

Análisis de seguridad BESS — BATIQ, 15 de julio de 2026 (v2)

Firmado digitalmente por: 2026.09.
JOSE ANTONIO 04
CULLÍA 12:40:48
DE LA MAZA +02'00'



Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion



TRAGSATEC

Julio 2026



Análisis de seguridad en los sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion



TRAGSATEC

Julio 2026

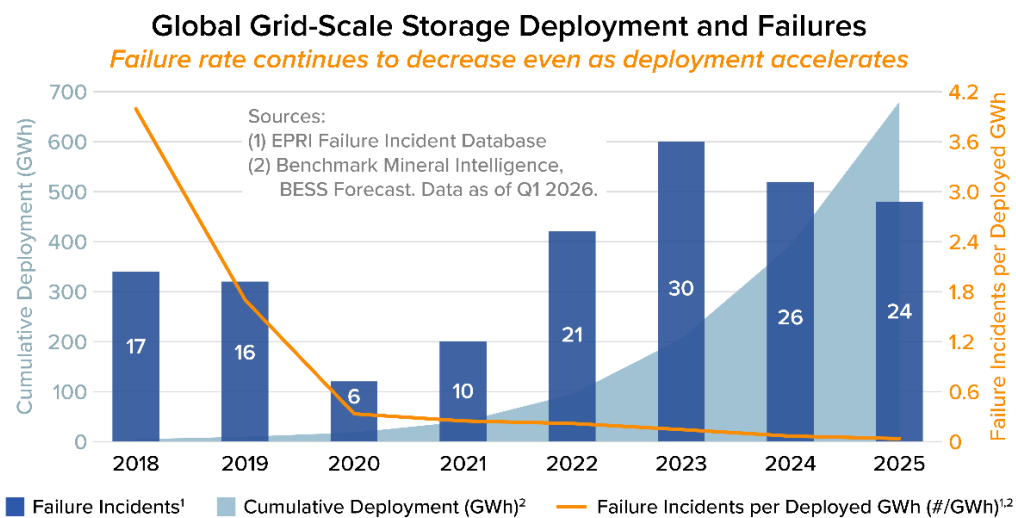
Contenido

Resumen ejecutivo	2
Aspectos generales.....	3
¿Qué es un thermal runaway?	3
Descripción de los niveles de mitigación de riesgos	7
Tipos de ensayos	8
Riesgo de incendio	9
Riesgo químico	26
Gases	26
Líquidos	42
Otros riesgos.....	47
Riesgos físicos.....	47
Riesgos eléctricos	48
Riesgos procedentes de campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos	50
Riesgos funcionales	50
Riesgos medioambientales.....	56
Evaluación de riesgos	61
Definición de la unidad de análisis (UA)	62
Análisis de los riesgos aplicados a la UA.....	63
Estimación y evaluación de riesgos	67
(In)Formación	68
Información para los trabajadores	69
Formación a los instaladores.....	70
Formación a los equipos de emergencias	71
Información para las visitas.....	72
Información a las autoridades.....	72
Información a la ciudadanía	73
Documentación de un proyecto.....	74
Memoria general del proyecto (incl. manuales del producto)	74
Plan de evaluación de riesgos (HMA)	74
Plan de gestión de incendios (PGI)	75
Plan de emergencia (PE).....	77
Bibliografía.....	78
Normas o estándares	78
Guías.....	78
Informes	79
Artículos científicos	79

Resumen ejecutivo

Actualmente se está produciendo un crecimiento exponencial en la instalación de sistemas de almacenamiento basados en baterías de litio-ion. En parte debido a la falta de conocimiento general sobre esta tecnología, relativamente nueva, y en parte por la espectacularidad de algunos de los escasos incidentes producidos, se está generando una lógica alarma social que debe ser contrarrestada con datos realistas.

La recopilación de datos demuestra que el nivel de incidencias está bajando de manera drástica en los últimos años, tal y como recoge la EPRI en su [página web](#):



A pesar de esta tendencia favorable, es necesario mantener e incluso incrementar las medidas de mitigación en los sistemas de almacenamiento para lo cual es necesario conocer cuales son los riesgos que se pueden producir.

Este informe, tras describir tres aspectos generales que ayudan a una mejor comprensión de los siguientes apartados, profundiza en cada uno de los riesgos asociados a los sistemas de almacenamiento:

- Riesgo de incendio (de las baterías o del resto de elementos e incluso proveniente del exterior)
- Riesgo químico por gases (incluyendo explosión y toxicidad)
- Riesgo químico por líquidos (vertidos)
- Riesgos físicos, eléctricos y electromagnéticos
- Riesgos funcionales (fallos, ergonomía, vandalismo, ciberseguridad)
- Riesgos medioambientales (humedad, corrosión, agresiones externas, ruido, medioambiente)

En cada apartado, además de la descripción del riesgo, se incluyen las medidas de mitigación a nivel de diseño, de protecciones activas e incluso de medidas de emergencia en caso de incidente.

Finalmente se incluye la propuesta de evaluación de riesgos como elemento clave para garantizar la seguridad a todos los niveles.

El estudio se completa con una recomendación de los planes de formación, la documentación que debería presentarse en un proyecto y la bibliografía recomendada.

Aspectos generales

La acumulación de energía implica que, si la devolución de la misma no se hace de una manera controlada existe un riesgo de producirse daños. Por ejemplo, si circulamos en un coche a gran velocidad acumulamos energía cinética; si no frenamos progresivamente devolviendo esa energía de manera controlada y lo hacemos de manera brusca en un impacto los daños pueden ser muy graves. De la misma manera, si subimos a una muralla acumulamos energía potencial. Si en lugar de bajar de manera controlada por las escaleras no caemos desde la muralla nuevamente la devolución descontrolada de la energía potencial puede ser fatal.

En los sistemas de acumulación de energía industriales el principio es similar: una acumulación térmica a 600 °C mediante sales fundidas puede provocar graves daños por la temperatura si no está controlada y un pantano que acumula GWh de energía potencial puede ser catastrófico si la presa se rompe. Por lo tanto el primer paso para el análisis de los riesgos de un sistema de almacenamiento basado en Li-ion es conocer cuales son los riesgos asociados.

En un sistema de almacenamiento basado en baterías de litio-ion, el tipo de energía acumulada es energía química, aunque gracias a las reacciones electroquímicas que tienen lugar en los electrodos de las baterías, la batería se alimenta con electricidad y devuelve electricidad. Por esta razón, el principal riesgo en una batería de litio-ion es un riesgo de origen químico. Este riesgo es el conocido como fuga térmica o thermal runaway porque, como se describe en el siguiente apartado, es un proceso autoacelerado que genera calor y gases que pueden dar lugar a incendios o explosiones.

Este proceso de thermal runaway es **extremadamente raro** pero debido a la peligrosidad de sus consecuencias, se implementan un gran número de medidas de mitigación, tal y como se describirá en los siguientes apartados. Además, el thermal runaway no es el único riesgo que debe ser estudiado. En este informe analizarán el resto de riesgos (y mitigaciones correspondientes) que las baterías tienen en común con otros sistemas industriales, como son los riesgos eléctricos, mecánicos, funcionales o medioambientales.

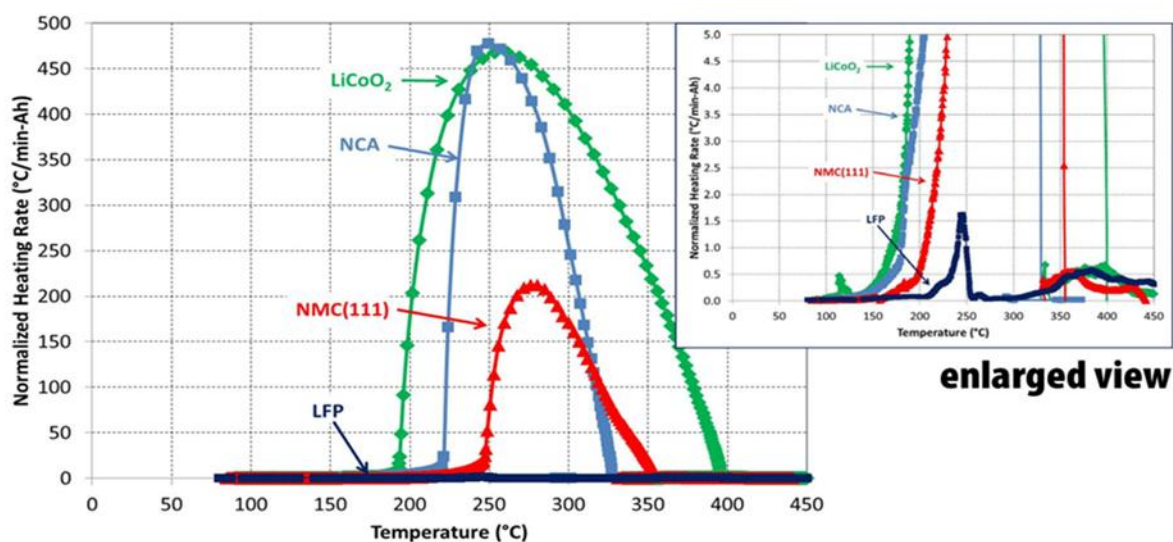
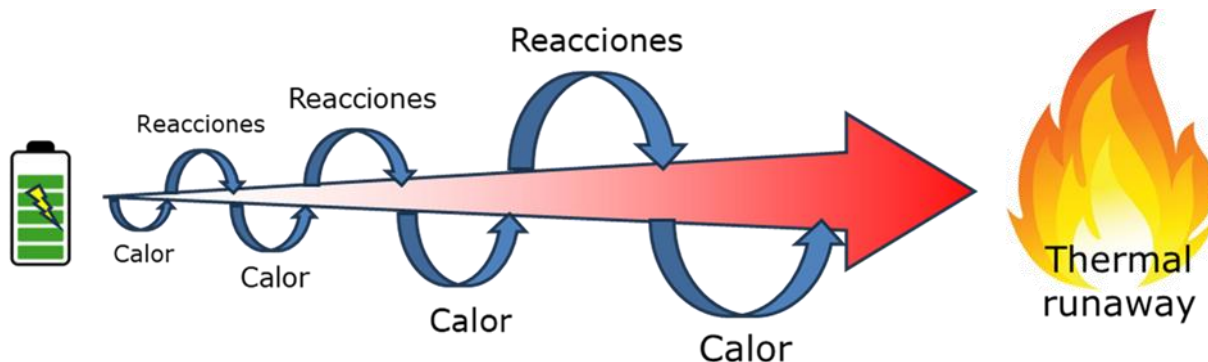
Sin embargo, antes de profundizar en los riesgos y sus mitigaciones se van a describir 4 aspectos generales que ayudarán a una mejor comprensión de los siguientes apartados:

- Qué es un proceso de thermal runaway
- Cómo pueden dividirse los niveles de mitigaciones de riesgos
- Cuales son los tipos de ensayos que se realizan para garantizar que las medidas de mitigación son efectivas

¿Qué es un thermal runaway?

Descripción del proceso

El proceso de thermal runaway se produce cuando en un punto de la celda de litio-ion se genera una gran cantidad de calor que no puede ser disipada adecuadamente. Este calor da lugar a reacciones de degradación exotérmicas que producen calor, lo que aumenta dichas reacciones, que a su vez producen más calor, lo que incrementa más la cantidad de reacciones y el consiguiente calor. Esta espiral ascendente, si las medidas de control no consiguen pararlas, puede desembocar en lo que se conoce como fuga térmica, embalamiento térmico o thermal runaway.



Sandia National Laboratories. (2012) Thermal Runaway: Impact of Cell Chemistry [Gráfico de Calorimetría de Tasa Acelerada (ARC)]. Programa de Seguridad de Baterías (Battery Safety Program), Departamento de Energía de EE. UU.

Además de la temperatura de inicio, es importante la cantidad de calor generada por gramo de material para que la reacción se propague. En la siguiente se muestran los valores típicos de las 3 químicas utilizadas en sistemas BESS:

Química Emisión de calor (J/g)

NMC	1.124
LFP	123
LTO	93

La combinación de ambos datos indica que el LFP es la química con la que es más difícil de iniciar un proceso de TR y si ocurre su propagación es baja. En el caso del LTO, es más fácil que se inicie la reacción, pero menor su propagación mientras que en el NMC la combinación de baja temperatura de inicio con elevada emisión de calor hace que sea la menos intrínsecamente segura.

Causas del thermal runaway

Como se ha indicado, el thermal runaway se produce por la aparición de un punto caliente que no puede evacuar el calor adecuadamente. Para llegar a este punto, el calor puede provenir de un calor extremo externo o de un calor generado internamente.

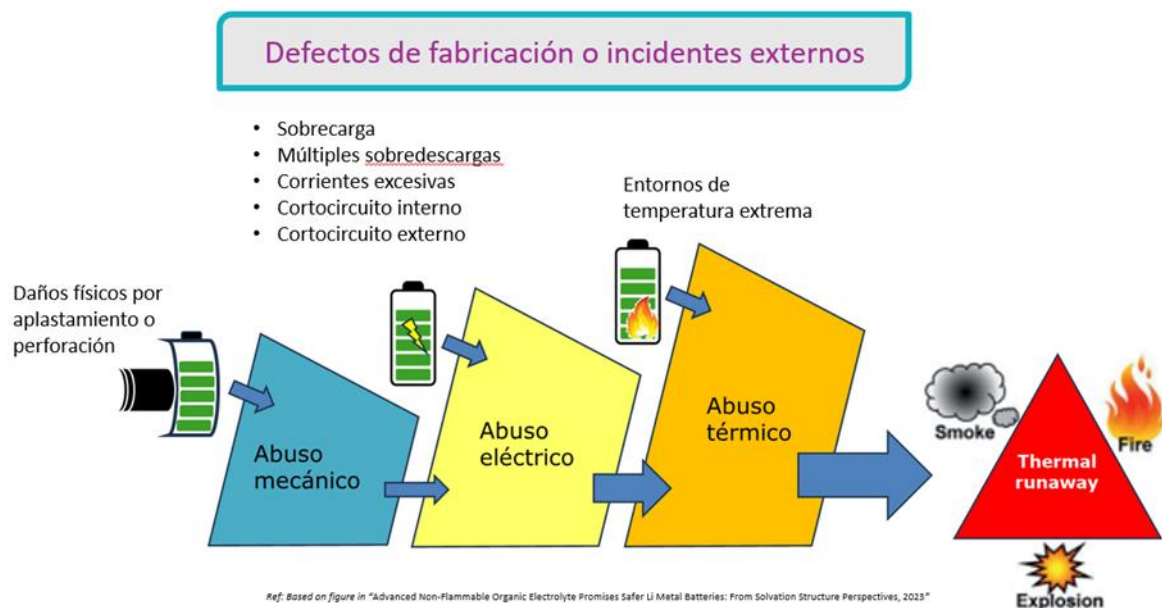
En el primer caso, un calor de alrededor de 200 °C solo puede provenir de una llama externa. Por lo tanto, es importante la utilización de diseños que protejan la batería de las llamas que puedan generarse en otros elementos, como la electrónica mediante elementos ignífugos o medidas activas de sofocación de llama.

El calor interno se puede generar a partir de abusos eléctricos, como por ejemplo, sobrevoltajes o sobrecorrientes. Normalmente las baterías incorporan sistemas de protección como fusibles o contactores que desconectan el paso de corriente si se detectan estas circunstancias anómalas.

El abuso eléctrico puede provenir del exterior o producirse debido a un abuso mecánico. En este último caso una deformación interna debido a un golpe o la penetración de un elemento metálico en la celda puede ser la causante del cortocircuito eléctrico. Actualmente los diseños de las celdas y baterías deben ser suficientemente robustos como para soportar un abuso mecánico como los descritos, para lo cual deben superar los test indicados por la normativa correspondiente (por ejemplo, la IEC 62619).

En todos los casos anteriores se está considerando como inicio del evento una causa accidental imprevisible (una caída, un cortocircuito, un incendio exterior, etc.). Sin embargo, un error en el diseño de la celda o la batería puede dar lugar a fallos catastróficos cuya peligrosidad es mayor ya que afectarán, no a una batería en particular sino a un modelo y por lo tanto a muchas unidades distribuidas en muchas aplicaciones. Para evitarlo, las baterías deben ser certificadas antes de ser introducidas en el mercado y cumplir con el Reglamento de Baterías, que cubre, entre otros aspectos, el de la seguridad, mediante la aplicación de normativas como la indicada en el párrafo anterior.

En la siguiente figura se muestra un resumen de las diferentes causas de un thermal runaway:



*Based on Advanced Nonflammable Organic Electrolyte Promises Safer Li-Metal Batteries: From Solvation Structure Perspectives, Shouyi Yuan, Kai Ding, Xiaoyuan Zeng, Duan Bin, Yingjie Zhang, Peng Dong and Yonggang Wang, **Advanced Materials**, 35, 2206228, 2023*

Consecuencias del thermal runaway

Cuando se inicia un proceso de thermal runaway se pueden producir 4 efectos:

Subida de la temperatura e hinchamiento

En caso de producirse un evento en el interior de una celda el primer efecto visible es un aumento de la temperatura acompañado de un hinchamiento de la celda. La subida de la temperatura provoca la descomposición de la SEI lo que da lugar a la formación de gases, responsables del hinchamiento. Este hinchamiento no es reversible pero habitualmente, las medidas de contención de la batería o la propia deformación de la celda interrumpe el proceso y el thermal runaway no se produce. En caso contrario se observan los siguientes 3 efectos.

Gases

Si las medidas de seguridad activas (BMS) y pasivas (aditivos, materiales especiales) no funcionan correctamente, la temperatura sigue subiendo y se producen tres efectos en paralelo: en el ánodo se produce la deposición de litio metálico (muy reactivo), en el cátodo se empieza a generar oxígeno (también muy reactivo) y el separador comienza a fundirse. A estas temperaturas parte de los componentes del electrolito se volatilizan generándose mucho más gas. Esto provoca la ruptura de la válvula de seguridad y exteriormente se observa la salida de humo de color blanco.

Dado que el separador se ha fundido los materiales anódico y catódico entran en contacto produciendo una gran cantidad de reacciones redox directas (cortocircuito masivo) lo que provoca una fuerte subida de la temperatura. Las elevadas temperaturas junto a las especies reactivas provocan la volatilización del resto de componentes del electrolito (segunda fase del venteo, es decir, más gas) y una reacción en cadena que incrementa la temperatura, lo que incrementa la degradación, lo que incrementa la temperatura, lo que... en otras palabras, se conoce como fuga térmica, embalamiento térmico o thermal runaway.

Los gases generados incluyen en su composición gases ignífugos como el H_2 , gases asfixiantes como el CO, gases inertes como el CO_2 y pequeñas trazas de gases tóxicos como el HF.

Incendio

Para que se produzca un incendio es necesario que coexistan las 3 partes del triángulo: combustible, comburente y calor. El combustible principal es el disolvente del electrolito, el comburente es el oxígeno y el calor lo generan las propias reacciones internas. En baterías de LFP no se produce oxígeno en la degradación catódica, por lo que un adecuado diseño de la celda puede evitar el incendio aislándola del oxígeno ambiental. Sin embargo, dadas las condiciones que se dan en el thermal runaway, si se alcanza esa fase la aparición de fuego, es posible con cualquier química (aunque es más probable y violento en el caso del NMC o NCA). En cualquier caso, el incendio relacionado con el thermal runaway implica un fuego muy virulento alimentado por reacciones exotérmicas descontroladas y la generación de gases inflamables que lo retroalimentan, lo que dificulta enormemente su extinción.

Explosión

La generación acelerada de gases puede ser mayor que la capacidad de la batería para evacuarlos, bien porque el diseño no es correcto o bien porque se produce un fallo en el sistema de evacuación. La acumulación de gases puede dar lugar a una sobre presión explosiva. Dado que una parte de los componentes de dichos gases es inflamable, es posible que una reacción violenta de los mismos con el oxígeno del aire incremente la peligrosidad de la deflagración.

Descripción de los niveles de mitigación de riesgos

Una buena filosofía de seguridad se basa en que los incidentes de seguridad no pueden eliminarse por completo. Por ello se debe:

- Reducir la probabilidad de que se produzca un incidente de seguridad
- Minimizar el nivel o la gravedad de dicho incidente
- Limitar las consecuencias del incidente

Siguiendo esta filosofía en el presente informe se definen 3 niveles de mitigación de riesgos:

Primer nivel: protección pasiva → diseño inherentemente seguro: INCIDENTE EVITADO

Diseño inherentemente seguro mediante la implantación de medidas de seguridad en el propio diseño. Por lo tanto, son medidas pasivas que buscan reducir la probabilidad de que se produzca el incidente.

El diseño inherentemente seguro debe existir tanto a nivel de producto como a nivel de instalación. En el primer caso se incluyen todas las medidas a nivel de diseño de las celdas, módulo y el resto de los componentes, así como de su integración (incluyendo de los componentes en el contenedor y de la integración de este con el resto de los elementos del sistema de almacenamiento).

A nivel de planta el diseño seguro incluye la situación de la instalación, el vallado de la instalación, las distancias entre equipos (entre contenedores y entre contenedores y PCS) y las distancias con el entorno. También se incluyen en el apartado de medidas preventivas a nivel de planta, las necesarias para una correcta ejecución de las medidas paliativas si fueran necesarias como por ejemplo la disponibilidad de agua o la de disponibilidad de accesos para los vehículos de emergencias. Por último, en este subapartado hay que incluir el diseño de la planta para limitar las afecciones de ruido al entorno a la planta.

Segundo nivel: protección activa → dispositivos detección, alarma y actuación: INCIDENTE CONTENIDO

Medidas de protección redundante mediante la implementación de sistemas de detección, alarma y actuación. Por lo tanto, son medidas activas que buscan minimizar y contener el incidente.

Las medidas de protección se implementan a nivel de producto y se centran en los sistemas de detección de incendios, los mecanismos de parada rápida o los sistemas de control de explosión, además de las medidas avanzadas que se están desarrollando a nivel de laboratorio y que progresivamente se están implementando en soluciones reales.

Tercer nivel: protección de emergencia → medidas paliativas ante emergencias: INCIDENTE NO CONTENIDO ⇒ Limitación de daños

Medidas de actuación ante emergencia. Estos procedimientos se activan cuando no se ha podido contener el incidente y, por lo tanto, la prioridad pasa a ser la limitación de las consecuencias de este.

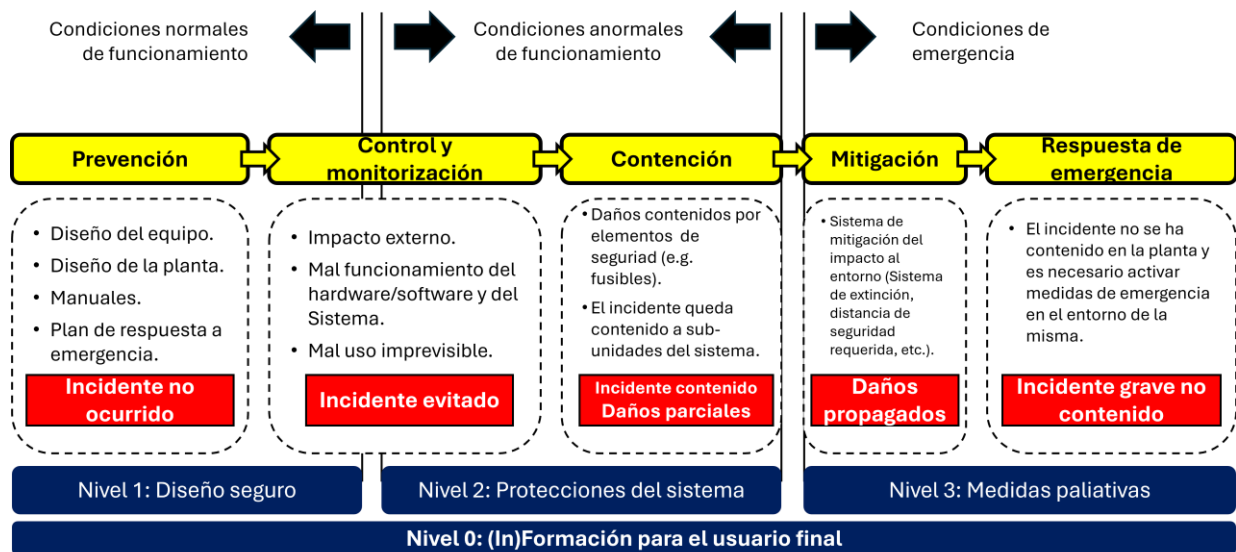
Cuando un incidente no queda contenido, el foco se traslada al plan de respuesta de emergencia definiendo métodos para detectar y gestionar incendios, estrategias para controlar la evacuación de

gases tóxicos y formas para regular los vertidos además de establecer los contactos de emergencia e información a intervinientes.

Las medidas paliativas se aplican en situaciones descontroladas para evitar daños mayores. En esta situación la protección de los equipos pasa a un segundo nivel siendo prioritaria la protección de las personas.

A estos 3 niveles de mitigación se le añade un 4º nivel focalizado en la formación e información, que debe ser un pilar necesario, antes, durante y después de cualquier incidente.

Durante la evolución de un incidente, siempre y cuando este esté identificado en la evaluación de riesgos, este transcurrirá por las fases de prevención, contención y mitigación mencionadas. La siguiente figura engloba la evolución del incidente, diferentes fases y niveles de protección.



Tipos de ensayos

Las medidas de mitigación deben ser validadas. Para ello existen 3 tipos de mecanismos:

Ensayos tipo

No son específicos del proyecto. Se centran en el producto. Ensayo a la gama, no al producto particular. Siguen normas específicas, como por ejemplo la IEC 62619 para los módulos de las baterías. Dado que se trata de test a una gama de producto estos ensayos se realizan sobre unidades repetitivas como celdas o módulos, aunque recientemente se están extendiendo incluso a contenedores completos con los denominados ensayos de fuego a gran escala o Large Scale Fire Testing (LSFT) bajo condiciones estándar

FAT

Factory Acceptance Test: Son ensayos realizados de manera individual a cada unidad que sale de la línea de producción. Se utilizan para garantizar la calidad del producto y la repetitividad de las características de cada unidad producida, así como el cumplimiento de las especificaciones del mismo.

