es la aplicación de inteligencia artificial y otras tecnologías digitales, las cuales pueden optimizar e incrementar la eficiencia de los sistemas de almacenamiento mediante la predicción meteorológica, la predicción de generación renovable, el mantenimiento predictivo y la monitorización de las condiciones de los dispositivos, la toma de decisiones en función de las señales de precio del mercado eléctrico, y las pautas de consumo de los usuarios, entre otros. De este modo, se consigue aumentar el retorno económico de este tipo de sistemas a sus propietarios. Además, la inteligencia artificial puede ayudar a estimar y ampliar la vida útil de los dispositivos de almacenamiento empleando algoritmos predictivos en los procesos de carga y descarga.

### **Ejemplo 6: INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LOS DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO**

En este ejemplo se muestra un caso real del funcionamiento inteligente de un dispositivo de almacenamiento de la empresa española Ampere Energy, especializada en el diseño, desarrollo y producción de sistemas de almacenamiento y gestión energética para el sector residencial.

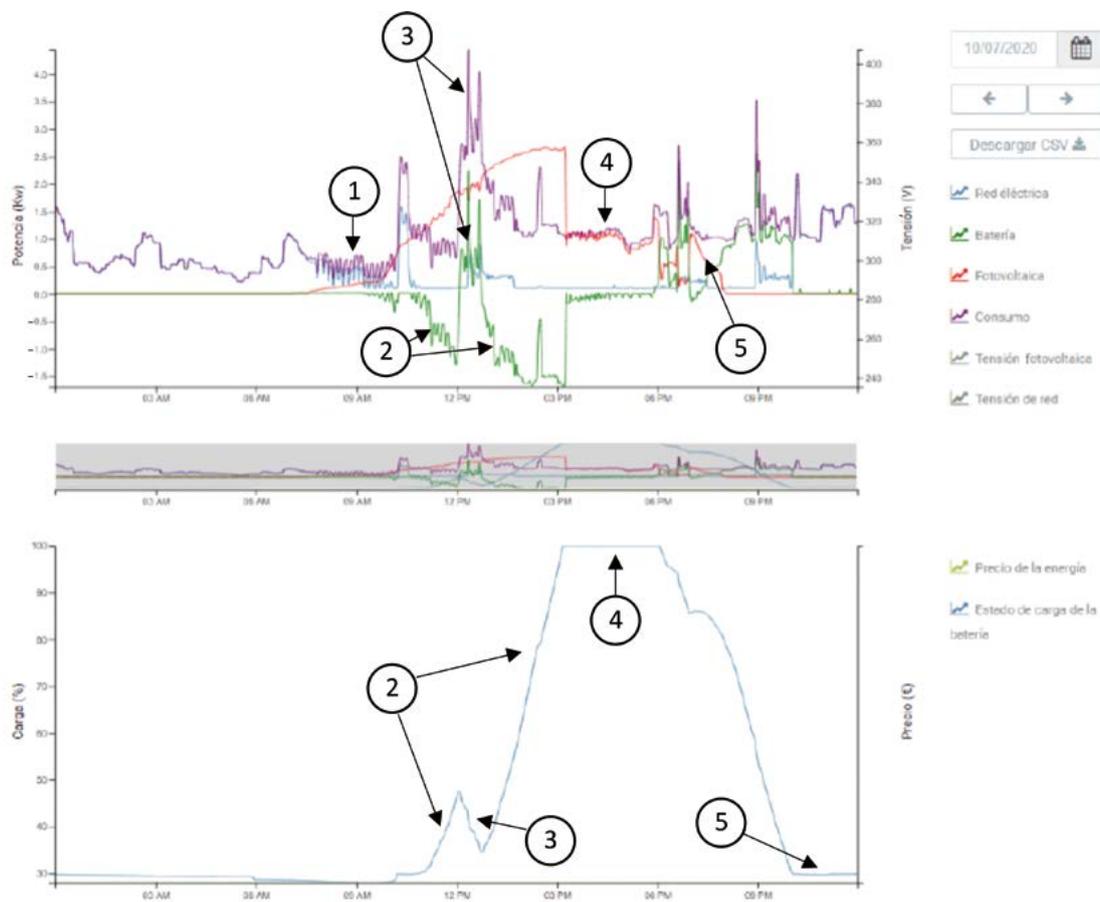
Características de la instalación:

- Instalación residencial (fotovoltaica + batería).
- Peaje de acceso 2.0A.
- Potencia contratada 3 kW.
- Reserva de batería del 30% para disminución de potencia (*peak shaving*).

Funcionamiento de la instalación (véase la figura 9):

1. Aprovechamiento de energía fotovoltaica directa.
2. Aprovechamiento de excedentes para aumentar el estado de carga de la batería.
3. Función de *peak shaving*: la batería aporta potencia para abastecer el pico de potencia demandado (5 kW), ya que la potencia contratada es de 3 kW.
4. Función de «inyección cero»: la instalación fotovoltaica únicamente genera para abastecer la demanda del usuario, ya que el estado de carga de la batería se encuentra al 100%.
5. La batería se comienza a descargar para abastecer la demanda del usuario por a la finalización de la generación fotovoltaica. El estado de carga de la batería baja hasta el valor del 30% fijado por el usuario para asegurar el *peak shaving*.

Figura 9. Ejemplo de gestión energética mediante inteligencia artificial de una instalación fotovoltaica con dispositivos de almacenamiento.



Fuente: Ampere Energy.



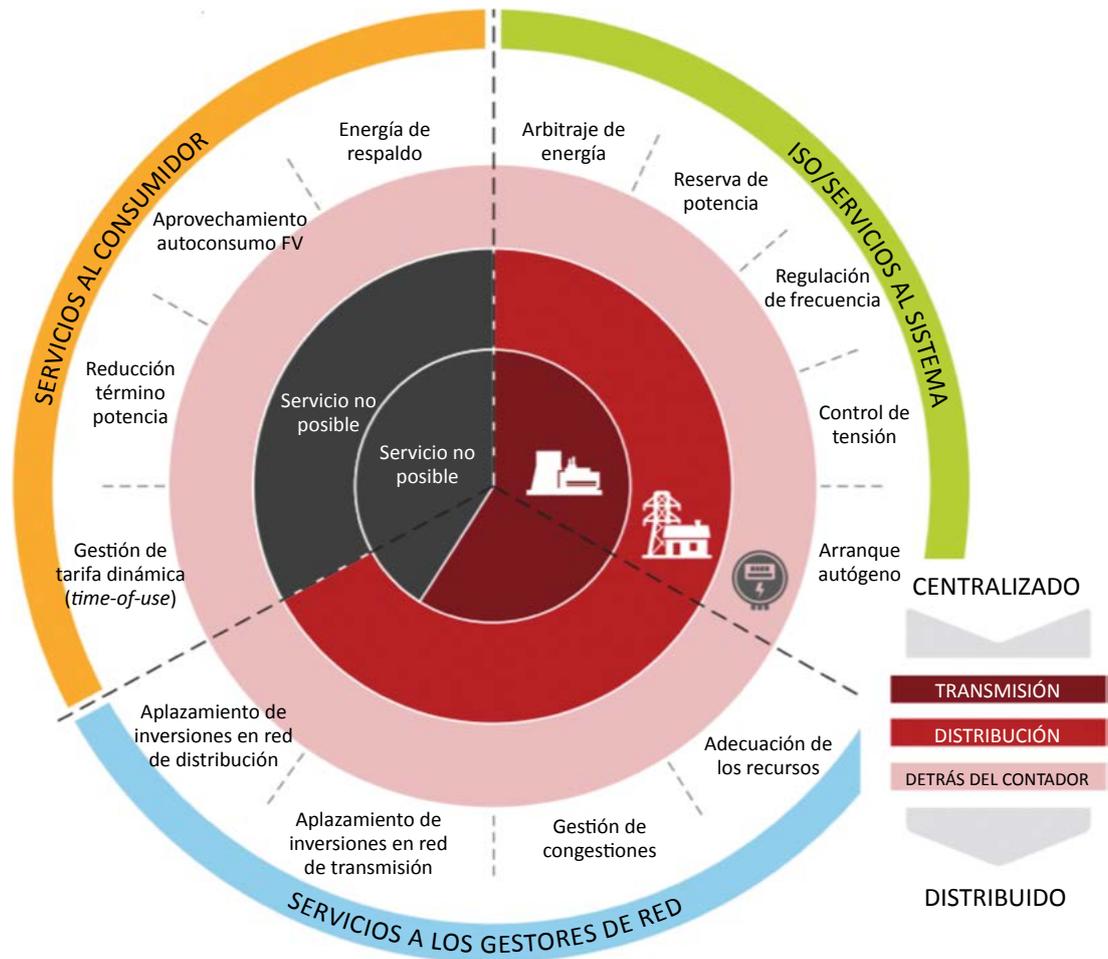
# 5 Modelos de negocio

Con la madurez y reducción en el coste de los recursos energéticos distribuidos, están emergiendo nuevos modelos de negocio que incentivan la transformación de los consumidores tradicionales en consumidores activos, es decir, que no solo utilizan la energía proveniente de la red, sino que también la producen (para su propio autoconsumo o para inyectarla de vuelta a la red) y la almacenan. Estos recursos energéticos distribuidos, junto con la necesaria implementación de sistemas de comunicación y aplicaciones tecnológicas asociadas, ponen a los consumidores activos en el centro del sector energético, pudiendo tomar las decisiones óptimas en función de su consumo, generación y almacenamiento.

