

A.2.1: Sistemas de Almacenamiento

E.2.2: (RESUMEN) Informes científicos con datos de ensayos



Información del documento

Código del entregable	E2.2
Título	(RESUMEN) Informes científicos con datos de ensayos
Actividad	A2.1 – Sistemas de Almacenamiento
Fecha límite de entrega	31/12/2025
Fecha de entrega	31/12/2025
Nivel de difusión	Interno
Socio responsable	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Autores	José María Sancho Peñate Rosa M ^a Rengel Gálvez Eduardo López González

Historial de versiones

Versión	Fecha	Autor(es)
01	31/12/2025	

© **AGERAR PLUS, 2023-2026**

Se autoriza la reproducción siempre que se reconozca la fuente

Contenido

1. Introducción	6
2. Tecnologías de almacenamiento en INTA. Ensayos, modelado y resultados.....	6
2.1 Bateria CATL de 100Ah.....	6
2.2 Supercondensadores híbridos (HSC)	9
2.3 Bateria Na-ion 50160118C-0800-30E.....	11
2.4 Bateria Na-ion CSC-40160-HP20-2C	12
3. Conclusiones	15

Listado de figuras

FIGURA 1: BATERÍA CATL DE 100AH.....	7
FIGURA 4: SUPERCONDENSADOR TOOMEN NEW ENERGY TMDD7500/48	9
FIGURA 7: BATERÍA NA-ION 50160118C-0800-30E.....	11
FIGURA 10: BATERÍA NA-ION CSC-40160-HP20-2C	13

Listado de Términos y definiciones

Abreviación	Definición
SMES	Almacenamiento magnético superconductores
PHES	Almacenamiento hidroeléctrico por bombeo
CAES	Almacenamiento de energía por aire comprimido
TES	Almacenamiento de energía térmica
EDLCs	Condensadores electroquímicos de doble capa
LCO	Óxido de Cobalto y Litio
NMC	Óxido de Níquel, Manganeso y Cobalto con Litio
LFP	Fosfato de Hierro y Litio
VPP	Planta de Energía Virtual

Tabla 1: Términos y definiciones

1. Introducción

El presente documento constituye un resumen del entregable E.2.2: Informes científicos con datos de ensayos, elaborado en el marco de la actividad A.2.1 del proyecto AGERAR PLUS.

En el entregable se presentan los ensayos realizados sobre cuatro tecnologías seleccionadas por su relevancia y estado de desarrollo: una batería LiFePo₄, dos baterías de Ion-sodio y un supercondensador híbrido.

El objetivo principal del trabajo es analizar el comportamiento operativo de estos dispositivos bajo distintas condiciones de carga y descarga, evaluando su eficiencia energética, estabilidad de tensión, evolución de la capacidad y la respuesta dinámica.

2. Tecnologías de almacenamiento en INTA. Ensayos, modelado y resultados.

2.1 Batería CATL de 100Ah

La celda de litio-ferrofosfato (LiFePo₄) CATL DE 100Ah utilizada en los ensayos, se trata de una celda prismática con voltaje nominal de 3.2V, diseñada aplicaciones de almacenamiento estacionario.

Las principales características técnicas incluyen:

- Capacidad nominal: 100Ah
- Voltaje nominal: 3.2V
- Corriente estándar de carga/descarga: 0.5C
- Corriente máxima (carga/descarga): 1C
- Rango de temperatura: -30°C a 55°C
- Impedancia: 0.39±0.05M ω



Figura 1: Batería CATL de 100Ah

Para el procedimiento de pruebas se ha definido un protocolo basado de 19 ciclos de carga y descarga con las siguientes fases:

- Carga a $5 \cdot n$ hasta alcanzar los 3.65V. (n es el número de ciclo)
- Fase de tensión constante a 3.65V hasta que la corriente cae por debajo de 1.2A.
- Reposo de 3 minutos.
- Descarga a $5 \cdot n$ hasta alcanzar los 2.5V.
- Reposo de 1 minuto.
- Repetición de ciclos

Durante los ensayos, la batería ha mostrado un comportamiento operativo estable a lo largo de los ciclos, con una eficiencia energética inicial cercana al 96 %, que presenta una ligera tendencia decreciente conforme aumenta el número de ciclos y la intensidad de corriente aplicada. Esta reducción progresiva de la eficiencia se asocia al incremento de las pérdidas internas derivadas del mayor esfuerzo electroquímico.

