

VERSTAT POWER

LiFePO₄ por cuenta propia: guía práctica

De las celdas en la caja a una fuente de respaldo funcionando

Contenido

Acerca de esta guía

Importante: responsabilidad

1. Seguridad

- 1.1 Por qué esto no se parece a una batería de plomo
- 1.2 Herramientas
- 1.3 Joyas, ropa, área de trabajo
- 1.4 Fuego
- 1.5 Qué hacer si

2. Recepción de las celdas

- 2.1 Desempaque e inspección visual
- 2.2 Voltaje al recibir
- 2.3 Prueba de capacidad: metodología
- 2.4 Resistencia interna
- 2.5 Compresión

3. Primera carga paso a paso

- 3.1 Por qué el balanceo superior
- 3.2 Preparación: conexión en paralelo
- 3.3 Procedimiento de balanceo
- 3.4 Ensamblado en circuito serie y primera carga del paquete
- 3.5 Qué vigilar durante la primera carga

4. Balanceo en operación

- 4.1 Balanceo pasivo y activo
- 4.2 Umbrales de configuración del balanceo
- 4.3 Cómo saber que el balanceo está funcionando
- 4.4 Cuándo repetir el balanceo superior manual

5. Configuración del BMS

- 5.1 Lo que el BMS hace y lo que no hace
- 5.2 Tabla de umbrales (perfil típico 16s, celdas 280 Ah)
- 5.3 Cálculo de los umbrales de corriente
- 5.4 Umbrales de temperatura: el parámetro más importante
- 5.5 Orden de configuración y verificación

6. Cableado

- 6.1 Sección del cable
- 6.2 Terminales y crimpado
- 6.3 Pares de apriete
- 6.4 Barras de conexión
- 6.5 Cables de balanceo

7. Fusibles y conmutación

- 7.1 Cálculo del nominal
- 7.2 Tipo de fusible: por qué importa justo aquí

7.3 Dónde colocar cada elemento

7.4 Precarga (pre-charge)

7.5 Puesta a tierra

8. Invierno

8.1 Qué hace exactamente el frío

8.2 La solución más barata: ubicar el paquete en un lugar cálido

8.3 Aislamiento

8.4 Calefacción activa

8.5 Lista de verificación de invierno

9. Errores comunes

Error 1. Montaje sin balanceo superior

Error 2. Carga en frío

Error 3. Carga diaria hasta 3.65 V por celda

Error 4. Fusible ausente o incorrecto

Error 5. Rosca dañada o tornillo demasiado largo

Error 6. El BMS se usa como interruptor

Error 7. Sección de cable incorrecta o terminales soldados

Error 8. Paquete sin compresión

Error 9. Error en el arnés de balanceo

Error 10. Mezclar celdas distintas en un mismo circuito

10. Lista de verificación de la primera puesta en marcha

A. Antes del montaje

B. Montaje

C. BMS

D. Protección y conmutación

E. Primera puesta en marcha

F. Registrar y guardar

Anexo A. Fórmulas de cálculo del sistema

Anexo B. Valores de referencia

Acerca de esta guía

Usted pidió celdas LiFePO₄ y un BMS. Llegaron. Y aquí empieza lo más incómodo: la caja no trae instrucciones, y en internet cada segunda persona dice lo contrario de la primera. Unos dicen cargar hasta 3.65 V, otros advierten que eso matará las celdas. Unos arman el paquete sin balanceo, otros mantienen las celdas semanas enteras conectadas a una fuente de alimentación de laboratorio.

Esta guía fue escrita para eliminar esa incertidumbre. Está basada en la experiencia de cientos de montajes para clientes: los que funcionan desde hace años y los que se quemaron o perdieron la mitad de su capacidad en el primer mes. La segunda categoría enseñó más que la primera, por eso cada capítulo incluye no solo "cómo hacerlo", sino también "qué ocurre si se hace de otra manera" y "cómo reconocer que algo ya salió mal".

Para quién es esta guía. Para una persona que sabe manejar una herramienta, entiende qué son el voltaje y la corriente, pero no es electricista profesional y nunca antes armó baterías. Es normal ser cauteloso: una celda LiFePO₄ de 280 Ah no es una pila AA, sino una fuente de energía capaz de fundir una llave de tuercas en un segundo.

Cómo usar esta guía. Lea los capítulos 1 a 3 antes de tomar la primera celda en sus manos. Los capítulos 4 a 7 serán útiles durante el armado: téngalos a mano. El capítulo 8 trata sobre el invierno, el capítulo 9 sobre los errores más comunes (léalo dos veces), y el capítulo 10 es una lista de verificación de una sola página: imprímala y marque los puntos con lápiz antes de la primera puesta en marcha.

Unidades y notación. El voltaje de la celda siempre se indica como V/celda. La corriente en amperios (A), la capacidad en amperios-hora (Ah), la energía en vatios-hora (Wh). La tasa C es la corriente expresada como fracción de la capacidad: para una celda de 280 Ah, $0.5C = 140\text{ A}$, $0.2C = 56\text{ A}$. El par de apriete en newton-metro (N·m).

Advertencia. Trabajar con baterías de gran capacidad implica riesgo de quemaduras, incendio y descarga eléctrica. Esta guía ofrece referencias probadas en la práctica, pero la responsabilidad por su montaje específico es suya. Verifique siempre la documentación de sus celdas, su BMS y su inversor: los valores indicados aquí son rangos típicos para equipos de uso común, no un sustituto de la ficha técnica del fabricante.

Importante: responsabilidad

Trabajar con sistemas de baterías de litio implica un riesgo real: incendio, descarga eléctrica, lesiones, daños materiales.

Esta guía tiene carácter informativo. Refleja una metodología probada en cientos de montajes para clientes, pero cada montaje es responsabilidad de quien lo realiza. Usted arma y opera su sistema bajo su propio riesgo, y es el único responsable de verificar la elección de los componentes, la calidad del montaje y el cumplimiento de los códigos y normativas eléctricas locales. Si tiene dudas en cualquier paso, consulte a un electricista calificado.

El vendedor no conoce ni puede verificar qué componentes utiliza usted realmente, cómo los monta ni en qué condiciones funciona su sistema. Por ello, toda la responsabilidad por el montaje y por cualquier consecuencia del uso de la información de esta guía recae exclusivamente en el comprador.

1. Seguridad

Este capítulo es intencionalmente breve. Contiene lo que hay que saber antes del primer contacto con las celdas, y nada más.

1.1 Por qué esto no se parece a una batería de plomo

La diferencia principal entre el LiFePO₄ y una batería de auto convencional no está en la química, sino en la resistencia interna. Una celda de 280 Ah tiene una resistencia interna de aproximadamente 0.2-0.3 mΩ. Conecte dieciséis de ellas en serie y obtendrá un paquete de 51.2 V con una resistencia de aproximadamente 4-5 mΩ, incluyendo los conectores.

Calcule la corriente de cortocircuito: 51.2 V dividido entre 0.005 Ω es más de 10 000 A. En la realidad la corriente será menor por la resistencia del propio elemento que provoca el cortocircuito y de los contactos, pero el orden de magnitud es exactamente ese: miles de amperios. Una batería de plomo entregará varias veces menos y "se hundirá" en segundos; el LiFePO₄ sostendrá esa corriente el tiempo suficiente como para que el metal llegue a vaporizarse.

La consecuencia práctica: una llave que cae sobre dos bornes no "chispea", explota. El metal fundido sale despedido hacia los lados, no gotea hacia abajo. Por eso los puntos siguientes no son una precaución exagerada.

1.2 Herramientas

- **Aísle cada llave que vaya a tocar los bornes.** Termorretráctil en 2/3 de la longitud de la llave, o herramienta dieléctrica especializada. Una sola capa de cinta aislante no es suficiente: se desplaza.
- **Trabaje con una sola mano** cuando sea posible. La otra mano en el bolsillo o detrás de la espalda. Así la corriente no atraviesa el pecho.
- **Un borne a la vez.** Nunca sostenga la herramienta de forma que pueda alcanzar el positivo y el negativo simultáneamente.
- **La llave dinamométrica es obligatoria.** No "a ojo". La razón está en el capítulo 6.
- **Multímetro con resolución de 0.001 V.** Un instrumento barato que muestra 3.2 V en lugar de 3.284 V no sirve para este trabajo: todo el balanceo se mide en milivoltios.

1.3 Joyas, ropa, área de trabajo

Quítese el anillo, el reloj, las pulseras, la cadena. Un anillo de oro en el dedo que hace contacto entre dos bornes se calienta hasta la temperatura de fusión de la piel más rápido de lo que alcanza a retirar la mano, y después es imposible quitarlo. Esta es la lesión grave más frecuente en este trabajo, y se elimina por completo con una sola acción antes de empezar.

Ropa de fibras naturales: el algodón se consume lentamente, la sintética se derrite y se pega a la piel. Los lentes de protección son obligatorios al apretar bornes y en cualquier trabajo con barras. Calzado con suela de goma.

Mesa de trabajo: de madera o cubierta con una alfombra de goma. Nunca metálica. No deje nada metálico sobre la mesa salvo lo que tiene en las manos en ese momento. El escenario de accidente más común es este: alguien deja la llave sobre la parte superior de las celdas "por un segundo", después mueve la carcasa, y la llave cae sobre los bornes.

1.4 Fuego

El LiFePO_4 , comparado con el NMC, es considerablemente más seguro: no es propenso a la fuga térmica en condiciones normales y no se incendia al ser perforado como sí ocurre con los sistemas químicos de litio-cobalto. Pero ante un daño mecánico severo, una carga inversa o un sobrecalentamiento intenso, la celda libera gas (principalmente CO e hidrocarburos) que puede inflamarse.

El gas de la válvula es tóxico. Además de monóxido de carbono (CO), contiene fluoruro de hidrógeno (HF), que se forma a partir del electrolito y las sales de litio. No se debe respirar ese humo ni siquiera unas pocas veces: el HF daña las vías respiratorias, y sus efectos aparecen con retraso. Por eso la primera acción ante liberación de gas o humo es sacar a las personas del lugar y ventilar desde afuera, no apagar desde adentro.

Distinga entre dos escenarios distintos:

- **Se quema algo cerca del paquete** (cableado, la carcasa del inversor, objetos en el armario), pero las celdas están intactas. Es un incendio normal: corte la alimentación, apague con un extintor de polvo ABC.
- **Se quema el paquete mismo** (la válvula se abrió, la celda expulsa llama y gas). Un extintor no detendrá esa celda: ella misma genera el oxidante en su interior. Evacúe a las personas, llame a los bomberos, deje que el paquete se consuma. Si es seguro hacerlo, enfríe con agua desde cierta distancia lo que esté alrededor (celdas vecinas, paredes, objetos) para que el fuego no se propague, pero no se acerque al paquete ni respire el humo.
- Extintor de polvo clase ABC cerca. No se aplica agua sobre un paquete energizado.
- No arme ni cargue el paquete en un dormitorio donde usted duerme. Un depósito, un pasillo, un armario aparte con ventilación.
- La ventilación no es necesaria por "liberación de hidrógeno" (eso corresponde al plomo), sino para que, en caso de falla, el gas no se acumule en un espacio cerrado. Basta con la ventilación natural del ambiente y un armario no hermético.
- El inversor se calienta por sí mismo y necesita espacio libre alrededor del disipador: mínimo 10 cm a los lados, 20 cm por arriba, con el ventilador sin obstrucciones.

1.5 Qué hacer si

La celda se hinchó. No cargar, no descargar con corriente alta, sacarla del local, dejarla enfriar. Una celda hinchada es resultado de una sobrecarga, un defecto de fábrica o falta de compresión. Ya no vuelve al paquete.

