

A.2.1: Sistemas de Armazenamento

E.2.2: (RESUMO) Relatórios científicos com dados de ensaios



Informação do documento

Código do Entregável	E2.2
Título	(RESUMEN) Informes científicos con datos de ensayos
Actividade	A2.1 – Sistemas de Almacenamiento
Prazo de entrega	31/12/2025
Data de entrega	31/12/2025
Nível de difusão	Interno
Parceiro responsável	Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial
Autores	José María Sancho Peñate Rosa M ^a Rengel Gálvez Eduardo López González

Histórico de versões

Versão	Data	Autor(es)
01	31/12/2025	

© AGERAR PLUS, 2023-2026

É autorizada a reprodução desde que seja reconhecida a fonte.

Conteúdo

1. Introdução.....	¡Error! Marcador no definido.
2. Tecnologias de armazenamento no INTA. Ensaio, modelação e resultado	¡Error! Marcador no definido.
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. Conclusões	¡Error! Marcador no definido.

Lista de figuras

FIGURA 1: BATERÍA CATL DE 100AH.....	7
FIGURA 2: SUPERCONDENSADOR TOOMEN NEW ENERGY TMDD7500/48	9
FIGURA 3: BATERÍA NA-ION 50160118C-0800-30E.....	11
FIGURA 4: BATERÍA NA-ION CSC-40160-HP20-2C	12

Lista de Termos e Definições

Abreviação	Definição
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, Manganeseo y Cobalto con Litio
LFP	Fosfato de Hierro y Litio
VPP	Planta de Energía Virtual

Tabla 1: Termos e definições

1. Introdução

O presente documento constitui um resumo do entregável E.2.2: Relatórios científicos com dados de ensaios, elaborado no âmbito da atividade A.2.1 do projeto AGERAR PLUS

No entregável são apresentados os ensaios realizados sobre quatro tecnologias selecionadas pela sua relevância e estado de desenvolvimento: uma bateria LiFePO₄, duas baterias de íões de sódio e um supercondensador híbrido.

O principal objetivo do trabalho é analisar o comportamento operacional destes dispositivos sob diferentes condições de carga e descarga, avaliando a sua eficiência energética, estabilidade de tensão, evolução da capacidade e resposta dinâmica.

2. Tecnologias de armazenamento no INTA. Ensaio, modelação e resultados

2.1 Bateria CATL de 100Ah

A célula de lítio-ferrofosfato (LiFePO₄) CATL de 100 Ah utilizada nos ensaios é uma célula prismática com tensão nominal de 3,2 V, concebida para aplicações de armazenamento estacionário.

Principais características técnicas:

- Capacidade nominal: 100 Ah
- Tensão nominal: 3,2 V
- Corrente padrão de carga/descarga: 0,5 C
- Corrente máxima (carga/descarga): 1 C
- Intervalo de temperatura: -30 °C a 55 °C
- Impedância: $0,39 \pm 0,05 \text{ m}\Omega$



Figura 1: Bateria CATL de 100Ah

Para o procedimento de ensaio foi definido um protocolo baseado em 19 ciclos de carga e descarga com as seguintes fases:

- Carga a $5 \times n$ até atingir 3,65 V (n corresponde ao número do ciclo).
- Fase de tensão constante a 3,65 V até que a corrente desça abaixo de 1,2 A.
- Repouso de 3 minutos.
- Descarga a $5 \times n$ até atingir 2,5 V.
- Repouso de 1 minuto.
- Repetição dos ciclos.

Durante os ensaios, a bateria apresentou um comportamento operacional estável ao longo dos ciclos, com uma eficiência energética inicial próxima de 96 %, evidenciando uma ligeira tendência decrescente à medida que aumentam o número de ciclos e a intensidade da corrente aplicada. Esta redução progressiva da eficiência está associada ao aumento das perdas internas decorrentes de um maior esforço eletroquímico.

A evolução da capacidade acumulada (Ah) e da energia acumulada (Wh) revela um crescimento contínuo, tanto em carga como em descarga. Observa-se uma diferença progressiva entre a energia carregada e a descarregada, especialmente nos últimos ciclos, atribuída às perdas energéticas internas. Contudo, a capacidade fornecida mantém-se estável, sem diminuições abruptas que indiquem degradação significativa da célula.