SAT

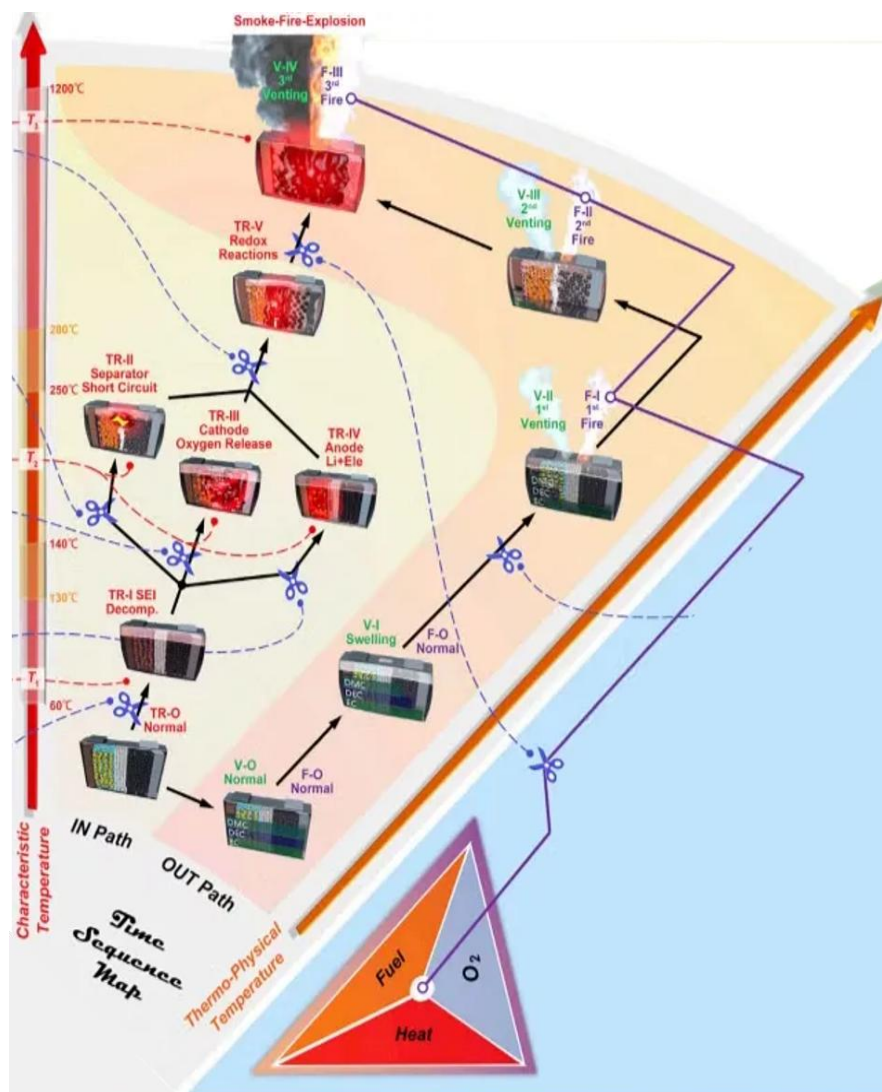
Site Acceptance Test: Ensayos de campo realizados durante el proceso de instalación del sistema completo. Los diferentes test van confirmando que cada uno de los componentes se ensambla correctamente en el conjunto, que las comunicaciones son correctas y finalmente que todo el sistema opera siguiendo los parámetros indicados en las especificaciones

Riesgo de incendio

Riesgo de incendio derivado de un thermal runaway

Un incendio debido al proceso de thermal runaway se genera en la propia celda y por su intensidad puede propagarse al resto de las celdas adyacentes. Como además hay formación de gases inflamables que salen expulsados con gran violencia, dichos gases pueden arder y propagar el incendio mucho más allá de las celdas e incluso de los módulos.

En un incendio por thermal runaway, los procesos son variados y pueden resumirse en la figura siguiente:



Feng, X., Ren, D., He, X., & Ouyang, M. (2020). Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. *Joule*, 4(4), 743-746

Temperaturas típicas dependiendo de la química

Aunque varía mucho de unos fabricantes a otros, en promedio, las temperaturas más significativas en el NMC y LFP son:

	NMC	LFP
Tª venteo	114 °C	168 °C
Tª aceleración TR	285 °C	346 °C
Tª máxima	850 °C	550 °C

Triángulo del fuego

Para que surja un incendio es necesario que se combinen 3 condiciones: calor, combustible y comburente:

- Aunque las temperaturas a las que se producen los procesos son diferentes en el caso del NMC y del LFP, las temperaturas máximas alcanzadas en ambos casos son muy elevadas y suficientes para generar un incendio de gran intensidad.
- El combustible utilizado es el disolvente del electrolito de las celdas y los gases inflamables generados en el proceso.
- Respecto al comburente, aunque el comburente más habitual es el oxígeno del aire, el propio proceso de degradación de los materiales activos de las celdas (y especialmente en las de NMC) puede dar lugar a la producción interna de oxígeno, lo que dificulta la sofocación del fuego e incluso provocar reigniciones de un incendio aparentemente apagado.

Todo esto demuestra que, una vez iniciado el thermal runaway es muy probable que se produzca un incendio y dado que dicho incendio viene acompañado de una emisión descontrolada de gases inflamables, con el añadido de que se pueden producirse reigniciones. Por todo ello, las labores de extinción serán complejas y las estrategias a seguir no serán las habituales.

Riesgo de incendio no debido al thermal runaway

El riesgo de incendio no atribuido a thermal runaway incluye ignición de materiales, fallos eléctricos, propagación térmica entre subsistemas y exposición externa al fuego. Puede originarse por temperaturas excesivas, sobrecargas, fallos de componentes, ruptura de aislamiento o conexiones sueltas.

Los incendios no derivados del thermal runaway pueden tener numerosas fuentes:

- Internas al sistema de almacenamiento → Si se generan en el sistema eléctrico de la propia batería. El mayor riesgo es su cercanía a las celdas y por lo tanto la posibilidad de que se propague a las mismas y eso genere un thermal runaway
- externas al BESS pero dentro de la planta → Como cualquier otra instalación industrial una planta de almacenamiento puede sufrir incendios por diferentes causas además de la descrita del thermal runaway. Al contrario de este última se trata de fuegos menos virulentos y más fáciles de sofocar con las medidas habituales. Lo más importante es sofocarlos lo antes posible y evitar su propagación hasta una batería para evitar la creación de un thermal runaway

- Externas a la planta → Un incendio exterior a la planta puede extenderse hasta los límites de la misma. Es necesario tomar medidas que eviten la entrada del fuego especialmente para eliminar la posibilidad de generar un thermal runaway

La diferencia principal de un incendio convencional y un incendio derivado de un thermal runaway es que el primero puede ser sofocado más fácilmente y utilizando procedimientos habituales como el agua y sin riesgos de reignición. Por ello, el objetivo principal si aparece un fuego con estas características es sofocarlo lo antes posible y especialmente evitar su propagación hacia la batería de manera que no se inicie un thermal runaway.

Sin embargo, saber si un incendio declarado en un contenedor se debe a un thermal runaway no es sencillo. Las diferencias más importantes son:

- La información aportada por la BMS (si todavía sigue activa) registrará una caída drástica del voltaje en celdas específicas, acompañada de un aumento exponencial e incontrolable de la temperatura (curva vertical) en un módulo concreto antes de que falle todo el sistema. En un incendio convencional el BMS mostrará temperaturas estables en las celdas, pero reportará alertas de cortocircuito externo, fallos de aislamiento (aislamiento a tierra), arcos eléctricos o caídas de tensión en el bus principal de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC).
- En un thermal runaway se produce el *off-gassing* antes de que aparezcan las llamas pudiéndose detectar CO, H₂ y otros compuestos entre 10 y 30 minutos antes de que aparezca el humo o las llamas visibles. En un incendio convencional los detectores no mostrarán una firma química previa de los gases de la batería.
- La dinámica del incendio y el comportamiento de las llamas es diferente: en un thermal runaway el incendio es sumamente violento, genera llamas tipo soplete (chorros de gas inflamable a alta presión). Además, el fuego se reinicia constantemente, aunque se apliquen agentes extintores convencionales. En un incendio convencional, el comportamiento del fuego es el de un incendio estructural o eléctrico estándar. Responde de manera efectiva a los sistemas de inundación por gas limpio o agua, y cesa rápidamente una vez que se corta el suministro eléctrico del circuito afectado.

Medidas de mitigación de riesgos de incendio mediante diseño seguro

Diseño mecánico para soportar golpes, caídas, impactos y vibraciones

No existe un único criterio universal de diseño mecánico de los módulos de baterías, pero sí hay requisitos y ensayos aplicables a impactos, caídas, esfuerzos externos, vibraciones y choques. La idea común es que el módulo debe mantener la integridad mecánica suficiente para que los daños previsibles durante fabricación, manipulación, instalación, mantenimiento o uso previsto no generen una condición peligrosa.

Dentro de los ensayos mecánicos, analizando las normas recogidas, se han clasificado 4 tipos de ensayos distintos:

- Ensayos de impacto

Se realizan los ensayos de impacto con el fin de conocer las consecuencias en las baterías de fuertes golpes o aplastamientos y los límites mecánicos de las mismas. Estos ensayos recopilan pruebas de impacto, estrujamiento y aplastamiento entre otras, variando en condiciones y características según la normativa que lo supervise.

- Ensayos de caída

A diferencia de los ensayos de impacto, en estos ensayos no se somete a las baterías a fuerzas externas, sino que simplemente se prueba su resistencia ante un golpeo tras una caída libre. La distancia y las condiciones dependerán de la norma y la aplicación a la que va dirigida la misma.

- Ensayos de choque mecánico

Los ensayos de choque mecánico examinan los efectos de fuerzas aplicadas repentinamente o cambios bruscos de movimiento, que pueden alterar las características de funcionamiento o causar daños, sobre todo si las vibraciones de choque son repetitivas.

- Ensayos de vibración

Esta prueba evalúa la capacidad de la batería para soportar vibraciones durante el transporte. Para ello se somete a un movimiento armónico en los 3 ejes.

En todos los casos, el criterio de aceptación es superar la prueba sin fuego y sin explosión, lo que indica que el diseño es adecuado.

Las normas o estándares que definen estos ensayos son IEC 62619, UL 1973, UL 1642, VDE-AR-E 2510-50, GB 40165.

Diseño eléctrico de la batería para soportar cortocircuitos y sobre cargas

Siguiendo el mismo criterio que en el diseño mecánico, las mitigaciones de los riesgos eléctricos vienen determinadas por su capacidad para superar ensayos normalizados. Éstos son de 6 tipos:

- Ensayos de cortocircuito interno

Este ensayo evaluará el comportamiento de seguridad de una batería en situaciones de cortocircuito interno. La aparición de cortocircuitos internos, una de las principales preocupaciones de los fabricantes de baterías, puede dar lugar a fugas, escapes térmicos y chispas que pueden inflamar los vapores electrolíticos que escapan de la celda.

- Ensayos de cortocircuito externo

Este ensayo evaluará las prestaciones de seguridad de una batería al aplicar un cortocircuito externo. La prueba puede evaluar la activación del dispositivo de protección contra sobrecorriente o la capacidad de las celdas para soportar la corriente sin llegar a una situación peligrosa (por ejemplo, embalamiento térmico, explosión, incendio).

- Ensayos de sobrecarga

Este ensayo evaluará el rendimiento de seguridad de una batería en situaciones de sobrecarga.

- Ensayos de sobredescarga

Este ensayo evaluará el comportamiento de seguridad de una batería en situaciones de sobredescarga.

- Ensayos de cargas y descargas anormales

Este ensayo evaluará el rendimiento de seguridad de una batería en situaciones de carga y descarga anormales.

- Otros ensayos eléctricos

En este apartado se han recogido otros ensayos eléctricos que se realizan y son descritos en la normativa recopilada. Entre ellos es posible encontrar ensayos de protección contra conexiones inversas, fugas de corrientes y resistencias a tensiones dieléctricas, entre otros.

Como en el caso anterior, el criterio de aceptación es superar la prueba sin fuego y sin explosión, lo que indica que el diseño es adecuado.

Las normas o estándares que definen estos ensayos son IEC 62619, UL 1973, UL 1642, VDE-AR-E 2510-50, GB 40165.

Diseño térmico de la batería para soportar temperaturas elevadas y cambios extremos de temperatura (incluso fuego directo)

Siguiendo la misma estructura que los capítulos anteriores el diseño térmico se valida mediante los siguientes tipos de ensayos:

- Ensayos de choque y ciclado térmicos

Este ensayo se diseñará para evaluar los cambios en la integridad de la batería derivados de la expansión y contracción de los componentes de la celda tras la exposición a cambios extremos y repentinos de temperatura, así como las posibles consecuencias de dichos cambios. Durante un choque térmico, la batería se exponerá a dos límites de temperatura y se mantendrá a cada límite de temperatura durante un período especificado.

- Ensayos de sobretemperatura

Esta prueba evaluará el efecto del fallo del control de temperatura o el fallo de otras características de protección contra el sobrecalentamiento interno durante el funcionamiento.

- Ensayos de abuso térmico

Durante esta prueba, la batería estará expuesta a temperaturas elevadas (definida en cada norma) que pueden desencadenar reacciones de descomposición exotérmica y provocar un desbordamiento térmico en la célula.

- Ensayos de fuego

El riesgo de explosión se evaluará exponiendo la batería al fuego.

Los estándares para definir estos ensayos son IEC 62619, UL 1973, UL 1642, GB 40165

Sistemas antipropagación entre celdas

Los sistemas antipropagación entre celdas tienen como finalidad evitar que el fallo de una única celda evolucione hacia una reacción en cadena dentro del módulo de manera que el incidente quede contenido al nivel más bajo posible y no progrese hacia el rack o el contenedor.

En general, el fallo interno de una celda que produce un TR no puede mitigarse mediante dispositivos externos como el BMS, por lo que el módulo debe diseñarse para mitigar ese escenario.

Desde el punto de vista normativo, no se impone una solución constructiva concreta —por ejemplo, un tipo determinado de barrera térmica o material—, sino que se exige demostrar que el diseño limita la propagación del evento y no provoca incendio externo o rotura de la carcasa del sistema.

El diseño pasivo del módulo incluye la disposición de celdas, la separación entre ellas, las barreras térmicas y el aislamiento, compartimentación o diseño interno que limite la transferencia de calor, gases y llamas desde una celda afectada a las celdas vecinas.

Los ensayos de propagación térmica evaluarán el comportamiento de seguridad de una batería en situaciones de propagación térmica. Un desbordamiento térmico en una celda puede provocar una reacción en cascada en toda la batería, que puede estar compuesta por numerosas celdas.

Tras los ensayos de propagación, no se establece que una batería deba seguir funcionando. Lo que se exige es demostrar que un evento térmico no se propaga fuera del módulo y que no genera incendio externo, explosión o rotura peligrosa. En el más extremo, en ensayo de llama directa, el criterio de aceptación es que el módulo no explote durante el tiempo del test (depende de la norma, pero este tiempo se sitúa en unos 20 minutos). Si la batería arde, se considera que pasa el test siempre y cuando los proyectiles resultantes permanezcan dentro de un perímetro de 1 metro.

Las normas más importantes para validar la propagación entre celdas son: IEC 62619, UL 1973, ISO 6469-1/AMD1, GB38031, UL 9540A, VDE-AR-E 2510-50.

Materiales ignífugos en la envolvente de la batería

Con el objetivo de reducir la probabilidad de ignición de la propia envolvente, limitar la propagación del incendio hacia otros componentes o unidades, proteger frente a incendios externos y, cuando proceda, mantener la integridad del contenedor o armario durante el tiempo necesario para la actuación de los sistemas de seguridad, se deben utilizar en la envolvente de los módulos, materiales no combustibles, ignífugos, retardantes de llama o resistentes al fuego.

El material de la envolvente del sistema debe ser incombustible conforme a ISO 1182, y los materiales poliméricos que soporten partes activas peligrosas deben tener un índice mínimo de llama V-1 conforme a IEC 60695-11-10 o 5VA conforme a la UL 746C. También se prevé que, si no puede eliminarse la posibilidad de incendio, sus efectos —llamas, calor, humo, etc.— se limiten mediante blindajes o envoltorios adecuados.

Diseño de la configuración de la zona de almacenamiento para limitar la propagación del incendio

El diseño de la sala o planta de almacenamiento debe tratar la propagación como un problema de distribución de materiales combustibles, distancias, barreras, sectorización, resistencia al fuego y exposición térmica. No basta con que cada contenedor (o *string* en el caso indoor) tenga protección interna; debe verificarse que, si uno falla, no se genera una propagación a la unidad vecina o a otras exposiciones.

- **Configuración en salas indoor**

En instalaciones indoor, la propagación del fuego se controla principalmente mediante sectorización, barreras resistentes al fuego, limitación de usos compatibles y separación respecto a otras áreas del edificio.

Es recomendable que las barreras cortafuegos y elementos horizontales tengan una resistencia mínima de **2 horas**. El análisis de riesgos debe demostrar, entre otros criterios, que los incendios quedarán contenidos dentro de salas ESS no ocupadas durante la duración especificada, y que se proporciona protección frente a deflagración cuando sea necesaria.

Por lo tanto, el diseño de configuración debe priorizar que la sala de baterías sea un sector de incendio separado, que la electrónica de potencia, climatización u otros sistemas auxiliares no generen exposición directa sobre las baterías, y que las rutas de propagación por paredes, techos, aberturas, pasos de cables, puertas o salas colindantes queden tratadas mediante barreras y soluciones compatibles con el nivel de resistencia requerido.

- **Configuración en plantas outdoor**

En instalaciones outdoor, la estrategia principal es la separación espacial, complementada con superficies no combustibles, cortafuegos, control de vegetación, orientación del *layout*, acceso para bomberos y, cuando la distancia no sea suficiente, barreras físicas resistentes al fuego.

Las instalaciones exteriores se clasifican en ubicaciones remotas y ubicaciones próximas a exposiciones.

- Una ubicación exterior remota es aquella situada a más de 30 m, de edificios, líneas de parcela edificables, vías públicas, materiales combustibles almacenados, materiales peligrosos, almacenamiento en altura y otros riesgos de exposición no asociados a la infraestructura eléctrica.
- Las ubicaciones que no cumplen esa condición se consideran próximas a exposiciones.

El factor más importante en el diseño de una instalación para limitar la propagación de un incendio es la distancia entre contenedores:

- Las distancias propuestas se deben basar en el flujo de calor radiante como fuente de ignición ya que existen diferentes tipos de baterías con características diferenciadas en cuanto al calor generador en un thermal runaway.
- Además del tamaño, capacidad y química de la batería, el cálculo de la distancia debe considerar otros factores como el acceso para extinción, la capacidad y tiempo de respuesta de bomberos y la resistencia al fuego del recinto.
- Las diferentes guías publicadas plantean distancias entre contenedores que van desde **1 m a 3 m**. En todos los casos se permite modificar distancias justificándose con evidencias técnicas (por ejemplo, mediante datos de pruebas de incendio a gran escala o simulación para estimar la distancia necesaria que evite la propagación).
- También pueden implementarse medidas constructivas adecuadas, como tabiques resistentes al fuego que permiten reducir las distancias indicadas. En estos casos, es recomendable que dichos tabiques sobresalgan al menos 0,5 m por encima del borde superior de los acumuladores y al menos 0,5 m por delante y por detrás de cada acumulador, con el fin de impedir el salto de las llamas.
- No se apoya el apilamiento vertical de contenedores por la carga de fuego, el potencial de propagación y las restricciones de acceso.

También es importante la separación entre la batería y otros elementos de la planta:

- Teniendo en cuenta que los PCS y los transformadores introducen riesgos adicionales de generación de calor, arco eléctrico y fugas de aceite, la distancia entre éstos y los contenedores BESS debe ser suficiente para evitar la inflamabilidad y potencial de arco eléctrico, incorporando barreras cortafuegos en zonas de alto riesgo.

- Los depósitos estáticos de agua destinados a extinción deben situarse al menos a **10 m** de cualquier contenedor, estar claramente señalizados, protegidos frente a daños mecánicos y ser accesibles para vehículos de bomberos, teniendo en cuenta el desarrollo potencial del incendio.

Respecto a la distancia con el exterior es necesario tener en cuenta que:

- Es necesario crear un cortafuegos alrededor del BESS y su infraestructura relacionada de anchura no inferior a **10 m**; y una distribución que minimice tanto que incendios de pastos o bosques afecten al BESS como que incendios en contenedores afecten a infraestructura dentro o fuera de la instalación.
- Dichos cortafuegos deben ser incombustibles, de hormigón, tierra mineral o mantillo incombustible como roca triturada, y permanecer libres de vegetación y obstrucciones, sin almacenamiento de plantas o equipos.
- Para la distancia a edificios ocupados y límites del emplazamiento debería tener una distancia mínima de **30 m** o considerar mitigaciones complementarias como muros de protección.

Para unidades exteriores *walk-in*, fija además dimensiones máximas, y si se superan deben tratarse como instalaciones indoor.

• Almacenes y baterías sueltas

En zonas de almacenamiento de baterías o equipos con baterías es recomendable disminuir la densidad de energía manteniendo separaciones regulares entre estanterías y reduciendo el estado de carga al mínimo aceptable.

Las zonas donde se manipulan baterías deben mantenerse libres de materiales inflamables o combustibles y, cuando no se utilicen, almacenarlas preferentemente en un recinto cerrado como un armario metálico o bolsa ignífuga.

Diseño del abastecimiento de agua para emergencias

El abastecimiento de agua en una instalación BESS no debe entenderse únicamente como un sistema para “apagar” la batería, siendo la estrategia principal de intervención de tipo defensivo: evitar la propagación a contenedores adyacentes, enfriar exposiciones, proteger estructuras y permitir una respuesta segura de los servicios de emergencia.

El suministro de agua dependerá del tamaño de la instalación y debe desarrollarse en coordinación con el servicio local de bomberos, considerando los caudales necesarios para alcanzar las prioridades tácticas y la capacidad o tiempo previsto para que los bomberos puedan aportar mayores volúmenes de agua al emplazamiento. Como mínimo, se recomienda disponer de los hidrantes necesarios para refrigeración defensiva (*boundary cooling*) y que estén situados próximos a los contenedores BESS, pero considerando el acceso seguro durante un incendio. Las recomendaciones de suministro mínimo por parte de las diferentes guía de bomberos oscila entre los 800 L/min durante 2 horas (96 m³) y los 1.200 L/min durante 4 horas (288 m³) aunque, de acuerdo con los servicios de bomberos, se puede modificar este requisito en función del tamaño de la planta, su ubicación y la capacidad de los bomberos para llevar suministros suplementarios a tiempo.

En el caso de una instalación remota, en la que no es posible instalar hidrantes se exige la instalación de depósitos o tanques estáticos, que deben estar situados al menos a **10 m** de cualquier contenedor o

armario BESS, claramente señalizado, fácilmente accesible para vehículos de bomberos y ubicado tras una evaluación de riesgos que considere el desarrollo e impactos previsibles del incendio. Las salidas y puntos de aspiración deben acordarse con el servicio local de bomberos y protegerse frente a daños mecánicos, por ejemplo, mediante bolardos. Como referencia para el cálculo de la instalación pueden utilizarse la NFPA 1142, que es la Norma sobre Suministros de Agua para el Combate de Incendios Suburbano y Rural de EE. UU.

En cualquier caso, el sistema de abastecimiento de agua no debe quedar aislado del *layout* de la planta: hidrantes, depósitos, bombas, válvulas, drenajes y accesos deben estar reflejados y disponibles para los servicios de emergencia.

En sistemas indoor, el suministro de agua se incluye como requisito de instalación tanto para edificios dedicados como no dedicados, junto con detección, control/supresión de incendios, señalización y otras medidas.

El diseño del abastecimiento de agua debe ir unido al diseño de contención y gestión del agua de extinción. Así, se deben considerar, dentro del diseño del emplazamiento, la gestión de escorrentías mediante drenajes, interceptores, lagunas confinadas u otros sistemas calculados considerando el tipo de supresión y su duración, y redes de drenaje existentes, interceptores, soleras estancas o cubetos que eviten la dispersión de contaminantes al suelo o cursos de agua. Además, el Plan de Respuesta ante Emergencias debe incluir planos con depósitos, bombas, sistemas de refuerzo, hidrantes, carretes de manguera, drenaje y propiedades vecinas.

Diseño de los accesos de vehículos de emergencia

En el caso de las plantas exteriores, el diseño de los accesos no debe centrarse únicamente en la entrada a la planta, sino como la capacidad real de que los servicios de emergencia puedan entrar, aproximarse, maniobrar, estacionar, tender mangueras, acceder a hidrantes/depósitos, evacuar y retirarse con seguridad, incluso en condiciones de humo, viento desfavorable, incendio, explosión, deflagración, escorrentías o pérdida parcial de accesos.

Su diseño debe desarrollarse en estrecha coordinación con el servicio local de bomberos, ya que las necesidades pueden variar según los vehículos y equipos disponibles.

Se recomienda las siguientes características:

- al menos dos puntos de acceso independientes para considerar direcciones opuestas del viento, de al menos 4 metros de ancho,
- la entrada principal al sitio y los tanques de agua contra incendios no alineados con la dirección predominante del viento, de forma que sea menos probable que se vean afectados por humo durante un incendio en el BESS
- carreteras o superficies duras aptas para vehículos de bomberos (mínimo 15 toneladas) en cualquier condición meteorológica,
- ausencia de pendientes extremas,
- carretera perimetral o carreteras con apartaderos,
- acceso sin obstáculos a todas las zonas de la instalación,
- radios de giro/apartaderos definidos por el servicio de bomberos según su flota.

Dado que la estrategia principal en una instalación externa es impedir que el fuego se propague de un contenedor a otro debe existir acceso adecuado para que los bomberos operen sin obstáculos entre unidades. Este acceso debe permitir el tendido y movimiento de líneas de manguera, mantenerse libre de restricciones y obstáculos, identificar la ubicación de sistemas eléctricos de alta tensión en corriente continua y definir zonas de exclusión.

Los hidrantes para refrigeración defensiva deben estar próximos a los contenedores BESS, pero considerando el acceso seguro durante un incendio y los tanques estáticos destinados a extinción situados al menos a 10 m de cualquier contenedor, claramente señalizados y fácilmente accesibles para vehículos de bomberos.

Los accesos deben mantenerse operativos durante toda la vida útil de la planta con limpieza periódica de vegetación y otros elementos combustibles. También debe evitarse acumulación de acopios temporales, aparcamientos, materiales de mantenimiento y el uso de puertas sin mantenimiento o candados no compatibles con bomberos.

La información sobre los accesos debe estar incluida en el Plan de Gestión de incendios y debe incluir acceso seguro hacia y dentro de la instalación para vehículos de emergencia, incluyendo acceso a infraestructura clave y sistemas de protección contra incendios. El Plan de Respuesta ante Emergencias debe incluir un plano del emplazamiento con puntos de acceso, carreteras internas, instalaciones contra incendios —tanques, bombas, sistemas de refuerzo, hidrantes, carretes de manguera—, drenaje y propiedades vecinas.