Huele a un olor dulzón e intenso (electrolito). Falta de hermeticidad. Corte la alimentación, ventile el local, lleve la celda a reciclaje.

Chispa al conectar el inversor. Es normal: el inversor tiene condensadores de entrada grandes, y la primera conexión produce un pico de corriente breve. Es anormal cuando la chispa persiste: en ese caso es un cortocircuito. Sobre la precarga de condensadores (pre-charge), lea el capítulo 7.

Usted hizo contacto entre bornes y nada se quemó. Revise cada elemento por el que pasó la corriente: bornes en busca de marcas de quemadura, conectores, BMS. La microsoldadura en el punto de contacto daña la rosca y el recubrimiento del borne. No lo dé por resuelto solo porque "no pasó nada".

2. Recepción de las celdas

El error más caro de este proyecto no se comete con el soldador, sino con la inacción: las celdas se aceptan "de buena fe", se arma el paquete, y al mes se descubre que una de las dieciséis tiene 240 Ah en lugar de 280. Ya no se puede devolver, y el paquete queda limitado para siempre por la celda más débil.

La recepción toma de tres días a dos semanas (en su mayoría es espera, no trabajo). Es la mejor inversión de tiempo de todo el proyecto.

2.1 Desempaque e inspección visual

Desempaque en el piso o sobre una mesa baja: una celda de 280 Ah pesa 5.4-5.6 kg, una de 314 Ah cerca de 6 kg, y cuanto menor sea la altura, menor el daño ante una caída accidental.

Revise cada celda según esta lista:

Qué se observa	Normal	Alarmante
Carcasa	Superficies planas, bordes rectos	Abultamiento en los lados, forma de "barril"
Película aislante	Íntegra, sin cortes	Cortes hasta el aluminio, quemaduras
Bornes	Rosca limpia, no forzada	Rosca dañada, abolladuras, oxidación
Válvula de ventilación (arriba)	Plana, sin marcas	Hinchada, con rastros de fuga
Marcado	Mismo lote en todas las celdas	Fechas distintas, etiquetas distintas, códigos QR alterados
Códigos de barras	Números consecutivos	Números aleatorios de lotes distintos

- Abultamiento.** Coloque la celda de lado sobre una superficie plana. Una celda nueva debe estar plana. Un abultamiento leve (hasta 1 mm) en celdas nuevas con SoC alto es aceptable; un "barril" perceptible no lo es.
- Lotes distintos.** Las celdas de lotes distintos tienen resistencia interna y capacidad real diferentes, incluso si llevan escrito el mismo número. Esto no es motivo para rechazarlas, pero sí motivo para medir cada una (sección 2.3) y estar preparado para una dispersión mayor.
- Carcasa energizada.** Mida el voltaje entre el borne negativo y la carcasa de aluminio (donde la película no la cubra). Debe ser cercano a cero o unas décimas de voltio. Un voltaje considerable significa que la película está perforada en algún punto y la carcasa hace contacto con el elemento interno. Esa carcasa no se puede instalar en una caja metálica sin aislamiento adicional.

2.2 Voltaje al recibir

Mida cada celda inmediatamente después de desempacarla y anótela en una tabla. Este es su punto de referencia, al que volverá durante toda la vida útil del sistema.

Valores normales para celdas nuevas que llegan desde almacén:

Estado	Voltaje por celda	Qué significa
Almacenamiento normal	3.28-3.32 V	Aproximadamente 50% de carga, así es como el almacén mantiene las celdas
Reducido	3.10-3.28 V	Almacenamiento prolongado o autodescarga, aún aceptable
Bajo	2.90-3.10 V	Sospecha de autodescarga, vigilar por separado
Fuertemente descargada	2.50-2.90 V	Cargar por separado con corriente de 0.1C bajo supervisión, luego seguir vigilándola
Peligroso	2.00-2.50 V	Descarga profunda, degradación probable, recuperación solo bajo supervisión
Defectuosa	por debajo de 2.00 V	No recuperar, llevar a reciclaje
Excedido	por encima de 3.40 V	La celda no viene de un almacén "nuevo", ya fue usada

La dispersión entre celdas es más importante que el valor absoluto. Un lote en el que las dieciséis celdas muestran entre 3.286 y 3.294 V es un buen lote. Un lote en el que hay una celda en 3.31 V y otra en 3.14 V requerirá un balanceo más largo, y casi con seguridad una de esas dos celdas resultará ser la débil en la prueba de capacidad.

Hay un límite por debajo del cual la celda no se recupera. Cuando el voltaje cae por debajo de aproximadamente 2.0 V, el colector de corriente de cobre del ánodo comienza a disolverse en el electrolito, y en la siguiente carga el cobre se deposita de nuevo en cualquier lugar, incluso atravesando el separador. Se forman puentes internos, y la celda puede calentarse y abrir la válvula justo durante la carga "de recuperación", cuando usted está al lado. Por eso la regla es estricta: **por debajo de 2.0 V la celda no se recupera, es defectuosa, se recicla.** Nada de "probar, a ver si revive": el precio del error aquí no es el costo de la celda.

Una celda que llega en el rango de 2.0-2.5 V se reanima con una corriente muy baja (0.02-0.05C, es decir 6-14 A para 280 Ah) hasta 3.0 V, y solo después se carga normalmente. Haga esto en un lugar seguro contra incendios (concreto, metal, fuera de un espacio habitado), bajo supervisión y con un termómetro: la celda no debe calentarse más de unos pocos grados. Si después de esta recuperación se calienta más que sus vecinas o pierde voltaje rápidamente, no entra al paquete.

2.3 Prueba de capacidad: metodología

Esta es la parte que más se omite, y precisamente la que se recupera con creces. El objetivo: conocer la capacidad real de cada celda y confirmar que ninguna sea un valor atípico evidente.

Lo que se necesita: una fuente de alimentación regulable (fuente de laboratorio) de 3.65 V y al menos 10-20 A, una carga electrónica o una carga resistiva con vatímetro, un culombímetro (vatímetro con conteo de Ah, por ejemplo del tipo "medidor de energía"), un termómetro.

Procedimiento para una celda:

1. **Carga.** Configure la fuente en 3.65 V con límite de corriente de 0.2-0.5C (para 280 Ah esto es 56-140 A; en la práctica la mayoría de quienes arman están limitados por la capacidad de la fuente y usan 10-20 A, lo cual también es aceptable, solo que más lento). Cargue hasta que el voltaje alcance 3.65 V y la corriente caiga a 0.05C (cerca de 14 A para 280 Ah) o menos, y deje de bajar.
2. **Pausa.** 30-60 minutos sin carga conectada. El voltaje bajará a aproximadamente 3.40-3.45 V: esto es normal, es la relajación.
3. **Descarga con medición.** Descargue con una corriente de 0.5C (140 A para 280 Ah) o menor, hasta un voltaje de 2.50 V en los bornes bajo carga. El culombímetro mostrará cuántos Ah se extrajeron. Esa es la capacidad real.
4. **Registro.** Anote en la tabla: número de celda, Ah extraídos, temperatura al final de la descarga, hora.
5. **Retorno al rango de trabajo.** Cargue la celda de inmediato hasta al menos 3.30 V: dejarla en 2.5 V por mucho tiempo es perjudicial.

Cómo interpretar el resultado. Una celda sana con marcado de 280 Ah debe entregar 275-290 Ah (los fabricantes suelen dar un pequeño margen). 260-275 Ah es aceptable, pero ya es el límite inferior. Menos de 250 Ah es motivo de reclamo.

El criterio clave es la dispersión, no el valor absoluto. Si las dieciséis celdas entregaron entre 281 y 287 Ah, tiene un excelente lote. Si quince entregaron alrededor de 285 y una entregó 258, esa última determinará la capacidad de todo el paquete: las celdas conectadas en serie siempre quedan limitadas por la más débil. Reemplácela, no espere a que "se equilibre sola".

Variante simplificada, cuando no se dispone del equipo para la prueba completa: cargue todas las celdas en paralelo hasta 3.65 V (ver capítulo 3), luego arme el paquete y realice un ciclo completo de descarga a través del inversor con un culombímetro. No conocerá la capacidad de cada celda por separado, pero verá cuál llega primero al umbral inferior bajo carga. Ese es el eslabón débil.

2.4 Resistencia interna

La resistencia interna (IR) es el segundo indicador de la salud de la celda, y revela problemas que la prueba de capacidad no detecta.

Valores orientativos para celdas nuevas:

Capacidad de la celda	IR típico	Alarma
100-105 Ah	0.5-0.8 mΩ	por encima de 1.2 mΩ
280 Ah	0.20-0.35 mΩ	por encima de 0.5 mΩ
304-314 Ah	0.18-0.30 mΩ	por encima de 0.45 mΩ

Los valores de la tabla corresponden a la medición estándar con corriente alterna de 1 kHz (AC-IR): así los reportan los fabricantes y así mide un tester especializado. Si no dispone de tester, existe un método práctico con corriente continua (DC-IR): aplique a la celda una carga conocida (por ejemplo 50 A), mida el voltaje sin carga y bajo carga a los 10 segundos. Resistencia = diferencia de voltajes dividida entre la corriente. Una caída de 0.015 V con una corriente de 50 A significa 0.3 mΩ, y que ese número caiga dentro del rango de la tabla AC de arriba es pura coincidencia: de todos modos no se pueden comparar.

Estos dos números no se pueden comparar entre sí. El método DC incluye no solo el componente óhmico, sino también la polarización de los electrodos, por lo que muestra entre 2 y 4 veces más que el valor de placa a 1 kHz. Una celda que en el tester marcaría 0.25 mΩ, bajo carga dará 0.6-1.0 mΩ, y eso no es un defecto. Por eso: **el resultado de la medición DC solo se compara entre celdas del mismo lote**, medidas con el mismo método, la misma corriente y la misma temperatura. Compararlo con los rangos de la tabla anterior no es correcto, o de lo contrario "rechazará" un lote sano.

Qué hacer con esto. Una celda con un IR el doble que el de sus vecinas se calienta el doble bajo la misma corriente y será la primera en hundirse bajo carga. Aun con capacidad normal, en un paquete de alta corriente se convertirá en el eslabón débil. Para una fuente de respaldo con corrientes moderadas (hasta 0.3C), una dispersión pequeña de IR no es crítica.

Importante: mida el IR con todas las celdas a la misma temperatura y con un SoC similar. Una celda fría muestra una resistencia mayor, y eso no es un defecto.

2.5 Compresión

Las celdas prismáticas de LiFePO₄ están diseñadas para trabajar comprimidas. Durante la carga se expanden, durante la descarga se contraen, y sin una restricción externa esa "respiración" daña progresivamente la estructura interna: las capas de los electrodos se delaminan, y la capacidad cae más rápido de lo que debería.

- Dos placas terminales rígidas (acero de 3-5 mm, contrachapado de 12-15 mm, o perfil de aluminio) y 4 varillas roscadas M6-M8 en las esquinas.
- Entre las celdas, separadores delgados (1-2 mm de espuma o fibra de vidrio) para que no rocen entre sí lateralmente y tengan algo de espacio para expandirse.
- Fuerza objetivo de aproximadamente 300 kgf sobre el paquete, es decir, aproximadamente 12 psi sobre el área de la cara lateral. Referencia práctica sin dinamómetro: comprimir hasta que las celdas ya no se muevan con la mano, pero sin deformación visible de la película ni "flexión" de las placas terminales.
- No use las barras de conexión como elemento estructural del paquete. La barra conduce corriente, no sujeta la estructura.