Relativamente à tensão e à corrente, observa-se um comportamento característico da tecnologia LiFePO₄. Durante a carga, a tensão aumenta progressivamente até ao limite de 3,65 V, enquanto durante a descarga diminui até valores próximos de 2,5 V. A sobreposição de ambas as grandezas evidencia uma correlação direta entre os aumentos de corrente e os transitórios de tensão,

sem ocorrência de instabilidades, colapsos de tensão ou comportamentos não lineares.

No conjunto, os resultados confirmam que a célula CATL de 100 Ah responde de forma precisa e controlada aos estímulos de corrente aplicados, mantendo o funcionamento dentro dos limites de segurança recomendados pelo fabricante, mesmo sob condições de carga progressivamente mais exigentes.

2.2 Supercondensadores híbridos (HSC)

Para a modelação e validação de sistemas de armazenamento de energia baseados em supercondensadores híbridos foi utilizado o supercondensador híbrido Toomen New Energy TMDD7500/48. Este dispositivo combina características próprias dos supercondensadores e das baterias, oferecendo elevada densidade de potência, resposta dinâmica rápida e uma vida útil significativamente superior à das tecnologias eletroquímicas convencionais.

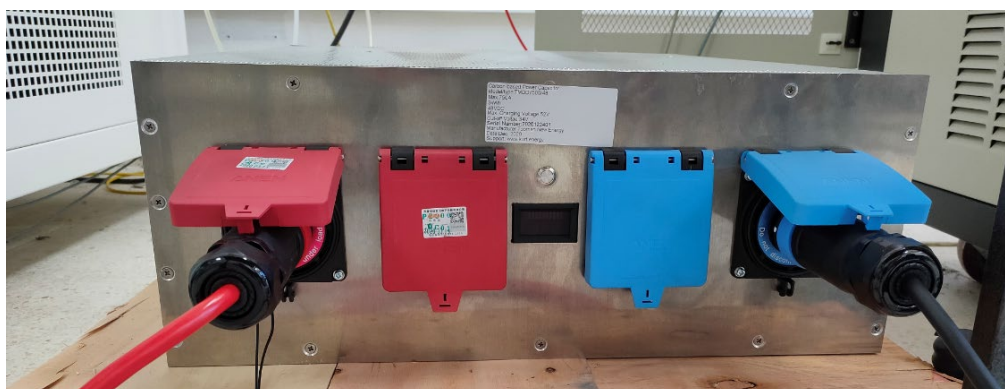


Figura 2: Supercondensador Toomen New Energy TMDD7500/48

Principais características técnicas del HSC:

- Capacidade nominal: 62,5 Ah
- Capacitância: 8.250 F ($\pm 5\%$)
- Energia nominal: 3,30 kWh
- Tensão nominal: 50,0 V
- Tensão de corte de descarga: 36,0 V
- Corrente máxima contínua (carga/descarga): 750 A
- Taxa máxima de descarga (C-rate): 12 C
- Resistência interna máxima: $\leq 5\text{ m}\Omega$
- Intervalo de temperatura de funcionamento: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Peso do sistema: 72,2 kg

Para o procedimento de ensaio foi definido um protocolo baseado em ciclos repetitivos de carga e descarga.

- Carregamento a $5*n$ até atingir os 52 V. (n corresponde ao número do ciclo)
- Fase de tensão constante a 52 V até que a corrente desça abaixo de 1,2 A.
- Repouso de 3 minutos.

- Descarga a $5 \cdot n$ até atingir os 36 V.
- Repouso de 1 minuto.
- Repetição dos ciclos.

Os resultados obtidos mostram uma evolução progressiva do comportamento do dispositivo após a sua sujeição aos ciclos repetitivos definidos no protocolo.

A eficiência energética apresenta uma tendência decrescente ao longo dos ciclos, passando de valores próximos de 97 % nos primeiros ensaios para aproximadamente 88 % no último ciclo, o que indica uma perda progressiva de desempenho.