En instalaciones indoor, el diseño de acceso de vehículos de emergencia no se limita al vial exterior. Debe garantizarse que los vehículos puedan aproximarse a las fachadas o puntos de intervención, que las entradas a salas ESS sean identificables y que los equipos de emergencia puedan localizar rápidamente desconexiones, salas, riesgos y sistemas de protección.

En el interior de los edificios, el acceso debe coordinarse con el resto de los elementos de emergencia como señalización exterior, rutas internas, puertas de sala, desconexiones, ventilación, sistemas de supresión, control de humos y posibles puntos de venteo o alivio de presión.

Medidas de mitigación de riesgos de incendio mediante protecciones redundantes

Sensores, detectores y alarmas en el módulo de la batería

A nivel de módulo, los sensores no se plantean como detectores independientes de incendio o de gases, sino como parte de las funciones de protección que deben mantener la batería dentro de sus límites seguros de tensión, corriente y temperatura.

- **Control del BMS**

El BMS realiza mediciones internas de corriente, tensión y temperatura, e integra componentes de alarma interna y protección para desconexión de corriente, con el fin de asegurar el funcionamiento seguro de la batería.

En una estructura de la BMS máster/esclavo, la mediciones se realizan a cada una de las celda y en cada uno de los módulos y se recopila en el BMS esclavo. La información de cada módulo se transmite al BMS máster del *string* y si hay un tercer nivel, al BMS máster global de la batería. Este tipo de estructuras además de garantizar cada uno de los BMS debe asegurar las correctas comunicaciones entre ellos.

- **Detección temprana de eventos**

Por otro lado, un evento de thermal runaway no aparece inicialmente como llama, sino como una secuencia de anomalía → calentamiento → venteos → gases y partículas → humo → fuego. Por lo tanto, la detección temprana del evento térmico o la detección basada en gas o humo tras el venteo inicial permite actuar antes de la propagación e incluso puede llegar a evitar el thermal runaway. Para ello se pueden utilizar opciones avanzadas como sensores de presión en celdas, detección de vapores electrolíticos, humo y calor, y vincular la detección al BMS u otras interfaces del fabricante para controlar el riesgo en tiempo real, actuando directamente sobre el módulo afectado.

Las medidas de actuación posibles, más allá de lanzar la alarma al sistema para que el BMS corte el paso de corriente, se basan en la supresión o refrigeración dirigida mediante sistemas de inyección directa de agente limpio en racks de baterías. Su objetivo no es actuar como inundación total, sino refrigerar módulos de litio tras detección de sobrecalentamiento o venteo para detener el desarrollo del fuego en el módulo afectado y limitar la propagación de la fuga térmica.

La opción de inundar completamente el módulo afectado también se ha demostrado eficaz con un elevado porcentaje de éxito, pero implica disponer de módulos sellados herméticamente para evitar la fuga del agua y la gestión posterior del módulo afectado para evitar la contaminación por el agua utilizada.

En ambos casos, la estructura del sistema de extinción de incendios es más compleja y cara ya que debe disponer de la capacidad de acceder a cada módulo y controlar de manera individual la actuación sobre cada uno de ellos.

Sistemas detectores y alarma en el contenedor

Los sensores principales de voltaje, y temperatura se instalan a nivel de módulo, pero a nivel de contenedor se deben añadir medidas preventivas complementarias como detección de fallo a tierra, detección frente a sobretensión total, detección de sobrecorriente total, protección frente a rayo y disipación electrostática.

Sin embargo, este apartado se refiere a los sistemas instalados a nivel de contenedor, armario o envolvente BESS, que incluyen la detección de incendio, humo, calor, gases inflamables y tóxicos o emisiones de electrolito, así como las alarmas locales/remotas, activación de ventilación, desconexión, supresión/extinción, control de explosión y sistemas de protección asociados al recinto.

- **Detección**

La protección no se limita a detectar fuego visible, sino que los sistemas deben identificar condiciones precursoras como sobretemperatura, emisión de gases (hidrógeno, monóxido de carbono o compuestos orgánicos volátiles), vapores, humo, fallo eléctrico, fallo del equipo o acumulación de gases inflamables. De manera más detallada los detectores más habituales son:

- Los detectores de humo por aspiración que toman muestras de aire mediante tuberías y pueden ser adecuados cuando se requiere detección temprana o cuando los detectores puntuales no son suficientemente sensibles.
- Los ASD de alta sensibilidad que pueden detectar incidencias de emisión de gases mediante partículas presentes en el gas emitido por las baterías.

- Los detectores de tasa de incremento, detectores lineales y cámaras IR para detectar la sobretemperatura, aunque, en la mayoría de los casos, la detección de calor no puede considerarse detección temprana.
- Los detectores combinados de humo y calor son el método más rápido y recomendable.
- Las cámaras termográficas, especialmente útiles en zonas abiertas o complejas, permiten detectar el calentamiento de una batería antes de que se produzca el incendio, identificando el aumento de temperatura previo al TR, aunque tiene limitaciones: no detecta zonas ocultas, puede generar falsas alarmas en exteriores y puede requerir varias cámaras para activar zonas selectivas.
- Los detectores termovelocimétricos que permiten identificar posición de alarma y no se ven afectados por movimiento del aire, aunque no proporcionan detección temprana y conviene combinarlos con sistemas más rápidos.
- Los detectores multicriterio humo-temperatura-IR-CO.

- **Alarma**

Una vez detectado el peligro debe disponerse de sistemas de advertencia. Éstos pueden basarse en:

- Alarmas sonoras locales sonoras y visibles en el recinto, para aviso a los trabajadores.
- Alarmas internas que activan acciones automáticas como:
 - la desconexión inmediata de las baterías afectadas mediante BMS, pero preservando en la medida de lo posible la funcionalidad de la propia BMS.
 - activación de la evacuación del personal
 - la conmutación de la ventilación a extracción completa
 - activación de los sistemas de extinción o prevención de explosiones
- Alarmas remotas que avisen a los servicios de emergencia.

Sistema de extinción de incendios dentro del contenedor

El incendio de una celda en thermal runaway no se pueden extinguir en sentido estricto, por lo que los sistemas de extinción en el contenedor se focalizan en limitar la propagación, reducir el impacto térmico, controlar incendios incipientes, proteger exposiciones internas y externas, y coordinarse con detección, alarma, ventilación, control de gases, contención de agua y respuesta de emergencia. Además, es importante reseñar que los sistemas de supresión pueden modificar significativamente el comportamiento frente a deflagraciones. En particular es necesario prever que los sistemas gaseosos pueden suprimir llamas, pero permitir acumulación de gases inflamables si continúa el venteo de celdas, aumentando el riesgo de ignición retardada y deflagración. Los agentes de extinción más utilizados son los siguientes:

- El agua es el agente de extinción más usado por su capacidad de enfriamiento, disponibilidad y facilidad de transporte hasta el foco del incendio. Su eficacia depende de la configuración de la batería y de la posibilidad real de alcanzar la zona en llamas, ya que pueden existir “zonas de sombra” de la aspersión. También es importante tener en cuenta que los agentes basados en agua

son conductores salvo que se use agua desionizada, y que incluso esta puede volverse conductora en presencia de sales u otros compuestos. Se aplica mediante rociadores, agua pulverizada o agua nebulizada. Esta última busca aplicar gotas pequeñas para enfriar llamas, sofocar con vapor y bloquear calor radiante, con menor volumen de agua que los rociadores convencionales. Sin embargo, su base de diseño se debe determinar mediante pruebas de incendio a escala real, por lo que solo deberían emplearse para baterías de ion-litio cuando exista un protocolo de pruebas establecido.

- Los sistemas de extinción por gas emplean gases inertes, CO₂ o agentes sintéticos; los gases inertes y el CO₂ actúan por desplazamiento de oxígeno, mientras que los agentes sintéticos actúan por absorción de calor. Estos compuestos son eléctricamente no conductores, volátiles y no dejan residuos, lo que puede ser útil en entornos sensibles donde no se desea agua.
- Para incendios que involucran módulos de celdas, los sistemas basados en agua son más eficaces que los sistemas gaseosos, por lo que la instalación de supresión gaseosa puede ser adecuada para incendios eléctricos que no involucren módulos de celda, aunque debe formar parte de una estrategia más amplia, ya que no proporcionan refrigeración, solo actúan durante el tiempo de retención, y pueden ser insuficientes para impedir la propagación del thermal runaway o reigniciones posteriores.
- Los aerosoles condensados son sistemas similares a los sistemas gaseosos, pero con un compuesto sólido que genera partículas suspendidas para inhibir la reacción química en cadena del fuego. Pueden ser eficaces en extinción, pero que el agente puede suponer riesgos para la salud de las personas expuestas, por lo que en áreas con ocupación deben contemplarse las precauciones de seguridad de las normas aplicables.
- Los sistemas de polvo son eficaces en la supresión de incendios, se distribuyen rápidamente y pueden funcionar en espacios abiertos o cerrados e incluso pueden ralentizar la propagación del thermal runaway a celdas vecinas y extinguir incendios en equipos eléctricos cercanos. No obstante, su aplicación en un contenedor BESS debe evaluarse considerando limpieza posterior, compatibilidad con equipos eléctricos/electrónicos y efectos secundarios operativos.

Anteriormente se explica el funcionamiento de los sistemas de inyección directa de agente limpio a módulos de baterías. Los agentes implicados pueden ser los mismos que se han descrito en el listado anterior pero aplicados localmente, lo que permite optimizar su acción y reducir su impacto secundario. Por contra, implican una mayor complejidad y coste del sistema.

La extinción dentro del contenedor debe estar coordinada con la detección y con la estrategia de gases. Si durante la supresión siguen aumentando los niveles de gas combustible o tóxico, puede ser necesaria la ventilación, incluso aunque el agente no haya completado su tiempo de retención. Tras la extinción, debe seguir monitorizándose la detección de gas por posibles eventos posteriores.

Un aspecto muy importante es que el uso de sistemas de extinción dentro del contenedor puede generar agua contaminada. Por lo tanto, la escorrentía de agua y su impacto ambiental deben considerarse y detallarse en el plan de respuesta a emergencias. Alternativamente, la combustión controlada puede ser una estrategia viable si está respaldada por ensayos a gran escala.

Sistemas detectores y alarmas en la instalación

En las instalaciones indoor los dispositivos detección y alarma a nivel de instalación equivalen a los descritos para el nivel de contenedor.

En las instalaciones outdoor, los sistemas detectores y alarmas instalados en los contenedores BESS deben complementarse con sistemas de detección y alarmas a nivel general en la planta. Ambos sistemas deben estar coordinados.

A nivel de instalación los sistemas de detección y alarma no pueden definirse de forma genérica sin una evaluación de riesgos, ya que el nivel de detección y extinción requerido depende del tamaño, tecnología, ubicación, cantidad y geometría del sistema de almacenamiento.

Los sistemas detectores y de alarma deben cubrir al menos cuatro funciones:

- Detección temprana de condiciones anómalas, recopilando información tanto de los propios componentes con incidencias como de los detectores generales.
- Alarma local para toda la planta y remota, especialmente para los sistemas de emergencias.
- Activación de maniobras de seguridad, tanto manuales como automáticas.
- Suministro de información útil para los servicios de emergencia, que habrá sido previamente definida en el Plan de Gestión de Incendios.

En el diseño de la planta deberán estar definidos los objetivos de protección, zonas a supervisar, escenarios de incendio previsible y tipo de detección. A partir de esta información se instalarán sistemas automáticos de detección de incendios con alarmas sonoras y visibles en todo el recinto.

Las alarmas de los equipos individuales deben estar conectadas a las centrales de incendio para supervisión centralizada y está integrada con las BMS u otras interfaces del fabricante para actuar sobre todos los equipos de la planta.

Los sistemas de detección y alarma deberán contar con alimentación de respaldo ya que en una emergencia es probable el corte de suministro eléctrico. También se establecerán procedimientos de inspección y prueba de alarmas, enclavamientos y controles para garantizar su correcto funcionamiento si llega una emergencia.

Acciones para el control de la propagación de un incendio

Limitación de la propagación entre contenedores

El objetivo en un sistema de almacenamiento es que un incendio o evento térmico en un contenedor no debe provocar la ignición o la pérdida de integridad de un contenedor adyacente. Para ello se establecen los criterios de diseño.

En caso de incendio en una unidad BESS, la intervención inicial se centrará en medidas defensivas para evitar la propagación del fuego a contenedores adyacentes. Para ello debe existir acceso suficiente entre unidades para que los bomberos puedan operar sin obstáculos, tender y mover mangueras, e identificar zonas de exclusión asociadas a sistemas eléctricos de alta tensión en corriente continua. De igual manera deberá haber un suministro suficiente de agua siguiendo las pautas definidas. También será importante conocer el grado IP de las unidades para entender los riesgos asociados a la refrigeración exterior.

Una vez controlada la propagación entre contenedores se aplican las estrategias de extinción.

Limitación de la propagación hacia el exterior

Si la instalación está dentro de un edificio, el incendio debe quedar contenido dentro de la sala o recinto durante un tiempo igual a la resistencia al fuego exigida para la separación. Este tiempo debe ser suficiente para que los equipos de bomberos puedan actuar.

En una instalación outdoor, el objetivo es que un incidente en el BESS no alcance:

- Edificios habitados o industriales externos.
- Linderos edificables.
- Vías públicas.
- Vegetación, cultivos o masa forestal.
- Materiales combustibles o peligrosos almacenados.
- Infraestructuras críticas próximas.
- Comunidades vecinas.
- Suelos, cauces o masas de agua mediante escorrentía contaminada.

Es importante tener en cuenta que la propagación hacia el exterior no se limita a la transferencia térmica. También puede producirse por gases inflamables, sobrepresión, llamas, partículas, materiales expulsados o proyectiles generados por deflagración.

En cualquiera de los casos, la limitación de la propagación hacia el exterior viene dada, en primer lugar, por la aplicación de las directrices de diseño. Las estrategias de extinción están definidas a continuación.

Estrategias de extinción del fuego

Para establecer la estrategia de extinción de un incendio el primer paso es saber si se trata de un incendio convencional o de un thermal runaway. Se trata de dos tipos de incendios con características diferentes y por lo tanto las acciones para su control y extinción también son diferentes.

- **Diferencias entre un incendio convencional y el proveniente de un thermal runaway**
 - La información aportada por la BMS (si todavía sigue activa) registrará una caída drástica del voltaje en celdas específicas, acompañada de un aumento exponencial e incontrolable de la temperatura (curva vertical) en un módulo concreto antes de que falle todo el sistema. En un incendio convencional el BMS mostrará temperaturas estables en las celdas, pero reportará alertas de cortocircuito externo, fallos de aislamiento (aislamiento a tierra), arcos eléctricos o caídas de tensión en el bus principal de corriente continua (DC) o corriente alterna (AC).
 - En un thermal runaway se produce el *off-gassing* antes de que aparezcan las llamas pudiéndose detectar CO, H₂ y otros compuestos entre 10 y 30 minutos antes de que aparezca el humo o las llamas visibles. En un incendio convencional los detectores no mostrarán una firma química previa de los gases de la batería.
 - La dinámica del incendio y el comportamiento de las llamas es diferente: en un thermal runaway el incendio es sumamente violento, genera llamas tipo soplete (chorros de gas inflamable a alta presión). Además, el fuego se reinicia constantemente, aunque se

apliquen agentes extintores convencionales. En un incendio convencional, el comportamiento del fuego es el de un incendio estructural o eléctrico estándar. Responde de manera efectiva a los sistemas de inundación por gas limpio o agua, y cesa rápidamente una vez que se corta el suministro eléctrico del circuito afectado.

- **Acciones para cada tipo de incendio**

- Un incendio convencional puede ser sofocado utilizando procedimientos habituales con los incendios eléctricos estándar. Por ello, si se genera un incendio con estas características la acción inmediata es sofocarlo lo antes posible y especialmente evitar su propagación hacia la batería de manera que no se inicie un thermal runaway.
- Si se trata de un incendio proveniente de un thermal runaway, es importante tener claro que, los incendios de las celdas en llamas no se pueden extinguir, aunque la propagación a otras celdas o módulos sí puede evitarse mediante sistemas adecuados. Por lo tanto, la extinción de este tipo de incendios no debe tratarse como una extinción clásica sino como una combinación de:

1. **Supresión o control de incendios incipientes**

La extinción de un incendio en su fase inicial es la opción prioritaria. Normalmente se ejecutará mediante sistemas automáticos implementados en el propio contenedor, ya que, en caso contrario, para cuando las dotaciones de bomberos lleguen al lugar del siniestro el thermal runaway ya estará plenamente activo.

2. **Refrigeración de módulos, contenedores y exposiciones**

En el caso de un incendio debido al thermal runaway la aplicación de agua no extinguirá el incendio, pero ayudará refrigerar el equipo en llamas. Sin embargo, se generará una escorrentía de agua contaminada.

Dependiendo de cada caso, se deberá optar por la estrategia de aplicar agua reduciendo la temperatura, pero generando agua contaminada o dejar arder la batería de manera controlada sin provocar un vertido tóxico. La decisión dependerá del tamaño y tipo de batería, de su situación, del correcto diseño de la instalación o de la disponibilidad de agua, y tendrá en cuenta la seguridad de los bomberos: en un incendio debido a un thermal runaway se generan gases inflamables con capacidad de provocar importantes explosiones. El apagado de las llamas no elimina la generación de gas por lo que si este deja de consumirse en el propio incendio puede acumularse dando lugar a las explosiones mencionadas.

La estrategia a seguir debe estar definida en el plan de gestión de incendios, antes de la construcción de la planta porque si la decisión es la de aplicar agua de refrigeración a un incendio activo, los sistemas de suministro de agua deben ser coherentes con esta actuación y los sistemas contención de agua deben estar diseñados para retener dicho agua contaminada.

De manera excepcional, un fuego que se encuentre en el proceso de thermal runaway, pero su envolvente todavía esté integra podría ser refrigerado con agua para bajar la temperatura ya que el agua utilizada no quedará contaminada con los elementos en combustión del interior del contenedor.

Por otro lado, cualquier fuego no debido al thermal runaway deberá ser extinguido con los procedimientos clásicos, siendo crítico el evitar el acceso del fuego hasta la batería para evitar la generación de un thermal runaway.

3. Limitación de la propagación a celdas, módulos, racks, contenedores o infraestructuras próximas

Al margen de cuál sea la decisión respecto al ataque directo a un contenedor con un thermal runaway activo, la refrigeración de los sistemas adyacentes es necesaria por precaución redundante, aunque el diseño de la planta tenga en cuenta la limitación de la propagación del incendio.

4. Gestión de gases inflamables y tóxicos

La gestión de los gases inflamables y tóxicos debe llevarse a cabo tal y como se explica en el capítulo dedicado a los gases

5. Control de reignición

Aunque aparentemente el fuego quede controlado, la temperatura interna en algunas de las celdas puede seguir siendo elevada y provocar una nueva reignición del incendio. Esto es especialmente crítico cuando se usan químicas basadas en óxidos metálicos como el NMC ya que se genera oxígeno internamente que actúa como comburente del fuego.

6. Gestión del agua contaminada de extinción

Si la estrategia de extinción del incendio se basa en la aplicación directa de agua sobre la batería en thermal runaway, es necesaria la gestión del agua contaminada generada.

- **Agentes de extinción**

Entre todos los agentes recomendables para la gestión de los incendios destaca el agua. El agua sigue siendo una práctica estándar para bomberos durante emergencias y puede ayudar a evitar la propagación entre BESS, refrigerar unidades adyacentes, apoyar estrategias de combustión controlada y mitigar emisiones tóxicas. Sin embargo, su eficacia es limitada para extinguir completamente el incendio, puede generar escurrimientos contaminados, crea riesgo eléctrico y existe la posibilidad de intensificar el thermal runaway en determinadas condiciones.

El resto de agentes, como aerosoles, agentes gaseosos, o agentes limpios no quedan descartados completamente, pero se exige mucha cautela en su utilización.

Los extintores portátiles tienen un papel muy limitado, y solo deberían utilizarse en pequeños dispositivos recargables portátiles o artículos electrónicos desconectados de la red ya que tienen capacidad limitada, pueden no controlar el incendio y obligan a actuar a pocos metros de la batería, con riesgo para las personas.

Otras posibilidades que se están desarrollando son las mantas térmicas, pero, como en el caso anterior, solo son válidas para incendios pequeños y suponen un riesgo para las personas al tener que acercarse mucho al incendio para utilizarlas.

Riesgo químico

Gases

Explosión derivada de un thermal runaway

Existen 3 elementos que contribuyen en diferente medida al riesgo de explosión derivado del thermal runaway:

- Reacciones químicas autoaceleradas y muy exotérmicas.
- Generación de un gran volumen de gas.
- Elevada proporción de componentes inflamables en dichos gases.

Explosión debida a las reacciones químicas

Aunque las reacciones que se producen durante un proceso de thermal runaway son muy exotérmicas, por sí mismas tienen un riesgo limitado de explosión. Sin embargo, generan temperaturas muy elevadas que pueden inflamar los gases producidos además de facilitar la propagación del incidente al resto de celdas adyacentes. Anteriormente se han indicado cuales son estas temperaturas.

Explosión debida a la sobrepresión de gases

La cantidad de gases generados durante un thermal runaway es muy elevada y su acumulación puede provocar una sobrepresión que desemboque en una explosión a nivel de celda, de módulo (si tiene envolvente hermética) o de contenedor.

Los datos de producción de gases varían mucho por cada fabricante, química y formato. En general el volumen de gas se incrementa con la capacidad de la celda, pero no se observa una tendencia clara en L/kWh, Por químicas, la tendencia observada en la bibliografía es:

NMC (546 L/kWh) > LCO (399 L/kWh) > LFP (247 L/kWh)

Respecto al formato, las celdas prismáticas producen más gas que las pouch quedando las cilíndricas por debajo de ambas.

La combinación de ambas variables nos indica que para las celdas de NMC, la generación es similar en prismáticas y pouch (579 y 574 respectivamente) mientras que para las de LFP la diferencia es de 3:1 (368 y 126). La influencia del SOC es clara en NMC (mayor producción de gas a mayor SOC) pero no en LFP, química con la que no se observan grandes diferencias.

Focalizando los datos en celda prismática de gran tamaño se observa la siguiente tendencia:

SIB (600 L/kWh) - NMC (476L/kWh) - LFP (200 L/kWh)

El Na-ion presenta una mayor generación de gas y los datos del NMC y LFP están en línea con el análisis global en cuanto a la química, pero son algo inferiores en cuanto al formato.

Estos datos son coherentes con los declarados como promedio en bases de datos de ensayos de celdas:

SIB (+600 L/kWh) > NCA (595L/kWh) > NMC (493L/kWh) > LTO (321L/kWh) > LFP (219 L/kWh)

Incluso la química que genera menor volumen de gases (LFP) produce una elevada sobrepresión en una celda hermética (80 atm) lo que puede provocar una explosión mecánica de gran violencia, razón por la cual un adecuado venteo que libere el gas de manera progresiva es imprescindible.

A nivel de módulo y sistema, la sobrepresión mecánica es menos probable porque los gases generados se diluyen en un volumen mucho mayor. Además, a nivel de módulo o contenedor los sistemas son no herméticos, lo que dificulta la creación de las condiciones de sobrepresión mecánica.

Explosión debida a la inflamación de gases

La explosión por gases inflamables se puede producir porque una parte de los gases generados en el proceso del thermal runaway es altamente inflamable (hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos). Si se acumulan en cantidad suficiente, una fuente de calor puede provocar una explosión mucho más intensa, destructiva y peligrosa que la explosión por sobrepresión mecánica: además de la que la presión interna puede multiplicarse entre 4 y 8 veces por la reacción química, la velocidad de la onda explosiva es supersónica (más de 1.000 metros por segundo) lo que genera una onda de choque muy destructiva.

El análisis de los gases generados en celdas con diferentes químicas muestra que hay 4 tipos de compuestos principales:

- hidrógeno (H_2)
- dióxido de carbono (CO_2)
- monóxido de carbono (CO)
- hidrocarburos (THC). Estos hidrocarburos están formados por diferentes cantidades de metano (CH_4), acetileno (C_2H_2), etileno (C_2H_4), etano (C_2H_6) y otros hidrocarburos con cadenas de 3, 4 y hasta 8 carbonos.

De los cuatro, solo el CO_2 es un gas no inflamable.

Además de estos 4 tipos, se generan pequeñas cantidades de otros gases y se suman los provenientes de la evaporación del propio electrolito (dimetilcarbonato (DMC), etilen carbonato (EC), etc.).

Las concentraciones promedio que se observan en la bibliografía son:

	LFP	NMC	SIB	NCA	LTO
H_2	44 %	19 %	29 %	28 %	15 %
CO	11 %	28 %	20 %	28 %	10 %
CO_2	26 %	37 %	33 %	32 %	68 %
THC	13 %	13 %	15 %	9 %	2 %
otros	7 %	3 %	2 %	3 %	5 %

- El LFP genera la mayor proporción de gases inflamables (74 %) frente a un 63% - 68 % de otras químicas.
- En la mezcla inflamable, el LFP genera más H_2 que el resto, pero menos CO, siendo la proporción de hidrocarburos más o menos similar (alrededor de un 13 %).

- *Nota: Los datos de NCA y LTO deben ser tomados con precaución porque se basan en pocos datos experimentales*

Otro dato importante es conocer el límite de inflamabilidad o explosividad inferior, es decir, cuál es la concentración mínima de un gas o vapor inflamable en el aire con la que se puede producir un incendio o una explosión en presencia de una fuente de ignición (como una chispa, llama abierta o calor extremo). Cada compuesto tiene un valor diferente (por ejemplo, el H_2 es un 4 %) por lo que hay que calcularla para la proporción de gases indicada. En general este valor se sitúa entre un 6 % y un 7 %, siendo ligeramente inferior con el NMC que con el LFP o el SIB.

Aunque es menos crítica también es interesante conocer el límite máximo de explosividad, es decir, cuándo la concentración de gases desplaza el suficiente hidrógeno como para que no se produzca la ignición. En la bibliografía se obtiene un valor promedio cercano al 50 % para todas las químicas.

Una vez analizados los 3 elementos por separado hay que tener en cuenta también las interacciones ellos.

El NMC genera un menor porcentaje de gases inflamables, pero también un mayor volumen total de gases lo que hace que el volumen de gases inflamables sea el doble que el del LFP. Además, las temperaturas del TR son mayores por lo que el riesgo de ignición es mayor.