La evolución de la capacidad acumulada (Ah) y de la energía acumulada (Wh) refleja un crecimiento continuo tanto en carga como en descarga. Se observa una diferencia progresiva entre la energía cargada y la descargada, especialmente en los últimos ciclos, atribuible a las pérdidas energéticas internas. No obstante, la capacidad entregada se mantiene estable, sin caídas abruptas que indiquen una degradación significativa de la celda.

En cuanto a la tensión y corriente, muestra un comportamiento característico de la tecnología LiFePO_4 . Durante la carga, la tensión asciende de forma progresiva hasta el límite de 3.65 V, mientras que durante la descarga desciende hasta valores próximos a 2.5 V. La superposición de ambas magnitudes evidencia una correlación directa entre

los incrementos de corriente y los transitorios de tensión, sin apreciarse inestabilidades, colapsos de voltaje ni comportamientos no lineales.

En conjunto, los resultados confirman que la celda CATL de 100 Ah responde de forma precisa y controlada a los estímulos de corriente aplicados, manteniendo su funcionamiento dentro de los márgenes de seguridad recomendados por el fabricante, incluso bajo condiciones de carga progresivamente más exigentes.

2.2 Supercondensadores híbridos (HSC)

Para modelado y validación de sistemas de almacenamiento de energía basados en supercondensadores híbridos se han utilizado el Supercondensador híbrido Toomen New Energy TMDD7500/48. Este dispositivo combina características propias de los supercondensadores y de las baterías, ofreciendo una elevada densidad de potencia, una rápida respuesta dinámica y una vida útil significativamente superior a las tecnologías electroquímicas convencionales.

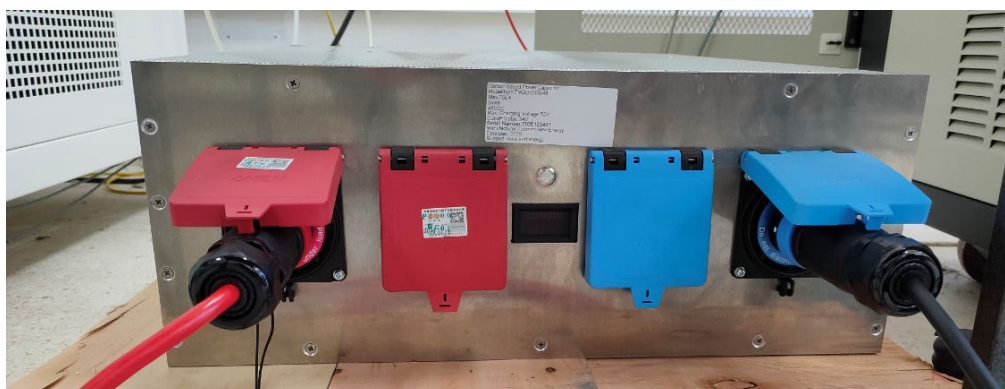


Figura 2: Supercondensador Toomen New Energy TMDD7500/48

Principales características técnicas del HSC:

- Capacidad nominal: 62,5 Ah
- Capacitancia: 8.250 F ($\pm 5\%$)
- Energía nominal: 3,30 kWh
- Voltaje nominal: 50,0 V
- Voltaje de corte de descarga: 36,0 V
- Corriente máxima continua (carga/descarga): 750 A
- C-rate máximo de descarga: 12 C
- Resistencia interna máxima: $\leq 5\text{ m}\Omega$
- Rango de temperatura de operación: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Peso del sistema: 72,2 kg

Para el procedimiento de pruebas se ha definido un protocolo de ensayo basado en ciclos repetitivos de carga y descarga con las siguientes fases:

- Carga a $5 \cdot n$ hasta alcanzar los 52V. (n es el número de ciclo)
- Fase de tensión constante a 52V hasta que la corriente cae por debajo de 1.2A.
- Reposo de 3 minutos.
- Descarga a $5 \cdot n$ hasta alcanzar los 36V.
- Reposo de 1 minuto.
- Repetición de ciclos

Los resultados obtenidos para el supercondensador híbrido Toomen New Energy TMDD7500/48 muestran una evolución progresiva del comportamiento del dispositivo tras someterlo a los ciclos repetitivos de carga y descarga definidos en el protocolo de ensayo.

La eficiencia energética muestra una tendencia decreciente a lo largo de los ciclos, pasando de valores cercanos al 97 % en los primeros ensayos hasta aproximadamente el 88 % en el último ciclo, lo que indica una pérdida progresiva de rendimiento.