Una celda que trabajó un año sin compresión suele presentar ya un ligero "barril" y entre un 5 y un 15% menos de capacidad. Esto es irreversible.

3. Primera carga paso a paso

Este capítulo trata sobre el procedimiento más importante de todo el montaje: el balanceo superior (top balancing). Se hace una sola vez, antes de conectar el paquete en un circuito serie, y de él depende si su paquete entregará la capacidad de placa o solo el 70% de ella.

3.1 Por qué el balanceo superior

Las celdas conectadas en serie reciben la misma corriente, pero se llenan de manera diferente porque tienen capacidades ligeramente distintas. Imagine dieciséis baldes conectados por una misma manguera: se llenan por igual, pero uno es más pequeño y se desborda primero.

El BMS detendrá la carga en cuanto **cualquier** celda alcance el umbral de sobrecarga (3.65 V). Si al comenzar las celdas estaban desigualmente cargadas, la más llena chocará con el techo cuando el resto todavía esté lejos de la carga completa, y el paquete "se terminará" en 80%, o incluso en 60%.

El balanceo superior nivela las celdas justo en el punto más alto: todas llegan a 3.65 V al mismo tiempo. Los puntos inferiores, en cambio, se dispersarán (la celda más débil se descargará primero), y esto es el compromiso correcto: es mejor quedarse corto abajo, donde el voltaje cae de forma gradual, que arriba, donde la curva sube bruscamente y el BMS reacciona de inmediato.

El balanceo "por abajo" (bottom balancing) se aplica en escenarios específicos sin BMS. Para un respaldo doméstico con BMS, la respuesta correcta es el balanceo superior.

3.2 Preparación: conexión en paralelo

Las celdas se balancean en **paralelo**: todos los positivos juntos, todos los negativos juntos. Así llegan automáticamente al mismo voltaje, y la fuente externa las llena hasta el mismo nivel.

Cuidado con la diferencia de voltajes. Si una celda está en 3.32 V y otra en 3.10 V, al conectarlas circulará una corriente grande entre ellas: una diferencia de 0.22 V sobre una resistencia conjunta de 0.5 mΩ es más de 400 A. Esto es peligroso y perjudicial para ambas.

Secuencia correcta:

1. Ordene las celdas por voltaje.
2. Conecte primero en paralelo las que difieran en no más de 0.05 V. Se nivelarán en minutos.
3. Las celdas que se salen del rango, ajústelas por separado con una fuente (carga) o una carga pequeña (descarga) hasta el nivel del resto, y solo entonces agréguelas al paralelo.
4. Alternativa: conecte cada celda siguiente a través de un cable de menor sección (por ejemplo 2.5 mm²) o de una resistencia de algunos ohmios durante los primeros minutos, para limitar la corriente de nivelación, y solo después pase a la barra normal.

Barras para el paralelo. La corriente en la conexión paralela se distribuye entre las celdas durante la carga, pero por las celdas de los extremos pasa toda la corriente de la fuente. Un cable de 16 mm² soporta hasta 80 A, y eso es más que suficiente para una fuente típica de 20-60 A. Apriete los bornes con el par normal (capítulo 6): un borne mal apretado en el paralelo no solo genera calentamiento, sino que también distorsiona el resultado del balanceo.

Esquema de conexión de la fuente. El positivo de la fuente en la celda del extremo de un lado, el negativo en la celda del extremo del lado opuesto. Así la corriente de carga atraviesa todo el circuito de manera más uniforme que si se conectaran ambos cables a una sola celda.

3.3 Procedimiento de balanceo

1. **Configure la fuente en 3.65 V** con límite de corriente al nivel que pueda entregar (0.2C o menos en total: típicamente 20-50 A para todo el paralelo). No se puede poner 3.70 V "para que sea más rápido": ninguna celda debe ver más de 3.65 V.
2. **Conecte y deje trabajar.** Al principio la fuente opera en modo de límite de corriente, y el voltaje aumenta progresivamente. Esta es la fase principal (bulk).
3. **Observe la transición a la fase de saturación (absorb).** Cuando el voltaje del paralelo alcance 3.65 V, la fuente pasará a modo de voltaje constante, y la corriente comenzará a bajar. Desde ese momento empieza la parte más larga.
4. **Espere a que la corriente caiga a 2-4 A** para todo el paralelo y deje de bajar. En la práctica llega casi a cero. Aquí no aplica el criterio habitual de finalización de carga para una sola celda (0.02-0.05C): para un paralelo de dieciséis celdas de 280 Ah (4480 Ah en total), eso daría entre noventa y más de doscientos amperios, y detendría el proceso mucho antes de la nivelación. La referencia en el balanceo es absoluta, en amperios: pocas unidades de amperio para todo el conjunto.
5. **Manténgalo 6-12 horas más después de que la corriente dejó de bajar.** Es justo en este momento cuando se completan los últimos porcentajes, y es aquí donde se nivelan las celdas. Tiempo total del procedimiento: 12-48 horas según el estado inicial y la potencia de la fuente. Esto es normal. No tiene sentido acortar esta etapa: es toda la esencia del trabajo.
6. **Verificación.** Desconecte la fuente, espere 2 horas, separe el paralelo y mida cada celda por separado. La dispersión después de un balanceo correcto debe estar entre 0.005 y 0.010 V.

Señal de problema: una celda, tras desconectarla, cae a 3.35 V, mientras que las demás mantienen 3.45 V. Es autodescarga o un defecto. Márquela y revísela por separado: cárguela a 3.65 V, déjela 72 horas sin carga conectada y compare cuánto cayó respecto a sus vecinas.

3.4 Ensamblado en circuito serie y primera carga del paquete

1. **Separe el paralelo.** Todas las celdas están ahora al mismo voltaje, aproximadamente 3.40-3.45 V en reposo.
2. **Arme el circuito en serie** según su configuración (4s = 12.8 V, 8s = 25.6 V, 16s = 51.2 V), respetando los pares de apriete del capítulo 6.
3. **Antes de conectar el BMS, confirme la polaridad.** Mida el voltaje total del paquete: para 16s debe ser aproximadamente $16 \times 3.42 = 54.7$ V. Si el número es menor al esperado por el doble del voltaje de una celda, alguna celda está invertida. Una celda conectada al revés destruirá tanto a sí misma como al BMS.
4. **Conecte los cables de balanceo del BMS estrictamente en orden**, desde el negativo del paquete (B-) hacia el positivo, uno por uno. Este es el punto de error más común con consecuencias fatales: los cables de balanceo cruzados queman los circuitos de entrada del BMS.
5. **Verifique las lecturas del BMS** antes de conectar cualquier carga: todas las celdas deben estar al mismo voltaje, el voltaje total debe coincidir con lo medido con el multímetro, y los sensores de temperatura deben mostrar temperatura ambiente.

Primera carga del paquete con el cargador. Configure en el cargador un voltaje final de 3.50-3.55 V por celda (no 3.65). Para 16s son 56.0-56.8 V, para 8s 28.0-28.4 V, para 4s 14.0-14.2 V.

Configuración	Nominal	Carga (3.50 V/celda)	Carga (3.55 V/celda)	Límite absoluto (3.65 V/celda)
4s	12.8 V	14.0 V	14.2 V	14.6 V
8s	25.6 V	28.0 V	28.4 V	29.2 V
16s	51.2 V	56.0 V	56.8 V	58.4 V

Por qué 3.50-3.55 V y no 3.65 V. El tramo superior de la curva del LiFePO₄ es muy pronunciado: entre 3.45 V y 3.65 V hay menos del 3% de la capacidad, pero es justo ahí donde la celda envejece más rápido y donde el BMS se activa constantemente por sobrecarga. Al cargar hasta 3.50-3.55 V por celda, se pierde unos pocos puntos porcentuales de capacidad y se gana una extensión considerable de la vida útil y un funcionamiento tranquilo sin desconexiones constantes. En realidad la pérdida es aún menor de lo que parece: una carga que termina en 3.55 V con espera hasta la caída de corriente alcanza aproximadamente el 99% de la capacidad real de la celda. La diferencia entre "hasta 3.55 V" y "hasta 3.65 V" no son decenas de puntos porcentuales de autonomía, sino uno o dos.

3.65 V son necesarios durante el balanceo (para llegar con seguridad al techo en todas las celdas al mismo tiempo) y como límite de emergencia del BMS. En el uso diario, ahí no hay nada que hacer.

Corriente de carga. Manténgase en el rango de 0.2-0.5C. Para 280 Ah esto es 56-140 A. Menos siempre se puede, solo es más lento. Más de 0.5C acorta la vida útil y sobrecarga el BMS.

3.5 Qué vigilar durante la primera carga

Realice la primera carga del paquete ya armado sin dejarlo sin supervisión. Preste atención a:

- **Dispersión de voltajes entre celdas (delta).** Al inicio de la carga, 0.005-0.015 V es normal. Si al final de la carga la delta crece a 0.05 V o más, el balanceo fue insuficiente o hay una celda débil.
- **La celda más alta.** No debe alcanzar 3.65 V antes que el resto. Si lo hace, detenga la carga y repita el balanceo superior.
- **Temperatura.** Las celdas durante una carga de 0.2-0.5C se calientan entre 3 y 8 grados por encima de la temperatura ambiente. Un calentamiento localizado en una sola celda o borne indica mal contacto o una celda problemática.
- **Temperatura de bornes y conectores.** Con la mano (con el dorso, con cuidado). Un borne caliente es un borne mal apretado o una sección insuficiente.
- **Corriente.** Debe corresponder a lo configurado en el cargador. Si la corriente es menor a la esperada, hay una resistencia alta en algún punto del circuito.

Al final de la carga, el BMS debe mostrar todas las celdas dentro de 3.50-3.55 V con una dispersión de hasta 0.010 V, y un SoC cercano al 100%. Si es así, la parte más difícil ya quedó atrás.

4. Balanceo en operación

El balanceo superior (capítulo 3) se hace una sola vez, manualmente, antes del montaje. De ahí en adelante, la uniformidad entre celdas queda a cargo del BMS. Este capítulo trata sobre cómo lo hace exactamente y por qué en muchos montajes el balanceo "no funciona".

4.1 Balanceo pasivo y activo

El balanceo pasivo consiste en una resistencia y un transistor por cada celda. Cuando una celda está más alta que el resto, el BMS activa la resistencia y disipa el excedente en forma de calor. La corriente de balanceo típica es de 30-200 mA, y en placas más potentes llega hasta 300 mA.

Consecuencias:

- Solo se puede balancear "hacia abajo": la energía sobrante se retira de la celda más alta, no es posible subir la más baja.
- Por eso el balanceo pasivo solo tiene sentido **durante la carga**, cuando el paquete se acerca al punto superior y la diferencia se hace visible. Balancear en reposo o durante la descarga es simplemente un desperdicio de energía.
- La velocidad es muy baja. Una corriente de 100 mA para nivelar una diferencia de 5 Ah necesita 50 horas de tiempo de balanceo efectivo, y el balanceo solo funciona unos minutos al final de cada carga. De ahí la conclusión principal: **el balanceo pasivo no corrige un mal arranque**, solo mantiene un paquete que ya está nivelado.

El balanceo activo transfiere carga de la celda más alta a la más baja a través de un condensador o un transformador, con una eficiencia del 80-90%. La corriente en las placas domésticas es de 0.6 A, 1 A, 2 A, y en las más potentes hasta 5 A. Es un orden de magnitud más rápido y funciona en ambos sentidos.