Sin embargo, la baja temperatura de TR del LFP y su menor calor generado, junto a la menor producción de gas, pueden provocar que el gas inflamable no arda, lo que favorece su acumulación. En este caso el riesgo de explosión es mayor y más peligroso por su mayor alcance, en el caso del LFP frente al NMC.

Gases tóxicos derivados de un thermal runaway

Varios de los componentes de los gases generados en los procesos de thermal runaway, presentan niveles de toxicidad importantes. El más importante es el monóxido de carbono (CO) cuya fuerte tendencia a capturar oxígeno para producir CO_2 provoca la asfixia de personas y animales en entornos cerrados. La proporción de CO generada está entre el 10 % y el 28 % del gas total generado dependiendo de la química:

	LFP	NMC	SIB	NCA	LTO
CO	11 %	28 %	20 %	28 %	10 %

Otro gas tóxico que se genera en las reacciones de descomposición del electrolito es el ácido fluorhídrico (HF).

De media, el LFP produce más emisiones totales de HF que el NMC (50 - 100 g/kWh para el LFP frente a 10 g/kWh del NMC). El nivel de carga de la batería tiene importancia porque dependiendo del SOC el LFP baja desde 100 g/kWh al 0 % del SOC hasta 50 g/kWh al 100 % SOC. En el NMC no se observa cambios con el SOC.

Comparando las emisiones de HF con las de CO, puede constatar que, las emisiones de HF, de media, son un orden de magnitud inferior al CO, aunque existen diferencias dependiendo de la química: en el caso del NMC son dos órdenes de magnitud inferiores, pero en el caso del LFP son de orden similar.

Aunque hay indicaciones de otros posibles agentes tóxicos en los gases generados en el TR, como por ejemplo, el HCN o el HCl, no referencias bibliográficas que aporten datos al respecto bien porque los valores no se han medido o bien porque quedan por debajo del umbral de medida.

En general, la difusión de todos estos gases es muy rápida y salvo en los propios contenedores de baterías, el riesgo real de afección es muy bajo. Esto queda constatado analizando las mediciones publicadas por el **[**Center for Toxicology & Environmental Health \(CTEH\)**](#)** a raíz del mayor incidente de baterías que se produjo el 16 de enero de 2025 en Moss Landing, California. En dicho informe se muestra que ninguno de los gases indicados en este apartado alcanzó niveles de concentración suficientes como para ser detectados por los equipos de medida en las inmediaciones de la planta incendiada:

Table 1 Handheld Real-Time Air Monitoring Results

Analyte	Instrument	Count of Readings	Count of Detections	Average Concentration	Concentration Range
CO	MultiRAE	174	0	-	< 1 ppm
HCl	Gastec #14L	103	0	-	< 0.05 ppm
HCN	MultiRAE	147	0	-	< 0.5 ppm
HF	ChemLogic CLPx	99	0	-	< 0.4 ppm
	Gastec #17	109	0	-	< 0.1 ppm
PM2.5	DustTrak	47	47	0.006	0.002 - 0.014 mg/m ³
	SidePak AM520	221	221	0.010	0.002 - 0.090 mg/m ³

The selected instrument sensor responds to HCl, HF, and other mineral acids. For each measurement, any detections are assumed to consist completely of the indicated acid with internal instrument correction factor applied. Analytes with no detections are reported as less than (<) the instrument's Limit of Detection (LOD). ppm=parts-per-million

A la vista de estos resultados, el CTEH definió la calidad del aire como “buena”.

En un incidente similar ocurrido en San Diego, un año antes, tras las actuaciones de emergencia del equipo de bomberos, el equipo de materiales peligrosos del condado de San Diego realizó un control de la calidad del aire detectándose únicamente los productos normales de la combustión propios de un incendio estructural, a niveles que el NIOSH y la OSHA consideran muy por debajo de los umbrales de exposición. Durante 2 días se monitorizó la calidad del aire. En ningún momento durante el incidente los niveles de oxígeno se desviaron del 20,9 %, que se considera el nivel atmosférico normal. Además, no se detectó ni ácido fluorhídrico (HF), ni ácido cianhídrico (HCN) ni ácido sulfhídrico (H₂S) en ninguno de los puntos de muestreo. Solo se detectaron niveles de monóxido de carbono (CO), con valores superiores a 0, pero que se mantuvieron muy por debajo de los límites de exposición aceptables. Los valores elevados de CO son un resultado previsible durante un incendio en un edificio siendo además compatibles con las concentraciones debidas a diversas fuentes de combustión incompleta, incluidas las emisiones de los vehículos.

Mitigación del riesgo químico mediante la selección de la celda de Li-ion

La normativa no marca ninguna preferencia por una química en particular. La validación de esta se realiza mediante test genéricos y será responsabilidad del fabricante lograr un diseño que supere dichos test, sea cual sea la química.

A pesar de esto, a la hora de analizar y mitigar los riesgos es importante tener en cuenta la composición química ya que esta condiciona la reactividad, desgasificación, cantidad/composición de gases, incendio y propagación.

Por lo tanto, puede concluirse que no hay una preferencia de unas químicas sobre otras siempre y cuando la batería diseñada supere los test definidos por las normas.

Tampoco hay ninguna norma que plantee diferencias de diseño según el formato de celdas.

- Las celdas cilíndricas y prismáticas utilizan una envolvente rígida lo que proporciona un mayor nivel de seguridad a nivel de celda mientras que las celdas pouch utilizan una envolvente mucho más fina que puede ser atravesada fácilmente por un objeto metálico. Esta menor seguridad deberá ser compensada a nivel de módulo incluyendo una carcasa que en el caso de los otros dos formatos puede eliminarse.
- Desde el punto de vista de la gestión del calor, el formato pouch es más plano lo que proporciona un menor espesor y una mayor superficie para la extracción del calor.
- En caso de incidente, el formato también tiene importancia ya que la válvula de evacuación de los gases está situada en diferente posición dependiente el formato.
- Por último, las celdas cilíndricas son las únicas que no pueden empaquetarse de manera compacta, quedando huecos entre las celdas que facilitarán una mejor salida del calor.

Como en el caso del formato, ninguna norma plantea diferencias por el tamaño de las celdas. Sin embargo, una celda muy grande presenta 3 posibles problemas que deben ser tenidos en cuenta en el diseño:

- Cuanto más grandes son las celdas más grande es el peso de estas. Durante la fabricación o desmantelamiento de la batería esto, junto a su diseño no ergonómico, dificulta su manipulación pudiendo dar lugar a situaciones de riesgo para los operarios.
- Las celdas grandes tendrán espesores mayores, lo que dificultará la extracción de calor de su interior. Para mejorar la seguridad los fabricantes recomiendan trabajar a bajos C rate con este tipo de celdas.
- En caso de thermal runaway, una celda mayor acumula más energía. Al ser un incidente interno, para el nivel de energía de una celda, no pueden utilizarse las estrategias de diseño para evitar la propagación entre celdas. Y para energías mayores, la cantidad de energía propagada aumenta, lo que incrementa el riesgo de todo el sistema.

Evacuación de gases

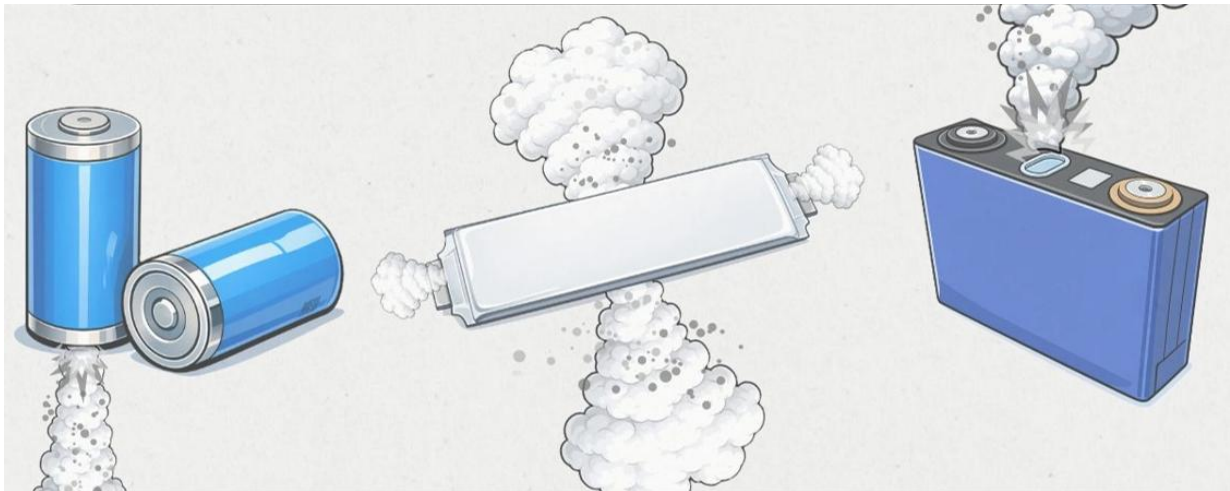
Diseño pasivo para facilitar la evacuación de gases de la celda

Las celdas deben incorporar sistemas de alivio de presión permitiendo la evacuación de los gases generados en un TR y de esta manera, evitar su ruptura o explosión. Generalmente son zonas débiles, denominadas válvulas de seguridad, que rompen antes que el resto de la envolvente ante una sobrepresión lo que permite dirigir la salida de los gases hacia una zona determinada. La idoneidad del diseño se comprueba a posteriori, en los test de seguridad que deben superarse con la celda terminada o el battery pack construido.

La localización de la válvula de seguridad en las celdas es importante desde el punto de vista del diseño ya que va a definir la ruta de evacuación de los gases y por lo tanto la estrategia de diseño a nivel de módulo. Esta localización difiere según el formato de las celdas:

- Las celdas cilíndricas ventilan desde abajo.
- Las celdas prismáticas generan chorros de gases en la válvula de seguridad.

- Las celdas pouch se rompen por todas partes.



Letter to Power. (s.f.). Three completely different venting behaviours. Same Event. Same Chemistry [Infografía].

Otros aspecto clave es la presión de rotura de la válvula: la mayor presión se genera en las celdas cilíndricas y es detectable desde los 20 bares. En las prismáticas aproximadamente 10 bares mientras que en las celdas pouch la presión es un orden de magnitud menor (alrededor de 2 bares). Además, en estas últimas, la sobrepresión es claramente visible por el hinchamiento de las celdas.

- Si la presión es alta, como ocurre en las celdas cilíndricas y prismáticas, los gases calientes y la energía térmica permanecen confinados más tiempo dentro de la celda:
 - Las temperaturas internas continúan subiendo junto con la acumulación de presión.
 - La carga térmica local se vuelve más intensa.
 - La liberación de gases se vuelve más agresiva una vez que ocurre la ruptura.
- Si es baja, como es el caso de las celdas pouch:
 - Liberación de presión más temprana y, por tanto, temperaturas máximas de las celdas más bajas.
 - Eliminación de calor más rápida.
 - Picos de presión más bajos.

También es importante la presencia de partículas en el chorro de gas. Estas partículas, normalmente son metálicas y conductoras por lo que reducen el voltaje de arco eléctrico, lo que incrementa este riesgo eléctrico, obligando a incrementar las distancias entre celdas. Fabricantes como CATL han desarrollado un diseño por el que evacuan los gases por rutas diferentes al circuito eléctrico de manera que este efecto no se produce.

No hay limitaciones por parte de la normativa para el uso de una determinada química, formato o tamaño de celda. Lo que es obligatorio es que se cumpla con el Reglamento de Baterías UE 2023/1542 siendo las normas recomendadas para seguridad la IEC 62619 y UL 1973. Otras normas sobre seguridad a nivel de celda son IEC 61438, IEC 62281, IEC 63115-2 y GB 40165.

Diseño pasivo para facilitar la evacuación de gases del módulo

El diseño pasivo para evacuación de gases del **módulo** debe entenderse como el conjunto de elementos constructivos que permiten que, si una celda ventila o entra en TR, los gases y la sobrepresión puedan salir del módulo de forma controlada, evitando la rotura violenta, la explosión del módulo y la propagación hacia celdas o módulos vecinos. No equivale a eliminar el riesgo químico ya que los gases evacuados pueden seguir siendo inflamables y/o tóxicos, por lo que deben ser gestionados por las capas superiores de diseño del contenedor o sala en la que estén instalados los módulos si estos no se colocan en un contenedor.

Para la gestión de la evacuación de los gases la envolvente del módulo o pack de baterías debe incorporar una función de alivio de presión que impida su ruptura o explosión, es decir, que el venteo debe estar previsto en el diseño y no ser una rotura accidental. Además, si se emplea encapsulado para sostener las celdas dentro de una carcasa exterior, este no debe provocar sobrecalentamiento ni impedir el alivio de presión.

Como criterio general, el módulo o battery pack debe estar diseñado para que el fallo por TR de una sola celda no genere un peligro significativo, es decir que el módulo no explote ni el incendio se propague fuera del mismo.

Para confirmar un diseño adecuado hay que asegurarse de que existe protección adecuada contra deflagración cuando sea necesaria, que los gases tóxicos en condiciones de incendio no alcanzan niveles IDLH durante el tiempo necesario para evacuar y que los gases inflamables en operación normal no superan el 25 % del LFL.

Los parámetros de explosividad de los gases —presión máxima de explosión, velocidad de aumento de presión, límites de explosividad, concentración límite de oxígeno y temperatura de ignición— deben determinarse mediante test de laboratorio debido a la variabilidad de composición de los gases según la batería.

A modo de resumen el diseño pasivo del módulo debería incorporar, como mínimo, los siguientes criterios:

1. Función de alivio de presión integrada en la carcasa del módulo.

La envolvente del módulo debe estar diseñada para liberar presión de forma prevista, evitando ruptura o explosión. Esta función no debe depender de que la carcasa falle de forma aleatoria.

2. Componentes de rotura diseñados.

Cuando se utilicen elementos fusibles, tapas, membranas, válvulas, zonas débiles o paneles de alivio, deben ser parte del diseño y validarse frente a los escenarios de fallo previstos.

3. Rutas de venteo no bloqueadas.

Los materiales de encapsulado, barreras térmicas, soportes de celdas, aislantes y elementos de compresión no deben impedir la salida de gases ni generar sobrepresión interna peligrosa.

4. Evacuación dirigida y compatible con el rack/contenedor.

La salida de gases del módulo debe dirigirse hacia un volumen o ruta donde pueda ser gestionada por la ventilación, detección, alivio de presión o protección contra deflagración de la capa superior. No debe descargar directamente hacia celdas vecinas, conectores, electrónica sensible, zonas calientes o rutas de propagación de llama.

5. Compatibilidad con la protección contra incendios.

La evacuación pasiva de gases no debe crear una vía que facilite la propagación del incendio o combustión hacia otros módulos. Por ello, debe coordinarse con barreras térmicas, separación entre celdas, compartimentación y estrategia de extinción.

Sistema activo para facilitar la evacuación de gases del módulo

En general no se suele prescribir un extractor activo dentro de cada módulo, sino sistemas de detección, ventilación, extracción o control de explosión a nivel de contenedor, armario o recinto. No obstante, es recomendable que el diseño parta del comportamiento del módulo durante la fuga térmica y de los gases que libera.

Diseño pasivo para facilitar la evacuación de gases del contenedor

El diseño pasivo para facilitar la evacuación de gases del contenedor debe permitir aliviar la presión, dirigir gases combustibles/tóxicos hacia una zona segura y limitar las consecuencias de una eventual deflagración dentro del contenedor BESS. No sustituye a la detección de gases ni a la ventilación mecánica, pero debe integrarse con ellas para evitar acumulaciones peligrosas, sobrepresiones y daños estructurales.

Durante un evento de *thermal runaway*, las baterías de ion-litio pueden liberar gases inflamables y tóxicos. La acumulación de estos gases en la envolvente del contenedor puede generar atmósferas inflamables y provocar una deflagración si existe una fuente de ignición. Por ello, el diseño del contenedor debe prever medios de alivio o venteo capaces de evacuar gases y presión de forma controlada. Para los cálculos debe considerarse el volumen de gas liberado, volumen libre, presión máxima, área de venteo, presión reducida admisible y efectos de deflagración parcial. Para obtener esta información es necesario disponer de datos de los gases generados, que indiquen la composición, LFL/HFL, cantidad —masa y volumen— y caudal.

Los sistemas más habituales para el venteo son los paneles de deflagración que son aliviadores mecánicos de presión que se abren por la presión generada por los gases, limitan las consecuencias de la explosión y permiten controlar su dirección. Estos sistemas deben validarse mediante ensayos físicos o análisis de modelización. Como criterio de diseño puede utilizarse la guía NFPA 68. Estos sistemas de venteo no serán obligatorios si se demuestra que la concentración de gas inflamable permanecerá siempre por debajo del 25 % del LFL y que no existe potencial de deflagración de volumen parcial.

Es importante tener en cuenta que el volumen libre en el contenedor, que suele ser de alrededor de un 20 %, puede verse reducido cuando se diseñan contenedores de mayor densidad energética, haciendo más probable superar el LFL tras un evento de *thermal runaway*.

Por otro lado, los contenedores no deben ventilar ni filtrar materiales peligrosos o tóxicos en zonas de acceso del EESS o en el entorno circundante. Se recomienda que el material expulsado se dirija hacia el techo de la envolvente para reducir el impacto de fuego y proyectiles sobre exposiciones cercanas.

Por lo tanto, el diseño pasivo del contenedor debería documentar, como mínimo:

1. **Datos de partida de generación de gases:** composición de gases, LFL/HFL, volumen, masa y caudal de liberación durante *thermal runaway*. Esto es necesario para dimensionar venteos, paneles o dispositivos de alivio.
2. **Volumen libre del contenedor:** debe justificarse el volumen disponible para dilución y acumulación de gases. El volumen libre depende del tamaño del contenedor, de la ocupación por

racks y equipos y de la separación interna. La reducción de volumen libre aumenta la probabilidad de alcanzar concentraciones inflamables.

3. **Dispositivos pasivos de alivio:** paneles de deflagración, trampillas de sobrepresión, elementos de rotura diseñados o respiraderos pasivos. Estos dispositivos deben abrir antes de que la presión comprometa la integridad estructural del contenedor, y deben estar calculados según los parámetros de explosión previstos y la resistencia de la envolvente.
4. **Ubicación y dirección de descarga:** los gases, llamas, presión o proyectiles deben dirigirse hacia zonas donde causen el menor daño posible. Se identifica el techo como ubicación preferente habitual para venteos de deflagración, aunque también se admiten dispositivos en pared exterior si el diseño lo justifica.
5. **Compatibilidad con la protección contra incendios y la envolvente:** los dispositivos de alivio no deben anular la compartimentación, la resistencia al fuego ni la estanqueidad funcional del contenedor, y la actuación del sistema no debe introducir nuevos peligros para personas, equipos próximos o entorno.
6. **Validación:** el diseño debe verificarse mediante ensayos físicos, ensayos a gran escala, análisis de deflagración o modelización.

Sistema activo para facilitar la evacuación de gases del contenedor

El sistema activo de evacuación de gases del contenedor tiene como función detectar la presencia o liberación de gases procedentes de un evento de thermal runaway y activar medios mecánicos o controlados de extracción/expulsión hacia una zona segura, evitando la acumulación de mezclas inflamables dentro del contenedor.

El objetivo es garantizar que la ventilación es suficiente para evitar una concentración combustible por debajo del 25 % del límite inferior de inflamabilidad/explosividad (LII/LFL). Se debe diferenciar la ventilación en operación normal (cuando se utiliza para la refrigeración por aire) de los requisitos de control de explosión para condiciones anormales. Para ello se recomienda la monitorización continua de gases combustibles dentro de las unidades, con alarma, parada del ESS y conmutación del sistema de ventilación a extracción total.

En términos de integración, el sistema activo no debe diseñarse de forma aislada. Es necesario evaluar la interacción entre supresión de incendios y ventilación, porque activar un extractor al mismo tiempo que se descarga un agente de supresión puede comprometer su eficacia. Por ello, deben definirse prioridades entre supresión de incendio y prevención de explosiones cuando sea necesario, y las funciones de mitigación, incluida la ventilación, deben validarse mediante ensayos físicos y/o modelización.

Los criterios de diseño son los siguientes:

1. **Detección previa a la extracción:** sensores de gases inflamables, tóxicos y/o vapores de electrolito, ubicados según la densidad de los gases esperados y la circulación de aire interna. Debe considerarse la localización de sensores según el gas detectado, como hidrógeno, CO o compuestos orgánicos volátiles.
2. **Lógica automática de actuación:** alarma, desconexión/parada del ESS y paso del sistema a modo de extracción total cuando se detecten gases combustibles.

3. **Compatibilidad con supresión:** si existe agente gaseoso, aerosol o sistema de extinción, debe evaluarse la interacción entre extracción y supresión.
4. **Caudal y eficacia demostrados:** el diseño debe justificar que evita concentraciones combustibles, con referencia al criterio del 25 % LII/LFL.
5. **Descarga a ubicación segura:** la extracción no debe introducir nuevos peligros en zonas de acceso, trabajadores, equipos adyacentes o entorno.
6. **Validación mediante ensayo/modelización:** Se recomiendan tanto ensayos físicos, modelización o CFD para validar la solución.
7. **Integración con venteo/paneles de deflagración:** aunque el sistema activo se base en extracción mecánica, puede ser necesario combinarlo con alivio de presión, paneles de deflagración u otras vías de descarga si la ventilación no es suficiente por sí sola.

Diseño de la configuración de la zona de almacenamiento para limitar el efecto de los gases

El diseño de la configuración de la zona de almacenamiento debe tratar la liberación de gases como un peligro propio, no únicamente como una consecuencia secundaria del incendio. Esto es especialmente relevante en instalaciones indoor ya que, si estos gases se acumulan en una sala o recinto y encuentran una fuente de ignición, pueden provocar una deflagración o explosión. Por ello, el objetivo de diseño debe ser evitar la acumulación, limitar la concentración, dirigir la descarga hacia zonas seguras y reducir la exposición de trabajadores, bomberos, edificios, recorridos de evacuación y unidades adyacentes.

La configuración de la sala o planta debe partir de una evaluación específica de gases y deflagración. Se debe demostrar que los gases tóxicos no alcanzarán concentraciones superiores a los niveles IDLH en el edificio ni en las rutas de evacuación adyacentes durante el tiempo necesario para evacuar, y que los gases inflamables en operación normal no superarán el 25 % del LFL. La jerarquía frente a atmósferas explosivas es: primero evitar o reducir la atmósfera explosiva, después evitar fuentes de ignición y, si esto no es suficiente, aplicar medidas de protección como aislamiento, ventilación, supresión, contención o alivio.

Todo esto aplicado a una sala o planta BESS, implica que el *layout* no debe limitarse a colocar contenedores, racks o armarios, sino que debe definir volúmenes libres, distancias, rutas de venteo, orientación de paneles de deflagración, ubicación de accesos, dirección de extracción, recorridos de evacuación, puntos seguros para bomberos y zonas donde una nube de gases no pueda afectar a ocupantes, edificios, equipos críticos ni unidades vecinas.

Los requisitos de configuración para el diseño de la zona de almacenamiento son:

1. Preferencia de configuraciones exteriores o remotas para BESS de gran escala.

El espacio confinado limita la dispersión y dilución de gases inflamables y puede contener más fuentes de ignición. Por tanto, cuando el proyecto lo permita, la configuración más favorable para limitar el efecto de gases es una planta exterior, con separación frente a exposiciones, edificios, límites de parcela y zonas ocupadas.

2. Evitar configuraciones subterráneas o altamente confinadas salvo justificación técnica.

En infraestructuras subterráneas o salas con ventilación limitada los contaminantes pueden acumularse rápidamente y superar umbrales críticos antes que al aire libre. Es necesario tener en

cuenta que los gases/humos de baterías de litio pueden emitirse con presión, en gran volumen y llenar la zona más rápido que los humos de una combustión ordinaria.

3. Diseñar el volumen de sala, la ventilación y el venteo a partir de datos de gases.

No basta con aplicar una ventilación genérica. El diseño de control de explosión debe apoyarse en datos de composición, presencia de sustancias tóxicas, cantidad, caudal, concentración, LFL y geometría del recinto. Se recomienda modelización, especialmente CFD, para evaluar generación, dispersión, acumulación, ignición, propagación de llama, aumento de presión y venteo.

4. Orientar paneles, puertas de alivio y conductos hacia zonas seguras.

Las llamas, materiales y gases expulsados por venteo se deben dirigir hacia una ubicación segura, sin contribuir a la propagación del incendio ni generar riesgo para personas. En el diseño de planta, esto implica no orientar paneles de deflagración hacia rutas de evacuación, puntos de reunión, edificios ocupados, accesos de bomberos, equipos críticos, transformadores, PCS, vegetación combustible ni contenedores adyacentes.

5. Prever detección de gases en función de su comportamiento físico.

Los sistemas de detección de gases deben detectar gases más ligeros y más pesados que el aire. Esto afecta al *layout*: la ubicación de detectores no puede ser arbitraria, sino que debe considerar puntos altos, puntos bajos, posibles bolsas de gas, recirculación del HVAC, zonas muertas y recorridos de extracción. Los gases pueden mezclarse en todo el volumen de la sala por la expulsión rápida y la ventilación, por lo que la evaluación debe considerar el volumen completo de la sala de baterías.

6. Integrar ventilación y control de explosión sin interferir con detección o supresión.

La supresión de incendios no debe perjudicar la eficacia de los equipos de prevención de explosiones y que, si es necesario, deben definirse prioridades. Una ventilación mal diseñada puede extraer humos antes de que sean detectados, o interferir con sistemas de aerosoles/gases de extinción. Por ello, el diseño de sala/planta debe coordinar ventilación normal, ventilación de emergencia, detección, supresión, apertura de paneles, corte de equipos y lógica de control.

7. En salas interiores, reforzar compartimentación, resistencia al fuego, cierre y evacuación.

En instalaciones dentro de un edificio, debe evaluarse si el espacio constituye un local con riesgo elevado de incendio o explosión; en tal caso, se requieren tabiques cortafuegos de construcción maciza y cierres al menos ignífugos, estancos y de cierre automático. Los recintos transitables deben tener acceso/salida suficiente, puertas que abran en sentido de evacuación, dispositivos antipánico y acceso restringido con señalización.

8. En zonas exteriores, configurar accesos y rutas de intervención considerando viento y nubes de gases.

En instalaciones outdoor es recomendable establecer al menos dos accesos separados al emplazamiento para contemplar condiciones de viento opuestas. También debe identificarse en el plan de emergencia el recorrido probable de gases o materiales venteados. Por tanto, el *layout* debe permitir aproximación desde zonas no afectadas por la nube de gases y mantener rutas alternativas de intervención y evacuación.