La capacidad acumulada (Ah) presenta un incremento continuo tanto en carga como en descarga, con una ligera diferencia entre ambas curvas. De forma similar, la energía acumulada (Wh) evidencia un desajuste creciente entre la energía cargada y la entregada en descarga, coherente con la reducción de la eficiencia energética.

Las gráficas de tensión y corriente reflejan un comportamiento dinámico característico de los supercondensadores híbridos, con una variación aproximadamente lineal de la tensión y una alternancia clara de las fases de carga y descarga en la corriente. En conjunto, los resultados confirman un funcionamiento estable del dispositivo, con una degradación progresiva pero controlada y una respuesta eléctrica acorde a las especificaciones del fabricante.

2.3 Batería Na-ion 50160118C-0800-30E

En este apartado se presenta la batería Na-ion 50160118C-0800-30E, una celda de iones de sodio actualmente en fase de desarrollo que se evalúa como alternativa a las tecnologías de ion-litio.

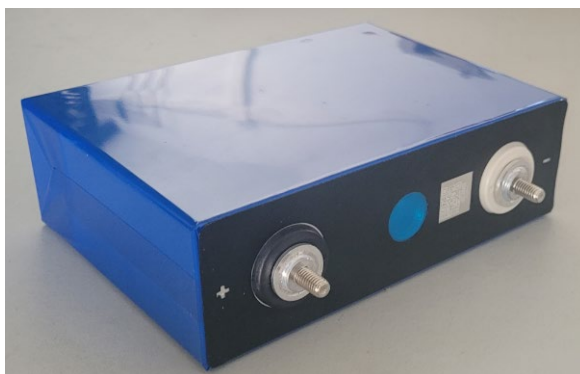


Figura 3: Batería Na-ion 50160118C-0800-30E

Principales características técnicas:

- Capacidad de descarga estándar: 80 Ah
- Voltaje nominal: 3,0 V
- Corriente máxima de carga/descarga: 80 A (1C)
- Voltaje de corte de carga: 4,0 V
- Voltaje de corte de descarga: 1,8 V
- Impedancia interna: $\leq 0,5 \text{ m}\Omega$ (AC, 1 kHz tras carga estándar)
- Rango de temperatura de operación: Carga: $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Descarga: $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Peso de la celda: $1,8 \pm 0,2 \text{ kg}$

Para el procedimiento de pruebas se ha definido un protocolo de ensayo basado en ciclos repetitivos de carga y descarga con las siguientes fases:

- Carga a $8 \cdot n$ hasta alcanzar los 4V. (n es el número de ciclo)
- Fase de tensión constante a 4V hasta que la corriente cae por debajo de 1.2A.
- Reposo de 3 minutos.
- Descarga a $8 \cdot n$ hasta alcanzar los 1.8V.
- Reposo de 1 minuto.
- Repetición de ciclos

En cuanto a los ensayos realizados sobre la batería Na-ion 50160118C-0800-30E se registró de forma continua variables como voltaje, corriente, capacidad y energía acumulada.

Por una parte, la eficiencia energética presenta una ligera tendencia decreciente a lo largo del ensayo, pasando de valores cercanos al 96 % en los primeros ciclos hasta aproximadamente el 94 % en el ciclo 10. Esta reducción es moderada y sugiere un impacto limitado de los ciclos sobre el rendimiento energético, posiblemente asociado a incrementos de la resistencia interna o pérdidas térmicas.

La evolución de la capacidad acumulada (Ah) muestra un crecimiento sostenido tanto en carga como en descarga, con una buena alineación entre ambas curvas, lo que indica un comportamiento estable de la celda bajo los perfiles de ensayo aplicados. De forma similar, las curvas de energía acumulada (Wh) presentan una tendencia creciente y prácticamente paralela, evidenciando una entrega energética consistente.

Las gráficas de tensión y corriente reflejan la aplicación escalonada de la corriente en cada ciclo, tanto en carga como en descarga, mientras que el voltaje responde de manera progresiva y controlada. El voltaje máximo durante la carga se mantiene próximo a 4 V, y durante la descarga desciende hasta valores por debajo de 2 V, sin observarse caídas bruscas ni inestabilidades, lo que confirma una buena estabilidad electroquímica de la batería durante el ensayo.