Además, la reciente aceleración en el despliegue de recursos renovables en el sistema, la incertidumbre alrededor de posibles contingencias en las redes o las centrales de generación tradicional, así como la variabilidad de la demanda, nos sitúa en un escenario de necesidad creciente de flexibilidad en el sistema. Los recursos de almacenamiento, debido a sus características inherentes, también se posicionan como activos clave para cubrir esta demanda creciente del sistema.

Las aplicaciones de almacenamiento detrás del contador permiten varios modelos de negocio dependiendo de la propiedad de los activos, las fuentes de ingresos, y los servicios proporcionados. El cuadro siguiente, procedente del Rocky Mountain Institute, resume los diferentes potenciales servicios que pueden ofrecer los sistemas de almacenamiento detrás del contador.

Figura 10. Servicios posibles a partir de sistemas de almacenamiento detrás del contador



Fuente: Fitzgerald, Garrett; Mandel, James; Morris, Jesse y Touati, Hervé. 2015. The Economics of Battery Energy Storage. Rocky Mountain Institute.

A continuación, se destacan algunos de los modelos de negocio más comunes a día de hoy, que se espera que vayan evolucionando en los próximos años.

1. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor sin acceso a mercado.
2. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor con acceso a mercado.
3. Almacenamiento *as-a-service*. Dispositivos de almacenamiento propiedad de terceros.

### 5.1. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor sin acceso a mercado

El primer caso representa aquellas instalaciones de sistemas de almacenamiento en los sectores residencial, terciario o industrial, en los que los dispositivos de almacenamiento son propiedad de los usuarios finales. Los propietarios pueden aprovechar los excesos de generación de energía de los sistemas de autoconsumo asociados para utilizarla en otros momentos de mayor demanda, aumen-

tando su aprovechamiento del sistema. También existe la posibilidad de que se realice un proceso de arbitraje con los precios de la energía, almacenando energía en períodos de precios más bajos y consumiendo energía almacenada en el sistema durante períodos de precios más elevados. Además, los sistemas de almacenamiento también pueden ayudar a reducir en cierto nivel los picos de potencia del consumidor. Finalmente, los propietarios de los sistemas de almacenamiento también pueden aprovechar estos sistemas como sistemas de respaldo en caso de necesidad.

Este modelo de negocio permite al propietario de la instalación de almacenamiento y consumidor optimizar su factura de electricidad. Dependiendo de la estructura de la tarifa eléctrica y la posibilidad de obtener ciertos ingresos mediante el arbitraje, los ahorros/ingresos generados por el sistema de almacenamiento pueden ayudar a recuperar más o menos parte de la inversión inicial en el sistema. En general, estos consumidores cuentan con la ayuda de empresas tecnológicas especializadas (que pueden ser el mismo proveedor del sistema) para gestionar esta optimización, pero no participan directamente en los mercados de electricidad.

Dentro de este primer caso también incluiríamos el de las baterías de los VE que pueden ofrecer este tipo de optimización a los edificios asociados a sus puntos de carga a través de la tecnología de V2HB (vehículo-a-casa-edificio). En este escenario, los VE actúan como baterías detrás del contador que permiten una mayor utilización de las energías renovables (en caso de estar vinculados a una instalación de autoconsumo), así como una reducción en la dependencia en la red eléctrica optimizando las necesidades de los usuarios finales.

### **Ejemplo 7: EXKAL**

EXKAL, fabricante español de cámaras frigoríficas y muebles expositores de alimentación, dispone de dos sistemas de almacenamiento de energía SAFT de tecnología Li-ion en sus instalaciones de Marcilla (Navarra).

Esta instalación, que entró en funcionamiento en abril de 2017, forma parte del proyecto europeo STORY H2020 y dispone de socio tecnólogo a CENER (Centro Nacional de Energías Renovables) y a GREEN RENOVABLES como dirección técnica del proyecto, tiene como objetivo proporcionar el máximo respaldo para reducir los picos de electricidad y así aumentar el autoconsumo de energía solar (112,70 kWp) y el almacenamiento flexible de energía con una capacidad de 50 kW de potencia y 200 kWh de energía. Por medio del sistema de almacenamiento, dimensionado de la forma más óptima con base en un análisis de los perfiles de consumo de energía históricos de la planta, y en combinación con un sistema de gestión dinámica de la energía, desarrollado por CENER, EXKAL es capaz de minimizar la cantidad de energía demandada a la red y maximizar, así, la utilización de sus recursos propios de generación renovable. El sistema de almacenamiento de energía está ayudando a lograr una reducción del 20% en la demanda máxima de energía de la red local junto con un mayor autoconsumo de energía solar. Según EXKAL, durante el primer año de operación del sistema el ahorro en las facturas energéticas ha sido de en torno al 8%.



Ilustración 1. Sistema de almacenamiento SAFT instalado en la fábrica de EXKAL. Fuente: EXKAL.

### Ejemplo 8: **CAMPING LA BALLENA ALEGRE**

Este *camping*, ubicado en la costa Brava (Sant Pere Pescador, Cataluña), está llevando a cabo un innovador multiproyecto con Webatt para integrar una amplia gama de soluciones de energías renovables en su complejo, entre las cuales se incluyen:

- Sistemas de almacenamiento térmico vinculados a instalaciones de energías geotérmica, aerotérmica y solar térmica para el abastecimiento de ACS y climatización.
- Sistemas de almacenamiento electroquímico vinculados a una instalación fotovoltaica.

La instalación de fotovoltaica y baterías dispone de 400 módulos distribuidos en las cubiertas de los diferentes bungalós y 40 dispositivos de almacenamiento del fabricante Sonnen con una capacidad de acumulación total de 214 kWh. Los datos energéticos más característicos obtenidos durante el año 2019 y la primera mitad del 2020 son los siguientes:

Tabla 3. Datos energéticos del *camping* La Ballena Alegre. Fuente: Webatt

	2019	2020
Producción fotovoltaica [kWh]	61.168	41.484
Energía fotovoltaica compartida entre los diferentes bungalós [kWh]	28.181	20.331
Consumo neto de red [kWh]	23.956	5.665
Consumo bruto de red [kWh]	52.215	24.387
Uso directo solar [kWh]	19.947	13.433
Autosuficiencia con instalación fotovoltaica	38%	55%
Autosuficiencia con instalación fotovoltaica + baterías	54%	77%

Los datos muestran el aumento de autosuficiencia energética de la instalación de un año a otro, pasando del 54% al 77%. Cabe destacar que hay bungalós con niveles de autosuficiencia superiores (los usuarios más autosuficientes obtuvieron un 85,5%) y que la media obtenida en las diferentes estancias durante el año 2020 asciende hasta el 82%.

Este proyecto, más allá del retorno económico que puedan ofrecer las instalaciones, también cuenta con un retorno más intangible, basado en los valores de la empresa, muy ligados a la promoción de la sostenibilidad entre los clientes del *camping* de La Ballena Alegre.



Ilustración 2. Vista aérea de los módulos fotovoltaicos instalados en los bungalós de La Ballena Alegre. Fuente: Webatt.

### Ejemplo 9: SISTEMA DE BATERÍAS DE SEGUNDA VIDA PARA INSTALACIONES DE RECARGA RÁPIDA DE VEHÍCULO ELÉCTRICO

Los sistemas de recarga rápida y ultrarrápida para vehículo eléctrico requieren una elevada potencia de conexión a red. En función de su ubicación, la conexión puede requerir grandes inversiones adicionales, que, unidas a unos costes operacionales elevados, pueden afectar a la viabilidad de la instalación.

Con el objetivo de hacer frente a estos retos, IBIL está desarrollando un sistema basado en baterías de segunda vida de autobuses eléctricos como soporte para las instalaciones de recarga rápida, que reduce la necesidad de potencia de red, aporta una gran flexibilidad para integrar renovables para autoconsumo, mejora la gestión energética y, además, puede prestar servicios adicionales al sistema eléctrico.

IBIL está actualmente en el proceso de instalación y puesta en marcha en una estación de servicio de Tolosa en Gipuzkoa de un sistema de almacenamiento de 75 kWh, empleando baterías de autobús de Irizar e-mobility, como apoyo a un cargador de 50 kW. La puesta en servicio de esta instalación está prevista para diciembre 2020 y enero 2021.

En este caso, el papel de la batería es fundamental, ya que la potencia disponible en la estación es únicamente de 15 kW y aumentar la potencia requeriría asumir grandes inversiones. A continuación, se muestran las especificaciones del sistema:

Tabla 4. Especificaciones del sistema. Fuente: IBIL.