9. Mantener zonas libres de combustibles y vegetación alrededor de unidades.

En los sistemas exteriores deben establecerse cortafuegos alrededor del BESS, libres de vegetación y obstrucciones, contruidos con materiales no combustibles. El emplazamiento debe mantenerse sin combustibles adyacentes y despejar vegetación u otros combustibles en un radio de 10 m alrededor de las unidades. Aunque esta medida se asocia principalmente a incendio, también reduce el riesgo de que un venteo con gases calientes, llamas o materiales proyectados genere propagación secundaria.

Acciones ante la emisión de gases

Como ya se ha explicado anteriormente, una de las consecuencias del thermal runaway es la generación de gases como subproducto de las reacciones que se producen, lo que puede derivar en una explosión o la creación de una nube de gases tóxicos. Las estrategias de diseño y protección a nivel de celda, módulo y contenedor para la gestión de los gases emitidos no tienen como objetivo eliminarlos o contenerlos sino canalizarlos hacia el exterior de una manera segura. Esto implica que, incluso aunque se logre la contención del incidente, deben considerarse las acciones de emergencia asociadas a la emisión de gases.

Debido a la toxicidad de los gases y su carácter inflamable, la primera acción necesaria es la detección y la activación de las alarmas correspondientes.

Las siguientes acciones asociadas a la emisión de gases que deben considerarse son:

Acumulación de gases inflamables

La acumulación de gases inflamables es uno de los escenarios más críticos porque puede transformar un evento de venteo de celdas en una deflagración. El riesgo no depende únicamente de que se generen gases, sino de que estos se acumulen en una concentración inflamable dentro de un contenedor, sala, envolvente, armario, unidad transitable o espacio conectado.

Las cantidades de gas y su composición (y por lo tanto la inflamabilidad) depende de la química de litio-ion utilizada.

La secuencia típica identificada por las guías es:

1. **Fallo o abuso de celda:** sobrecalentamiento, sobrecarga, daño mecánico, cortocircuito u otro fallo.
2. **Venteo o emisión de gases:** la celda libera gases antes o durante el thermal runaway.
3. **Dilución insuficiente o acumulación:** si la ventilación no es suficiente o la geometría genera bolsas de gas, la concentración puede entrar en rango inflamable.
4. **Presencia de ignición:** chispas, llamas, superficies calientes, equipos eléctricos, apertura de paneles, entrada de oxígeno o reignición.
5. **Deflagración o explosión parcial:** el gas acumulado arde rápidamente, generando llama, sobrepresión y posible daño estructural.

Los umbrales de 25 % del LFL pueden ser alcanzables incluso aunque los eventos de TR afecten a pocas celdas y una vez liberado el gas, las concentraciones elevadas pueden generarse rápidamente. Además, por dispersión no uniforme, pueden formarse bolsas locales de alta concentración, cuya ignición puede provocar al menos una deflagración parcial.

El riesgo se agrava con la ignición retardada: cuanto más tarde se produzca la ignición, más gas puede haberse acumulado.

Dado que una explosión es un proceso muy rápido y por lo tanto no hay tiempo de actuación una vez se inicia es importante volver a recalcar las medidas para evitar o limitar la acumulación de gases inflamables

1. Prevención de atmósferas explosivas
2. Detección continua de gases y activación de ventilación
3. Ventilación activa, ventilación pasiva y evacuación segura
4. Control de fuentes de ignición
5. Validación mediante ensayo, modelización y datos de gases
6. Respuesta operativa ante acumulación o sospecha de gases

Generación de nubes tóxicas

La generación de nubes tóxicas debe tratarse como un escenario distinto, aunque relacionado, con la acumulación de gases inflamables. En este caso el peligro principal no es únicamente la deflagración, sino la exposición de personas, servicios de emergencia, ocupantes de edificios próximos o terceros a gases, vapores, humos o partículas peligrosas emitidas por el BESS.

Las emisiones peligrosas pueden proceder de tres orígenes principales:

- las propias celdas,
- otros componentes del BESS sometidos a altas temperaturas (plásticos, carcasas, cables, estructuras),
- los sistemas de refrigeración o sus fluidos.

No existe una composición universal de la nube tóxica, porque esta depende de la química de la celda, del estado de carga, de los materiales constructivos, del refrigerante, de la presencia o no de combustión y de las condiciones de ventilación. Sin embargo, sí pueden identificarse gases y sustancias tóxicas de referencia como el CO, HF, HCl, HCN o POF_3 . Estos compuestos se combinan además con calor, combustión de materiales inflamables y riesgo de explosión.

Por lo tanto, la nube tóxica no debe considerarse solo un problema interno del contenedor, sino también un posible impacto sobre intervinientes y entorno.

Las medidas exigidas o recomendadas son:

1. Evitar que los gases tóxicos alcancen zonas de acceso o el entorno

Los ESS no deben ventilar ni filtrar materiales peligrosos o tóxicos hacia zonas de acceso del EESS ni hacia el entorno circundante. Si existe posibilidad de vertido de gases tóxicos, deben adoptarse medidas para evitar su acumulación, considerando la topografía en instalaciones exteriores, el diseño del edificio en instalaciones interiores y las características físicas del gas. Este criterio implica que la ventilación o venteo de emergencia no puede diseñarse únicamente para “sacar” el gas del contenedor, sino que debe evaluarse hacia dónde se dirige la nube, si puede alcanzar

accesos, rutas de evacuación, zonas de intervención, otros equipos, edificios próximos o límites de parcela.

2. Evaluar la exposición durante la evacuación

Los gases tóxicos liberados durante incendios u otras condiciones de fallo no deben alcanzar concentraciones superiores al nivel IDLH en el edificio o en las rutas adyacentes al BESS durante el tiempo necesario para evacuar. Por tanto, para este subapartado, el criterio de seguridad no debe limitarse a la concentración dentro del contenedor, sino que debe incluir al menos:

- espacios interiores conectados
- rutas de evacuación
- zonas de acceso de bomberos
- edificios próximos
- límites de parcela
- posible afección a terceros

3. Monitorización atmosférica y restricción de acceso

Las actuaciones ante incidentes ESS deben seguir las siguientes prácticas:

- aislar el área
- confirmar la localización y tipo de alarma
- realizar monitorización atmosférica
- gestionar ventilación/extracción
- suprimir incendios

En el caso de incendios del sistema de almacenamiento es necesario estar preparados para liberación de gases tóxicos y potencialmente explosivos, tratándolos como altamente peligrosos y usando EPI completo y equipos de respiración autónoma.

En instalaciones indoor, si se produce acumulación intensa de humo o fuga de gas, debe abandonarse inmediatamente la sala y si hay inhalación accidental e irritación respiratoria, debe buscarse atención médica inmediata.

4. Modelización de dispersión y afección a la comunidad

Es muy recomendable disponer de un análisis de dispersión de gases tóxicos e inflamables para el equipo BESS previsto en un escenario severo de incendio, con el objetivo de evaluar impactos potenciales sobre las comunidades próximas. Este plan debe describir también medidas de evacuación y notificación comunitaria.

Este criterio es especialmente relevante para instalaciones outdoor próximas a viviendas, usos sensibles, carreteras, límites de parcela o zonas con presencia habitual de terceros. En este tipo de emplazamientos, la nube tóxica no puede evaluarse solo como un riesgo laboral interno, sino como un posible riesgo externo y de protección civil.

Por último, pero no menos importante, se debe considerar la planificación desde la perspectiva de los servicios de bomberos: se debe dar una respuesta segura ante incendios o liberaciones de nubes de vapor en BESS, lo que exige que el plan de emergencia incluya detección de gases, sistemas de advertencia, comunicaciones, EPI, primeros auxilios, lista de mercancías peligrosas, evacuación y procedimientos para riesgos creíbles.

Asfixia por desplazamiento del aire

La asfixia por desplazamiento del aire debe tratarse como un riesgo de atmósfera peligrosa en espacios confinados o semicerrados y aunque está relacionado, es diferente a la toxicidad y la inflamabilidad de los gases. En este caso, el daño principal se produce porque el aire respirable queda desplazado o empobrecido en oxígeno, no necesariamente porque el gas sea tóxico en sí mismo.

Hay tres mecanismos principales a tener en cuenta:

1. **Liberación y acumulación de gases de venteo o combustión de baterías**, especialmente en salas, contenedores, armarios, edificios de uso dedicado o unidades *walk-in*.
2. **Accionamiento de sistemas de extinción gaseosa o reducción de oxígeno**, que pueden desplazar intencionadamente el oxígeno para controlar el incendio.
3. **Consumo o alteración del oxígeno durante incendios, explosiones o combustión incompleta**, con riesgo adicional cuando después se reintroduce aire en un recinto cargado de gases inflamables.

Las situaciones en las que puede aparecer el riesgo son:

1. **Venteo o fuga térmica en recinto cerrado**

Durante el thermal runaway, las celdas pueden liberar gases como CO₂ o CO. El primero no es un gas tóxico, pero puede desplazar al oxígeno si su concentración es elevada. El segundo puede consumir el oxígeno y por lo tanto provocar asfixia.

2. **Sistemas de extinción gaseosa o inertización**

El segundo origen relevante no es el gas de la batería, sino el propio sistema de protección contra incendios. Los sistemas de extinción por gas utilizan gases inertes, CO₂ o agentes sintéticos. Estos gases extinguen el fuego por desplazamiento de oxígeno. Como gas inerte se suele suministrar nitrógeno puro o aire enriquecido en nitrógeno para mantener el oxígeno del recinto entre el 13 % y el 16 %. Otras opciones son argón, IG-55 e IG-541.

3. **Entrada de aire en un recinto con gases acumulados**

La reducción del nivel de oxígeno puede eliminar un incendio mientras el contenedor o la sala permanezcan cerrados, pero convertirse en peligroso cuando se abren y entra aire. La nueva aportación de oxígeno puede convertir una acumulación de productos de combustión incompleta o gases de venteo nuevamente en una mezcla inflamable. Incluso el ángulo de apertura de paneles o puertas afecta a cuánto oxígeno entra y cuánto gas/calor queda retenido dentro del recinto. Por tanto, la actuación segura no consiste simplemente en “abrir para ventilar”, sino en monitorizar primero, controlar la ventilación y evitar la entrada no controlada de oxígeno en recintos con gases acumulados.

Las medidas de mitigación recomendadas son:

1. No acceder sin verificación atmosférica

Ante eventos de TR se debe aislar el área de personal no esencial, revisar alarmas y sistemas de protección, realizar monitorización atmosférica de todos los espacios conectados e identificar y aislar la batería afectada.

2. Monitorización atmosférica, no solo detección de incendio

La monitorización del aire debe ser prioritaria durante y después de cualquier emergencia ESS. Se recomienda que los servicios de bomberos utilicen medidores de cuatro gases u otros equipos de detección para determinar niveles de gases tóxicos, y debe usarse EPI completo y SCBA durante y después del incendio. Además, si existe un sistema fijo de gas inerte u otro agente que desplaza oxígeno, debe medirse desde zonas exteriores al recinto afectado para establecer lecturas base, incluyendo plantas superiores e inferiores, esquinas, zonas bajas, áreas fuera del recorrido del humo/gas y puntos próximos a ventilaciones.

Esto implica que no basta con medir gases inflamables o CO. En recintos cerrados o tras descarga de agentes gaseosos, debe considerarse también la medición de oxígeno, junto con gases tóxicos e inflamables.

3. Ventilación o extracción controlada

Cuando exista posibilidad de vertido de gases tóxicos, se deben adoptar medidas para evitar su acumulación. Estas medidas deben considerar la topografía en instalaciones exteriores, el diseño del edificio en instalaciones interiores y las características físicas del gas. Aunque esto se refiere a gases tóxicos, el mismo razonamiento es aplicable al escenario de asfixia por desplazamiento, porque el riesgo depende de acumulación, confinamiento, densidad del gas y ventilación.

4. Gestión específica de sistemas de extinción gaseosa

Como ya se ha indicado, los sistemas de CO₂, gases inertes o reducción de oxígeno pueden crear una atmósfera no respirable por diseño. Por ello, en caso de emplearse este tipo de sistemas, el riesgo de asfixia debe integrarse en la evaluación del recinto, en la ocupación prevista, en los avisos de descarga, en los procedimientos de evacuación y en la verificación previa a la reentrada.

5. Integración en el plan de emergencia

El manual de emergencia debe contemplar eventos previsibles según tecnología, diseño y modo de operación, incluyendo medidas para controlar condiciones, limitar consecuencias, avisos, evacuación y coordinación con servicios externos. El manual de primera respuesta debe describir medidas frente a incendios, prevención de explosión y otros peligros como derrames químicos, peligros eléctricos o emisiones de gases tóxicos.

También debe realizarse la formación del personal en riesgos y peligros de las instalaciones, sistemas de alerta, zonas de evacuación, mercancías peligrosas, primeros auxilios y ejercicios de emergencia, invitando a la brigada local cuando haya personal en las instalaciones.

Limitación de daños tras explosiones

La mitigación del riesgo de explosiones se basa en medidas de diseño y protección que eviten que dicha explosión se produzca. Sin embargo, si la deflagración tiene lugar es importante que sus efectos queden limitados y no provoquen:

- rotura catastrófica del contenedor;
- proyección de puertas, paneles o fragmentos;
- propagación del incendio a otros contenedores o infraestructuras;
- exposición de bomberos, trabajadores o público a llamas, sobrepresión, gases tóxicos o atmósferas pobres en oxígeno;
- daños secundarios por pérdida de contención, fallo de sistemas auxiliares o contaminación.

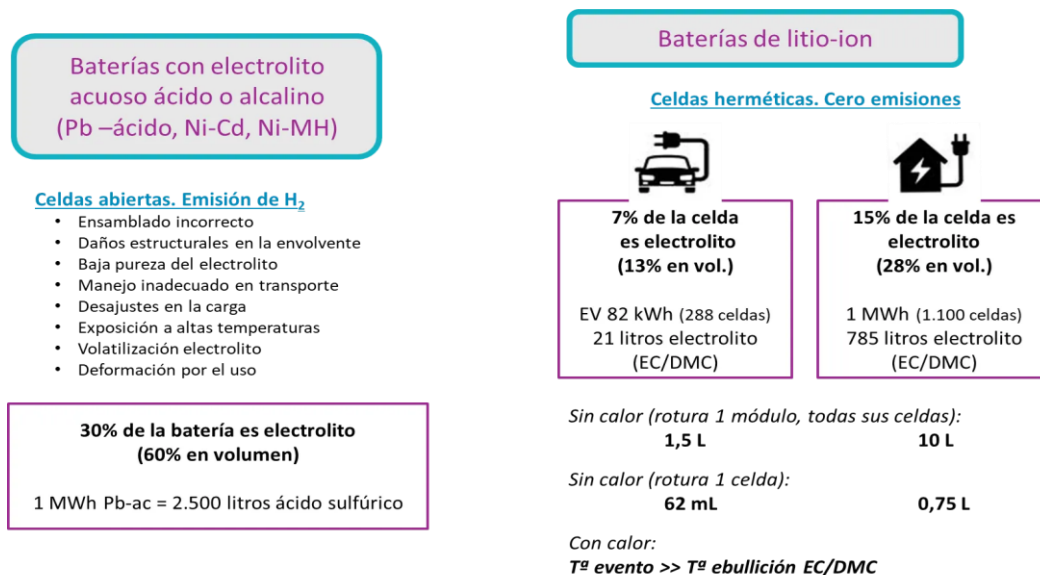
Tras una explosión o deflagración, la respuesta debe ser defensiva y controlada. El plan de operaciones de emergencia debe contemplar procedimientos para apagado seguro, desenergización o aislamiento, inspección y prueba de alarmas/interbloqueos/controles para equipos dañados por incendio u otro evento de emergencia como explosiones.

Líquidos

Riesgo de vertidos derivados de un thermal runaway

El origen del riesgo de vertidos asociados al electrolito de las baterías proviene de las baterías de plomo ácido. Este tipo de baterías utiliza grandes cantidades de ácido sulfúrico concentrado como electrolito (hasta un 60 % del volumen de la batería). Además, las envolturas de las baterías suelen ser de plástico para evitar la corrosión del ácido. Todo ello supone que el riesgo de rotura es elevado y los daños de grandes cantidades de ácido sulfúrico derramado son grandes.

Sin embargo, las baterías de litio-ion utilizan electrolitos orgánicos con un pH neutro y en cantidades mucho menores. Además, las celdas son más pequeñas y su envoltura suele ser una carcasa de aluminio soldada herméticamente para evitar la entrada de aire y agua del exterior. Esto hace que la rotura de una celda sea mucho más difícil y si se produce la cantidad de electrolito liberada muy pequeña (por ejemplo, la cantidad total de electrolito de una celda típica de un sistema estacionario es de menos de 1 litro y la mayor parte está embebida en los electrodos y separador). Además, la rotura de una celda suele ir acompañada de un evento de thermal runaway donde se generan altas temperaturas lo que evapora los disolventes orgánicos en su totalidad.



Al margen del electrolito los vertidos pueden provenir de los líquidos de refrigeración de la batería y de la electrónica de potencia. En el primer caso lo más habitual es utilizar mezclas de glicol y agua que no suponen un riesgo medioambiental y en el caso del PCS o trafo se usan aceites cuyo vertido se evita con el uso de cubas de contención.

Hay un riesgo de vertido añadido que es el que se produce si se intenta apagar un incendio mediante el uso de agua directamente. Como ya se ha indicado anteriormente, el agua de extinción entra en contacto con los elementos activos expuestos por el evento de thermal runaway y la escorrentía puede adquirir un carácter contaminante que hace recomendable la recogida de dicho agua.

Riesgos químicos no debidos al thermal runaway

El riesgo químico se produce por contacto con sustancias peligrosas, por inhalación de sustancias peligrosas, por reacciones químicas descontroladas o por la generación de acelerantes de reacciones. Los riesgos químicos al margen del thermal runaway son leves:

- Los materiales **sólidos** activos responsables de las reacciones electroquímicas no suponen ningún riesgo para las personas porque se encuentran perfectamente sellados en el interior de las celdas.
- Las celdas de Li-ion utilizan cantidades pequeñas de electrolito **líquido** (mucho menos que, por ejemplo, las baterías de plomo ácido) basadas en disolventes orgánicos muy volátiles. Por lo tanto, no son suficientes para generar un vertido, ni siquiera en caso de rotura de las celdas.
- El único líquido en cantidades suficientes para suponer un riesgo es el de los circuitos de refrigeración de la batería o de la electrónica de potencia. En el primer caso el líquido utilizado suele ser una mezcla de glicol y agua medioambientalmente compatible. En el segundo se utiliza aceite de refrigeración que por su carácter más contaminante debe ser recogido en una cubeta exprofeso situada bajo el equipo para evitar derrames en caso de fuga.
- En las baterías de litio-ion no se utilizan gases salvo en los equipos de extinción de incendios. Estos gases no son tóxicos, pero pueden llegar a desplazar al aire en espacios cerrados por lo que deben tomarse medidas de precaución para su uso.

Consideración aparte debe tenerse con el posible riesgo químico producido por las escorrentías derivadas del agua utilizada en el sofocamiento de un incendio de una batería de litio-ion. Como se describe en el apartado de medidas paliativas hay dos posibles estrategias de actuación frente a un thermal runaway.

Diseño de sistema de contención de vertidos

Una batería de litio-ion no presenta un riesgo de vertido de electrolito, pero hay varios componentes del sistema que utilizan refrigeración líquida, como es la propia batería, el PCS o el trafo. Si dicho líquido refrigerante tiene carácter contaminante, en caso de rotura o fallo pueden generar una fuga nociva. Para evitarlo se utilizan los siguientes métodos de contención:

- **Contención primaria:** el propio circuito de refrigeración debe estar diseñado para no fugar: tuberías, mangueras, racores, bombas, depósitos, intercambiadores, juntas y conexiones. Todos los componentes usados para refrigeración líquida deben ser resistentes a la degradación química del líquido que contienen y tener la resistencia mecánica suficiente para el entorno previsto. Además, su ensayo de presión de refrigeración exige que las partes que contienen líquido soporten 1,2 veces la presión máxima declarada durante 1 minuto, sin deformación, rotura ni fuga.

- **Contención secundaria:** si la contención primaria falla, el líquido debe quedar retenido en bandejas, cubetos, tanques, doble envolvente o solera estanca, evitando que salga del contenedor o alcance drenajes no controlados. Dichos contenedores deben tener capacidad suficiente para almacenar el fluido dentro del EESS, disponer de sensores y alarmas y resistencia química de los materiales para el líquido que van a contener. Si los contenedores se ubican en el exterior, deben diseñarse para impedir el llenado inadvertido por lluvia.

Además, se recomienda que las alarmas o advertencias de fuga del sistema térmico se comuniquen al BMS y que los riesgos del sistema de refrigeración se evalúen y validen mediante procesos de certificación reconocidos.

Contención de agua de extinción

La contención del agua de extinción tiene como finalidad impedir que el agua utilizada durante la intervención ya sea por sistemas fijos, rociadores, diluvio, tuberías secas, inundación, refrigeración defensiva o aplicación manual por bomberos, arrastre contaminantes fuera de la zona controlada.

El riesgo no es el agua en sí misma, sino su posible mezcla con:

- electrolitos, sales de litio, disolventes orgánicos o productos de degradación;
- partículas, hollín, metales, fluorados, ácidos o productos tóxicos de combustión;
- aceites de transformador, glicoles o refrigerantes;
- residuos sólidos procedentes de celdas, racks, cables, plásticos o envoltentes;
- agentes extintores, espumógenos, aditivos o contaminantes arrastrados del suelo.

Dentro del diseño del emplazamiento, debe considerarse la gestión de la escorrentía mediante:

- cubetos o soleras estancas;
- diques o bermas perimetrales;
- sumideros;
- drenajes segregados;
- válvulas de aislamiento de drenaje;
- interceptores;
- separadores agua-aceite;
- lagunas o balsas confinadas;
- depósitos de retención;
- contenedores sellados;
- sistemas de bombeo y extracción;
- filtración y tratamiento;
- conexión separable al drenaje pluvial para evitar salida de agua contaminada.

La capacidad de los sistemas de contención y gestión de escorrentías debe basarse en los caudales de agua previstos, incluyendo el impacto de sistemas fijos basados en agua. No existe un volumen único universal para todos los BESS. El criterio común es que la capacidad debe justificarse en función de:

- caudal previsto de sistemas fijos de extinción o supresión;
- duración prevista de la descarga;
- caudal de intervención manual o refrigeración defensiva;
- agua adicional aportada por bomberos;
- lluvia o agua pluvial que pueda entrar en el sistema;
- volumen de líquidos peligrosos existentes en el emplazamiento;
- capacidad de bombeo, aislamiento o retirada durante la emergencia;
- sensibilidad ambiental del emplazamiento.

La contención del agua de extinción debe coordinarse con la estrategia de extinción. Si se prevé una estrategia basada en agua, el volumen a contener puede ser elevado. Si se prevé combustión controlada, refrigeración defensiva o ausencia de supresión fija, el plan debe seguir contemplando el agua que puedan aplicar los bomberos.

También es importante diferenciar las instalaciones por su tamaño: Para instalaciones pequeñas la contención puede considerarse prescindible según experiencia de los servicios de emergencia, pero para grandes instalaciones o ubicaciones especiales, por ejemplo, zonas de protección de aguas, las medidas deben acordarse con la autoridad competente, mediante evaluación de riesgos que considere condiciones de instalación, tecnología, sistemas automáticos de extinción y resultados de ensayos reales de incendio.

Por otro lado, no puede asumirse por defecto que los bomberos adopten medidas específicas de retención de agua de extinción; por tanto, estas medidas no deben dejarse a la improvisación de la intervención y deben estar recogidas en el Plan de Gestión de Incendios.

La contención de agua de extinción adquiere mayor importancia cuando la instalación está cerca de:

- cauces, arroyos, humedales o masas de agua;
- zonas de protección de acuíferos;
- captaciones de agua potable;
- áreas inundables;
- suelos permeables o de alta sensibilidad ambiental;
- hábitats o especies protegidas;
- zonas agrícolas o forestales con escorrentías superficiales.

Tratamiento de vertidos

En los sistemas de almacenamiento de energía eléctrica basados en baterías de litio-ion no hay un riesgo significativo de vertido por derrame del electrolito. Sin embargo, hay otros dos riesgos de derrame de

líquidos contaminantes: los líquidos de refrigeración de batería, PCS y trafo y el agua de extinción utilizada durante un incendio. A continuación, se describen las actuaciones relacionadas con ambos posibles vertidos:

Líquidos de refrigeración contenidos

En los sistemas de almacenamiento con refrigeración líquida, el líquido refrigerante puede circular por circuitos cerrados asociados a módulos, racks, unidades de climatización, *chillers* o sistemas auxiliares. También se utiliza líquidos de refrigeración en el PCS y en el transformador. Aunque una fuga no implica necesariamente incendio o thermal runaway, sí puede producir:

- Daño ambiental por vertido al suelo, drenajes o aguas superficiales.
- Cortocircuitos o fallos eléctricos si el líquido alcanza partes energizadas.
- Corrosión de celdas, módulos, bandejas, conectores o electrónica.
- Pérdida de capacidad de refrigeración y posterior sobrecalentamiento.
- Riesgo de resbalones, contacto químico o exposición de operarios.
- Interacción con agua de extinción o con otros contaminantes presentes en emergencia.

Conviene distinguir tres niveles de contención:

- **Contención primaria:** proporcionada por el propio diseño del sistema.
- **Contención secundaria:** mediante la retención de una posible.
- **Gestión ambiental:** una vez contenido, el líquido debe poder identificarse, bombearse, retirarse, tratarse o gestionarse como residuo según sus características.

La contención de líquidos de refrigeración no debe diseñarse como una medida pasiva aislada. Debe conectarse con:

- Detección de fugas.
- Aviso al sistema de control.
- Alarma local/remota.
- Parada o aislamiento del circuito afectado.
- Cierre manual o automático de válvulas.
- Procedimiento de bombeo o retirada del líquido.
- Inspección de daños eléctricos/corrosivos.
- Reposición del refrigerante.
- Verificación antes de volver al servicio.

Agua de extinción contenida

La contención del agua de extinción tiene como finalidad impedir que el agua utilizada durante la intervención ya sea por sistemas fijos, rociadores, diluvio, tuberías secas, inundación, refrigeración defensiva o aplicación manual por bomberos, arrastre contaminantes fuera de la zona controlada.