2.4 Batería Na-ion CSC-40160-HP20-2C

En este apartado se resume la caracterización de la batería Na-ion CSC-40160-HP20-2C, una celda de iones de sodio de menor capacidad orientada a aplicaciones que requieren mayor flexibilidad en regímenes de carga y descarga y capacidad para operar a C-rates más elevados, evaluada dentro del entregable E.2.2.



Figura 4: Batería Na-ion CSC-40160-HP20-2C

Principales características técnicas:

- Capacidad de descarga estándar: 20 Ah
- Capacidad nominal: 19,5 Ah
- Voltaje nominal: 3,1 V
- Corriente máxima de carga: 20 A (1C)
- Corriente máxima de descarga: 40 A (2C)
- Voltaje de corte de carga: 3,95 V
- Voltaje de corte de descarga: 2,0 V
- Impedancia interna: $\leq 1,5 \text{ m}\Omega$
- Rango de temperatura de operación: Carga: $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Descarga: $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Peso de la celda: 440 g

El entregable E.2.2 describe un protocolo de ensayo estructurado en dos fases, diseñado para evaluar el comportamiento de la batería bajo distintos regímenes de carga y descarga, con incremento progresivo de la exigencia eléctrica.

Primera fase del ensayo:

- Carga a n hasta alcanzar los 4V. (n es el número de ciclo)
- Fase de tensión constante a 4V hasta que la corriente cae por debajo de 1.2A.
- Reposo de 3 minutos.
- Descarga a n hasta alcanzar los 1.5V.
- Reposo de 1 minuto.
- Repetición de ciclos (hasta 20 ciclos)

Segunda fase del ensayo:

- Carga a 20A hasta alcanzar los 4V.
- Fase de tensión constante a 4V hasta que la corriente cae por debajo de 1.2A.
- Reposo de 3 minutos.
- Descarga a n hasta alcanzar los 1.5V. (n es el número de ciclo)
- Reposo de 1 minuto.
- Repetición de ciclos de segunda fase (hasta 40 ciclos)

En cuanto a los ensayos, la eficiencia energética presenta un descenso progresivo a lo largo del ensayo, pasando de valores cercanos al 97 % en los primeros ciclos hasta aproximadamente el 80 % en los ciclos finales. Esta evolución refleja un incremento de las pérdidas internas del sistema, asociado al aumento del esfuerzo eléctrico aplicado y a posibles fenómenos de crecimiento de la resistencia interna o degradación de la celda.

La capacidad acumulada muestra una evolución prácticamente paralela entre carga y descarga durante la mayor parte del ensayo, con una tendencia a la convergencia de ambas curvas en los ciclos finales. También la evolución de la energía acumulada presenta una tendencia creciente tanto en carga como en descarga, con una pendiente cada vez mayor, coherente con el incremento progresivo de la corriente aplicada en los últimos ciclos

Las gráficas de corriente y tensión reflejan la estrategia de ensayo aplicada, con una corriente escalonada en carga y descarga que progresa desde 1C hasta 2C. La tensión muestra un comportamiento estable y característico de las celdas de ion sodio, sin apreciarse caídas abruptas ni inestabilidades, lo que confirma un funcionamiento controlado de la batería durante todo el ensayo.

3. Conclusiones

En el entregable E.2.2 se ha realizado el ensayo experimental de distintas tecnologías de almacenamiento energético, incluyendo una batería LiFePO_4 , dos baterías de ion-sodio (Na-ion) y un supercondensador híbrido. Los ensayos han permitido analizar su comportamiento bajo diferentes regímenes de carga y descarga, evaluando parámetros como eficiencia energética, estabilidad de tensión, capacidad y respuesta dinámica.

Los resultados muestran que la batería LiFePO_4 presenta un comportamiento estable y robusto, con una degradación progresiva y controlada de la eficiencia. El supercondensador híbrido destaca por su elevada capacidad de respuesta y operación a altas corrientes, manteniendo estabilidad a lo largo de los ciclos ensayados. Las baterías Na-ion analizadas evidencian comportamientos diferenciados según el diseño y el régimen de operación, manteniendo en general una respuesta estable, aunque con una reducción de la eficiencia más acusada en los ensayos más exigentes.

De forma global, los ensayos confirman que cada tecnología presenta características específicas que condicionan su idoneidad según la aplicación, aportando una base experimental relevante para su futura integración en microrredes, sistemas de autoconsumo y estrategias de gestión de la demanda dentro del proyecto AGERAR PLUS.



@AgerarPlus



@AgerarPlus