Las placas JK BMS de las series populares traen un balanceador activo integrado (de ahí su popularidad). Pero incluso un balanceador activo de 2 A no reemplaza el balanceo superior: para nivelar celdas que se separaron 20 Ah, necesitará 10-12 horas de trabajo continuo (20 Ah con una corriente de 2 A), y normalmente trabaja solo dentro de un rango de voltajes definido y solo unos minutos al final de la carga.

4.2 Umbrales de configuración del balanceo

Tres parámetros determinan cuándo se activa el balanceador.

Voltaje de inicio del balanceo (balance trigger voltage). El balanceador se activa solo cuando el voltaje de la celda más alta superó este umbral. Valor típico **3.40 V**, rango razonable 3.38-3.45 V.

Por qué ahí: por debajo de 3.40 V la curva del LiFePO₄ es prácticamente plana, y la diferencia de voltaje no corresponde a una diferencia de carga. Una celda en 3.28 V y una celda en 3.30 V pueden tener el mismo SoC, y un balanceador activado en ese tramo estaría "corrigiendo" un desequilibrio inventado, creando uno real. Por encima de 3.40 V la curva ya sube, y el voltaje se convierte en un indicador confiable del nivel de carga.

Diferencia de voltaje para el inicio (balance delta / trigger difference). Dispersión mínima entre la celda más alta y la más baja a partir de la cual tiene sentido actuar. Valor típico **0.010 V (10 mV)**, rango razonable 5-30 mV.

Un valor demasiado bajo (3 mV) hace que el balanceador trabaje de forma constante y caliente la placa por el ruido propio de la medición. Uno demasiado alto (50 mV) permite que el desequilibrio se vuelva notable antes de que empiece el trabajo.

Corriente de balanceo (balance current). Para placas activas JK es de 0.6-2 A según el modelo; a menudo ajustable. Configure el máximo que permita la placa, pero vigile la temperatura del balanceador: se calienta, y es normal mientras el calentamiento sea moderado.

Balanceo solo durante la carga. La mayoría de las placas tienen un interruptor aparte que permite balancear solo cuando hay corriente de carga. Para balanceadores pasivos, ese es el valor correcto (activado). Para un balanceador activo se admite balancear siempre, e incluso es beneficioso, porque un balanceador activo no desperdicia energía en calor, sino que la transfiere a la celda vecina. **Verifique el manual de su BMS:** en distintas series este parámetro se llama de forma diferente y se comporta de manera distinta.

4.3 Cómo saber que el balanceo está funcionando

Observe la delta (diferencia entre la celda máxima y la mínima) en tres puntos del ciclo:

Punto del ciclo	Paquete sano	Requiere atención
Reposo, SoC medio	0.002-0.010 V	por encima de 0.020 V
Final de carga	0.005-0.020 V	por encima de 0.050 V
Final de descarga	0.010-0.040 V	por encima de 0.100 V

La delta al final de la descarga siempre es mayor que al final de la carga: abajo la curva también es pronunciada, y la celda más débil se hunde más rápido. Esto es normal y por sí solo no es un diagnóstico.

La delta crece con los ciclos (era 0.010 V, pasó a 0.030 V en tres meses): esto es o bien un desgaste natural que el balanceador no alcanza a compensar, o bien una celda con autodescarga elevada. Observe cuál celda "se escapa". Si siempre es la misma y siempre hacia abajo, es autodescarga.

La delta saltó de forma brusca en un solo ciclo: revise no la celda, sino el contacto. Un borne en mal estado o un conector oxidado genera una caída de voltaje que el BMS interpreta como el hundimiento de una celda.

4.4 Cuándo repetir el balanceo superior manual

De forma programada una vez al año, o ante estas señales:

- La delta al final de la carga supera de forma estable 0.050 V.
- El BMS desconecta la carga por sobrevoltaje en una celda cuando el SoC todavía es menor al 95%.
- El paquete entrega notablemente menos Ah que hace un año, aunque las celdas individualmente estén sanas.

El procedimiento es el mismo que en el capítulo 3: separar el circuito serie, conectar en paralelo, cargar hasta 3.65 V, mantener. Son unas pocas horas de trabajo una vez al año, y devuelven al paquete su capacidad de placa.

5. Configuración del BMS

El BMS no es "un dispositivo inteligente que lo hace todo solo". Es un conjunto de umbrales, y de fábrica vienen configurados de forma genérica o directamente incorrecta para su configuración. Este capítulo trata sobre qué configurar exactamente y por qué.

Los valores siguientes se presentan como rangos típicos para placas comunes de la serie JK. **Verifique el manual de su BMS:** los nombres de los parámetros, e incluso su lógica, difieren entre series y firmwares.

5.1 Lo que el BMS hace y lo que no hace

Hace: vigila el voltaje de cada celda, la corriente total, la temperatura; abre las llaves de potencia cuando se exceden los límites; balancea las celdas; calcula el SoC.

No hace: no es un interruptor para uso diario (capítulo 9, error 6), no reemplaza al fusible (la apertura del MOSFET no es aislamiento galvánico, y ante un cortocircuito puede quedar soldado en estado cerrado), no salva de errores de montaje, no compensa la ausencia de balanceo superior.

5.2 Tabla de umbrales (perfil típico 16s, celdas 280 Ah)

Parámetro	Valor típico	Rango razonable	Comentario
Sobrecarga de celda (Cell OVP)	3.65 V	3.60-3.65 V	Límite absoluto, no un punto de trabajo
Liberación de sobrecarga (OVP release)	3.55 V	3.45-3.55 V	Histéresis para que no "esté chasqueando"
Retardo OVP	1-2 s	1-5 s	
Subdescarga de celda (Cell UVP)	2.80 V	2.70-2.90 V	Por debajo de 2.5 V la celda se degrada
Liberación de subdescarga (UVP release)	3.00 V	2.95-3.10 V	
Retardo UVP	2-5 s	2-10 s	Un retardo más largo tolera corrientes de arranque
Sobrecarga del paquete	58.4 V (16s)	3.65 x N	Duplica el umbral de celda
Subdescarga del paquete	44.8 V (16s)	2.80 x N	
Límite de corriente de carga (Charge OCP)	100 A	1.2 x corriente máx. del cargador	Y no más del 0.5C de la capacidad del paquete ni más del nominal de la placa
Retardo Charge OCP	5-10 s		

Parámetro	Valor típico	Rango razonable	Comentario
Límite de corriente de descarga (Discharge OCP)	150-200 A	según cálculo, sección 5.3	
Retardo Discharge OCP	5-10 s	3-30 s	Debe soportar el arranque del inversor
Segunda etapa de descarga (OCP2)	250-300 A	1.5-2 x OCP1	Retardo 0.1-1 s
Cortocircuito (SCP)	de fábrica		Actúa en microsegundos
Carga, límite superior de temperatura	50-55 C	45-55 C	
Carga, límite inferior de temperatura	5 C	3-5 C, mínimo absoluto 0 C	Crítico, sección 5.4
Liberación del bloqueo por baja temperatura	10 C	8-12 C	
Descarga, límite inferior de temperatura	-20 C	-20...-10 C	
Descarga, límite superior de temperatura	60 C	55-65 C	
Temperatura del MOSFET, corte	80-90 C		De fábrica, no elevar
Balanceo, voltaje de inicio	3.40 V	3.38-3.45 V	Capítulo 4
Balanceo, diferencia para inicio	0.010 V	0.005-0.030 V	
Corriente de balanceo	0.6-2 A	según modelo de placa	
Voltaje de celda para SoC 100%	3.55 V	3.50-3.60 V	Debe coincidir con el perfil del cargador
Voltaje de celda para SoC 0%	2.80 V	2.75-2.90 V	Debe coincidir con UVP
Capacidad del paquete (Capacity)	280 Ah	real según prueba	A partir de ella se calcula el SoC

Para 8s y 4s, los umbrales del paquete se recalculan multiplicando por la cantidad de celdas; los umbrales de celda no cambian.

5.3 Cálculo de los umbrales de corriente

Los umbrales de corriente se derivan de la potencia de la carga, no se sacan "de la nada".

Paso 1. Potencia continua (contW). Suma de las potencias de todo lo que funciona al mismo tiempo: $\text{contW} = \text{suma}(\text{potencia}_i \times \text{cantidad}_i)$.

Paso 2. Potencia pico (peakW). El mayor incremento de arranque individual sobre la potencia continua: $\text{peakW} = \text{contW} + \max(\text{arranque}_i - \text{nominal}_i)$. Un refrigerador con nominal de 150 W y arranque de 900 W agrega a la potencia continua 750 W, no 900.

Paso 3. Corriente del BMS. $\text{corriente BMS} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$, donde V es el voltaje nominal del paquete (12.8, 25.6 o 51.2 V), y 1.25 es el margen obligatorio del 25%.

Ejemplo: paquete de 25.6 V, contW de 800 W, mayor incremento de arranque 750 W, por lo tanto $\text{peakW} = 1550$. $1550 / 25.6 \times 1.25 = 75.7 \text{ A}$. Se toma un BMS de 100 A.

Por qué justo 1.25. El margen del 25% cubre: la caída de voltaje del paquete bajo carga (con 20% de SoC, un paquete de 25.6 V trabaja más cerca de 24 V, y la corriente aumenta), el error de medición del BMS, y también la desviación de las corrientes de arranque reales respecto a las de placa. Sin este margen, el BMS se desconectaría en cada arranque del compresor.

Corrección honesta sobre la eficiencia. La fórmula calcula la corriente a partir de la potencia de la carga, pero la corriente real que sale del paquete es mayor: el inversor absorbe las pérdidas, y con una eficiencia de 0.88 consume aproximadamente 14% más de lo que entrega ($W / 0.88 / V$). El margen 1.25 no reemplaza esta diferencia, se suma encima: mientras el inversor no trabaje al máximo, la potencia de placa suele ser bastante mayor a la carga real, y precisamente en eso se sostiene el cálculo simplificado $\text{peakW} / V \times 1.25$. Pero si usted planea cargar el inversor de forma prolongada a su potencia de placa completa, primero calcule la corriente real considerando la eficiencia: $I = W / 0.88 / V$, y luego, como siempre, aplique el mismo margen del 25%: elija el cable y el fusible a partir de $I \times 1.25$, no de I directamente. Para un inversor de 3000 W a 25.6 V: $I = 3000 / 0.88 / 25.6 = 133 \text{ A}$, con el margen 1.25 esto es 166 A, por lo tanto fusible de 200 A y cable de 50 mm², en lugar de 150 A y 35 mm² que daría el cálculo a partir de la corriente nominal sin la corrección de eficiencia.

El retardo importa más que el umbral. El arranque de un motor dura de 0.1 a 2 segundos. Si el umbral con el margen 1.25 igual se supera en el arranque, la solución correcta es aumentar el retardo de activación de la primera etapa a 5-10 segundos y confiar en la segunda etapa (OCP2) con un retardo más corto para fallas reales. No suba el umbral por encima del nominal de la propia placa.

5.4 Umbrales de temperatura: el parámetro más importante

La carga con la temperatura de las celdas por debajo de 0 °C está prohibida. Esto no es una recomendación ni algo "deseable". Durante la carga en frío, el litio no se incorpora a la estructura del ánodo, sino que se deposita en su superficie como dendritas metálicas (recubrimiento de litio, plating). Consecuencias:

- Se pierde capacidad de forma irreversible, unos pocos puntos porcentuales por cada episodio.
- La resistencia interna aumenta.
- Las dendritas pueden, con el tiempo, perforar el separador y provocar un cortocircuito interno.
- **No hay señales externas.** La celda se ve normal, el voltaje es normal, y la persona descubre el problema medio año después, cuando el paquete sostiene la mitad.