La contención del agua de extinción debe coordinarse con la estrategia de extinción. Si se prevé una estrategia basada en agua, el volumen a contener puede ser elevado. Si se prevé combustión controlada, refrigeración defensiva o ausencia de supresión fija, el plan debe seguir contemplando el agua que puedan aplicar los bomberos. También es importante diferenciar las instalaciones por su tamaño: Para instalaciones pequeñas la contención puede considerarse prescindible según experiencia de los servicios de emergencia. Por otro lado, no puede asumirse por defecto que los bomberos adopten medidas específicas de retención de agua de extinción; por tanto, estas medidas no deben dejarse a la improvisación de la intervención y deben estar recogidas en el Plan de Gestión de Incendios.

La contención no termina cuando el agua queda retenida. Debe existir un procedimiento para:

- aislar el drenaje;
- identificar el agua retenida como potencialmente contaminada;
- evitar bombeo automático a redes pluviales o cauces;
- tomar muestras si procede;
- retirar mediante gestor autorizado o sistema de tratamiento;
- limpiar sedimentos, lodos o sólidos arrastrados;
- verificar suelo, drenajes y puntos de vertido;
- documentar el incidente;
- impedir la reposición del servicio hasta cerrar la fase ambiental.

Otros riesgos

Riesgos físicos

Riesgos mecánicos (caída, cortes, etc.)

Las baterías como tales no tienen partes móviles y debido a su uso estacionario tampoco se encuentran en movimiento. Sin embargo, durante su vida útil pueden darse circunstancias especiales de riesgos mecánicos que deben tenerse en cuenta:

Riesgo de caída

Durante las etapas de traslado, instalación, mantenimiento, reparación o desmontaje hay que tener especial precaución a la hora de manipular los módulos debido a su peso. Es importante tener en cuenta que la tendencia actual es la de meter cada vez más energía en un contenedor. Esto implica que el peso de dichos contenedores se incrementa. Así se ha pasado de contenedores de 20 pies de 20.000 kg - 30.000 kg hace unos pocos años a contenedores de 40.000 kg o incluso 70.000 kg en la actualidad. Este incremento supone un reto logístico a nivel de barcos, camiones, grúas, etc, pero también un

incremento del riesgo por roturas de cables, desplazamientos de cargas o cualquier otro incidente asociado al movimiento de cargas muy pesadas. Como referencia, un contenedor estándar de 20 pies está diseñado para una carga bruta de 30.500 kg.

Por otro lado, si un BESS está instalado en una zona sísmica existe la posibilidad de que un temblor provoque la caída de los módulos, especialmente si los apilamientos incluyen un número elevado de los mismos. Para preverlo es necesaria la utilización de sistemas de amarre eficiente que lo eviten.

Riesgos cinéticos

A pesar de que las baterías son sistemas estáticos a su alrededor pueden moverse personas por lo que es necesario que las envolventes no presenten bordes y esquinas afilados que puedan provocar cortes o daños similares. De la misma manera, los sistemas de refrigeración que incorporen ventiladores deben estar protegidos para evitar daños físicos.

Vibraciones

En la única etapa que las baterías estacionarias van a sufrir vibraciones es durante su transporte hasta su lugar de instalación. Sin embargo, dado que todos los módulos van a tener que ser trasladados, es necesario que el riesgo de vibraciones esté contemplado en el diseño de estos.

Riesgo por temperatura no debida al incendio

Las batería de litio-ion no utilizan altas temperaturas ya que las operaciones por debajo de 0 °C reducen la capacidad disponible y por encima de 40 °C incrementan la degradación reduciendo la vida útil de la batería. Por lo tanto, las baterías se van a mantener siempre a temperaturas cercanas a los 25 °C.

Al margen de las elevadas temperaturas generadas en un evento de thermal runaway, es posible que se produzcan puntos de calentamiento por la existencia de sobrecorrientes aunque los diseños de los BESS disponen de una doble protección, por un lado, cubriendo con materiales aislantes los potenciales puntos de peligro y por otro mediante la incorporación de sistemas actuadores que cortan el paso de corriente en caso de un mal funcionamiento.

Riesgos por sobrepresión o explosión no debidos al thermal runaway

Los riesgos asociados a la presión son dos, pero ambos de bajo riesgo.

- Por un lado, en los sistemas auxiliares para la extinción de posibles incendios se suelen utilizar gases extintores a presión. Un fallo en la válvula de estas balas a presión puede generar daños materiales, pero es poco probable que ocurra un daño más importante.
- Por otro lado, la operación a bajas presiones (altitud elevada) puede perjudicar al correcto funcionamiento de las celdas, aunque la normativa exige analizar previamente este tipo de situaciones.

Riesgos eléctricos

Los peligros eléctricos entran dentro de las consideraciones generales de seguridad de un sistema de almacenamiento y se define como “parte activa peligrosa” aquella que, en determinadas condiciones, puede provocar una descarga eléctrica nociva. Por lo tanto, el riesgo eléctrico de las baterías es independiente de la química que se utilice.

- A nivel de celda el riesgo es bajo por el bajo voltaje de estas, pero es necesario tomar precauciones en su manipulación ya que los borneros suelen estar desprotegidos. Manteniendo una distancia o un aislamiento adecuados la manipulación es totalmente segura.
- A nivel de módulo los voltajes son más elevados, aunque habitualmente siguen por debajo del límite de bajo voltaje (75 V). Sin embargo, en general las conexiones están protegidas con conectores.
- A nivel de batería, el voltaje puede alcanzar valores de riesgo (más de 400 V) e incluso los sistemas más modernos operan a 1.500 V lo que los sitúa en el rango de sistemas de alto voltaje.

Todos los riesgos asociados a la manipulación de sistemas de elevados voltajes y corrientes son ya ampliamente conocidos en sistemas industriales eléctricos, como subestaciones eléctricas y similares, por lo que los riesgos y las medidas para controlarlos son también ampliamente conocidos. El análisis de seguridad debe considerar además de los peligros eléctricos habituales, la compatibilidad entre batería, cargador, inversor, BMS, contactores y sistema de gestión de energía. También la separación de circuitos, aislamiento, puesta a tierra, resistencia dieléctrica, impulso, continuidad de tierra y resistencia de aislamiento e inmunidad electromagnética.

La diferencia más importante en el caso de las baterías es que, incluso aunque se abran las protecciones de corriente de un sistema y deje de fluir la corriente eléctrica, las celdas siguen manteniendo la carga y por lo tanto son potenciales creadores de corriente y voltajes peligrosos. Por ello, en estos sistemas se deben redoblar las precauciones relacionadas con el riesgo eléctrico.

El diseño eléctrico debe evitar el peligro de descarga, cortocircuito, sobrecorriente, aislamiento, puesta a tierra, desconexión, parada y antiisla. Las protecciones deben dimensionarse frente al contacto directo —protección básica— y contacto indirecto —protección frente a fallo. Además, deben documentarse con capacidad de corte, tiempos y procedimientos de sustitución o intervención y se debe impedir accesibilidad a partes vivas. Para sistemas de baja tensión, se debe considerar la IEC 60364-4-41 o IEC 60204-1 mientras que para sistemas de alta tensión la IEC 61936-1, IEC TS 61936-2 o IEC 60204-11. Otra normativa a tener en cuenta son la Directiva de baja tensión y normas como EN 61140, IEC 62477-1 y IEC 62909-1.

Para evitar el contacto con partes activas se pueden utilizar envoltentes, IP2X/IPXXB, resguardos, vallas, enclavamientos, señalización y acceso restringido a personal cualificado. Es recomendable utilizar dos niveles de protección entre circuitos de tensión peligrosa y partes accesibles, como, por ejemplo, aislamiento doble o reforzado,

Para reducir riesgos de choque eléctrico se debe utilizar doble aislamiento o aislamiento reforzado, puesta a tierra y red equipotencial de baja impedancia, protección por fallo a tierra y ensayos de rigidez dieléctrica, impulso y resistencia de aislamiento.

El riesgo de arco eléctrico se limita manteniendo los circuitos de polaridad opuesta con una separación física fiable y si no puede garantizar la separación, debe emplearse aislamiento adecuado para las tensiones y temperaturas previstas. Se debe considerar la normativa existente sobre el tema: NFPA 70E, CSA Z462 o IEEE C2.

Otro aspecto importante es limitar la energía remanente en la batería aun cuando se corte el paso de corriente. Esto se consigue mediante fusibles, interruptores, protecciones contra sobrecorriente, dispositivos de desconexión bajo carga y dimensionamiento frente a corrientes de cortocircuito disponibles, incluyendo corrientes aditivas si hay baterías en paralelo.

En sistemas multiparte, las instrucciones deben incluir diagrama unifilar, capacidad de cortocircuito soportada por cada componente y corriente de defecto disponible que cada parte puede aportar a otras partes del ESS.

Por último, hay que tener en cuenta que el agua puede aumentar el riesgo de descarga eléctrica o cortocircuitos, lo que es relevante para el diseño de aislamiento, IP, drenajes y estrategia de intervención.

Riesgos procedentes de campos eléctricos, magnéticos o electromagnéticos

En una batería se manejan corrientes y voltajes eléctricos elevados. Por lo tanto, se generan campos eléctricos y magnéticos.

- Los campos eléctricos generados son de muy baja intensidad (del orden de 0,002 V/m a nivel de BESS) y dado que el límite impuesto por las autoridades para riesgo a las personas es de 5.000 V/m, este riesgo puede considerarse despreciable.
- Los campos magnéticos también son de muy baja intensidad. Si en un sistemas de voltajes muchísimo mayores como una línea de transmisión de alta tensión de 400.000 V no se alcanza el límite de riesgo de 100 mT, en sistemas que como mucho alcanzan los 1.500 V la influencia va a ser también despreciable.

También se suele mencionar el riesgo de las emisiones electromagnéticas y su influencia en la salud humana. A este respecto, las emisiones de radiofrecuencia que pueden encontrarse en un sistema BESS son radiaciones no ionizantes y por lo tanto estas radiaciones no tienen energía suficiente como para ionizar la materia, es decir, no pueden modificar las células humanas.

En cualquier caso, es importante mencionar un riesgo real derivado de las emisiones electromagnéticas: los sistemas electrónicos son sensibles a dichas radiaciones y pueden producirse ruidos en las comunicaciones que provoque fallos o pérdidas de datos que provoquen fallos en los sistemas que contra dicha electrónica (por ejemplo, la BMS de una batería). Por ello es necesario que todos los sistemas que incorporan electrónica estén certificados ante emisiones electromagnéticas externas y no sean responsables de emisiones hacia equipos adyacentes. Todo esto está regulado por la Directiva 2014/30/UE de compatibilidad Electromagnética y se valida conforme a la serie IEC 61000.

En conjunto, el riesgo electromagnético no se formula como un escenario dañino para las personas, sino como un riesgo de mal funcionamiento, pérdida de funciones de seguridad, perturbación del entorno y afección a comunicaciones/control. La mitigación se articula mediante análisis de riesgos, cumplimiento de normas CEM, control de emisiones, inmunidad suficiente, ensayos sobre el sistema o dispositivo final y criterios de fallo seguro.

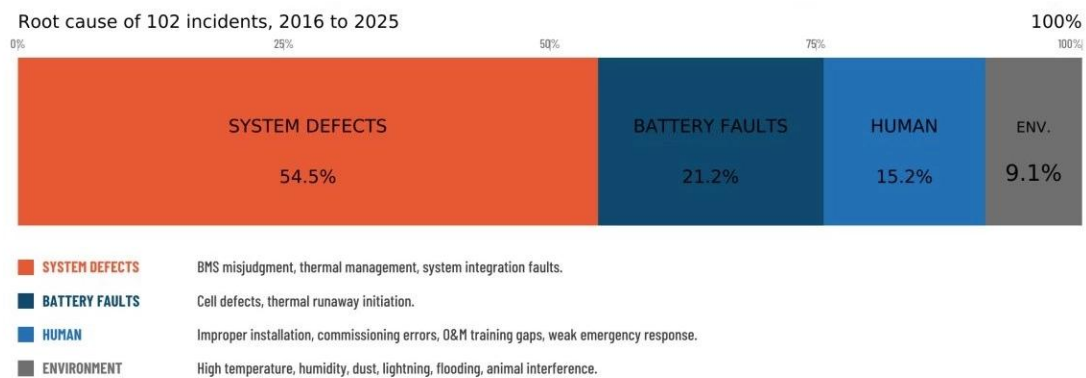
Riesgos funcionales

Fallo de componentes

Los sistemas BESS son sistemas complejos que incluyen dispositivos electrónicos y mecánicos propensos a fallos bien por errores de diseño, por desgaste o por influencias externas. El fallo de estos dispositivos, en algunos casos puede llevar a la aparición de otros riesgos más graves. Entre los más importantes están los fallos de los dispositivos de control como las BMS, ya que son los dispositivos directamente

responsables de la gestión segura del sistema BESS. Este tipo de componentes pueden requerir doble redundancia o la existencia de otros sistemas complementarios que garanticen la seguridad incluso aunque fallen.

En un *review* de 2026 en el que se analizan las causas raíz de 102 incidentes que dieron lugar a incendios globales de BESS entre 2016 y 2025, se constata que la causa principal son los defectos del sistema, en una proporción de más del doble que los fallos de la propia batería, quedando por detrás los fallos humanos y las causas medioambientales.



Multidimensional Characteristic Analysis of Fire Accidents in Electrochemical Energy Storage Stations and Study on Current Fire Safety Status, Qingyu Zhoua, Guowei Zhanga, Guoqing Zhua, Diping Yuana, Applications in Energy and Combustion Science, 2026

El fallo de componentes se trata sobre todo mediante análisis de riesgos, análisis de modos de fallo y ensayos en condición de fallo. Se define el “modo de fallo” como la forma en que se produce un fallo, y se utilizan metodologías como FMEA, FMECA, árbol de fallos y HAZOP como métodos para analizar modos de fallo, sus causas y sus efectos en distintos niveles del sistema y subsistema.

Los componentes más críticos, como el BMS, deben disponer de diagnóstico avanzado, mantenimiento predictivo, compatibilidad sin fisuras con otros componentes, ampliación de ensayos a escenarios operativos a gran escala, mejora del diseño del BMS frente a cortocircuitos propios y respaldo del BMS con SAI cuando sea posible para conservar datos y evaluar la gravedad del fallo.

La certificación individual de componentes no basta por sí sola, porque la integración puede generar riesgos adicionales: componentes del sistema pueden afectarse entre sí, un mal funcionamiento de comunicaciones no debe comprometer la seguridad, y las perturbaciones inducidas por un PCS pueden afectar al EMS, gestión de almacenamiento o dispositivo de almacenamiento. En funcionamiento remoto o sin supervisión, el EESS debe detectar condiciones anormales y pasar automáticamente a un estado seguro. Además, hay que incluir ensayos de mal funcionamiento del sistema de refrigeración, de otros subsistemas auxiliares —por ejemplo, protección contra incendios o UPS—, del subsistema de control y de comunicaciones internas/externas.

Seguridad laboral

La seguridad laboral comprende los riesgos a los que puede quedar expuesto el personal durante la instalación, puesta en marcha, operación, mantenimiento, inspección, intervención ante alarmas, emergencias y retirada del sistema. Aunque se ha incluido dentro de los “riesgos funcionales”, es un riesgo complejo que no se limita al fallo de un equipo concreto, sino que depende de la interacción entre diseño, procedimientos, formación, señalización, acceso seguro, consignación eléctrica, ventilación, detección, alarmas y respuesta ante incidentes.

En un sistema BESS los riesgos laborales principales son la descarga eléctrica, el arco eléctrico, el contacto con partes energizadas, quemaduras por superficies calientes, exposición a gases tóxicos o inflamables, exposición a productos químicos o electrolitos, atrapamientos o golpes durante manipulación de equipos pesados, caída de elementos, condiciones inseguras dentro de contenedores transitables, falta de iluminación, mala ventilación, ausencia de rutas de evacuación claras y actuación no coordinada durante una emergencia. En operación normal, el riesgo se controla mediante utilización de EPI, acceso restringido, procedimientos de operación, señalización, instrucciones de mantenimiento y formación del personal. En operación anormal o emergencia, cobran especial importancia la detección temprana, alarmas, evacuación, zonas de exclusión, información disponible para intervinientes y coordinación con bomberos.

La seguridad laboral debe integrarse desde el diseño del BESS y no limitarse a procedimientos posteriores. El sistema debe permitir operar, mantener, aislar y evacuar de forma segura. Debe definirse qué personal puede acceder a cada zona, qué formación necesita, qué EPI debe utilizar y qué trabajos requieren consignación, bloqueo, herramientas aisladas o procedimientos especiales.

Las instrucciones de operación y mantenimiento deben contemplar condiciones normales, anormales y de emergencia, incluyendo parada segura, desconexión parcial o total, alarmas, presencia de gases, incendio, sobretensión y fallos eléctricos. Los contenedores transitables deben tener especial atención por la posible acumulación de gases, la exposición a arco eléctrico, la necesidad de ventilación, iluminación, rutas de salida y señalización interior.

En emergencia, la protección del personal exige zonas de exclusión, evacuación, información accesible del sistema, coordinación con bomberos y procedimientos que eviten la entrada innecesaria en áreas con riesgo de gases, explosión, electrocución o reignición.

Diseño mecánico seguro de las baterías para los trabajadores

El diseño mecánico seguro debe abordarse en varios niveles:

1. **Diseño de la envolvente y modo de acceso:** cuando el sistema sea *walk-in*, deben resolverse capacidad portante, entrada y salida segura, puertas antiatrapamiento, evacuación, señalización, anchuras libres, ausencia de tropiezos y resbalones, y protección frente a partes peligrosas. Las soluciones *reach-in* reducen el riesgo para personal de mantenimiento y emergencias al permitir acceso desde el exterior sin entrar en la envolvente.
2. **Resistencia mecánica de racks, soportes, asas, envolventes y módulos:** protección frente a peligros mecánicos, peligros en el lugar de trabajo, formación del personal y ensayos de validación mecánica, como resistencia de envolvente a impactos, fuerza estática, contención de partes móviles peligrosas, robustez de asas y medios de montaje, impacto y vibración durante transporte.

Los accesorios, soportes, cajas y componentes situados en salas de baterías deben estar diseñados para impedir el acceso a partes peligrosas o estar protegidos. Además, se deben considerar riesgos externos como fuego, agua, golpes, vibraciones o plagas.

3. **Prevención de atrapamientos, caídas y lesiones musculoesqueléticas:** deben existir condiciones de trabajo adecuadas y prevención de lesiones por posturas, esfuerzo, frecuencia y duración de las tareas.
4. **Mantenimiento seguro:** Las instrucciones deben incluir medidas de seguridad, frecuencia de mantenimiento rutinario, comprobaciones de subsistemas, análisis previo para asegurar que el

mantenimiento puede realizarse con seguridad, aislamiento eléctrico documentado cuando proceda, EPIs adecuados, señalización de precaución en zonas con peligros eléctricos, mecánicos, químicos, térmicos o de energía almacenada, y prácticas de trabajo seguras. Además, debe existir espacio para inspección, mantenimiento y sustitución

Diseño seguro de la instalación para los trabajadores

El diseño ergonómico de la instalación BESS debe entenderse como un conjunto de decisiones de *layout*, acceso, operación y mantenimiento que reduzcan la exposición física del trabajador a peligros eléctricos, térmicos, químicos, mecánicos y de incendio.

El diseño de la instalación debe garantizar la accesibilidad y seguridad del emplazamiento. Para ello debe disponer de accesos despejados (son recomendables al menos 2 accesos), viales capaces de soportar vehículos de bomberos en cualquier condición meteorológica, zonas seguras de evacuación, caminos perimetrales, zonas de paso, y redes de viales sin obstáculos. El espacio entre contenedores debe permitir el trabajo de bomberos, el tendido y movimiento de mangueras. Es recomendable evitar el apilamiento de contenedores.

También debe incorporar medios para impedir el acceso no autorizado, puertas que no permitan que una persona quede atrapada, apertura interior de los cerramientos sin herramienta ni llave, apertura en el sentido de evacuación y señalización de salida. Además, las instalaciones deben estar supervisadas 24/7 mediante videovigilancia y CCTV, especialmente en emplazamientos remotos, y se debe prohibir el trabajo en solitario durante mantenimiento de alta tensión.

Debe existir la posibilidad de desconexión parcial o total para operación, mantenimiento rutinario y reparación de averías. Para sistemas con control remoto o automático, exige que exista un medio para desactivar el control remoto durante inspecciones o mantenimientos, y que estos controles no puedan anular los controles locales de seguridad.

El espacio y las condiciones de trabajo deben adaptarse para prevenir lesiones por **trastornos musculoesqueléticos**, teniendo en cuenta los puestos y posturas de trabajo, la frecuencia de la tarea, el nivel de esfuerzo requerido y su duración. Además, deben evitarse elementos con bordes cortantes que puedan causar lesiones físicas. También debe haber suficiente espacio de trabajo para los sistemas y equipos del EESS que puedan requerir examen, ajuste, revisión o mantenimiento mientras estén energizados, y suficiente espacio alrededor del ESS para permitir una operación y mantenimiento rápidos y seguros.

Los EPI para los trabajadores deben incluir casco, guantes con aislamiento eléctrico, ropa de protección para sistemas de alta tensión y arco eléctrico, botas, protección respiratoria durante incendios y otros equipos pertinentes, especialmente para levantar cargas pesadas de módulos de batería de gran tamaño.

Por otra parte, el ruido debe mantenerse dentro de límites seguros para los trabajadores mediante medidas de protección, señalización y protección auditiva cuando sea necesario. A modo de referencia se considera un límite de una media ponderada de 8 h a 85 dBA. Si se superan esos niveles, deben incluirse advertencias e instrucciones sobre protección auditiva y otras medidas de protección para las personas expuestas.

Vandalismo

El vandalismo incluye intrusión en el recinto, manipulación de puertas o cerraduras, daños en envoltentes, rotura de rejillas de ventilación, manipulación de contactores, daños en cableado, intento

de robo de cobre, sabotaje de sistemas auxiliares, daños a cámaras o sensores, retirada de señalización, acceso a partes bajo tensión o ignición deliberada de materiales próximos al sistema.

El riesgo principal no es únicamente el daño material al contenedor, sino la posibilidad de que una acción externa degrade alguna función de seguridad. Por ejemplo, una puerta forzada puede permitir entrada de agua, polvo o animales; un daño en el HVAC puede llevar a sobretensión; una manipulación del cableado puede provocar cortocircuitos o fallos de aislamiento; una alteración del sistema de detección puede retrasar la alarma; y un daño en ventilación o extracción puede favorecer la acumulación de gases inflamables o tóxicos. Por tanto, el vandalismo también podría considerarse dentro del análisis funcional del BESS, porque puede afectar a BMS, EMS, sistemas de detección, sistemas de extinción, refrigeración, ventilación, comunicaciones, accesos de emergencia y seccionamiento. Sin embargo, debido a la intencionalidad de este tipo de acciones, es necesario hacer un análisis específico de cara a adoptar las medidas necesarias para evitarlo (o al menos para mitigar sus efectos).

Por otro lado, el diseño de seguridad antivandálica no debe impedir la respuesta de emergencia. El vallado, las cerraduras y el control de accesos deben coordinarse con bomberos y servicios de emergencia, garantizando acceso seguro mediante llaves, códigos o procedimientos acordados.

Medidas antivandálicas

Las medidas antivandálicas incluyen el control de acceso, protección frente a acceso no autorizado, vallado, vigilancia, señalización, resistencia mecánica de envolventes, protección frente a impactos, cerraduras, tornillería antimanipulación, inspección de vallas, puertas y cámaras, y planes de emergencia ante incidentes de seguridad.

- **Control de acceso y restricción a personal autorizado**

El diseño del BESS debe garantizar que las personas no autorizadas, incluido el público general, no puedan acceder a partes o controles peligrosos del sistema. Las zonas restringidas deben estar señalizadas con advertencias que prohíban la entrada a personas no cualificadas. Para recintos transitables, las puertas deben poder abrirse desde el interior mediante barras antipánico o dispositivos equivalentes, pero deben disponer de cerraduras que impidan el acceso de personas no cualificadas.

- **Vallado, vigilancia y control perimetral**

El vallado que impide el acceso no autorizado a los emplazamientos BESS debe mantener el flujo de aire y la eficiencia de evacuación de gases. Ejemplos de este vallado son las barreras de seguridad, paisajismo, palizadas de acero, mallas soldadas de acero y, cuando proceda, vallas acústicas.

Para emplazamientos remotos se recomienda sistemas con vigilancia CCTV 24/7, y que los materiales de vallado y las distancias se adapten al tamaño de la instalación y al perfil de riesgo.

Es importante evaluar las necesidades de vallado teniendo en cuenta normativa local, factores ambientales, zonas de alta criminalidad, presencia de fauna salvaje y su integración con sistemas de vigilancia como CCTV 24 horas y detectores de movimiento.

Todos estos elementos (vallas, puertas y cámaras de seguridad) deben inspeccionarse para detectar daños, y cualquier daño debe repararse o sustituirse inmediatamente.

- **Protección frente a manipulación, sabotaje o daño físico**

Aunque la utilización de sensores y alarmas se diseña para el control de la seguridad frente al incidentes, también pueden ser aplicables al diseño antivandálico: impedir que una persona no autorizada abra partes críticas, manipule componentes o genere fugas, derrames o condiciones peligrosas.

- **Señalización e información disuasoria**

Debe incluirse señalización en puertas de salas o áreas con ESS, contenedores ESS exteriores y ubicaciones en ESS exteriores. La señalización debe indicar “Energy Storage Systems”, tipo de tecnología, peligros especiales, tipo de sistema de supresión y contacto de emergencia.

La señalización debe ser legibles de noche a 30 m o desde el límite del emplazamiento, lo que tiene utilidad tanto para emergencias como para disuasión e identificación del riesgo.

- **Seguridad física y organizativa**

Además de para los ataques físicos la instalación debe estar preparada para los ataques informáticos o ciberataques. Se exigen medidas de control de acceso para proteger la instalación y sus componentes informáticos contra accesos no autorizados, y medidas que minimicen los daños derivados de accesos comprometidos, como concesión restrictiva de autorizaciones, accesos y autenticación de dos factores. También se deben implementar medidas de seguridad física para proteger los componentes informáticos, tanto frente a atacantes como frente a efectos ambientales.

- **Integración con emergencias y mantenimiento**

Las medidas antivandálicas no deben impedir la respuesta de emergencia. Deben restringir el acceso de personal no autorizado, pero permitir que bomberos y personal cualificado accedan de forma rápida y segura cuando sea necesario.

Ciberseguridad

Aunque, como en el caso anterior, la ciberseguridad puede considerarse como un riesgo funcional, también debe tener un tratamiento destacado en sistemas que dependen de comunicaciones, software, monitorización remota, actualizaciones, alarmas y señales de mando.