Características y requisitos de recarga		Características BESS	
Potencia de recarga	50 kW	Número de módulos en serie	16
Potencia de conexión a red AC	15 kW	Potencia de descarga	35 kW
Potencia nominal de almacenamiento	35 kW	Potencia de carga	15 kW
		Capacidad nominal inicial	75,8 kWh
		C-rate (descarga/carga)	0,46C/0,2C
		Capacidad operativa útil inicial	68,7 kWh
		Capacidad operativa útil año 15	54,2 kWh
		Vida estimada	26 años

En la figura siguiente se muestra cómo los módulos, tras sacarse de su envolvente original, se han apilado verticalmente en una envolvente eléctrica para exteriores, empleando un sistema de refrigeración por aire en lugar de la refrigeración líquida que se empleaba en el autobús.



## 5.2. Sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor con acceso a mercado

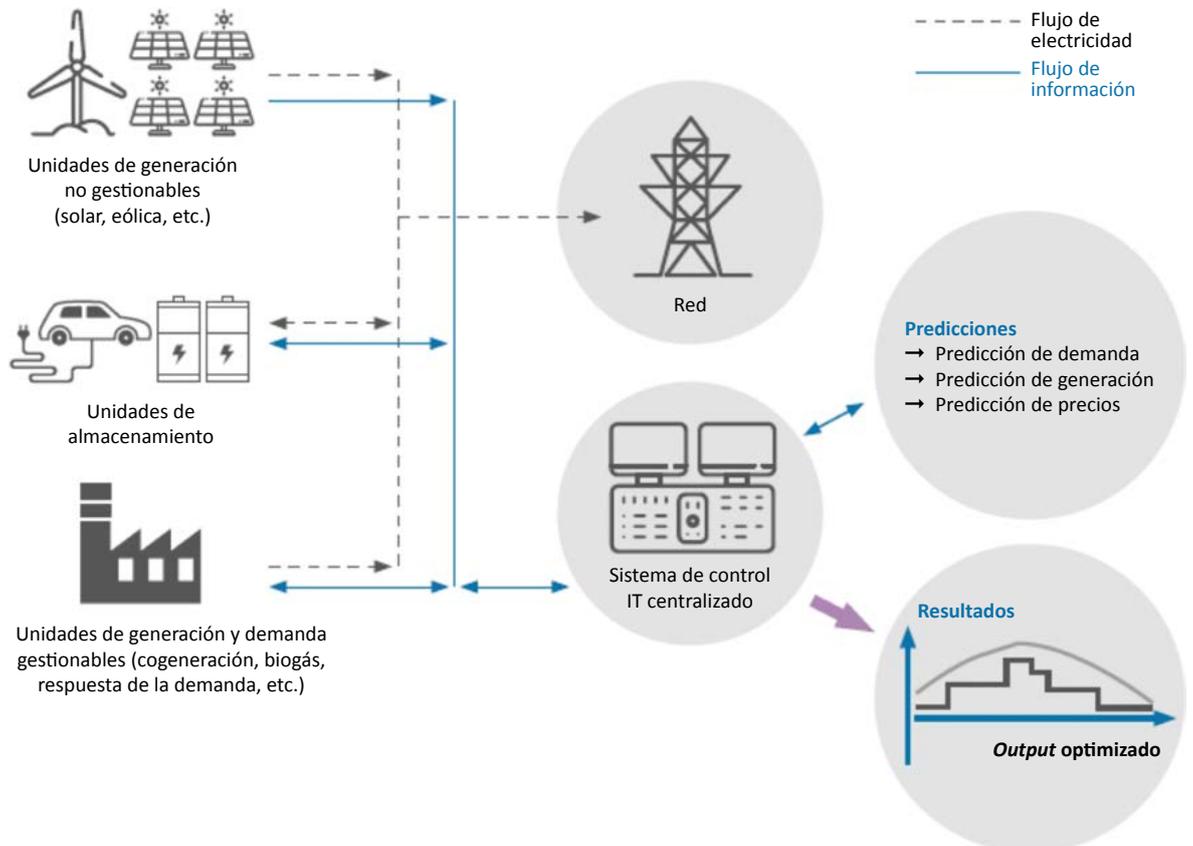
Como hemos visto en el apartado anterior sobre barreras, los sistemas de almacenamiento destinados a optimizar los costes energéticos del consumidor final sin posibilidad de participar en los mercados no siempre producen suficientes ahorros/ingresos para asegurar un retorno de la inversión favorable. Mediante la combinación de un servicio principal de optimización con la provisión de servicios a los mercados, el retorno de la inversión en baterías puede mejorar considerablemente. De hecho, es habitual que los sistemas de almacenamiento se desplieguen para un objetivo que requiere un uso puntual o limitado de su capacidad, dando posibilidad a la provisión de estos servicios complementarios sin afectar a la satisfacción del consumidor final.

Por eso, a diferencia del primer caso, en este, los propietarios de los sistemas de almacenamiento (los consumidores finales) acceden a los mercados directamente o a través de la figura del agregador. En el caso de consumidores con suficiente entidad (actualmente es necesario disponer de 1 MW de almacenamiento), estos pueden acceder al mercado directamente sin la figura del agregador. En caso de participar a través del agregador, este asume la representación de estos recursos en los distintos mercados disponibles y permite a los propietarios de estos recursos capturar un valor que de otra manera no sería factible para ellos.

Los agregadores establecen un acuerdo contractual con los consumidores y generalmente operan un gran número de recursos energéticos distribuidos de diferente tipo, o también pueden especializarse en un tipo particular de recurso, como pueden ser los sistemas de almacenamiento detrás del contador.

Así, mediante las denominadas plantas eléctricas virtuales (VPP, por sus siglas en inglés), los agregadores pueden vender electricidad en los mercados eléctricos o proveer de servicios de flexibilidad al sistema. Las VPP están controladas por sistemas inteligentes que relacionan las previsiones meteorológicas, los precios de los distintos mercados disponibles y las tendencias de consumo y producción de los recursos energéticos asociados para optimizar la participación de los recursos en distintos mercados. La siguiente ilustración muestra un esquema sobre la operación de los recursos energéticos distribuidos por parte de los agregadores:

Figura 11. Operación de los recursos energéticos distribuidos por parte del agregador



Fuente: IRENA (2019), Innovation landscape brief: Aggregators, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

En la siguiente tabla se muestran ejemplos de casos reales que demuestran el modelo de negocio de participación en los mercados a través de la figura del agregador.

Tabla 5. Ejemplos de modelos de negocio y sus características principales. Fuente: adaptado de IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Aggregators*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Agregador	País/región	Características principales
AGL	Australia	La VPP de AGL consiste en una red de baterías detrás del contador que tiene como objetivo reducir los costes de electricidad de los consumidores y ayudar en la estabilidad de la red en el sur de Australia.
Eneco CrowdNett	Países Bajos	Fundado en 2016, este agregador de baterías residenciales provee servicios de red mediante las baterías detrás del contador propiedad de prosumidores. Los consumidores reciben descuentos por la instalación de baterías además de un pago adicional de 450 €/año a cambio de poder utilizar el 30% de la capacidad de la batería en cualquier momento del día.
Energy & meteo systems (EMSYS)	Alemania	EMSYS da soporte a los agregadores para una eficiente integración de sus activos en el mercado. La oferta de EMSYS en las VPP incluye: plataformas de conexión a los recursos energéticos distribuidos, gestión de datos en tiempo real, control remoto de plantas de generación solar y eólica, predicción de generación, programación de la energía, trato en el mercado diario e intradiario, acceso a los servicios de balance de los recursos distribuidos y gestión de la demanda. EMSYS es uno de los primeros agregadores en ejecutar control primario utilizando baterías detrás del contador en el mercado de balance alemán.
Stem	Estados Unidos	Este agregador basa su actividad en la utilización de tecnología de inteligencia artificial en baterías detrás del contador y <i>virtual power plants</i> . Emplean los sistemas de almacenamiento para reducir el coste de electricidad de los consumidores comerciales. Las baterías se cargan cuando el coste de la energía es bajo y se descargan cuando el coste de la energía es alto (normalmente durante el pico de demanda). Stem puede utilizar su <i>software</i> para reducir la demanda de red de sus clientes, reduciendo de este modo la demanda de toda el área en los momentos en que la red existente no pueda aportar dicha energía.

Las comunidades locales de energía son una nueva figura en el sector eléctrico que podría adoptar un modelo de negocio similar al presentado en este apartado. En este caso, diversos usuarios finales/consumidores pueden crear una comunidad local donde coexisten instalaciones de generación renovable distribuida, sistemas de almacenamiento, puntos de recarga de vehículo eléctrico, etc. La propiedad de todos estos activos está en manos de la comunidad, pero, potencialmente, los recursos de la comunidad pueden ser gestionados de manera agregada para ofrecer servicios de red en los mercados de flexibilidad disponibles.