Por eso configure de esta manera:

1. **El sensor de temperatura debe estar sobre la celda**, no en la placa del BMS ni al aire. A continuación, importa en cuál celda exactamente, porque las dos protecciones miran en direcciones distintas.

El bloqueo por baja temperatura de carga debe orientarse por la celda más fría. El bloqueo actúa según lo que ve el sensor, y la deposición de litio ocurre en la celda que realmente está fría. Si el sensor está en la celda central (la más caliente), mostrará +6 C mientras la celda del extremo, junto a la pared de la caja, tiene 0 C, y el BMS permitirá una carga que destruirá esa celda del extremo. Por eso **el sensor principal de carga se coloca en la celda del extremo, del lado de la pared exterior o del fondo** (de donde viene el frío), en el punto más frío del paquete.

El corte por temperatura superior, en cambio, se orienta por la celda más caliente, que es la central: está rodeada de vecinas, se calienta con ellas y disipa el calor más lentamente. El segundo sensor se coloca en la cara lateral de la celda central, y es él quien se encarga del corte por sobrecalentamiento durante la carga y la descarga.

Si la placa tiene una sola entrada de sensor, colóquelo en la celda fría del extremo: en invierno el error hacia el frío cuesta más caro, y el sobrecalentamiento en un respaldo doméstico con corrientes moderadas ocurre con mucha menos frecuencia.

2. **Límite inferior de carga en 5 C**, liberación del bloqueo a 10 C. El mínimo físico absoluto es 0 C, pero el umbral se fija con margen: el sensor tiene su propio error (un NTC típico es de $\pm 1-2$ C), y entre el punto de medición y la zona más fría de la celda siempre hay un gradiente de algunos grados. El intervalo de 5 grados entre el bloqueo y su liberación también es necesario para que el sistema no esté encendiéndose y apagándose en el límite.
3. **No confíe en el cargador.** La mayoría de los cargadores no conocen la temperatura del paquete. La protección debe estar en el BMS.
4. **La descarga en frío está permitida** hasta -20 C, pero la capacidad a -10 C cae aproximadamente 20-30%, y esto es normal: se recupera después de que la celda se calienta.

5.5 Orden de configuración y verificación

1. Conecte el BMS a la aplicación (Bluetooth) o a la PC antes de conectar los cables de potencia.
2. Configure la cantidad de celdas (S count) y la química (LiFePO4/LFP). Un error aquí vuelve inútil todo lo demás.
3. Configure la capacidad del paquete según los resultados de la prueba del capítulo 2 (por ejemplo, no 280, sino los 275 Ah medidos).
4. Ingrese los umbrales de celda de la tabla 5.2.
5. Ingrese los umbrales de corriente según el cálculo 5.3.
6. Ingrese los umbrales de temperatura según 5.4.
7. Ingrese los parámetros de balanceo según el capítulo 4.
8. **Verifique con una activación real.** Baje temporalmente el umbral de subdescarga a un valor apenas por encima del voltaje actual de la celda y confirme que el BMS realmente desconecta la carga. Luego restablezca el valor de trabajo. Una protección que nunca se probó es una suposición, no una protección.
9. Guarde la configuración y **anótela en papel** o tome una captura de pantalla. Después de cambiar la placa o de un reinicio, se lo agradecerá.

6. Cableado

La mayoría de los montajes que se quemaron no se quemaron por las celdas, sino por las conexiones. Una celda distribuye el calor por toda su carcasa; un borne en mal estado lo concentra en un punto del tamaño de una moneda.

6.1 Sección del cable

La tabla siguiente presenta valores de trabajo para cable de cobre multifilar en un tramo corto (hasta 2-3 metros) dentro de una carcasa o gabinete, a una temperatura ambiente de hasta 40 C. Son deliberadamente conservadores: en un sistema de respaldo, el margen cuesta menos que la reparación.

Sección, mm ²	Corriente continua	Aplicación típica (cálculo $\text{peakW} / \text{V} \times 1.25$)
6	30 A	Consumidores pequeños, ramales hasta 30 A, cargador hasta 30 A
10	50 A	Líneas de 12/24 V de potencia media, ramal con fusible de 40 A
16	80 A	600 W a 12 V, 1200 W a 24 V, 2400 W a 51.2 V (en los tres casos cerca de 59 A, fusible de 60 A)
25	100 A	1000 W a 12 V, 2000 W a 24 V, 4000 W a 51.2 V (cerca de 98 A, fusible de 100 A)
35	150 A	1500 W a 12 V, 3000 W a 24 V, 6000 W a 51.2 V (cerca de 147 A, fusible de 150 A)
50	200 A	2000 W a 12 V, 4000 W a 24 V (cerca de 195 A, fusible de 200 A)

Cómo elegir. El orden es el siguiente:

1. Calcule la corriente igual que para el BMS: $\text{corriente} = \text{peakW} / \text{V} \times 1.25$.
2. Redondee **hacia arriba** al nominal de fusible más cercano de la serie 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 A (sección 7.1). Esta escala está pensada para los circuitos principales y del inversor; los ramales pequeños de hasta 30 A (por ejemplo, la línea de 12 V para consumidores pequeños) protéjalos con fusibles planos automotrices de 5-30 A, elegidos con la misma regla: corriente x 1.25, redondeo hacia arriba dentro del rango de fusibles planos, pero nunca por encima de la corriente admisible del propio cable.
3. Tome la fila de la tabla cuya corriente continua no sea menor al nominal del fusible, no al número calculado.

El tercer paso es fácil de pasar por alto, y es justo ahí donde ocurre el error más peligroso. El cálculo dio 73 A, usted tomó 16 mm² (80 A) y puso el fusible más cercano de la serie, que es 100 A. Ahora el cable soporta 80 A, y la protección actúa a 100 A: lo que se quema es el tramo de cable, no el fusible. El cable siempre se calcula a partir del nominal del fusible.

Ejemplo: inversor de 3000 W en un paquete de 51.2 V. $3000 / 51.2 \times 1.25 = 73 \text{ A}$, el fusible más cercano hacia arriba es 100 A, por lo tanto cable de 25 mm² (100 A). El mismo inversor en un paquete de 25.6 V da $3000 / 25.6 \times 1.25 = 146 \text{ A}$, fusible de 150 A, cable de 35 mm². Por eso un voltaje de paquete más alto abarata tan notablemente el cableado.

Corrección por la eficiencia del inversor. El cálculo anterior parte de la potencia de la carga y supone que la potencia de placa del inversor es un pico, no un régimen continuo. Si el inversor va a trabajar de forma prolongada a su potencia de placa completa, primero calcule la corriente real considerando su eficiencia: $W / 0.88 / V$, y luego, como siempre, aplique el margen 1.25 y elija la sección con ese número a partir de la tabla anterior (sección 5.3).

Dos correcciones.

- **Longitud.** En tramos de más de 3 metros, calcule no solo el calentamiento, sino también la caída de voltaje. Referencia: la caída en todo el tramo, ida y vuelta, no debe superar el 2-3% del nominal (para 12.8 V son 0.3 V, para 51.2 V son 1.2 V). En tramos largos, use la siguiente sección superior.
- **Haz de cables y temperatura.** Varios cables de potencia dentro de un mismo conducto o en una caja cerrada y caliente se calientan entre sí. Reduzca la corriente admisible en 20-30%, o use la siguiente sección superior.

Solo cobre, solo multifilar, solo con aislamiento de calidad. No use aluminio en un montaje doméstico: fluye bajo la presión del borne, y una conexión bien apretada hoy queda floja mañana. El aislamiento debe estar clasificado para 90 C o más; el cable de soldadura (clase KG) de hilos finos se dobla bien y es una excelente opción. No use cable "de audio" automotriz de sección desconocida con revestimiento de cobre sobre aluminio (CCA): la sección real de cobre ahí es varias veces menor a la declarada.

6.2 Terminales y crimpado

No se pueden soldar las conexiones de potencia. Tres razones: la soldadura se filtra por capilaridad dentro del hilo y lo vuelve rígido, creando un punto de quiebre; ante un calentamiento de emergencia, la soldadura es lo primero que se funde y la conexión se deshace justo cuando menos conviene; la resistencia de una unión soldada es inestable.

Correcto: crimpado con prensa hidráulica y matriz hexagonal. No "a martillazos y cincel", no con alicates.

Secuencia:

1. Pele el aislamiento exactamente a la profundidad del cuerpo del terminal, no más. El cobre expuesto fuera del terminal se oxida.
2. No retuerza el hilo con los dedos, no lo estañe.
3. Elija el terminal según la sección (el marcado 25-8 significa 25 mm² para tornillo M8) y la matriz según la sección.
4. Crimpe en dos pasadas a lo largo del cuerpo del terminal, girándolo 90 grados entre presiones, si la matriz lo permite.
5. Verificación: tire con fuerza. El terminal no debe moverse en absoluto. Un cable que gira dentro del terminal es un trabajo defectuoso.
6. Termorretráctil con capa adhesiva de 20-25 mm sobre la transición aislamiento/terminal. Esto no es cosmético: fija la transición y evita que la humedad entre al hilo.
7. Marcado por color: termorretráctil rojo en el positivo, negro o azul en el negativo. En un año usted ya no lo recordará.

6.3 Pares de apriete

Los bornes de las celdas prismáticas de LiFePO₄ están hechos de aluminio (positivo) y de cobre o acero (negativo). La rosca de aluminio se daña con facilidad y de forma irreversible.

Rosca del borne	Par	Nota
M6	4-6 N·m	Típico para celdas de 100-105 Ah
M8	8-12 N·m	Típico para celdas de 280-314 Ah

Verifique siempre la ficha técnica de sus celdas: el fabricante específico puede indicar un rango más estrecho, y su valor tiene prioridad sobre este.

Reglas que salvan los bornes:

- **La llave dinamométrica es obligatoria.** La mano de una persona sin experiencia aplica en un M8 entre 3 y 25 N·m, y el segundo caso arranca la rosca.
- **Verifique la longitud del tornillo.** Un tornillo más largo que la profundidad de la rosca del borne toca fondo y da una sensación engañosa de apriete, mientras que la barra en realidad queda poco presionada. Peor aún: en algunas celdas un tornillo demasiado largo llega hasta el elemento interno. Regla: la parte roscada del tornillo entra en el borne 6-8 mm, y no más.
- **Orden de las arandelas:** barra, luego arandela plana, luego arandela de presión (grover), luego el tornillo. La arandela de presión directamente sobre la barra la deforma y daña el contacto.
- **No use arandelas dentadas (de seguridad)** sobre un borne de aluminio: cortan el recubrimiento, y en el punto del corte comienza la oxidación.
- **Nada de grasa con grafito.** Una capa fina de pasta conductora especial para contactos de aluminio es aceptable; una grasa común crea una película aislante.
- **Reapriete después del primer ciclo.** Después de una semana de funcionamiento (varios ciclos de carga/descarga y varias dilataciones térmicas), pase de nuevo la llave dinamométrica. Después, una vez cada seis meses.