El riesgo principal es que una acción no autorizada, un *malware*, una actualización comprometida, una mala configuración o una pérdida de comunicaciones modifiquen el comportamiento seguro del sistema. Los escenarios más relevantes son: envío de consignas de carga/descarga inseguras, alteración de límites de operación, bloqueo del BMS/EMS, pérdida de monitorización remota, datos falsos de temperatura o tensión, desconexión de alarmas, inhibición de sistemas auxiliares, pérdida de comunicación con el operador, acceso remoto no autorizado o actualización de software que afecte a funciones críticas.

Deben protegerse especialmente BMS, EMS, PCS, SCADA, comunicaciones con operador, acceso remoto de mantenimiento, actualizaciones de software, servidores de monitorización, pasarelas de comunicaciones, *routers*, PLC, sensores y sistemas de alarma.

Las medidas mínimas deben incluir segmentación de red, control de accesos, autenticación fuerte, gestión de usuarios y privilegios, registro de eventos, supervisión de actividad, gestión de parches, copias

de seguridad, protección frente a *malware*, comunicaciones cifradas cuando proceda, bloqueo de accesos no autorizados y procedimientos para actualización segura.

Todas estas medidas deben estar validadas por el cumplimiento de la normativa europea de ciberseguridad, Directiva UE 2022/2555 (NIS2) y la obtención del Certificado del Esquema Nacional de Seguridad y certificado de cumplimiento de la norma ISO 27001.

Riesgos medioambientales

En situaciones normales de operación hay condiciones medioambientales que pueden acelerar la degradación y, por consiguiente, el fallo de distintos componentes. De la misma manera hay elementos externos que pueden generar riesgos a los sistemas de almacenamiento como los ambientes corrosivos en los sistemas metálicos y daños por la sal marina. En casos anormales pueden producirse agresiones externas como es el caso de inundaciones o terremotos que también deben considerarse.

Humedad

Las baterías tienen un elevado número de componentes eléctricos por lo que el agua puede generar riesgos de consideración. El problema del agua no se limita a la humedad relativa del aire, sino que incluye condensación, lluvia, salpicaduras, entrada de agua por juntas o ventilaciones, acumulación de agua en el interior del contenedor, inundación parcial y, en casos extremos, inmersión. Sus efectos principales son la degradación del aislamiento, formación de corrientes de fuga, cortocircuitos, fallos de puesta a tierra, corrosión, deterioro de conectores, pérdida de estanqueidad, fallo de sensores, fallo del HVAC y posible afectación de los sistemas de protección.

La humedad debe evaluarse tanto en operación normal como en condiciones anormales. En operación normal, el objetivo es evitar condensación, entrada de lluvia y degradación progresiva del aislamiento. En condiciones anormales, deben contemplarse pérdida de estanqueidad, fallo de HVAC, obstrucción de drenajes, rotura de juntas, inundación, entrada de agua durante extinción o reacción de materiales sensibles al agua.

La protección frente al agua se lleva a cabo preferentemente mediante el diseño de la envolvente y se debe exigir el cumplimiento de clasificación IP adecuada para la instalación prevista cuando puedan estar sometidas a polvo, humedad, agua o lluvia. Lógicamente, esta IP será diferente en función de si es sistema es indoor u outdoor. En cualquier caso, deben revisarse especialmente puertas, juntas, pasamuros, ventilaciones, filtros, drenajes, bandejas de cable, conectores, entradas de HVAC, sensores exteriores, armarios auxiliares y cajas de conexión.

El diseño debe evitar acumulaciones internas de agua. Para ello deben preverse drenajes, pendientes, sellados, protección de entradas de aire, control de condensación, calefactores anticondensación si procede, sensores de humedad/agua, alarmas y procedimientos de parada o revisión si se detecta agua en zonas no previstas.

En emplazamientos inundables, la humedad pasa a ser un riesgo de inmersión. En ese caso debe justificarse la cota de instalación, drenaje, achique, elevación sobre plataforma, protección de canalizaciones, accesos de emergencia y criterio de desconexión segura.

Corrosión marina

La corrosión marina se produce principalmente por la exposición a niebla salina, humedad elevada, aerosoles con cloruros y ambientes costeros. No es únicamente un problema de durabilidad de la

envolvente, sino que debe analizarse como un riesgo de seguridad, porque puede degradar elementos que cumplen funciones críticas: cerramientos, bisagras, cerraduras, tornillería, anclajes, bandejas de cable, conectores, barras de tierra, terminales, ventilaciones, intercambiadores del HVAC, sensores, pasamuros, protecciones eléctricas y sistemas de control.

Entre los efectos más relevantes de la corrosión están la pérdida de estanqueidad, el deterioro del aislamiento, la reducción de distancias de arco eléctrico, la pérdida de continuidad de puesta a tierra, el aumento de resistencia de contacto, los fallos de fijaciones mecánicas, la degradación del HVAC y pérdida de integridad de la envolvente. Por tanto, puede terminar contribuyendo a riesgos eléctricos, térmicos, mecánicos y de incendio.

La corrosión marina es especialmente relevante cuando el BESS se instale en costa, puerto, muelle, buque o zona con atmósfera salina importante. En estos casos la corrosión marina debe incorporarse al análisis de riesgos del sistema.

Agresiones externas (terremotos, inundaciones, incendios)

Las agresiones externas son eventos procedentes del entorno o de actividades naturales próximas que pueden afectar al BESS e incluyen terremotos, inundaciones con agua dulce o salada, incendios externos, rayos, viento extremo, nieve o deslizamientos de tierra. También se consideran agresiones externas las provocadas de manera no intencionada por acciones humanas como por ejemplo los impactos de vehículos.

En un BESS, un terremoto puede provocar desplazamiento de contenedores, fallo de anclajes, deformación de racks, rotura de canalizaciones, pérdida de conexión a tierra, daños en cables de potencia/control, fallo de HVAC, apertura de puertas o pérdida de estanqueidad. También puede producir fallos latentes que no generen un problema inmediato, pero sí condiciones inseguras en operación posterior. Por eso, en el caso de un incidente de este tipo, la evaluación no debe limitarse a la estabilidad civil del contenedor, sino incluir continuidad eléctrica, aislamiento, puesta a tierra, fijación de módulos/racks, integridad de canalizaciones, armarios auxiliares, PCS, transformador, sistemas de detección y sistemas de extinción.

La inundación puede afectar al BESS por entrada directa de agua, anegamiento de canalizaciones, flotación o desplazamiento de equipos, cortocircuitos, degradación del aislamiento, corrosión, pérdida de comunicaciones, fallo de sensores, contaminación de aguas y generación de residuos peligrosos.

El incendio externo incluye incendios de vegetación, edificios próximos, vehículos, transformadores, almacenes, equipos eléctricos o infraestructuras cercanas. Este riesgo puede calentar la envolvente del BESS, afectar al HVAC, dañar cableado, provocar fallo de protecciones, iniciar propagación hacia el interior o comprometer el acceso de bomberos.

Las agresiones externas son poco frecuentes y a veces difícilmente previsibles, pero deben incorporarse al análisis de riesgos del emplazamiento. No basta con validar el BESS en condiciones normales de operación; debe justificarse que el diseño, la ubicación y las medidas auxiliares permiten mantener un nivel de seguridad aceptable ante eventos externos razonablemente previsibles.

Para terremotos, deben comprobarse la cimentación, anclajes, estabilidad del contenedor, fijación de racks, soportes de baterías, canalizaciones, bandejas, armarios, PCS, transformador, HVAC, sistemas de extinción, detección, alarmas, continuidad de tierra y cableado de control/potencia. IEC 62933-5-2 identifica específicamente el **impacto de terremoto y vibración** dentro de los riesgos mecánicos y lo contempla como ensayo SAT cuando proceda.

Para inundaciones, debe evitarse la ubicación en zonas inundables. Si existe riesgo residual, deben justificarse cota de implantación, plataformas elevadas, drenaje, achique, protección de canalizaciones, protección de cuadros, estanqueidad, sensores de agua, procedimiento de desconexión segura y plan de recuperación. BEQUINOR recomienda evitar zonas inundables y, cuando exista riesgo, disponer plataformas elevadas y drenaje o achique.

Para incendios externos, deben considerarse separaciones, control de vegetación, franjas cortafuegos, distancia a edificios o combustibles, orientación de puertas y venteos, protección frente a radiación térmica, accesos de bomberos, disponibilidad de agua, detección exterior, cámaras térmicas si procede y estrategia de intervención. NFCC exige que los planes contemplen incendios de edificio, infraestructura, vehículo, *grassfire* y *bushfire*.

Las medidas frente a agresiones externas deben coordinarse con el plan de emergencia. Un evento externo puede producir simultáneamente pérdida de red, pérdida de comunicaciones, daños en accesos, presencia de agua, incendio en vegetación y fallo de sistemas auxiliares. Por tanto, debe existir criterio de parada segura, aislamiento, inspección postevento y autorización de reenergización.

Diseño frente agresiones externas

Las agresiones externas son poco frecuentes y a veces difícilmente previsibles, pero deben ser tenidas en cuenta en el diseño de la instalación. Estas agresiones se consideran no intencionadas (las intencionadas se analizan en el punto siguiente) y pueden ser naturales (terremotos, inundaciones con agua dulce o salada, incendios externos, rayos, viento extremo o deslizamientos de tierra) o provocadas por humanos (por ejemplo, los impactos de vehículos).

Para terremotos, vientos extremos o deslizamientos de tierra, deben comprobarse la cimentación, anclajes, estabilidad del contenedor, fijación de racks, soportes de baterías, canalizaciones, bandejas, armarios, PCS, transformador, HVAC, sistemas de extinción, detección, alarmas, continuidad de tierra y cableado de control/potencia.

Para inundaciones, debe evitarse la ubicación en zonas inundables. Si existe riesgo residual, deben justificarse cota de implantación, plataformas elevadas, drenaje, achique, protección de canalizaciones, protección de cuadros, estanqueidad, sensores de agua, procedimiento de desconexión segura y plan de recuperación.

Para incendios externos, deben considerarse separaciones, control de vegetación, franjas cortafuegos y distancia a edificios o combustibles exteriores. En resumen, analizar el riesgo de propagación en ambos sentidos, no solo desde la planta hacia el exterior.

Respecto al diseño frente a agresiones no naturales (y no intencionadas) destacan los sistemas de protección frente a impactos de vehículos cuando pueda existir acceso de estos, por ejemplo, en garajes o cerca de carreteras.

Ruido

Los sistemas BESS se basan en las baterías, que no incluyen partes móviles y por lo tanto no generan ruido. Sin embargo, la necesidad de mantener la temperatura en un rango estrecho óptimo lleva a utilizar sistemas de control de temperatura que utilizan partes móviles como ventiladores, o líquidos refrigerantes que son movidos por bombas y refrigerados por *chillers*. Todos estos sistemas auxiliares, especialmente en momentos de altas temperaturas pueden llegar a afectar a trabajadores, mantenedores, población próxima, fauna y aceptación social del proyecto, por lo que deberán ser analizados y mitigados hasta quedar por debajo de los límites impuestos por la normativa local.

Por otro lado, un incremento anómalo del ruido puede ser síntoma de fallo mecánico, desgaste de ventiladores, desequilibrio de equipos rotativos, mal funcionamiento del HVAC, vibraciones en transformadores o funcionamiento fuera de condiciones normales por lo que debe considerarse como una señal temprana de alarma de mal funcionamiento.

Las principales fuentes de ruido en un BESS son los sistemas de climatización y refrigeración, los ventiladores de los contenedores, los compresores, bombas, sistemas HVAC, inversores/PCS, transformadores, ventiladores de los armarios de electrónica de potencia y, en algunos casos, sistemas auxiliares de ventilación o extracción. Entre ellos, el HVAC suele ser una de las fuentes más relevantes, especialmente en sistemas de alta potencia o mal mantenidos. Además, el nivel de ruido puede variar con el modo de operación. Por ello, el ruido no debe evaluarse solo en reposo, sino también en condiciones representativas de operación a potencia elevada, temperatura exterior alta y funcionamiento simultáneo de PCS, transformador y refrigeración.

Para los trabajadores de la planta, el ruido es un factor de riesgo ya que el ruido excesivo continuo que pueda dañar la audición de personas próximas si no utilizan protección auditiva. Por tanto, desde el punto de vista de seguridad laboral, el ruido debe evaluarse cuando el personal pueda permanecer cerca de equipos ruidosos durante operación, mantenimiento, inspecciones o emergencias.

Impacto medioambiental

El impacto medioambiental de un BESS debe analizarse en dos situaciones distintas: funcionamiento normal y condiciones anormales o de emergencia. En funcionamiento normal, el impacto suele estar asociado a ocupación del suelo, integración paisajística, ruido, iluminación, escorrentías, afección a vegetación, drenajes, mantenimiento y gestión de residuos. En condiciones anormales, el impacto puede ser mucho más relevante, especialmente por incendio, gases, humos, aguas de extinción contaminadas, vertidos de electrolito, refrigerante, aceite de transformador, arrastre de contaminantes al suelo o cursos de agua y gestión de baterías dañadas.

Respecto a los riesgos en condiciones normales se deben tener en cuenta que los BESS, especialmente en suelo no urbanizable o espacios no alterados, pueden afectar al suelo, vegetación, paisaje, conectividad ecológica y biodiversidad. Para ello deben analizarse la proximidad a cauces, masas de agua, acuíferos, espacios protegidos, hábitats sensibles, zonas forestales, usos colindantes, dirección de vientos dominantes, pendientes del terreno, drenajes y posibilidad de arrastre de contaminantes.

En el sentido inverso, la fauna y la flora deben considerarse fuentes externas de daño para el BESS, no solamente receptores de sus posibles impactos.

Los riesgos identificados pueden agruparse en tres grandes mecanismos:

1. Intrusión de animales, capaz de originar cortocircuitos o la pérdida del control térmico.
2. Crecimiento o presencia de vegetación combustible, que puede actuar como carga de fuego y como puente para transmitir un incendio hasta el BESS o entre unidades.
3. Interferencia física con zonas de separación, accesos y equipos, reduciendo la eficacia de las distancias de seguridad, dificultando la inspección o permitiendo que una agresión externa evolucione sin detectarse.

Diseño para minimizar afecciones al medioambiente

Los elementos vulnerables afectados por un posible incidente en el entorno natural incluyen aguas subterráneas, ríos, suelo y atmósfera y se ven influenciados por las características del terreno, dirección del viento, niveles sísmicos, rayos y altitud. El Estudio de Impacto Ambiental debe incluir la evaluación de consecuencias ambientales sobre suelo, cursos de agua, calidad del aire, biodiversidad e influencia forestal analizando posibles vertidos y estudios de dispersión considerando vientos dominantes.

Las medidas de mitigación a nivel de instalación son las siguientes:

- **Contención de líquidos, refrigerantes, aceites y electrolitos**

La protección básica frente a sustancias peligrosas es la **contención del material**. El primer nivel de contención se lleva a cabo en el propio producto, pero la instalación debe estar preparada para la gestión de dichos derrames una vez producidos.

En salas, edificios o áreas protegidas con sistemas de protección contra incendios basados en agua, la capacidad del sistema de contención debe incluir la descarga esperada del sistema durante 10 minutos.

En el caso de que la estrategia de extinción del incendio sea la de extinguirlo con agua es necesario que el diseño del emplazamiento considere la gestión de escorrentías mediante drenajes, interceptores, lagunas confinadas u otros sistemas. También indica que deben proporcionarse medidas de protección ambiental adecuadas, incluyendo sistemas para contener y gestionar el agua de escorrentía con la capacidad calculada para los caudales de agua previstos. Para emplazamientos en zonas inundables, deben detallarse medidas de protección o mitigación frente a inundaciones.

- **Aire, humo, gases y contaminación atmosférica**

Los diseños para minimizar el impacto medioambiental de la contaminación atmosférica asociada a los gases de un thermal runaway son los mismos que se han definido para el impacto sobre las personas.

- **Protección de hábitats, biodiversidad, vegetación y zonas sensibles**

El diseño de la planta de almacenamiento no debe incrementar el riesgo para hábitats o especies sensibles del entorno. También hay que considerar la biodiversidad, influencia forestal y proximidad a población en el Estudio de Impacto Ambiental.

- **Ruido ambiental**

La contaminación acústica puede afectar tanto a la comunidad humana como al medioambiente, ya que la fauna silvestre cercana a emplazamientos BESS puede experimentar cambios en patrones de sueño, comportamiento y otras perturbaciones por niveles excesivos de ruido, especialmente en zonas ecológicamente sensibles o protegidas. Para limitarla pueden implementarse medidas de mitigación como barreras acústicas, equipos más silenciosos y diseños optimizados.

Residuos, equipos dañados y recuperación postincidente

Tras un incendio u otro evento que haya dañado el BESS, y especialmente cuando exista posibilidad de reignición, el propietario, agente o arrendatario debe enviar inmediatamente personal autorizado para mitigar el peligro o retirar el equipo dañado a una ubicación segura.

Así mismo el operador debe desarrollar un plan de recuperación postincidente que aborde la posibilidad de reignición, la desenergización del sistema y la retirada y eliminación de equipos dañados. Dicho plan debe contemplar que las baterías que han sufrido cualquier accidente deben reciclarse y procesarse de forma responsable para evitar daños medioambientales, analizándose los riesgos de vertidos y emisiones de gases tóxicos desde el punto de vista de su efecto sobre contaminación de suelo, agua y aire.

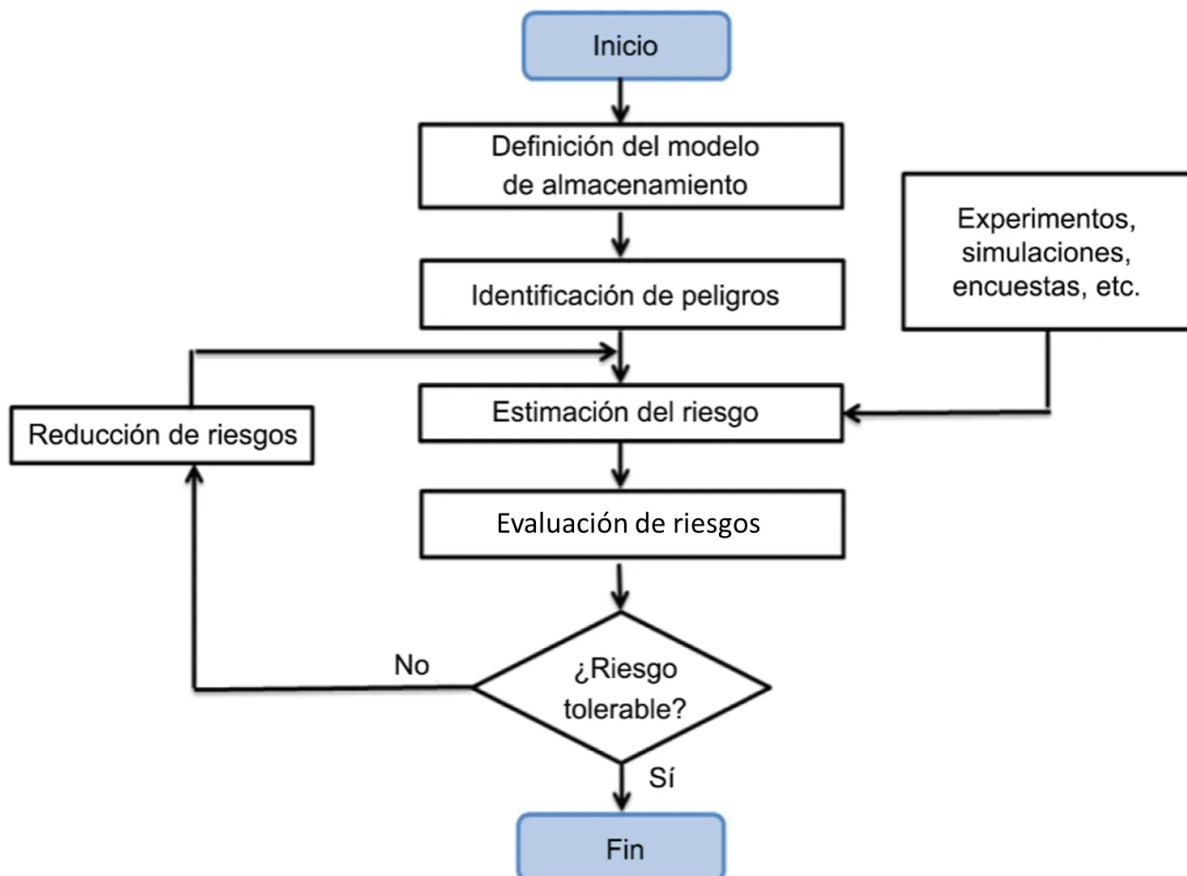
Evaluación de riesgos

A nivel de componente repetitivo (celda, módulo y en ocasiones sistema) existen ensayos tipo que permiten certificar las medidas de diseño y protección para garantizar la seguridad intrínseca de dichos productos. Sin embargo, a nivel de instalación (y de sistema si éste se sale del estándar y se hace a medida) no es posible un certificado según norma ya que la variabilidad es muy grande. En estos casos es necesario llevar a cabo una evaluación de riesgos que analice cada proyecto en particular.

La evaluación de riesgos tiene tres partes:

1. definición de la unidad de análisis o del modelo de almacenamiento)
2. análisis o identificación de los riesgos y las medidas de mitigación implementadas
3. Estimación y evaluación de los riesgos

Cada riesgo identificado que afecta a la unidad de análisis se categoriza por tanto en riesgo tolerable o no según criterios predefinidos (normas oficiales o estándares internos de seguridad). Por ejemplo, muchas normas internacionales exigen que la probabilidad de explosión de gas en un BESS sea “extremadamente baja”, y que en caso de incendio la propagación fuera del contenedor sea prácticamente nula. Si la evaluación inicial muestra riesgos no aceptables, se itera implementando medidas de reducción hasta lograr niveles tolerables, y se documentan las decisiones. Este ciclo iterativo identificar–analizar–evaluar (y si es necesario mitigar) es continuo, actualizándose ante cualquier cambio (nueva configuración de baterías, ampliación de la planta, incidencias operativas relevantes, etc.). La siguiente figura ilustra este proceso iterativo.



Definición de la unidad de análisis (UA)

El primer paso para la evaluación de los riesgos es definir la unidad de análisis sobre la que se va a realizar dicho estudio. El resultado final del análisis de riesgo debe recoger todos los niveles de la cadena de valor, desde la celda hasta la instalación final, aunque los primeros eslabones pueden quedar cubiertos con los certificados de las normas correspondientes. En cualquier caso, los parámetros que deben definirse para establecer la unidad de análisis son los siguientes:

- Cadena de valor
 - Definición del nivel de la unidad de análisis en la cadena de valor
 - Identificación de los proveedores de niveles precedentes
- Tecnología
 - Identificación de la química o químicas utilizadas
 - Identificación de otros materiales significativos para la seguridad
- Descripción de la unidad de análisis
 - Componentes, estructura, características eléctricas, mecánicas, de operación, de comunicación, etc
 - Información sobre las características de los componentes principales

- Etapas del proyecto
 - Identificación de las etapas implicadas en la unidad de análisis
 - Establecimiento de responsabilidad en los puntos frontera
- Descripción de los parámetros de operación
 - *Planning* del proyecto
 - Modos de operación
 - Personal implicado
 - Planes de mantenimiento
- Descripción del entorno de la unidad de análisis
 - Ubicación
 - Elementos vulnerables que podrían verse afectados (personas cercanas a la instalación, otros equipos, propiedades y estructuras, entorno natural)
 - Accesos
- Uso previsto de la unidad de análisis

Análisis de los riesgos aplicados a la UA

La segunda fase de la evaluación de riesgos consiste en identificar y analizar los riesgos para la unidad de análisis definida. Para ello se deberán repasar todos los riesgos descritos a lo largo del presente documento, así como las medidas de mitigación propuestas. En cada caso se analizará si el riesgo indicado afecta a la unidad de análisis y si es así, cuáles son las medidas de mitigación utilizadas, utilizando como referencia las indicadas en el documento:

- riesgos de incendio
- químicos
 - gases
 - líquidos
- otros riesgos
 - físicos
 - eléctricos
 - funcionales
 - medioambientales

En este análisis es crítico tener en cuenta si la instalación es indoor u outdoor. Dependiendo de uno u otro caso deben tenerse en cuenta las siguientes indicaciones:

Consideraciones de diseño

De forma general, en las instalaciones indoor hay prestar especial atención a la compartimentación, ventilación, evacuación, acumulación de gases, protección contra explosión, detección, extinción, control de accesos y separación respecto a otros usos del edificio. En las instalaciones outdoor, en cambio, se desplaza el peso del diseño hacia la separación espacial, accesos de emergencia, control de vegetación y combustibles, exposición ambiental, resistencia de la envolvente, protección frente a lluvia, humedad, corrosión, viento, impacto, incendio externo, inundación y gestión de escorrentías.

La ubicación afecta a la evaluación de riesgos y es necesario identificar los elementos vulnerables del entorno que podrían verse afectados. Eso implica diferencias importantes dependiendo de si la instalación es exterior o interior.

- En sistemas outdoor, son importantes las distancias a edificios, límites de parcela, vegetación, viales, depósitos de agua, cursos de agua, zonas inundables, dirección del viento y accesos de emergencia.
- En sistemas indoor, los elementos vulnerables suelen incluir el propio edificio, otros usos del edificio, ocupantes, vías de evacuación y salas colindantes. Además, en el caso indoor hay que distinguir entre edificios de uso dedicado y edificios de uso no dedicado:
 - Los edificios dedicados a ESS solo deben usarse para almacenamiento de energía, generación u operaciones eléctricas relacionadas con la red; la ocupación de las zonas con ESS queda limitada a personal que opera, mantiene, revisa, ensaya o repara el sistema; no se permiten otros usos; y las áreas incidentales de administración o apoyo deben quedar limitadas y separadas mediante barreras y elementos horizontales con resistencia al fuego de 2 horas, además de disponer de salida hacia vía pública sin atravesar áreas con ESS.
 - En edificios no dedicados, el riesgo es más complejo porque el ESS comparte edificio con otros usos. Por ello, se analizan, entre otros aspectos, tamaño y separación, límites de energía almacenada, elevación, separación frente a otras áreas, detección de humo e incendio, control y supresión de incendios, suministro de agua, señalización, centros de trabajo ocupados y protección específica por tecnología.