Finalmente, dentro de este caso también se podrían incluir los VE, mediante la tecnología V2G. Los VE pueden actuar como cargas flexibles y sistemas de almacenamiento distribuido, capaces de proveer de servicios a los operadores de red. Mediante la carga inteligente de vehículos se posibilita la optimización del proceso de carga teniendo en consideración las restricciones de red, la disponibilidad de energías renovables y las necesidades de los propietarios. De manera análoga a los sistemas de almacenamiento estacionarios, los agregadores podrían gestionar los procesos de carga de los VE para acceder al mercado eléctrico.

### Ejemplo 10: PROYECTOS DE TECNOLOGÍA V2G EN EUROPA

En Europa existen varias iniciativas relacionadas con la tecnología V2G, de las que se puede destacar el proyecto danés Parker, que utiliza la tecnología de recarga inteligente y se basa en la cooperación entre los sectores de la industria automotriz y de energía para demostrar la capacidad de los VE para apoyar y equilibrar sistemas de energía basados en energías renovables. El proyecto, en el que participan diferentes operadores de red como Enel, Nuvve e Inero, así como diversos fabricantes de vehículos como Nissan, Mitsubishi y el Grupo PSA, ha demostrado que los VE pueden contribuir en la optimización de la red eléctrica, proveyendo servicios como regulación de frecuencia y tensión. Se estiman ingresos anuales por vehículo entre 1.700 y 2.500 €.

### 5.3. Dispositivos de almacenamiento propiedad de terceros

El último caso se refiere a modelos de negocio donde un tercero (como un agregador o una empresa de servicios energéticos) es propietario de los sistemas de almacenamiento con el objetivo de maximizar el valor derivado de estos sistemas. Por un lado, este modelo ofrece almacenamiento como un servicio energético (*as-a-service*) a los consumidores que les permite obtener una fracción de los ahorros del sistema sin tener que llevar a cabo ninguna inversión inicial. Por otro lado, la entidad propietaria del sistema busca optimizar la factura del consumidor al mismo tiempo que ofrece la capacidad disponible en las baterías a los mercados disponibles para incrementar sus fuentes de ingresos.

Este modelo de negocio pone en relieve la tendencia de transformación del sector, de un modelo de venta de energía tradicional a una venta de servicios energéticos al consumidor. Entre estos servicios se encuentran la gestión de la demanda, el respaldo energético con generación distribuida y dispositivos de almacenamiento, el intercambio de electricidad en comunidades locales, ahorros energéticos, etc.

Es esperable que este modelo de negocio (almacenamiento *as-a-service*) se convierta en uno de los modelos comerciales más atractivos desde el punto de vista del usuario final, por el hecho de que este puede beneficiarse de los servicios de almacenamiento sin estar obligado a adquirir experiencia en la administración y control de los activos de almacenamiento y no tener que aportar ninguna inversión inicial.

### Ejemplo 11: STARKE ENERGY

Starke Energy es una *start-up* española que está empezando a operar en los mercados europeos más maduros, como vendrían a ser los Países Bajos o el Reino Unido, que están abiertos a la participación en los mercados energéticos de unidades de almacenamiento energético de pequeño/mediano tamaño mediante agregación. La operación de las baterías se hace mediante la aplicación de una inteligencia artificial que permite la participación en varios mercados al mismo tiempo con un enfoque de minimizar la degradación de las baterías, optimizando así su valor. Además, ofrecen a sus clientes la posibilidad de optar por un modelo *as-a-service*, en el cual se ofrece la batería con un contrato de *leasing* o *renting*, si bien el cliente también puede optar por adquirir la batería y ceder su operación a Starke Energy.

Ambos modelos de negocio (*as-a-service* o compra) funcionan mediante el mismo *software* diseñado por Starke Energy, de manera que es una garantía de que las baterías no llegarán a condiciones operativas extremas o dañinas. Así, mientras que otros modelos de agregación o VPP buscan maximizar su retribución a corto plazo al incluir baterías en sus portafolios, Starke Energy maximiza el valor de cada batería en un mayor horizonte temporal dado que el modelo *as-a-service* implica tratar de minimizar los costes de operación y mantenimiento de las baterías.

Además, Starke Energy ofrece sus soluciones de almacenamiento de tamaño medio (en torno a 100 kWh) para edificios del sector residencial u oficinas, lo cual abre un nicho para el sector de las baterías ya que cada batería provee servicios a varios habitantes del mismo edificio o grupo de viviendas. Así, pivotan del modelo clásico B2C de baterías para el sector residencial hacia un modelo B2B, donde sus clientes son empresas del sector inmobiliario o gestores de comunidades energéticas.



# 6 Cadena de valor del almacenamiento detrás del contador en España

La cadena de valor del sector del almacenamiento detrás del contador se puede clasificar en diferentes fases:

- **Materiales/componentes:** en esta fase se incluyen proveedores de materias primas, productos químicos para materiales activos, fabricantes de piezas metálicas y componentes electrónicos necesarios para la fabricación de los dispositivos de almacenamiento. En este ámbito no existen muchas compañías del sector privado a nivel español, se pueden mencionar Graphenea y Gnanomat como diseñadores y fabricantes de productos basados en grafeno para aplicaciones de almacenamiento energético, y Simune, que ofrece servicios de análisis de materiales.
- **Sistemas de almacenamiento:** en esta etapa se consideran los fabricantes del conjunto del sistema de almacenamiento de las diversas tecnologías. En el caso del almacenamiento electroquímico se encuentran los fabricantes de módulos y packs de baterías, como, por ejemplo, Cegasa, Amopack, AEG power solutions, Ukai y E22. Otros ejemplos de empresas de esta fase de la cadena de valor son Elytt Energy, diseñador y fabricante de sistemas de almacenamiento de energía cinética (volantes de inercia) y Cade Engineered Technologies, especialistas en sistemas de almacenamiento térmico a nivel industrial.
- **Integración y desarrollo:** los sistemas de almacenamiento fabricados en la fase anterior se integran con componentes electrónicos (inversores, sistemas de gestión, etc.) para abastecer los requerimientos específicos de cada proyecto. Esta etapa es la que más empresas concentra a nivel estatal, entre ellas se pueden mencionar, por ejemplo, Ingeteam que desarrolla soluciones avanzadas para el almacenamiento de la energía eléctrica basadas en la electrónica de potencia y control, Albufera Energy Storage que comercializa sus propias patentes de baterías electroquímicas basadas en materiales sostenibles como son el aluminio y el carbono, e HydraRedox que ofrece soluciones de almacenamiento de energía mediante la tecnología redox de vanadio.
- **Servicios al usuario final:** en esta fase se presentan las empresas relacionadas con la oferta de servicios/productos al usuario final, ya sean proyectos de instalaciones de almacenamiento de energía o servicios energéticos vinculados a estas. Por ejemplo, Ampere Energy, que ofrece servicios de diseño, desarrollo y producción de sistemas de almacenamiento y gestión energética para el sector residencial, Webatt, con su servicio a clientes residenciales mediante soluciones de autoconsumo con baterías Sonnen, Holaluz, que ofrece la posibilidad de instalar baterías Tesla junto a las instalaciones fotovoltaicas de autoconsumo en el sector residencial, o Stemy Energy, que ofrece servicios de flexibilidad a la red mediante la agregación de sistemas energéticos residenciales a la vez que optimiza la factura energética de sus clientes.

- Reciclaje y segunda vida: en la última etapa se enumeran las entidades con actividades relacionadas con el reciclaje de componentes de las diversas tecnologías de almacenamiento energético y la segunda vida en el caso de las baterías electroquímicas. Algunos ejemplos son las compañías Recyclia y Envirobat, especializadas en el reciclaje de baterías, Renobat que ofrece servicios de venta, distribución, optimización, regeneración y reciclado de baterías, BeePlanet Factory, que diseña, desarrolla y fabrica la primera batería de segunda vida comercial en España, y Unibat, que asesora a las empresas para la correcta gestión del reciclaje de pilas y baterías.

### **Ejemplo 12: BEEPLANET FACTORY**

BeePlanet Factory desarrolla proyectos tecnológicos basados en la reutilización de las baterías retiradas del vehículo eléctrico (B2U, del inglés *Battery 2nd Use*), las cuales, al acabar su aplicación original, mantienen intacta una gran capacidad de almacenamiento (70-80%) y altas prestaciones de calidad y seguridad.

BeePlanet reutiliza baterías del modelo Leaf de Nissan y tiene la previsión de firmar nuevos acuerdos con otros fabricantes de vehículos. Sus sistemas disponen de una vida útil de entre 12 y 15 años y entre el 60 y el 65% del producto es reciclado. Los productos que comercializan actualmente son baterías de 4, 8 y 12 kWh para el sector residencial y próximamente tienen prevista la comercialización de sistemas de entre 12 y 200 kWh para los sectores comercial e industrial.