6.4 Barras de conexión

- **La sección de la barra debe corresponder a la corriente del paquete,** según la misma tabla 6.1. Una barra de cobre de 20x3 mm tiene un área de 60 mm² y cubre con amplio margen 200 A. Las barras decorativas delgadas que vienen con celdas económicas suelen estar diseñadas para 100-150 A, y en un montaje de alta potencia serán el punto más caliente.
- **Las trenzas flexibles son mejores que las barras rígidas** cuando las celdas pueden moverse un poco: la celda "respira" en cada ciclo, y una barra rígida transmite ese movimiento al borne.
- **La barra no sostiene el paquete.** La mecánica la sostienen las placas de compresión; la barra solo conduce corriente.
- **Cobre con recubrimiento (estañado o niquelado).** El cobre desnudo sobre un borne de aluminio forma un par galvánico y se oxida en el punto de contacto, aumentando progresivamente la resistencia.
- **Las superficies de contacto, antes del montaje,** límpielas con alcohol, no con lija: los rayones reducen el área de contacto real.

6.5 Cables de balanceo

- Sección de 0.5-1.0 mm², haz aparte, en ningún tramo pasa cerca del cableado de potencia.
 - **Cada cable de balanceo tiene su propio fusible** de 1-2 A (fusibles en portafusibles o PPTC autorrestaurables). Es una práctica estándar que a menudo se omite: si un cable de balanceo se pela contra la carcasa y hace contacto con un potencial vecino, sin fusible se quema el BMS, y a veces también el haz.
 - Conecte estrictamente en orden desde B- hacia arriba. Verifique con el multímetro el voltaje entre contactos vecinos del conector antes de insertarlo: debe ser el voltaje de una celda (cerca de 3.3 V), no el doble ni cero.
 - Fije el conector de forma que no vibre ni se salga. Si se pierde una de las líneas de balanceo, el BMS ve la celda como cero o como el doble, con las activaciones correspondientes.
-

7. Fusibles y conmutación

El BMS es electrónica, y puede fallar. El fusible es física, y actúa incluso cuando nada más funciona. Un paquete sin fusible principal no es una instalación terminada, sin importar cuántas funciones inteligentes tenga su BMS.

7.1 Cálculo del nominal

El mismo factor que para el BMS y para el cable:

$\text{nominal del fusible} \geq \text{peakW} / V \times 1.25$, y luego redondeo **hacia arriba** al nominal estándar más cercano.

Serie estándar de la cual se elige: **40, 60, 100, 125, 150, 200, 250 A**.

Ejemplos:

Paquete	Inversor	Cálculo	Fusible	Cable mínimo
12.8 V	600 W	$600 / 12.8 \times 1.25 = 58.6 \text{ A}$	60 A	16 mm ²
12.8 V	1000 W	$1000 / 12.8 \times 1.25 = 97.7 \text{ A}$	100 A	25 mm ²
25.6 V	1500 W	$1500 / 25.6 \times 1.25 = 73.2 \text{ A}$	100 A	25 mm ²
25.6 V	2000 W	$2000 / 25.6 \times 1.25 = 97.7 \text{ A}$	100 A	25 mm ²
25.6 V	3000 W	$3000 / 25.6 \times 1.25 = 146.5 \text{ A}$	150 A	35 mm ²
51.2 V	3000 W	$3000 / 51.2 \times 1.25 = 73.2 \text{ A}$	100 A	25 mm ²
51.2 V	5000 W	$5000 / 51.2 \times 1.25 = 122.1 \text{ A}$	125 A	35 mm ²

Preste atención a la columna del cable: no se calcula a partir de la corriente calculada, sino del **nominal del fusible después del redondeo hacia arriba**. Por eso 73.2 A no dan 16 mm², sino 25 mm²: el fusible en ese punto ya es de 100 A.

Tres elementos, una sola corriente. El cable, el BMS y el fusible se calculan con la misma fórmula y el mismo margen de 1.25. La lógica de la protección solo funciona si el fusible actúa antes de que el cable llegue a sobrecalentarse. Por eso el fusible nunca debe ser más potente que la corriente admisible del cable al que está conectado: de lo contrario, lo que se quema no es el fusible, sino el tramo de cable.

Verifique en la tabla 6.1: un fusible de 150 A exige un cable de al menos 35 mm². Si tiene 25 mm² (100 A), cambie el cable o coloque un fusible de 100 A.

7.2 Tipo de fusible: por qué importa justo aquí

La característica clave para un paquete de litio es la **capacidad de interrupción** (interrupt rating): la corriente máxima que el fusible es capaz de cortar sin convertirse en un arco. Recuerde el cálculo del capítulo 1: el paquete puede entregar más de 10 000 A en un cortocircuito. Un fusible con capacidad de interrupción de 2000 A en esa situación no protege, se convierte en una fuente de arco de plasma dentro de la carcasa.

Tipo	Capacidad de interrupción (DC)	Aptitud
Class T	hasta 20 000 A (a 125 VDC)	La mejor opción para LiFePO ₄ , el único recomendado para 51.2 V
MRBF (sobre el borne)	10 000 A a 14 VDC, cerca de 5 000 A a 32 V, cerca de 2 000 A a 58 V	Solo para sistemas de 12 y 24 V, hasta 300 A
ANL / MIDI	2 000-6 000 A	Aceptable solo para paquetes pequeños de 12 V
"Cuchilla" automotriz	1 000-2 000 A	No para protección principal
Interruptor termomagnético AC doméstico	no normado para DC	No usar en DC

La capacidad de interrupción depende del voltaje, y en el MRBF esto es decisivo. Los 10 000 A de placa corresponden a 14 VDC. Ya a 32 V corta cerca de 5 000 A, y a 58 V (es decir, en un sistema de 51.2 V en el punto más alto de carga) cerca de 2 000 A. Un paquete 16s es capaz de entregar más de 10 000 A, por lo tanto en un sistema de 51.2 V el MRBF queda en la misma categoría que el ANL: no cortará la corriente de falla, se convertirá en un arco. Por eso la regla es simple:

- **12 V y 24 V:** el MRBF es aceptable (cómodo, se instala directamente sobre el borne), el Class T es mejor.
- **51.2 V:** solo **Class T**. Nada de MRBF, ANL o tipo cuchilla como fusible principal.

Los interruptores termomagnéticos de corriente alterna no funcionan como protección en corriente continua. La corriente continua no tiene paso por cero, por lo que el arco entre los contactos no se apaga solo. Un interruptor diseñado para 230 V AC, en 51.2 V DC puede no interrumpir el circuito en absoluto, quedando en un estado de arco sostenido. Si necesita un interruptor, use uno marcado explícitamente para DC, con el voltaje indicado (por ejemplo "48 VDC" o "125 VDC") y la capacidad de interrupción requerida.

El voltaje del fusible no debe ser menor al voltaje del paquete. Un fusible marcado 32 VDC no es apto en un sistema de 51.2 V, aunque su nominal en amperios parezca correcto.

7.3 Dónde colocar cada elemento

Orden desde el paquete hasta la carga:

```
[+] paquete -> fusible principal -> interruptor principal -> barra de distribución -> consumidores
[-] paquete -> BMS (B-) -> barra de negativo -> consumidores
```

- **El fusible principal se coloca en el cable positivo, lo más cerca posible del borne del paquete**, dentro de 15-20 cm. El tramo de cable hasta el fusible no está protegido por nada, por lo que debe ser mínimo y estar protegido mecánicamente (conducto corrugado, portafusible aislado).
- **El interruptor principal** se coloca después del fusible. Es su manera de cortar la energía del sistema para dar mantenimiento. Debe estar clasificado para DC y para la corriente total del sistema.
- **Un fusible separado para cada ramal** después de la barra de distribución, dimensionado según la corriente de ese ramal específico. El inversor, el cargador y la línea de 12 V para consumidores pequeños son tres ramales

distintos con tres nominales distintos.

- **El cargador tiene su propio fusible**, según su propia corriente, no la del inversor.
- **El BMS en el circuito negativo** (esquema típico en la mayoría de las placas): las llaves de potencia abren el negativo, por lo que toda la corriente del negativo pasa por B- del BMS. No conecte ningún consumidor al negativo del paquete sin pasar por el BMS: trabajaría sin protección, y el BMS no vería su corriente.

7.4 Precarga (pre-charge)

Los condensadores de entrada del inversor están descargados en el momento de la conexión, y en el primer instante se comportan como un cortocircuito. El pico de corriente alcanza cientos de amperios en milisegundos. Consecuencias: una chispa intensa, contactos quemados en el interruptor, contactos soldados entre sí, y a veces incluso la activación del BMS por cortocircuito.

La solución es simple: antes de cerrar el interruptor principal, aplique la alimentación a través de una resistencia.

- Resistencia de 50-100 Ω , potencia de 5-10 W, en serie, durante 2-5 segundos. Los condensadores se cargan, y no hay chispa en la conexión principal. El valor se elige de forma que la constante de tiempo $R \times C$ entre en ese rango de 2-5 segundos: para una capacitancia de entrada típica del inversor de 10-20 mF, una resistencia de 50 Ω da 0.5-1 s por constante de tiempo, es decir, carga completa en 2-5 s. Una resistencia menor (10 Ω) deja pasar un pico demasiado grande y se convierte ella misma en fuente de chispa; una mayor (más de 200 Ω) carga los condensadores tan lentamente que la persona no espera y cierra el interruptor antes de tiempo.
- Implementación: un botón aparte con la resistencia en paralelo al interruptor principal, o simplemente tocar con un cable que lleve la resistencia antes de cerrar el interruptor.
- También existen interruptores comerciales con función de precarga integrada, y son cómodos.
- Señal de que se necesita precarga: una chispa notoria y con chasquido en cada conexión del inversor. Señal de un problema, no de falta de precarga: una chispa que no cesa. Eso es un cortocircuito, y hay que buscarlo, no apagarlo con una resistencia.

7.5 Puesta a tierra

- La carcasa metálica del gabinete o la caja se conecta a la puesta a tierra de protección de la vivienda.
- El negativo del paquete **no se conecta** con la carcasa ni con la tierra, salvo que el inversor lo exija explícitamente en su documentación. Un circuito DC flotante es más seguro en una instalación doméstica: una falla aislada a carcasa no genera corriente.
- La puesta a tierra del inversor se realiza estrictamente según su manual: en inversores híbridos con función de conmutación de red, el esquema de conexión entre neutro y tierra es determinante para el correcto funcionamiento de la protección.
- No use tuberías de agua ni herrajes como puesta a tierra.

8. Invierno

El invierno ucraniano es tanto la razón principal por la que se arma este paquete como la principal amenaza para él. Este capítulo trata sobre cómo atravesarlo sin perder capacidad.

8.1 Qué hace exactamente el frío

La carga por debajo de 0 C daña la celda. El mecanismo se describió en la sección 5.4: el litio se deposita como capa metálica en el ánodo en lugar de incorporarse a su estructura. El daño se acumula, es irreversible e imperceptible desde afuera. Es el único "no se puede" absoluto en toda la operación de invierno. Cero es el límite físico, y el umbral en el BMS se fija más arriba, en 5 C con liberación a 10 C: el sensor tiene su propio error, y siempre hay un gradiente de algunos grados dentro de la caja.

La descarga en frío está permitida y es segura, pero:

Temperatura de las celdas	Capacidad disponible	Carga
+25 C	100%	Permitida
+10 C	aproximadamente 95%	Permitida
0 C	aproximadamente 85%	Prohibida
-10 C	aproximadamente 70-80%	Prohibida
-20 C	aproximadamente 60-70%	Prohibida

La pérdida de capacidad por el frío es temporal: se recupera por completo después de que la celda se calienta. No confunda la reducción invernal de la autonomía con una degradación del paquete.

La resistencia interna aumenta con el frío, aproximadamente al doble a -10 C respecto a +25 C. Consecuencia práctica: bajo carga el voltaje se hunde más, y el BMS puede activarse por subdescarga antes de lo esperado. Es otra razón para no fijar el umbral de UVP demasiado alto.