A capacidade acumulada (Ah) apresenta um aumento contínuo tanto em carga como em descarga, com uma ligeira diferença entre ambas as curvas. De igual modo, a energia acumulada (Wh) evidencia um desfasamento crescente entre a energia carregada e a energia descarregada, coerente com a redução da eficiência energética.

Os gráficos de tensão e corrente refletem um comportamento dinâmico característico dos supercondensadores híbridos, com uma variação aproximadamente linear da tensão e uma alternância clara das fases de carga e descarga da corrente. No conjunto, os resultados confirmam um funcionamento estável do dispositivo, com uma degradação progressiva mas controlada e uma resposta elétrica em conformidade com as especificações do fabricante.

2.3 Bateria Na-ion 50160118C-0800-30E

Neste ponto apresenta-se a bateria Na-ion 50160118C-0800-30E, uma célula de iões de sódio atualmente em fase de desenvolvimento, avaliada como alternativa às tecnologias de iões de lítio.

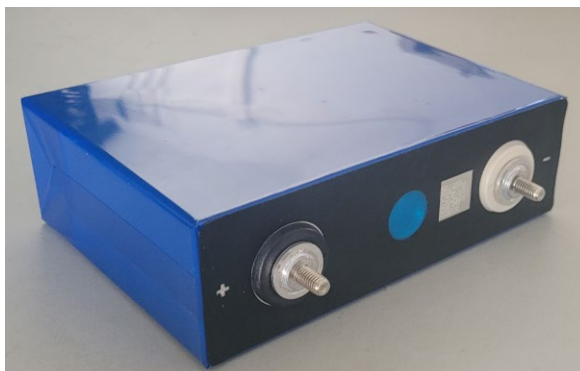


Figura 3: Bateria Na-ion 50160118C-0800-30E

Principales características técnicas:

- Capacidade padrão de descarga: 80 Ah
- Tensão nominal: 3,0 V
- Corrente máxima de carga/descarga: 80 A (1 C)
- Tensão de corte de carga: 4,0 V
- Tensão de corte de descarga: 1,8 V
- Impedância interna: $\leq 0,5 \text{ m}\Omega$
- Intervalo de temperatura de funcionamento:
- 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 da célula: $1,8 \pm 0,2 \text{ kg}$

Os ensaios realizados registaram continuamente variáveis como tensão, corrente, capacidade e energia acumulada.

- Carregamento a $8*n$ até atingir os 4 V. (n corresponde ao número do ciclo)
- Fase de tensão constante a 4 V até que a corrente desça abaixo de 1,2 A.
- Repouso de 3 minutos.
- Descarga a $8*n$ até atingir os 1,8 V.
- Repouso de 1 minuto.
- Repetição dos ciclos.

No que respeita aos ensaios realizados na bateria Na-ion 50160118C-0800-30E, foram registadas de forma contínua variáveis como a tensão, a corrente, a capacidade e a energia acumulada.

A eficiência energética apresenta uma ligeira tendência decrescente ao longo do ensaio, passando de valores próximos de 96 % nos primeiros ciclos para aproximadamente 94 % no ciclo 10. Esta redução é moderada e sugere um impacto limitado dos ciclos sobre o desempenho energético.

A evolução da capacidade acumulada (Ah) evidencia um crescimento sustentado tanto em carga como em descarga, com uma boa correspondência entre ambas as curvas, indicando um comportamento estável da célula sob os perfis de ensaio aplicados. De forma semelhante, as curvas de energia acumulada (Wh) apresentam uma tendência crescente e praticamente paralela, evidenciando uma entrega energética consistente.

Os gráficos de tensão e corrente refletem a aplicação escalonada da corrente em cada ciclo, tanto na carga como na descarga, enquanto a tensão responde de forma progressiva e controlada. A tensão máxima durante a carga mantém-se próxima dos 4 V e, durante a descarga, desce para valores inferiores a 2 V, sem quedas abruptas ou instabilidades, confirmando uma boa estabilidade eletroquímica da bateria durante o ensaio.

2.4 Bateria Na-ion CSC-40160-HP20-2C

Neste ponto resume-se a caracterização da bateria Na-ion CSC-40160-HP20-2C, uma célula de iões de sódio de menor capacidade, orientada para aplicações que exigem maior flexibilidade nos regimes de carga e descarga e capacidade de funcionamento com C-rates mais elevadas, avaliada no âmbito do entregável E.2.2.