Además de entidades del sector privado, existen diversos centros de investigación en cada una de las fases de la cadena de valor, tal y como puede apreciarse en las siguientes tablas, donde se muestra una recopilación lo más exhaustiva posible de diversas empresas del sector privado y centros de investigación a nivel español vinculados a las diferentes etapas de la cadena de valor del almacenamiento de energía:

Tabla 6. Cadena de valor con empresas españolas del sector del almacenamiento. Fuente: elaboración propia con datos aportados por BatteryPlat y adaptación de *El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV*, Cuadernos Orkestra 61/2019.

Materiales/componentes	Fabricación de sistemas de almacenamiento	Integración y desarrollo	Servicios al usuario final	Reciclaje y segunda vida
Sector privado				

Tabla 7. Cadena de valor con centros de investigación del sector del almacenamiento. Fuente: elaboración propia con datos aportados por BatteryPlat y adaptación de *El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV, Cuadernos Orkestra 61/2019*.

Materiales/componentes	Fabricación de sistemas de almacenamiento	Integración y desarrollo	Servicios al usuario final	Reciclaje y segunda vida
<p>Centros de investigación</p>				

# 7 Conclusiones

En el presente documento se ha llevado a cabo un análisis del estado actual del almacenamiento detrás del contador en España. Se espera que este marco evolucione favorablemente en los próximos años gracias a una mayor madurez de la tecnología, cambios regulatorios que faciliten su participación en los distintos mercados eléctricos, definición específica de nuevos agentes del sector eléctrico como los agregadores independientes y las comunidades energéticas locales, y un aumento de la oferta y la competitividad de empresas a nivel nacional dedicadas a este sector, así como la voluntad de todos los agentes (públicos, empresariales, ciudadanos) de avanzar en la transición energética del país.

Las tecnologías de almacenamiento detrás del contador más utilizadas actualmente son las baterías electroquímicas, especialmente las de tipo Li-ion. Estas se emplean tanto en instalaciones estacionarias como en vehículos eléctricos, que a la vez pueden conectarse a punto de consumo a través de la tecnología *vehicle-to-building* (V2B) o proporcionar servicios al sistema eléctrico mediante la tecnología *vehicle-to-grid* (V2G). Además, el almacenamiento de calor sensible (como los sistemas ACS) también es una tecnología muy madura y ampliamente utilizada en el ámbito residencial, que, con un adecuado control inteligente, también es capaz de ofrecer una optimización de los costes energéticos del consumidor, así como servicios a la red.

En el documento también se identifican aquellos retos más relevantes a los que se enfrentan los sistemas de almacenamiento detrás del contador para poder impulsar su despliegue masivo.

Por un lado, el acceso de los sistemas de almacenamiento detrás del contador a los mercados eléctricos es un requisito fundamental para asegurar su viabilidad económica, así como el aprovechamiento de su potencial técnico para ofrecer flexibilidad y estabilidad al sistema. En este sentido, nos encontramos en un punto incipiente, aunque con perspectivas favorables. Por un lado, el Real Decreto-ley 23/2020 reconoce la figura de los «titulares de instalaciones de almacenamiento» así como la del «agregador independiente» y, por el otro, los cambios en las condiciones de participación en los mercados de balance de REE ya permiten la participación de sistemas de almacenamiento en estos mercados de manera individual o agregada. Aún queda un recorrido extenso por delante, en el que será necesario definir los derechos, obligaciones y límites en la participación de los sistemas de almacenamiento en los diferentes mercados eléctricos y los requisitos técnicos de su participación, entre otros.

A nivel regulatorio, como se ha comentado, se debe desarrollar el marco normativo que especifique los derechos y las obligaciones de la figura del almacenamiento. La Estrategia de Almacenamiento aprobada el 9 de febrero de 2021 marca la dirección y objetivos que seguir para avanzar en el despliegue de estos sistemas alrededor del territorio español según los objetivos fijados en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030.

A nivel tecnológico, se necesita seguir trabajando para obtener dispositivos más eficientes, de menor coste y con una mayor vida útil. Además, es clave promover la segunda vida de los sistemas de almacenamiento con el objetivo de evitar la sobreexplotación de los recursos naturales ligada a la producción de algunos de los sistemas.

Este conjunto de retos derivan en la barrera fundamental para el despliegue masivo de sistemas de almacenamiento detrás del contador que es su rentabilidad. En este sentido, una de las oportunidades para mejorar la rentabilidad de los sistemas será la capacidad de innovar en el modelo de negocio de despliegue y financiación de estos sistemas. En este sentido, se identifican tres tipologías de modelos de negocio principales: 1) sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor sin acceso a mercado, con el objetivo de optimizar su factura de electricidad y/o maximizar su independencia energética; 2) sistemas de almacenamiento propiedad del consumidor, con acceso a mercado directamente o a través de la figura del agregador, y 3) el almacenamiento *as-a-service*, donde los dispositivos de almacenamiento son propiedad de un tercero cuyo objetivo es maximizar el valor derivado de estos sistemas.

A nivel del mercado español, el análisis de la cadena de valor de los sistemas de almacenamiento detrás del contador muestra que existen empresas del sector privado en todas las fases de la cadena, con una presencia importante en las fases de fabricación de sistemas de almacenamiento, integración y desarrollo, y servicios al usuario final. En cuanto a los centros de investigación, hay una gran cantidad de ellos que participan en todas las fases de la cadena de valor, exceptuando la fase de servicios al usuario final.

En el contexto de la transición energética, el almacenamiento detrás del contador es una de las oportunidades que afrontar en el futuro para una plena descarbonización del sistema energético y una efectiva integración de las tecnologías renovables.

# 8 Agradecimientos

Para la realización de este estudio se han llevado a cabo consultas específicas con algunos de los expertos/proveedores de referencia de sistemas de almacenamiento detrás del contador en España y Europa. En particular:

- Alicia Carrasco (Asociación Entra).
- Daniel Pérez (Holaluz).
- Franc Comino (Webatt).
- Ignacio Guerrero (Ampere Energy).
- Iñigo Cobelo (Edinor e Ibil).
- Iván Mayordomo (Starke Energy).
- Maja Jousif y Luis Manuel Santos (BatteryPlat).
- Marie Wettingfeld y Wenzel Brühl (Sonnen).
- Pol Olivella (Thermovault).



# 9 Bibliografía

Ampere Energy (acceso el 03/07/2020). <https://ampere-energy.com/es/vpp>

BeePlanet Factory (acceso el 10/07/2020). <https://beeplanetfactory.com/>

Clever Green (acceso el 31/07/2020). <http://www.clevergreen.es/icebat-bateria-frio/>

EASE/EERA (2017), *European energy storage technology development roadmap*.

European Battery Alliance (2020), *How stationary batteries further trigger the storage boom*. <https://www.eba250.com/how-stationary-batteries-further-trigger-the-storage-boom/>

EIT InnoEnergy. <https://www.innoenergy.com/news-events/business-model-innovation-who-should-own-behind-the-meter-battery-storage/>

EXKAL (acceso el 02/07/2020). <https://www.exkalsa.com/genera2018/#more-4251>

IEA (2019), *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities*.

Instituto Vasco de competitividad (Fundación Deusto) (2019), *Cuadernos Orkestra - El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV*.

Instituto Vasco de competitividad (Fundación Deusto) (2020), *Cuadernos Orkestra - Modelos de negocio en recursos distribuidos de electricidad*.

Ioan Sarbu y Calin Sebarchievici (2018), *A comprehensive review of thermal energy storage*.

IRENA (2013), *Thermal energy storage: Technology brief*.

IRENA (2017), *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2018), *Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Aggregators*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Time-of-use tariffs*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Net billing schemes*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Behind-the-meter batteries*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Electric-vehicle smart charging*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Utility-scale batteries*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2019), *Innovation landscape brief: Artificial intelligence and big data*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

IRENA (2020), *Electricity storage valuation framework: Assessing system value and ensuring project viability*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

Futured GIA (Grupo Interplataformas de Almacenamiento) (2016), *Almacenamiento: Estado de las tecnologías*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Febrero de 2021). Estrategia de Almacenamiento Energético. [https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento\\_tcm30-522655.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/prensa/estrategiaalmacenamiento_tcm30-522655.pdf)

Real Academia de Ingeniería (2017), *El almacenamiento de energía en la distribución eléctrica del futuro*.

Redflow (acceso el 31/07/2020). <https://redflow.com/>

REMOTE project (acceso el 30/07/2020). <https://www.remote-euproject.eu/>

Smartgridsinfo (acceso el 31/07/2020). <https://www.smartgridsinfo.es/2019/08/01/nueva-alianza-estrategica-desarrollar-tecnologias-almacenamiento-termoquimico-energia>

Sunrun (acceso el 03/07/2020). <https://www.sunrun.com/solar-plans-and-services>

Unión Europea (2019), *El apoyo de la UE al almacenamiento de energía*. Documento informativo.

USAID-NREL (2020), *An overview of behind-the-meter solar-plus-storage regulatory design*.

Wood Mackenzie (2020), *Global energy storage outlook H1 2020*.