8.2 La solución más barata: ubicar el paquete en un lugar cálido

Antes de comprar calentadores, considere algo simple: un paquete de 51.2 V con 280 Ah pesa aproximadamente 100 kg y ocupa un volumen del orden de 40-60 litros. Cabe en un armario en el pasillo, en un depósito, bajo la escalera, en un sótano con calefacción.

- Un espacio con temperatura de +10 C o más elimina por completo la problemática invernal.
- Un balcón sin calefacción pero aislado, con una pared compartida con el departamento, suele mantenerse entre 0 y +5 C incluso en heladas fuertes, y eso ya es suficiente si hay una calefacción pequeña.
- Un garaje, un armario exterior, un galpón sin aislar son escenarios donde se necesita calefacción activa.

El propio paquete genera calor durante su funcionamiento (pérdidas por resistencia interna), y su gran masa térmica hace que la temperatura cambie despacio: 100 kg de celdas se enfrían unos pocos grados por día, no por hora. Esto juega a su favor.

8.3 Aislamiento

El aislamiento térmico es más barato y confiable que la calefacción: no consume energía y no puede fallar.

- Poliestireno extruido (XPS) de 20-30 mm en todas las paredes de la caja, incluyendo el fondo y la tapa. El fondo es lo más importante: el frío sube desde el concreto.
- El paquete no se coloca directamente sobre concreto. Una base de madera o una capa de XPS debajo de la caja.
- El aislamiento debe dejar espacio para el BMS y especialmente para el inversor: el inversor se calienta y necesita aire libre, no se aísla junto con el paquete.
- No haga la construcción hermética. Aislada pero ventilada: esa es la combinación correcta.

8.4 Calefacción activa

Cuando el paquete debe permanecer en un lugar frío:

Equipo. Mantas calefactoras de silicona de 12 V o 24 V, con una potencia de 20-50 W por manta. Para un paquete 16s suelen bastar de 2 a 4 mantas, con una potencia total de 60-150 W.

Ubicación. Las mantas debajo del paquete y en las caras laterales de las celdas de los extremos, no arriba (el calor sube por sí solo). A través de una capa fina de material térmicamente conductor, no directamente sobre la película de la celda, para evitar un sobrecalentamiento localizado.

Control. Un termostato con sensor sobre la celda: encender a +5 C, apagar a +12 C. Así el paquete queda un poco por encima del umbral de liberación del bloqueo de carga (10 C, sección 5.4) y la carga realmente arranca. Esta histéresis evita que el sistema esté encendiéndose y apagándose cada minuto. Muchos BMS tienen una salida de control de calefacción; si el suyo la tiene, es la opción más cómoda, porque el BMS ya conoce la temperatura de las celdas.

La lógica de alimentación de la calefacción es el punto más delicado. Calentar el paquete a partir del propio paquete en invierno significa descargarlo para poder cargarlo. El esquema correcto es:

1. Hay red eléctrica: la calefacción se alimenta de la red (mediante una fuente), y el paquete se carga después de calentarse por encima de 10 C.
2. No hay red: la calefacción está apagada, o se alimenta del paquete en modo mínimo (solo para mantener la temperatura por encima de -10 C para la descarga). De todos modos no hay nada que cargar, así que no tiene sentido mantener +10 C.
3. Umbral inferior de emergencia: si el SoC del paquete cae por debajo del 20-30%, la calefacción se apaga por completo. Mejor un paquete frío que uno descargado por completo.

Calcule por qué el tercer punto es tan importante. Una calefacción de 100 W funcionando un día entero sin red consume $100 \times 24 = 2400 \text{ Wh}$. Un paquete de 51.2 V con 280 Ah contiene $51.2 \times 280 = 14\,336 \text{ Wh}$, por lo tanto la calefacción se lleva cerca del 17% de toda la reserva en un día, sin alimentar nada más. Dos o tres días de apagón en pleno invierno, y el paquete queda a cero solo por la calefacción. Por eso, en invierno sin red, la calefacción está apagada o mantiene el mínimo necesario para la descarga, no unos cómodos +10 C.

Secuencia al regresar la red eléctrica después de un apagón invernal. Primero el calentamiento, luego la carga. Si el BMS está configurado correctamente (sección 5.4), lo hará por sí solo: bloqueará la carga hasta que las celdas alcancen 10 C. Si usted omitió esa configuración, hágalo ahora, antes de la primera helada.

8.5 Lista de verificación de invierno

- Sensores de temperatura del BMS físicamente sobre las celdas, lecturas verificadas.
 - Límite inferior de carga en 5 C configurado y verificado, liberación del bloqueo a 10 C.
 - Aislamiento instalado, fondo aislado del concreto.
 - Calefacción (si la hay) verificada con la activación real del termostato.
 - La alimentación de la calefacción no depende del paquete cuando hay red eléctrica.
 - Bornes reapretados con llave dinamométrica (los cambios de temperatura aflojan las conexiones).
 - Paquete cargado al 100% antes de la temporada, delta verificada.
-

9. Errores comunes

Diez escenarios que se repiten de montaje en montaje. Para cada uno: qué se hace, cómo se manifiesta y qué hacer en su lugar.

Error 1. Montaje sin balanceo superior

Qué se hace. Se reciben celdas con voltaje de 3.29-3.31 V, se considera que "ya están igual de todos modos", se arman en serie y se cargan.

Síntoma. El paquete carga hasta 60-85% y el BMS corta la carga por sobrevoltaje en una celda. Esa celda está en 3.65 V, mientras que la más baja todavía está en 3.30 V. La autonomía es mucho menor a la calculada.

Por qué. Una diferencia de 0.02 V en el tramo plano de la curva puede representar hasta un 10% de la capacidad. "Mismo voltaje" no significa "misma carga". El balanceo pasivo (100 mA) no puede cerrar esa brecha en un tiempo razonable.

Qué hacer. Desarmar el circuito serie, hacer el balanceo superior según el capítulo 3. Una sola vez, y el problema desaparece por años.

Error 2. Carga en frío

Qué se hace. Se coloca el paquete en un garaje o balcón sin haber configurado el umbral inferior de temperatura de carga en el BMS.

Síntoma. Ninguno al principio. Las primeras semanas todo funciona. Después de una o dos temporadas, el paquete sostiene notablemente menos, la resistencia interna aumentó, el voltaje bajo carga se hunde más.

Por qué. Recubrimiento de litio (plating) en el ánodo. Irreversible, se acumula con cada episodio.

Qué hacer. Configurar el límite inferior de carga en 5 C (liberación a 10 C) en el BMS **antes** de la primera helada. Sensor en la celda del extremo, la más fría, no al aire ni en la celda central. Son diez minutos de trabajo que salvan el paquete.

Error 3. Carga diaria hasta 3.65 V por celda

Qué se hace. Se configura en el cargador 58.4 V para 16s, "para que cargue completo".

Síntoma. El BMS corta la carga al final de cada ciclo, a veces varias veces. La delta entre celdas crece con los meses. La capacidad cae más rápido de lo que debería.

Por qué. Entre 3.45 y 3.65 V hay menos del 3% de la capacidad, pero es justo ahí donde la celda envejece más rápido. Trabajar permanentemente en el límite superior es el peor régimen para la vida útil.

Qué hacer. Configurar 3.50-3.55 V por celda (56.0-56.8 V para 16s). Pérdida de unos pocos puntos porcentuales de capacidad, ganancia en vida útil y un funcionamiento tranquilo sin desconexiones.

Error 4. Fusible ausente o incorrecto

Qué se hace. Se confía en el BMS ("total, protege contra cortocircuitos") o se instala un fusible tipo cuchilla automotriz, o un interruptor termomagnético AC doméstico.

Síntoma. Ninguno hasta la falla. Durante la falla: los MOSFET del BMS quedan soldados en estado cerrado y no abren, o el fusible no extingue el arco, y en lugar de una activación se tiene una combustión sostenida.

Por qué. El paquete es capaz de entregar más de 10 000 A. La protección debe tener la capacidad de interrupción adecuada, y debe ser física, no electrónica.

Qué hacer. Fusible principal en el positivo, dentro de 15-20 cm del borne del paquete, nominal según el cálculo con margen 1.25 redondeado hacia arriba en la serie 40/60/100/125/150/200/250 A. Tipo según el voltaje del sistema: para 12 y 24 V sirve el MRBF (o Class T), **para 51.2 V solo Class T**. La capacidad de interrupción del MRBF cae con el voltaje: 10 000 A a 14 V, cerca de 2 000 A a 58 V, es decir, en un sistema 16s ya no soporta la corriente de cortocircuito del paquete. Verifique también que el cable soporte el nominal del fusible, no solo la corriente calculada.

Error 5. Rosca dañada o tornillo demasiado largo

Qué se hace. Se aprietan los bornes "a fondo" sin llave dinamométrica, o se usan tornillos de un stock antiguo sin verificar su longitud.

Síntoma. Con la rosca dañada: el borne ya no sostiene el par, la conexión se calienta, la celda queda prácticamente inutilizable para un montaje normal. Con el tornillo largo: la barra parece apretada, pero el contacto es débil, el borne se calienta bajo carga; en el caso más grave, el tornillo llega hasta el elemento interno.

Por qué. La rosca de un borne de aluminio no perdona un exceso de par. Un tornillo que toca fondo da el mismo "clic" de la llave dinamométrica que uno correctamente apretado.

Qué hacer. Llave dinamométrica, M6 = 4-6 N·m, M8 = 8-12 N·m, verificación con la ficha técnica de la celda. La parte roscada del tornillo entra en el borne 6-8 mm. Enrosque el tornillo en el borne sin la barra y confirme que no toca fondo.

Error 6. El BMS se usa como interruptor

Qué se hace. Se apaga el sistema desde la aplicación del BMS, cortando la carga o la descarga, en lugar de usar un interruptor físico.

Síntoma. Los MOSFET se degradan por la conmutación bajo carga, con el tiempo aumenta su resistencia y su calentamiento. En el peor caso, una llave queda soldada en estado cerrado, y el BMS pierde su capacidad de proteger.

Por qué. Las llaves de potencia del BMS están diseñadas para una desconexión de emergencia (poco frecuente), no para la conmutación diaria. El elemento de protección no debe ser el órgano de control.

Qué hacer. Interruptor DC principal para la corriente necesaria, después del fusible. El BMS desconecta solo en una emergencia.

Error 7. Sección de cable incorrecta o terminales soldados

Qué se hace. Se instalan 16 mm² donde se necesitan 35 mm², o se sueldan los terminales en lugar de crimparlos. Con frecuencia es cable CCA (cobre sobre aluminio) con sección declarada exagerada.

Síntoma. El cable y los terminales están notablemente tibios o calientes bajo carga, olor a aislamiento recalentado, aislamiento oscurecido cerca del terminal, caída de voltaje bajo carga mayor a la esperada.

Por qué. La disipación de calor es proporcional al cuadrado de la corriente, así que "un cable un poco más delgado" en carga pico no se calienta "un poco" más, sino mucho más. Una unión soldada se deshace justo con el sobrecalentamiento.

Qué hacer. Cálculo $\text{peakW} / V \times 1.25$, tabla de secciones 6.1, crimpado hidráulico con matriz hexagonal, solo cobre. Después del primer ciclo con carga, revise con la mano todas las conexiones: ninguna debe estar más caliente que las demás.

Error 8. Paquete sin compresión

Qué se hace. Se colocan las celdas en una caja, a veces solo sujetas con una cincha plástica, considerando las placas de compresión un "lujo opcional".