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

Principales características técnicas:

- Capacidade padrão de descarga: 20 Ah
- Capacidade nominal: 19,5 Ah
- Tensão nominal: 3,1 V
- Corrente máxima de carga: 20 A (1 C)
- Corrente máxima de descarga: 40 A (2 C)
- Tensão de corte de carga: 3,95 V
- Tensão de corte de descarga: 2,0 V
- Impedância interna: $\leq 1,5 \text{ m}\Omega$
- Intervalo de temperatura de funcionamento:
- Carga: -10°C a 60°C
- Descarga: -40°C a 60°C
- Peso da célula: 440 g

O entregável E.2.2 descreve um protocolo de ensaio estruturado em duas fases, concebido para avaliar o comportamento da bateria sob diferentes regimes de carga e descarga, com aumento progressivo da exigência elétrica.

Primeira fase do ensaio:

- Carga a n até atingir 4 V (n corresponde ao número do ciclo).
- Fase de tensão constante a 4 V até que a corrente desça abaixo de 1,2 A.
- Repouso de 3 minutos.
- Descarga a n até atingir 1,5 V.
- Repouso de 1 minuto.
- Repetição dos ciclos (até 20 ciclos).

Segunda fase do ensaio:

- Carga a 20 A até atingir 4 V.
- Fase de tensão constante a 4 V até que a corrente desça abaixo de 1,2 A.
- Repouso de 3 minutos.
- Descarga a n até atingir 1,5 V (n corresponde ao número do ciclo).
- Repouso de 1 minuto.
- Repetição dos ciclos da segunda fase (até 40 ciclos).

Relativamente aos ensaios, a eficiência energética apresenta uma redução progressiva ao longo do ensaio, passando de valores próximos de 97 % nos

primeiros ciclos para aproximadamente 80 % nos ciclos finais. Esta evolução reflete um aumento das perdas internas do sistema, associado ao aumento da exigência elétrica aplicada e a possíveis fenómenos de crescimento da resistência interna ou degradação da célula.

A capacidade acumulada apresenta uma evolução praticamente paralela entre carga e descarga durante a maior parte do ensaio, com tendência para a convergência de ambas as curvas nos ciclos finais. A evolução da energia acumulada apresenta igualmente uma tendência crescente tanto em carga como em descarga, com inclinação progressivamente superior, coerente com o aumento gradual da corrente aplicada nos últimos ciclos.

Os gráficos de corrente e tensão refletem a estratégia de ensaio aplicada, com uma corrente escalonada em carga e descarga que evolui de 1 C para 2 C. A tensão apresenta um comportamento estável e característico das células de iões de sódio, sem quedas abruptas nem instabilidades, confirmando um funcionamento controlado da bateria durante todo o ensaio.

3. Conclusões

No entregável E.2.2 foi realizado o ensaio experimental de diversas tecnologias de armazenamento de energia, incluindo uma bateria LiFePO₄, duas baterias de iões de sódio (Na-ion) e um supercondensador híbrido. Os ensaios permitiram analisar o seu comportamento sob diferentes regimes de carga e descarga, avaliando parâmetros como eficiência energética, estabilidade de tensão, capacidade e resposta dinâmica.

Os resultados demonstram que a bateria LiFePO₄ apresenta um comportamento estável e robusto, com uma degradação progressiva e controlada da eficiência. O supercondensador híbrido destaca-se pela sua elevada capacidade de resposta e funcionamento a altas correntes, mantendo a estabilidade ao longo dos ciclos ensaiados. As baterias Na-ion analisadas evidenciam comportamentos diferenciados em função da conceção e do regime operacional, mantendo em geral uma resposta estável, embora com uma redução da eficiência mais acentuada nos ensaios mais exigentes.

De forma global, os ensaios confirmam que cada tecnologia apresenta características específicas que condicionam a sua adequação a diferentes aplicações, proporcionando uma base experimental relevante para a sua futura integração em microrredes, sistemas de autoconsumo e estratégias de gestão da procura no âmbito do projeto AGERAR PLUS.



@AgerarPlus



@AgerarPlus