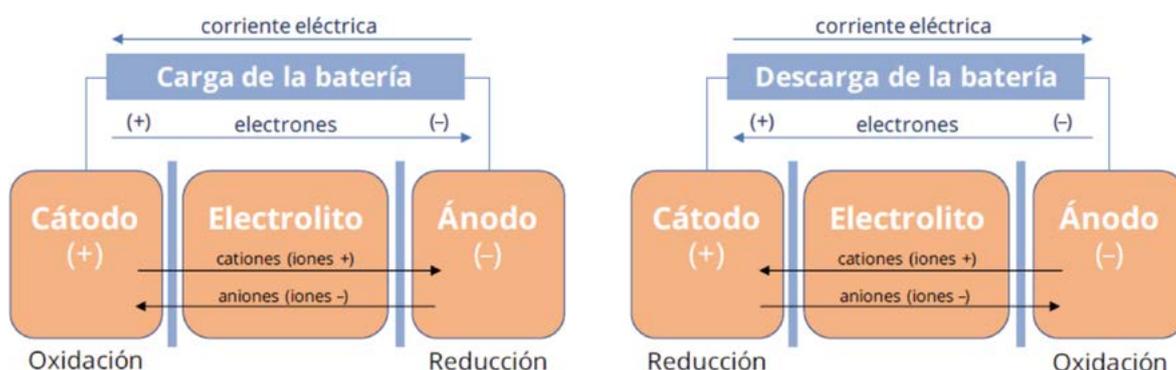
# ANEXO

## ALMACENAMIENTO ELECTROQUÍMICO

El almacenamiento electroquímico consiste en varias celdas donde se emplean las reacciones químicas de reducción y oxidación para generar un flujo de electrones (corriente) en un circuito externo. Los elementos básicos de una celda de una batería son los electrodos (ánodo y cátodo) y el electrolito. Los electrodos están formados por materiales químicos activos que disponen de la capacidad de oxidarse y reducirse. El electrolito separa los electrodos entre sí y está formado por sustancias que facilitan la transferencia de iones positivos y negativos entre el ánodo y el cátodo.

Durante el proceso de carga de una batería la corriente eléctrica aplicada genera de manera simultánea un flujo de electrones desde el cátodo hasta el ánodo, un flujo de iones positivos desde el elemento químico del cátodo hasta el ánodo y un flujo de iones negativos desde el ánodo hasta el cátodo. El proceso se revierte para llevar a cabo la descarga. La siguiente imagen ilustra el principio de funcionamiento de las baterías:

Figura 12. Flujos de electrones e iones durante el proceso de carga y descarga de una batería



Fuente: El sector del almacenamiento de energía eléctrica en la CAPV, *Cuadernos Orkestra* 61/2019.

Los sistemas de almacenamiento por baterías abarcan diversas tecnologías como Li-ion, plomo ácido, baterías de flujo y baterías de alta temperatura. Cada una de estas tecnologías difieren entre sí en sus características técnicas y tienen sus ventajas y desventajas respecto al resto, lo que las hace adecuadas para diferentes aplicaciones dentro del sistema eléctrico. A continuación, se describen las principales características de este tipo de sistemas:

- **Capacidad de potencia (MW):** es la potencia máxima de descarga que el dispositivo puede conseguir desde un estado de carga completa. Algunos sistemas de baterías permiten descargar a potencias superiores para duraciones limitadas.
- **Capacidad energética (MWh):** es la cantidad máxima de energía que la batería puede almacenar.
- **Densidad de potencia (W/l):** indica la potencia instantánea que puede suministrar una batería por unidad de volumen.

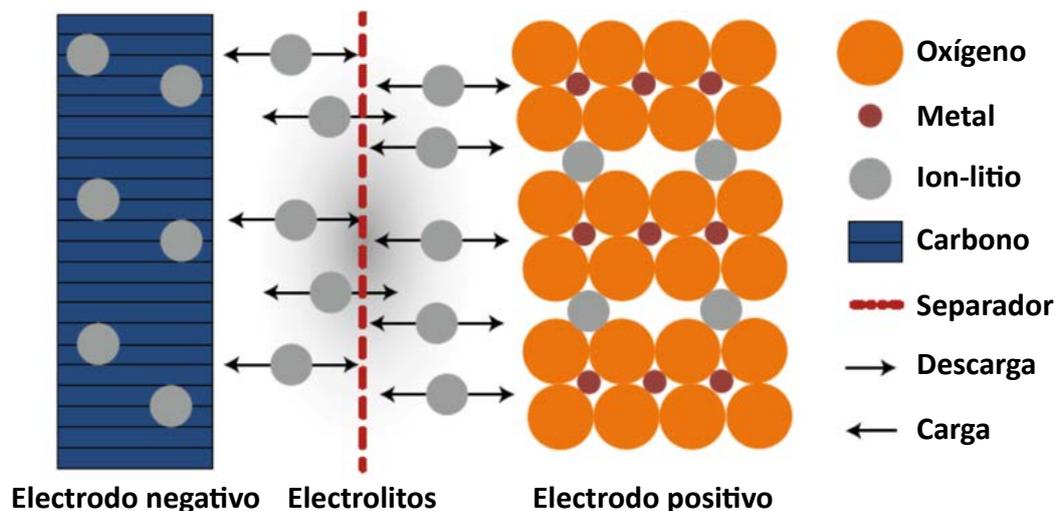
- **Densidad de energía (Wh/l):** es la capacidad de energía que puede almacenar la batería por unidad de volumen.
- **Tiempo de descarga (h):** es la cantidad de tiempo que un sistema de almacenamiento puede descargar su capacidad de potencia. Llamado también «C-rate», es la ratio entre la capacidad de potencia y la capacidad de energía de una batería y puede ser diferente para los procesos de carga y descarga.
- **Vida útil (ciclos):** es el número de ciclos de carga y descarga que la batería puede completar durante su vida sin perder un rendimiento considerable.
- **Autodescarga (%):** corresponde a la carga que pierde el dispositivo mediante reacciones químicas internas sin utilización.
- **Estado de carga (%):** representa el nivel de carga de la batería entre carga y descarga total.
- **Profundidad de descarga (%):** es la ratio entre la capacidad entregada por la batería durante la descarga y la capacidad nominal de esta.
- **Eficiencia (%):** es la ratio entre la descarga y la carga de energía de la batería. Este parámetro tiene en consideración las pérdidas de autodescarga y otras pérdidas eléctricas.
- **Coste (€/kWh):** es el coste de la batería por unidad de energía almacenada. Se puede referir tanto al coste de inversión como al coste de operación y mantenimiento durante su vida útil.
- **Madurez:** se refiere a la fase de evolución en la que se encuentra la tecnología.

### Baterías de Li-ion

Las baterías de Li-ion intercambian iones de litio (Li+) entre el ánodo y el cátodo, los cuales están fabricados por diferentes componentes combinados con litio. El cátodo habitualmente está formado de un óxido metálico de litio y el ánodo suele ser grafito.

El esquema del principio de funcionamiento es el que sigue:

Figura 13. Componentes principales y principio de funcionamiento de una celda Li-ion

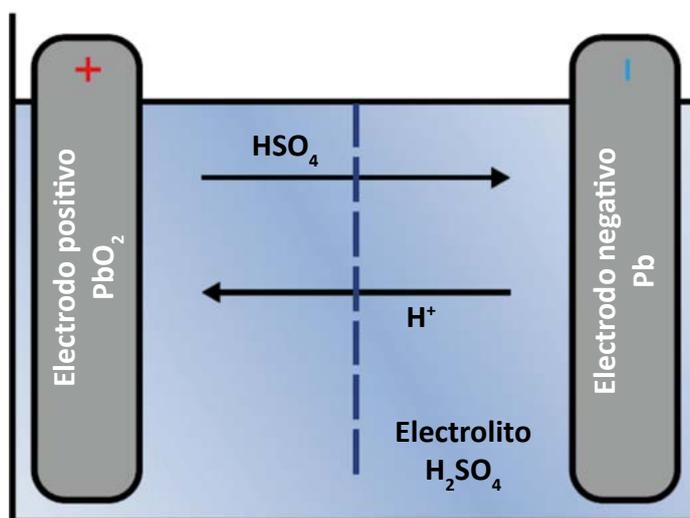


Fuente: Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, IRENA, 2017.

## Baterías de plomo ácido

Existen dos tipos de diseños, las baterías de plomo ácido inundadas y las reguladas por válvula que evitan la pérdida del electrolito. Las celdas de este tipo de baterías utilizan una disolución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en agua como electrolito, un electrodo positivo de óxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ) y un electrodo negativo de plomo ( $\text{Pb}$ ). También disponen de un separador poroso que tiene la doble función de aislar los electrodos entre sí y evitar el traspaso de ácido. Durante el proceso de descarga los electrodos se convierten en sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), mientras la concentración de ácido sulfúrico disminuye hasta conseguir una solución de básicamente agua en el electrolito. El proceso se revierte cuando la batería se carga mediante un recurso exterior, provocando que tanto los electrodos como el electrolito vuelvan a su estado original. El esquema del principio de funcionamiento se muestra a continuación:

Figura 14. Componentes principales y principio de funcionamiento de una celda Pb-ácido



Fuente: Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, IRENA, 2017.