Síntoma. A los pocos meses, las celdas están notablemente abultadas. La capacidad cae más rápido de lo que predice la vida útil de placa. Ya no es posible comprimir de vuelta celdas que ya se hincharon.

Por qué. La celda se expande y se contrae en cada ciclo. Sin una restricción externa, las capas de los electrodos se delaminan progresivamente, y el contacto interno se deteriora.

Qué hacer. Dos placas terminales rígidas, 4 varillas roscadas, aproximadamente 300 kgf de fuerza, separadores entre celdas. Se hace durante el montaje y no vuelve a mencionarse.

Error 9. Error en el arnés de balanceo

Qué se hace. Se conecta el conector de balanceo sin verificar el orden de los cables con el multímetro, o se conecta con el paquete ya bajo carga, o se deja el arnés sin fusibles.

Síntoma. En el mejor caso, el BMS muestra valores imposibles (celda en 0 V, celda en 6.6 V) y no funciona. En el peor, los circuitos de entrada del BMS se queman de inmediato, a veces con humo.

Por qué. Las entradas de balanceo están diseñadas para la diferencia de una sola celda. Los cables cruzados aplican voltaje doble o invertido directamente sobre los circuitos de medición.

Qué hacer. Conectar estrictamente en orden desde B- hacia arriba, verificar con el multímetro el voltaje entre contactos vecinos antes de insertar el conector (debe ser cercano a 3.3 V en cada par), colocar fusibles de 1-2 A en cada línea, fijar el arnés separado del cableado de potencia.

Error 10. Mezclar celdas distintas en un mismo circuito

Qué se hace. Se compran dos celdas para reemplazar las dañadas, de otro lote u otro fabricante, y se colocan en la misma cadena en serie. O se agrega una celda nueva a un paquete que ya lleva dos años en uso.

Síntoma. El paquete nunca se balancea de forma estable: la delta crece de ciclo en ciclo, la misma celda "se escapa" constantemente hacia arriba o hacia abajo. La capacidad queda determinada por la celda más débil.

Por qué. Una capacidad real y una resistencia interna distintas implican una velocidad de llenado distinta. El balanceador se agota nivelando constantemente en lugar de mantener.

Qué hacer. En un mismo circuito serie, use celdas del mismo lote y de edad similar. Si debe mezclarlas, haga obligatoriamente la prueba de capacidad (capítulo 2) y elija de forma que la dispersión de capacidades esté dentro de 3-5%. Una celda vieja no se coloca en un paquete nuevo.

10. Lista de verificación de la primera puesta en marcha

Imprima esta página. Marque los puntos con lápiz. No pase al siguiente bloque hasta que el actual esté completamente cerrado.

A. Antes del montaje

- ☐ Todas las celdas revisadas visualmente: sin abultamiento, película íntegra, rosca limpia
- ☐ Voltaje de cada celda medido y registrado; por debajo de 2.0 V no entra al paquete
- ☐ La dispersión de voltajes al recibir no supera 0.10 V
- ☐ Capacidad verificada (prueba completa o variante simplificada); dispersión dentro de 3-5%
- ☐ Balanceo superior realizado: paralelo, 3.65 V, espera hasta la caída de corriente y 6-12 horas más
- ☐ Después del balanceo, la dispersión de voltajes está dentro de 0.005-0.010 V
- ☐ Placas de compresión y varillas listas, separadores entre celdas colocados

B. Montaje

- ☐ Prendas retiradas, herramienta aislada, lentes puestos, extintor cerca
- ☐ Polaridad de cada celda verificada antes de instalar la barra
- ☐ Voltaje total del paquete coincide con lo calculado (cantidad de celdas x 3.42 V)
- ☐ Longitud de los tornillos verificada: 6-8 mm en la rosca, no tocan fondo
- ☐ Todos los bornes apretados con llave dinamométrica: M6 = 4-6 N·m, M8 = 8-12 N·m
- ☐ Orden de arandelas correcto: barra, arandela plana, grover, tornillo
- ☐ Sección del cable según la tabla, no menor al nominal del fusible
- ☐ Terminales crimpados con prensa hidráulica, prueba de tracción superada
- ☐ Termorretráctil instalado, marcado por color en su lugar

C. BMS

- ☐ Cantidad de celdas (S) y química (LFP) configuradas correctamente
- ☐ Capacidad del paquete ingresada según el resultado de la prueba
- ☐ Umbrales de celda: OVP 3.65 V / release 3.55 V, UVP 2.80 V / release 3.00 V
- ☐ Umbrales de corriente calculados según $\text{peakW} / \text{V} \times 1.25$, retardos suficientes para el arranque del inversor
- ☐ Límite inferior de carga en 5 C configurado, liberación a 10 C
- ☐ Límite superior de carga 50-55 C, de descarga 60 C; límite inferior de descarga -20 C
- ☐ Balanceo: inicio 3.40 V, diferencia 0.010 V

- ☐ Sensores de temperatura fijados físicamente sobre las celdas
- ☐ Arnés de balanceo verificado con el multímetro par por par antes de conectar
- ☐ Fusibles de 1-2 A instalados en las líneas de balanceo
- ☐ Configuración guardada y registrada (captura de pantalla o en papel)

D. Protección y conmutación

- ☐ Fusible principal en el positivo, a no más de 20 cm del borne (para 51.2 V solo Class T)
- ☐ Nominal del fusible según el cálculo, redondeado hacia arriba en la serie 40/60/100/125/150/200/250 A
- ☐ El nominal del fusible no supera la corriente admisible del cable
- ☐ Interruptor DC principal instalado después del fusible
- ☐ Fusibles separados en cada ramal (inversor, cargador, línea de consumidores pequeños)
- ☐ Esquema de precarga (pre-charge) previsto
- ☐ Carcasa puesta a tierra, negativo del paquete no conectado a la carcasa
- ☐ Ningún consumidor conectado al negativo del paquete sin pasar por el BMS

E. Primera puesta en marcha

- ☐ Polaridad verificada con el multímetro en la entrada del inversor **antes** de conectar
- ☐ Inversor conectado a través de la precarga, sin chispa al cerrar el interruptor
- ☐ El BMS muestra todas las celdas, el voltaje total y corriente cero
- ☐ Voltaje final del cargador configurado en 3.50-3.55 V por celda (no 3.65)
- ☐ Corriente de carga dentro de 0.2-0.5C
- ☐ Primera carga realizada bajo supervisión, de principio a fin
- ☐ Al final de la carga, la delta no supera 0.020 V
- ☐ Todos los bornes, terminales y barras revisados en busca de calentamiento bajo carga
- ☐ Realizado un ciclo completo de descarga con control: ninguna celda se hunde antes que las demás
- ☐ Después de una semana de funcionamiento, todos los bornes reapretados con llave dinamométrica

F. Registrar y guardar

- ☐ Tabla de celdas: número, voltaje al recibir, capacidad medida, resistencia interna
- ☐ Captura de la configuración del BMS
- ☐ Esquema de conexiones con nominales de fusibles y secciones de cable
- ☐ Fecha de puesta en servicio

Anexo A. Fórmulas de cálculo del sistema

Estas fórmulas son las que utiliza la calculadora del sitio web. Se presentan aquí para que usted pueda verificar el resultado manualmente.

1. Potencia continua.

$$\text{contW} = \text{suma} (\text{potencia}_i \times \text{cantidad}_i)$$

Sume la potencia nominal de todo lo que funciona al mismo tiempo.

2. Potencia pico.

$$\text{peakW} = \text{contW} + \max(\text{arranque}_i - \text{nominal}_i)$$

Se toma el mayor incremento de arranque individual, no la suma de todas las corrientes de arranque: dos motores prácticamente nunca arrancan en el mismo milisegundo.

3. Energía requerida.

$$\text{requiredWh} = \text{contW} \times \text{horas} / 0.8 / 0.88$$

- **0.8 (DoD, profundidad de descarga).** El paquete no se descarga a cero: 80% es el equilibrio entre energía disponible y vida útil.
- **0.88 (eficiencia del inversor).** Eficiencia típica de un buen inversor de onda senoidal pura con carga media. Las pérdidas se convierten en calor.

Ejemplo: 500 W durante 8 horas es $500 \times 8 / 0.8 / 0.88 = 5682 \text{ Wh}$.

4. Elección del voltaje del paquete.

Se prueba en orden: 12.8 V (solo si contW no supera 600 W), luego 25.6 V (contW hasta 1500 W), luego 51.2 V. Se acepta la primera opción en la que $\text{Ah} = \text{requiredWh} / \text{V}$ no supere 314 Ah (la celda común más grande). Si ninguna funciona, se toma 51.2 V y líneas en paralelo: $\text{cantidad de líneas} = \text{redondeo hacia arriba} (\text{Ah} / 314)$.

Para el ejemplo anterior: 5682 Wh con 500 W de potencia continua. 12.8 V es apto en potencia, pero $5682 / 12.8 = 444 \text{ Ah}$, que supera 314. Se toma 25.6 V: $5682 / 25.6 = 222 \text{ Ah}$. Es apto, por lo tanto 8s con celdas de 280 Ah.

5. Corriente del BMS.

$$\text{corriente BMS} \geq \text{peakW} / \text{V} \times 1.25$$

6. Potencia del inversor.

$$\text{potencia del inversor} \geq \max(\text{contW} \times 1.3, \text{peakW})$$

El inversor debe sostener la carga continua con un margen del 30% y también soportar el pico.

7. Cable y fusible.

$$\text{corriente} \geq \text{peakW} / \text{V} \times 1.25$$

El fusible se redondea hacia arriba en la serie 40 / 60 / 100 / 125 / 150 / 200 / 250 A, y **el cable se elige según el nominal del fusible**, no según la corriente calculada: según la tabla 6.1 (30 A / 6 mm², 50 A / 10 mm², 80 A / 16 mm², 100 A / 25 mm², 150 A / 35 mm², 200 A / 50 mm²) se toma la sección cuya corriente continua no sea menor al nominal del fusible.

Si el inversor va a trabajar de forma prolongada a su potencia de placa completa, primero se calcula la corriente real considerando la eficiencia: $W / 0.88 / V$, y luego, como en el paso 5, se multiplica por el margen 1.25 y solo después se elige el cable y el fusible (sección 5.3).

Anexo B. Valores de referencia

Magnitud	Valor
Voltaje nominal de celda LiFePO4	3.2 V
Voltaje máximo de carga	3.65 V
Límite superior de trabajo recomendado	3.50-3.55 V
Voltaje en reposo al 100% SoC	aproximadamente 3.40-3.45 V
Voltaje en reposo al 50% SoC	3.28-3.32 V
Límite inferior recomendado	2.80 V
Mínimo absoluto	2.50 V
Límite por debajo del cual la celda no se recupera	2.00 V
Voltaje de almacenamiento (aproximadamente 50% SoC)	3.28-3.32 V
Paquete 4s	12.8 V nominal
Paquete 8s	25.6 V nominal
Paquete 16s	51.2 V nominal
Corriente de carga recomendada	0.2-0.5C
Corriente de finalización de carga (taper), una celda	0.02-0.05C
Corriente de finalización en balanceo en paralelo	2-4 A para todo el conjunto
Temperatura de carga	+5...+50 C (límite físico 0 C)
Temperatura de descarga	-20...+60 C
Temperatura de almacenamiento	-20...+45 C
Vida útil al 80% DoD	aproximadamente 3000-6000 ciclos
Eficiencia del inversor para el cálculo	0.88
Profundidad de descarga de trabajo (DoD)	0.8
Margen para BMS, cable y fusible	1.25

VERSTAT Power. Esta guía se ofrece como material de referencia. Verifique siempre la documentación de su equipo específico.