La tecnología de plomo ácido es la más avanzada y desarrollada del mercado y este es uno de los motivos de tener un coste reducido en comparación con otras tecnologías. Dispone de eficiencias elevadas, entre 70 y 90%, y utiliza materiales con un alto grado de reciclabilidad. En cambio, dispone de una baja densidad de energía, entre 50 y 100 Wh/l, y una vida útil corta (únicamente tres años considerando un ciclo diario con un 80% de profundidad de descarga). Una consideración que tener en cuenta es la toxicidad del elemento principal de estos dispositivos, no obstante, la tasa de reciclabilidad es muy elevada (superior al 90%).

## Baterías de flujo

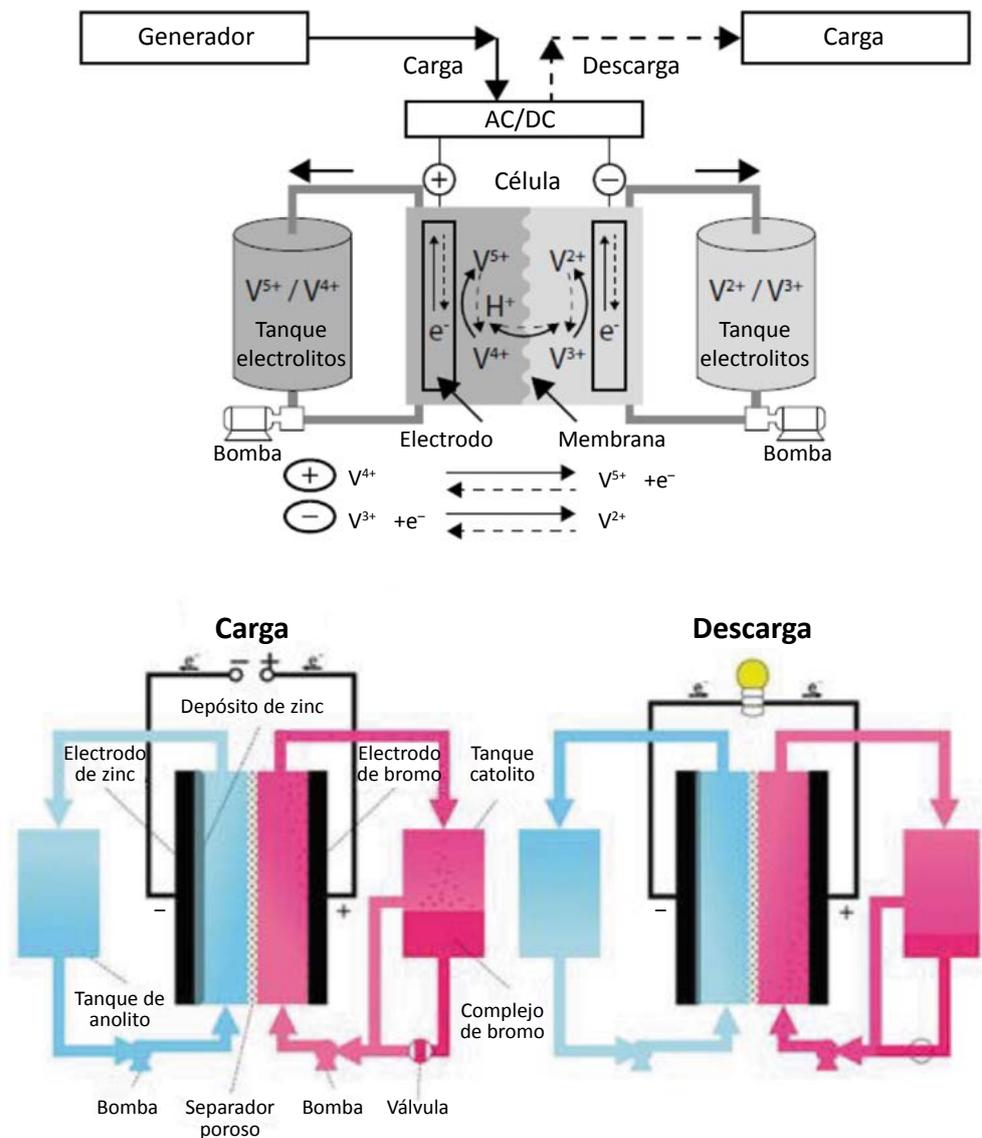
Este tipo de baterías se diferencian del resto de tecnologías por el hecho de que los materiales activos no se encuentran en los electrodos sino que están disueltos en las soluciones de los electrolitos. Estos se almacenan en tanques (uno en el lado del ánodo y otro en el del cátodo) y se bombean a las celdas, donde suceden las reacciones electroquímicas reversibles durante los procesos de carga y descarga de la batería. Se pueden diferenciar dos tipos de baterías de flujo dependiendo de la forma en la que se almacenan los materiales activos:

- Las de flujo puro, en las que los materiales activos se encuentran almacenados separados de las celdas (redox de vanadio, VRFB).
- Las híbridas, en las que los materiales activos se acumulan junto a las celdas (zinc bromuro, ZBFB).

Entre las ventajas de las baterías de flujo se encuentra la separación de la capacidad de potencia respecto a la capacidad de energía, que hace posibles la escalabilidad de las instalaciones, una vida útil larga sin dependencia de la profundidad de descarga, como sucede con otras tecnologías (hasta 20 años con profundidades de descarga del 100%), una buena reciclabilidad y un índice de autodescarga bajo.

Entre las desventajas se encuentran una baja densidad de energía y potencia, eficiencias bajas en comparación con la tecnología Li-ion y la complejidad de diseño. El esquema del principio de funcionamiento de cada tipología se muestra a continuación:

Figura 15. Componentes principales y principio de funcionamiento de las baterías de flujo VRFB (arriba) y ZBFB (abajo)



Fuente: Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, IRENA, 2017.

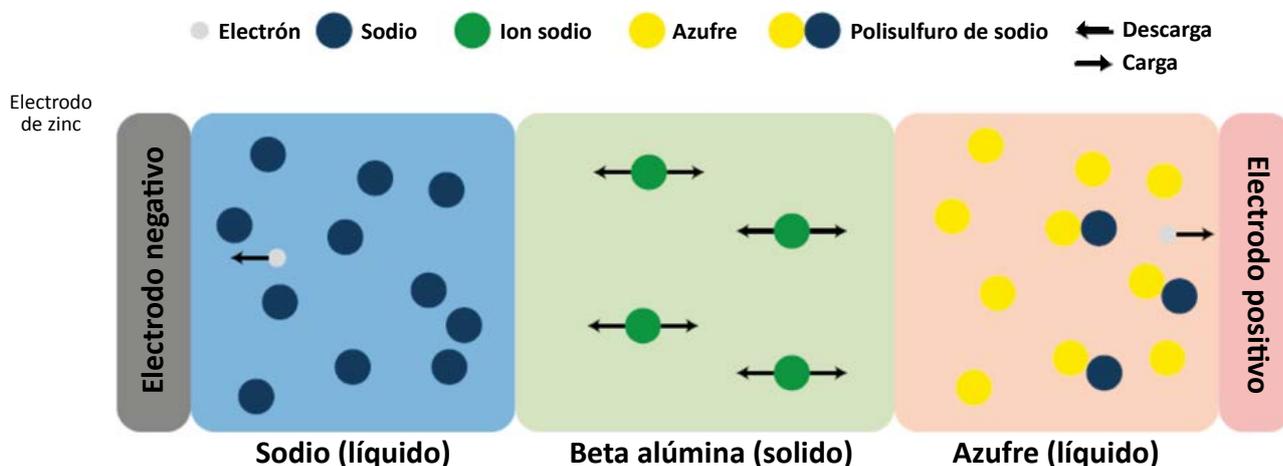
## Baterías de alta temperatura (basadas en sodio)

Las baterías de alta temperatura utilizan materiales activos en estado líquido y un electrolito sólido de cerámica que también funciona como separador de los electrodos. Se necesitan elevadas temperaturas, entre 250 y 350 °C, para mantener los materiales activos en estado líquido y asegurar la conductividad necesaria del electrolito. Las tipologías más relevantes son las siguientes:

- Sulfuro sódico (NaS).
- Sodio-níquel-cloruro (NaNiCl<sub>2</sub>).

En la siguiente imagen se muestra el principio de funcionamiento de una batería de alta temperatura NaS:

Figura 16. Componentes principales y principio de funcionamiento de una batería de alta temperatura NaS



Fuente: Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030, IRENA, 2017.

Esta tecnología cuenta con densidades de energía elevadas, entre 140 y 300 Wh/l, en comparación con las tecnologías de plomo ácido y baterías de flujo, y se encuentran cerca de los valores de las de Li-ion. También disponen de ratios de autodescarga muy bajos y una vida útil larga.

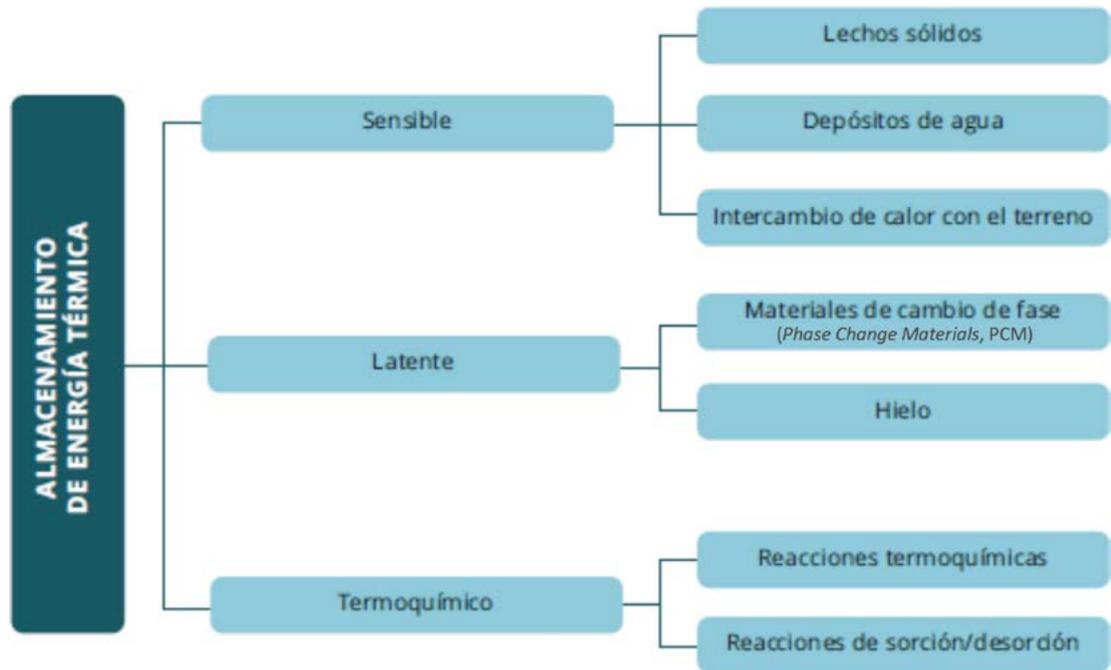
La principal desventaja de este tipo de baterías, que las hace inadecuadas para su utilización en gran parte de las aplicaciones detrás del contador, es la alta temperatura que se requiere para su operación. Durante las fases en las que la batería no se encuentra en carga o descarga el consumo energético del sistema es de en torno al 3%.

## ALMACENAMIENTO TÉRMICO

Esta tecnología se basa en el almacenamiento de la energía térmica. Esta se puede almacenar a temperaturas de entre -40 y 400 °C en forma de calor sensible (cambios de temperatura) de un determinado material, en calor latente (cambios de fase) asociado a los materiales de cambio de fase y como energía termoquímica asociada a reacciones químicas.

Las diferentes tecnologías se muestran en la siguiente ilustración:

Figura 17. Tipos de tecnologías de almacenamiento térmico



Fuente: Almacenamiento-Estado de las tecnologías, GIA-Grupo Interplataformas de Almacenamiento.

En la siguiente ilustración se muestran los principales parámetros técnicos de las tres tecnologías:

Tabla 8. Principales parámetros técnicos de las tres tecnologías de almacenamiento térmico

Sistema de almacenamiento térmico	Capacidad (kW/t)	Potencia (MW)	Eficiencia (%)	Período de almacenamiento	Coste (€/kWh)
Sensible (agua caliente)	10-50	0,001-10,0	50-90	días/meses	0,1-10
Materiales con cambio de fase (PCM)	50-150	0,001-1,0	75-90	horas/meses	10-50
Reacciones químicas	120-250	0,01-1,0	75-100	horas/días	8-100

Fuente: A Comprehensive review of thermal energy storage, Ioan Sarbu y Calin Sebarchievici, 2017.

## ALMACENAMIENTO ELÉCTRICO

### Supercondensadores

Los supercondensadores disponen de densidades de potencia muy elevadas en comparación con los sistemas de almacenamiento electroquímico, entre 10 y 20 kW/kg, a pesar de que su densidad energética es muy baja, menor a 8 Wh/kg. Con el objetivo de mejorar la capacidad de almacenamiento, actualmente existen líneas de investigación centradas en la búsqueda de materiales nuevos de gran porosidad para los electrodos, como, por ejemplo, el litio.

Otras características de esta tecnología son la rápida respuesta en milisegundos, una elevada eficiencia energética (mayor a 95%) y una larga vida útil.

A continuación, se muestran los principales parámetros técnico-económicos de los supercondensadores y la previsión de estos en el futuro:

Tabla 9. Parámetros técnico-económicos de los supercondensadores, 2017-2050.

	Rendimiento actual	Objetivo 2030	Objetivo 2050
Voltaje	3,0 Volt	4,0 Volt	4,5-5 Volt
Densidad de energía	4-8 Wh/kg EDLCs	50 Wh/kg	75 Wh/kg
	15-30 Wh/kg for LCAPs		
Densidad de potencia	» 10-20 kW/kg (1-5s)	» 40 kW/kg (1-5s)	» 60 kW/kg (1-5s)
Capacitación específica	6 F/g	50 F/g	ca. 600 F/g
Ciclabilidad	500k – 1 M cycles	1,5 M cycles	> 2 M cycles
Temperatura mínima	T – 40 °C	T – 40 °C	T –40 °C
Temperatura máxima	T – 65 °C	T – 100 °C	T –125 °C
	Rendimiento actual	Objetivo 2030	Objetivo 2050
€/W	0,3 €/W (cell basis)	0,2 €/W (cell basis)	0,05 €/W (cell basis)
€/F	0,0015 c€/F	0,005 c€/F	0,002 c€/F

Fuente: European energy storage technology development roadmap, EASE, 2017.

Notas: EDLC = supercondensadores eléctricos de doble capa; LCAP = superconductor de Li-ion.

## Superconductores (SMES)

Se pueden clasificar dependiendo de la temperatura de operación en sistemas HTS o de alta temperatura (70 K) y LTS o de baja temperatura (5 K).

A pesar de la necesidad de utilización de estas temperaturas, la eficiencia energética del sistema es superior al 90%. Otras características de esta tecnología son la rápida respuesta de potencia (milisegundos), la robustez, la posibilidad de ciclos de carga/descarga completos (100% de profundidad de descarga) y una larga vida útil con ciclos ilimitados. En cambio, disponen de densidades de energía muy limitadas que hacen muy difícil su utilización en las aplicaciones detrás del contador con limitación de espacio. Aunque no dispongan de componentes tóxicos, se debe tener en consideración el impacto ambiental de la fabricación de algunas tipologías de superconductores que emplean tierras raras (bobinas de alta temperatura).

## ALMACENAMIENTO MECÁNICO

Existen dos tipos de volantes de inercia, los de baja velocidad (menor a 10.000 rpm), que utilizan normalmente discos de inercia de acero, y los de alta velocidad (hasta 50.000 rpm), que utilizan fibra de carbono como material. En ambas tipologías se emplean atmósferas de muy baja presión para reducir pérdidas por rozamiento mecánico y con el aire.

Esta tecnología dispone de densidades de potencia y energía elevadas, posibilita la separación de las características de potencia y energía en la fase de diseño y cuenta con un número muy elevado de ciclos de carga y descarga. Otras características son la no dependencia de la temperatura y la facilidad de determinación del estado de carga, el cual está directamente relacionado con la velocidad de giro. La principal desventaja de los volantes de inercia es el elevado coste de inversión, así como el elevado índice de autodescarga.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros técnicos más importantes de estos sistemas:

Tabla 10. Parámetros técnicos de los volantes de inercia. Fuente: adaptación de *Electricity storage valuation framework*, IRENA, 2020.

Eficiencia (%)	85%
Tiempo de descarga (h)	0,25-1
Profundidad de descarga (%)	85%
Densidad de potencia (W/l)	7.500
Densidad de energía (Wh/l)	110
Coste de inversión (€/kWh)	2.656
Coste de operación (€/kWh)	80
Vida útil (ciclos)	>100.000
Madurez de la tecnología	Comercialización inicial

Por último, se trata de un sistema sin impacto ambiental durante su funcionamiento que no genera productos químicos ni emisiones, no obstante, utiliza materiales como fibra de carbono e imanes de tierras raras que tienen impacto durante su fabricación.





IDAIE, Calle Madera, 8, E-28004, Madrid, Tel.: 91 456 49 00  
Fax: 91 523 04 14, email: [comunicacion@idaie.es](mailto:comunicacion@idaie.es) // [www.idaie.es](http://www.idaie.es)