Las instalaciones indoor y los recintos *walk-in* de las instalaciones outdoor comparten algunos requisitos como son: disponibilidad de espacio de trabajo suficiente para equipos que puedan requerir examen, ajuste, revisión o mantenimiento mientras estén energizados; entradas de tamaño suficiente para acceso y salida; puertas de evacuación que abran en la dirección de salida y cuenten con barras antipánico u otros dispositivos de apertura por simple presión; cerraduras para impedir el acceso de personas no cualificadas; señalización que restrinja la entrada a personal autorizado; zonas de acceso diseñadas para evitar tropiezos, resbalones o caídas; y ventilación adecuada para las personas que trabajen en un EESS instalado en interiores o dentro de un recinto autónomo al que puedan entrar completamente.

Desde el punto de vista de incendio y explosión, las instalaciones indoor no son preferibles para BESS de gran escala, porque el espacio más confinado puede limitar la dispersión o dilución de gases inflamables y aumentar la probabilidad de alcanzar el rango inflamable. Además, las instalaciones interiores pueden contener más fuentes potenciales de ignición, como equipos eléctricos, iluminación o calefacción. Las soluciones indoor, sin embargo, pueden mantener los elementos con riesgo de propagación más separados.

Al contrario de los sistemas indoor, las instalaciones exteriores se ubican fuera de un edificio y pueden estar sometidos a exposiciones ambientales como lluvia y viento. Posteriormente se muestran las características que deben tener las envolventes de dichos contenedores para ser resistentes a los elementos.

La gestión de los gases debidos a un thermal runaway también presenta diferencias en instalaciones indoor u outdoor. En el apartado dedicado a este tema se muestran las diferencias entre ambos tipos de instalaciones.

En resumen, no hay una regla única de “indoor prohibido” u “outdoor obligatorio”, pero sí se observa una tendencia clara: para BESS de gran escala, la instalación outdoor suele ofrecer ventajas de seguridad por permitir mayor separación, mejor acceso de emergencia, menor exposición de ocupantes y mayor capacidad de orientar venteos o descargas hacia zonas seguras. Sin embargo, exige envolventes diseñadas para intemperie, IP adecuado, resistencia UV, corrosión, humedad, lluvia, viento, impacto, control de vegetación, protección frente a incendio externo, escorrentías e inundación.

La instalación indoor puede ser aceptable, especialmente para sistemas más pequeños, pero debe diseñarse como una sala, edificio dedicado o recinto con control estricto de ocupación, compartimentación, ventilación, detección, supresión, control de explosión, evacuación, señalización, acceso autorizado y separación frente a otros usos.

Actuaciones indoor vs actuaciones outdoor

La diferencia esencial entre indoor y outdoor no es solo constructiva, sino también operativa, especialmente en situaciones de emergencia:

- En indoor, la prioridad es proteger a las personas, evitar la entrada en espacios confinados, controlar acumulaciones de gases y limitar la propagación al edificio.
- En outdoor, la prioridad es mantener distancias, evitar propagación a contenedores o exposiciones próximas, asegurar accesos y agua para bomberos, y gestionar la afección al entorno.

En instalaciones interiores, el riesgo se ve agravado por el confinamiento. Las instalaciones indoor no son recomendables para BESS a gran escala porque el espacio confinado puede limitar la dispersión o dilución de gases inflamables y aumentar la probabilidad de alcanzar el rango de inflamabilidad. Además, en interiores puede haber más fuentes de ignición, como equipos eléctricos, iluminación o calefacción. Por otro lado, las opciones de escape o rescate son más difíciles en espacios cerrados.

Por lo tanto, las actuaciones indoor deben orientarse a:

4. Evacuación temprana y restricción de acceso.

Incorporar un sistema automático de detección dentro de un edificio para aumentar la protección de las personas dado que permite avisar tempranamente a quienes estén dentro y fuera de la instalación, facilitando evacuación o advertencia de no acceder a la zona peligrosa.

5. No acceder al recinto o contenedor durante un evento activo de thermal runaway salvo que el procedimiento y el diseño lo permitan.

Los bomberos no deben abrir el recinto del BESS para combatir activamente un desbordamiento térmico una vez iniciado dentro de una celda. Esta advertencia es especialmente relevante en

indoor, donde la apertura de puertas o recintos puede modificar la ventilación, introducir oxígeno y agravar el escenario

6. Controlar ventilación, extracción y acumulación de gases.

Las medidas frente a gases deben tener en cuenta el diseño del edificio en instalaciones interiores. La fase de thermal runaway incluye venteo/emisión de gases inflamables y/o tóxicos, y que, si no se actúa, puede formarse una mezcla explosiva gas-aire.

7. Limitar la propagación al edificio mediante compartimentación y resistencia al fuego.

Las salas o espacios con ESS deben estar separados de otras áreas del edificio mediante barreras cortafuego y elementos horizontales con resistencia mínima de 2 horas. Además, para edificios de uso dedicado, limita la ocupación a personal de operación, mantenimiento, servicio, prueba y reparación, y no permite otros usos en las áreas con ESS

8. Disponer de información operativa para bomberos.

El plan de gestión de riesgos debe incluir información sobre riesgos del BESS, sistemas de seguridad, proceso de activación/disparo automático, ubicaciones de datos del BMS, procedimientos de apagado/aislamiento y contactos técnicos. También recomienda familiarización previa del cuerpo de bomberos con la instalación, accesos, distribución, riesgos específicos y sistemas de detección/extinción.

9. Usar sistemas fijos o integrados cuando el diseño lo permita.

La inyección directa de agua como método viable para evitar propagación dentro de un contenedor es aceptable cuando el diseño lo permite, por ejemplo, mediante tuberías secas, pero no como intervención manual abriendo el recinto.

En instalaciones exteriores, el riesgo principal cambia: hay mejor dispersión de gases que en un recinto cerrado, pero aumenta la importancia de las distancias, la exposición de terceros, la propagación entre contenedores, la vegetación, el acceso de emergencias y el suministro de agua.

Las instalaciones exteriores, especialmente en ubicaciones remotas, son la opción recomendada para BESS a gran escala porque es más sencillo proporcionar separación suficiente y minimizar peligros eliminando exposiciones próximas. Los eventos de incendio o explosión en exterior pueden implicar menor riesgo para personas y entorno debido a la distancia y aislamiento.

En las instalaciones outdoor se puede diferenciar entre ubicaciones remotas y ubicaciones próximas a exposiciones. Se considera remotas aquellas situadas a más de 30 m de edificios, linderos edificables, vías públicas, materiales combustibles almacenados, materiales peligrosos, almacenamiento en altura y otros riesgos de exposición no asociados a infraestructura eléctrica. Las demás se consideran ubicaciones próximas a exposiciones.

Las actuaciones outdoor deben orientarse a:

1. Aplicar estrategia defensiva para evitar propagación.

En la mayoría de los casos, la intervención inicial de bomberos se centrará en medidas defensivas para evitar la propagación del incendio a contenedores adyacentes.

2. Refrigeración de límites y contenedores próximos.

Los suministros de hidrantes para refrigeración deben estar próximos a los contenedores BESS, pero considerando el acceso seguro en caso de incendio, y que sean capaces de proporcionar la cantidad de agua necesaria. También debe conocerse el grado IP de las unidades para entender los riesgos asociados a la refrigeración exterior.

3. Mantener distancias a exposiciones.

Debe establecerse una separación mínima respecto a linderos, vías públicas, edificios, materiales combustibles, materiales peligrosos, almacenamiento en altura y otros riesgos. Se debe implementar un cortafuegos como un espacio libre de combustible que reduzca la posibilidad de que el fuego entre o salga de una zona y que también puede servir para acceso de vehículos de emergencia. Este cortafuegos se debe mantener libre de vegetación, obstrucciones y almacenamiento.

4. Prever combustión controlada cuando esté justificada.

La combustión controlada es un enfoque viable, siempre que esté respaldado por ensayos de incendio a gran escala. Incluso se permite no instalar sistemas de supresión, siempre que se justifique con evidencias y un plan de respuesta a emergencias diseñado para esa estrategia, por ejemplo, combustión controlada evaluada por riesgos y rociadores externos.

5. Garantizar accesos

Debe haber al menos dos puntos de acceso para vehículos en cada sección con BESS, determinados en consulta con la autoridad de incendios.

6. Gestionar escorrentías y contaminación.

En caso de no establecerse la estrategia de combustión controlada es necesario considerar la escorrentía de agua y su posible impacto ambiental en el plan de respuesta a emergencias.

Estimación y evaluación de riesgos

A partir del análisis de los riesgos se lleva a cabo la evaluación de los mismos. Este es el proceso mediante el cual se identifican los peligros de un sistema, se analizan sus causas y consecuencias, se estima la probabilidad o criticidad de los escenarios peligrosos y se definen nuevas medidas de reducción del riesgo. En el ámbito de sistemas técnicos complejos, como un BESS, no suele bastar con aplicar una única técnica: lo habitual es combinar métodos ascendentes, descendentes y estudios sistemáticos de desviaciones.

Los métodos pueden agruparse en tres grandes familias:

1. Métodos ascendentes, que parten de componentes, funciones o modos de fallo individuales y analizan cómo pueden evolucionar hasta producir efectos sobre el sistema. El método representativo es el AMFE/FMEA, regulado en IEC 60812.
2. Métodos descendentes, que parten de un suceso peligroso final, por ejemplo “explosión del contenedor” o “propagación térmica entre módulos”, y reconstruyen las combinaciones de fallos que podrían producirlo. El método representativo es el análisis por árbol de fallos, FTA, regulado en IEC 61025.

3. Métodos combinados o sistemáticos, que estudian desviaciones respecto al funcionamiento previsto, combinando razonamiento causal, operativo y funcional. El método más característico es el HAZOP, regulado en IEC 61882.

Además, existen técnicas complementarias como el análisis preliminar de peligros, SWIFT, listas de comprobación, matrices de riesgo, análisis de capas de protección, análisis bow-tie o estudios específicos de mitigación de peligros.

Por último está el HMA (*Hazard Mitigation Analysis*, o Análisis de Mitigación de Riesgos) es un método/documento integrador de evaluación de riesgos. Su finalidad no es solo identificar peligros, sino demostrar que para cada peligro relevante se han definido medidas de prevención, detección, control, mitigación, respuesta y recuperación suficientes.

En el contexto BESS, el HMA funciona como una síntesis técnica de seguridad: recoge la información procedente de APP/PHA, SWIFT, AMFE, AMFEAC, FTA, HAZOP, ensayos, datos del fabricante, estrategia contra incendios, control de explosión, ventilación, detección, extinción, operación, mantenimiento y respuesta a emergencias.

El procedimiento recomendado parte de la información definida en los dos puntos anteriores:

- Definición de la unidad de análisis
- Análisis preliminar de los peligros aplicados a la UA)

A continuación, durante el diseño de producto o integración, se comienza la evaluación propiamente dicha:

- En primer lugar se aplica un **AMFE/FMEA** o **FMECA** sobre los principales componentes y funciones: batería, BMS, EMS, PCS, refrigeración, ventilación, detección, extinción, comunicaciones, protecciones eléctricas y sistemas auxiliares. *Nota: este análisis de modo de fallos puede estar realizado previamente por el fabricante del componente.*
- Para los eventos más graves, como incendio, explosión, propagación térmica o pérdida de apagado seguro, se continua con un **FTA**, ya que permite estudiar combinaciones de fallos y comprobar si las barreras son independientes y suficientes.
- Cuando existan procesos, flujos, secuencias o interfaces complejas, como refrigeración líquida, ventilación, acumulación de gases, control de carga/descarga o actuación de emergencia, es conveniente aplicar **HAZOP** o **SWIFT**.
- Finalmente, toda esta información se integra en un **HMA**, que actúe como documento de síntesis de peligros, escenarios, medidas de mitigación, requisitos de ensayo, documentación de fabricante, medidas de operación y respuesta a emergencias.

(In)Formación

La formación y la información son elementos clave en la gestión de los riesgos de los BESS. Esta formación debe comenzar por los propios trabajadores, incluyendo instaladores, operadores y técnicos de mantenimiento. Es importante ser conscientes de la rápida evolución de estas tecnologías por lo que la formación debe ser continua y recoger todas las incidencias previas para mejorar también gracias a la experiencia compartida.

Un apartado importante es la formación de los equipos de emergencias.

- En primer lugar, debe existir un equipo de primera intervención en la propia planta que ayude en los momentos iniciales de un incidente, donde hay que evitar el pánico y el caos.
- En segundo lugar, está la formación de los propios bomberos ya que los fuegos relacionados con un incidente en un BESS son relativamente nuevos y presentan aspectos peligrosos que deben tenerse en cuenta en los momentos de emergencia. Son necesarias las actualizaciones periódicas y los test fuera de emergencias además de visitas a las instalaciones y repaso conjunto con los responsables de la instalación.
- En tercer lugar, es necesaria la formación para los responsables de protección civil para que puedan tomar decisiones correctas en base a la instalación concreta y no a aspectos generales que pueden no cubrir todas las casuísticas.

Además de la formación es importante cubrir el apartado de la información tanto a las autoridades como a la propia ciudadanía de manera que las decisiones sobre la implantación de los sistemas BESS se haga de una manera correcta y no se genere una innecesaria alarma social sobre estas tecnologías.

Información para los trabajadores

La información a los trabajadores constituye una medida preventiva de nivel cero: no actúa sobre el fallo técnico, ni sobre la propagación, ni sobre la extinción, sino sobre la capacidad de las personas para reconocer riesgos, acceder solo cuando estén autorizadas, operar correctamente, responder a alarmas, evacuar y no agravar el incidente.

Se define al trabajador cualificado como una persona con educación, formación, conocimientos y experiencia adecuados para percibir los riesgos y evitar el peligro que pueden crear. Además, exige que los trabajadores reciban formación sobre los peligros del lugar de trabajo, las medidas de protección, el significado de las señales de advertencia, los EPI necesarios, las prácticas de trabajo seguras y las instrucciones de funcionamiento disponibles. La formación debe impartirse antes de empezar a trabajar en el BESS, cuando se introduzca o modifique equipo de trabajo, cuando se incorporen nuevas tecnologías, repetirse a intervalos adecuados, comprobarse su comprensión, aplicarse también a contratistas externos y registrarse por escrito.

La información a los trabajadores debe cubrir como mínimo:

- qué zonas son restringidas y quién puede acceder;
- cómo se controla el acceso y qué permisos o cualificaciones son necesarios;
- qué riesgos existen: eléctricos, arco eléctrico, incendio, explosión, gases, vertidos, superficies calientes, energía almacenada;
- qué información del sistema debe conocer el operador: BMS, alarmas, estados de funcionamiento, desconexión, parada, aislamiento y comunicaciones;
- qué EPI y prácticas de trabajo segura se exigen;
- qué hacer ante alarmas, avisos, humo, gas, incendio, explosión o fuga;
- cuáles son las rutas de evacuación, zonas seguras, puntos de reunión y cadena de aviso.

Las entradas a sistemas o áreas de instalación del BESS deben estar restringidas a personas autorizadas y señalizadas con advertencias que prohíban la entrada a personas no cualificadas, incluyendo esa información en las instrucciones de instalación, operación y mantenimiento.

La información a los trabajadores no debe limitarse a carteles genéricos. Debe incluir información operativa concreta del BESS. Para ello debe existir un manual del operador con descripción general del BESS, normas principales de seguridad, EPI, instrucciones de funcionamiento, control de interfaces, estados de operación, significado de indicadores, resolución de problemas, protocolos de comunicación, actuación ante alarmas o indicadores de advertencia y criterios para iniciar procedimientos de emergencia. Si el sistema puede operarse remotamente, deben existir instrucciones para desconectar de forma segura la operación remota, pasar a control local y reconectar después el control remoto.

Además, parte de esta información técnica debe estar disponible en el libro de información de emergencia del emplazamiento: condiciones seguras de funcionamiento, esquemas y datos técnicos de contenedores, número de contenedores, número de racks o módulos, riesgos del BESS, incidentes térmicos, riesgos eléctricos, explosión, mercancías peligrosas, emisiones de gases, nubes de vapor, datos monitorizados por el BMS —temperatura, estado de carga, tensión—, sistemas de seguridad, proceso de activación y procedimientos de apagado o aislamiento.

Por otro lado, la información a trabajadores debe incluir qué hacer cuando se activa una alarma o se detecta una condición anómala. Así, el manual de procedimiento de emergencia debe incluir planificación previa de eventos previsibles según tecnología, diseño y modo de operación; medidas para controlar condiciones y limitar consecuencias; equipos de seguridad y recursos disponibles; medidas para limitar riesgos a personas in situ; forma de dar avisos; acciones esperadas al recibir un aviso; directrices de primera respuesta; plan de evacuación; alerta temprana a la autoridad responsable del plan externo; información inicial y ampliada; y, cuando sea necesario, formación del personal y coordinación con servicios externos.

La información a trabajadores debe incluir el EPI (cascos, guantes con aislamiento eléctrico, ropa de protección frente a alta tensión y arco eléctrico, botas, protección respiratoria durante incendios y otros equipos adecuados para manipular módulos pesados) y las condiciones de trabajo seguro, incluyendo las instrucciones de mantenimiento que incluyan medidas de seguridad para mantenimiento, frecuencia de mantenimiento, comprobaciones de subsistemas —baterías, sistemas de contención, recipientes a presión, detección de gas, HVAC, extinción— y ensayos funcionales.

El apartado debe incluir expresamente a contratistas y personal externo, no solo a trabajadores propios. Esta formación debe impartirla una persona competente y deben mantenerse registros escritos con fecha, contenido y participantes.

Formación a los instaladores

Esta formación se focaliza en asegurar que quienes montan, conectan, ponen en servicio o modifican el BESS conocen los riesgos específicos del sistema y aplican correctamente las instrucciones del fabricante, los procedimientos de seguridad y los requisitos de puesta en marcha.

La formación a instaladores debe tratarse como una formación más técnica y específica que la formación general a trabajadores. El instalador no solo necesita conocer los riesgos del BESS, sino también cómo ejecutar correctamente la instalación conforme a:

- instrucciones del fabricante;

- manual de instalación;
- planos y especificaciones aprobadas;
- requisitos eléctricos, de comunicaciones, tuberías y fluidos;
- requisitos de ventilación, HVAC, detección, extinción y protección contra explosión;
- límites ambientales de instalación;
- condiciones de acceso restringido;
- procedimientos de izado, posicionamiento, conexión, aislamiento y puesta a tierra;
- pruebas de puesta en servicio;
- gestión de incidencias durante *commissioning*;
- documentación final y transferencia al operador.

Toda esta información debe estar recogida en un manual de instalación que incluya normas de seguridad, EPIs, instrucciones de instalación, puesta en servicio, control de interfaces, resolución de problemas, equipos instalados en sitio —como HVAC—, mecanismos de protección instalados in situ —detección y extinción— y desmantelamiento.

Además, la formación debe impartirse antes de empezar el proyecto, actualizarse cuando cambien equipos o procedimientos, repetirse periódicamente, comprobarse su comprensión, aplicarse también a contratistas externos y quedar registrada. Es especialmente importante en la fase de *commissioning*. Exige que el instalador del sistema o el agente de puesta en servicio evalúe el BESS tras la instalación y antes de la aprobación final. El plan de *commissioning* debe definir los roles de diseño, construcción, instalación, puesta en servicio y operación, así como las pruebas de controles, sistemas de seguridad, formación del personal de operación y mantenimiento e identificación del personal cualificado.

El personal de servicio debe ser cualificado, conforme a los códigos eléctricos, de edificación, incendios, requisitos de *utility* e instrucciones del fabricante. Sus instrucciones deben identificar la formación requerida para acceso restringido, conexiones eléctricas, comunicaciones, tuberías y fluidos, desconectores, válvulas, manipulación especial, soportes, operación, mantenimiento y procedimientos de emergencia, incluyendo primeros auxilios, extinción, responsabilidades de emergencia, permisos para trabajos en periodos de peligro de incendio, control de fuentes de ignición y notificación previa antes de poner en servicio infraestructuras de alto riesgo como BESS.

Formación a los equipos de emergencias

La formación a equipos de emergencia es una medida preventiva necesaria para la preparación operativa, orientada a que bomberos, servicios de rescate y otros primeros intervinientes conozcan previamente la instalación BESS, sus riesgos específicos y las tácticas de respuesta previstas. Está formado por dos contenidos principales: familiarización de brigadas locales antes de la puesta en marcha y ejercicios o simulacros anuales con revisión de lecciones aprendidas.

La planificación y formación de emergencia debe organizarse para que tanto el personal de operación/mantenimiento como los equipos de emergencia puedan abordar los peligros previsibles del BESS. El plan debe incluir procedimientos de apagado seguro, desenergización, aislamiento, información específica del emplazamiento, detalles de acceso, recursos de agua, detección, supresión, impacto

ambiental, recuperación y estrategias de deflagración/ventilación, respuesta a notificaciones del sistema de gestión, incendio, explosión, liberación de líquidos o vapores, equipos dañados y realización de simulacros. La formación debe actualizarse al menos anualmente y conservar registros.

Aunque exista un manual de procedimiento de emergencia y un manual de primera respuesta, se recomienda la familiarización con los mismos por parte del cuerpo local de bomberos antes de la puesta en servicio del BESS y ejercicios anuales invitando a la brigada local.

En síntesis, la formación a equipos de emergencias debe cubrir: riesgos de thermal runaway, incendio, explosión, deflagración, gases inflamables y tóxicos, atmósferas peligrosas, energía eléctrica remanente, reignición, vertidos y agua contaminada; *layout* de la instalación; accesos y puntos de agua; sistemas de detección, alarma, ventilación, supresión y alivio de presión; procedimientos de parada y aislamiento; zonas seguras; comunicación con el operador; uso de EPI/ERA; monitorización atmosférica; tácticas defensivas; y recuperación postincidente.

Información para las visitas

Aquellas personas que entran puntualmente en la instalación BESS sin formar parte del personal habitual de operación, deben ser informadas de las zonas de acceso restringido, rutas de evacuación, zonas seguras, acompañamiento y actuación ante alarmas. Para ello, los fabricantes de los sistemas deben informar de las ubicaciones de acceso restringido y debe indicarse la formación necesaria para acceder. Además, en unidades *walk-in* donde puedan entrar personas en áreas peligrosas deben existir procedimientos de entrada y salida segura, placas o cerraduras para impedir el acceso no autorizado, señalización, salidas practicables desde el interior y condiciones de espacio de trabajo considerando seguridad frente a arco eléctrico y EPI.

La información para visitas debe ser breve y operativa. Debe indicar qué zonas pueden visitar, qué zonas están prohibidas, quién es el responsable acompañante, qué riesgos principales existen —alta tensión, energía almacenada, incendio, thermal runaway, gases, explosión, vertidos, equipos calientes—, qué conductas están prohibidas —tocar equipos, fumar, usar llamas, separarse del grupo, bloquear accesos— y qué deben hacer ante alarma, humo, olor anómalo, ruido, fuga o instrucción del responsable.

La señalización es una parte esencial de esta información. Debe haber señalización aprobada en salas, áreas o contenedores BESS con identificación del sistema, tecnología, peligros especiales, sistema de supresión e información de contacto de emergencia. Señalización exterior visible en unidades BESS con peligros relevantes, tecnología, sistema de supresión y contacto 24/7, legible de noche a 30 m o desde el límite del emplazamiento si está más cerca.

El apartado también debe recoger que las visitas no deben permanecer en planta durante condiciones anómalas o trabajos de riesgo. Las notificaciones de detección deben alertar a ocupantes o personal del sitio para iniciar la evacuación, activar el plan de emergencia y notificar a emergencias; incluso en BESS outdoor no ocupados, debe prestarse atención especial a actividades de mantenimiento o presencia de personas cerca de unidades BESS sin aviso directo de condiciones peligrosas.

Información a las autoridades

La información a las autoridades debe plantearse como una obligación de transparencia técnica, coordinación administrativa y preparación ante emergencias. Debe empezar en fase temprana, no solo cuando la planta ya está construida y permitir que la autoridad de incendios, urbanismo, medio

ambiente, protección civil, seguridad industrial u otras autoridades competentes puedan revisar el diseño, valorar riesgos, exigir medidas adicionales y coordinar la respuesta ante emergencias. Dependiendo de los países se utilizan conceptos como el **AHJ** (Authority Having Jurisdiction) que debe participar en el diseño de los planes de seguridad contra incendios y los planes de emergencia y respuesta al fuego.

También debe existir documentación técnica previa y posterior a la construcción que debe ser presentada a estas autoridades antes de la construcción incluyendo especificaciones finales de equipos, datos del instalador, propietario y operador, ERP/FRP actualizados y, antes de operación comercial, documentación postconstrucción y *commissioning*. Además, debe incluirse un plan de desmantelamiento con contingencias para BESS intacto o dañado por incendio, retirada de materiales peligrosos, costes y garantías.

Información a la ciudadanía

El objetivo principal es que la ciudadanía conozca la existencia de la instalación, su función, sus beneficios, los riesgos principales, las medidas de seguridad implantadas, las restricciones de acceso y las instrucciones básicas en caso de emergencia. Normalmente no se desarrolla un programa específico de comunicación ciudadana, pero sí se exige identificar como elementos vulnerables a la población residente o personas que trabajan en las inmediaciones, considerando número de personas, tiempo de presencia, distancia a la planta y limitaciones. También debe informarse, en lugares de acceso general, las prohibiciones de que el público pueda acceder a partes o controles peligrosos del BESS.

Los BESS proporcionan beneficios para la ciudadanía, como resiliencia de red, apoyo a microrredes y suministro local durante interrupciones, pero también provoca preocupaciones ciudadanas válidas relacionadas con seguridad, ruido e impacto visual y todo esto debe estar incluido en la formación.

La información a la ciudadanía debe incluir dos planos.

- El primero es preventivo y divulgativo: qué es el BESS, qué servicio presta, dónde está, qué tecnología utiliza, qué riesgos existen y qué medidas de seguridad se han previsto.
- El segundo es operativo en emergencia: cómo se notificará un incidente, qué significan las posibles instrucciones de confinamiento, evacuación, cierre de carreteras o restricción de acceso, y quién emitirá dichas instrucciones. Los planes de emergencia deben incluir estas medidas de respuesta, control de evacuación y medidas de notificación a la comunidad por contingencia; y que el Plan de gestión de incendios debe contemplar la evacuación, notificación comunitaria e incluso, cuando proceda, análisis de dispersión de gases tóxicos e inflamables para evaluar impactos sobre comunidades cercanas.

Una justificación adicional para la comunicación pública es que la percepción ciudadana de los BESS está condicionada por falta de información, incidentes mediáticos y diferencias entre riesgo percibido y riesgo real. Analizando los incidentes previos se observa que una parte significativa de la población no había recibido información sobre BESS, y señala que la falta de conocimiento se correlaciona con oposición a proyectos; también indica que muchas personas se sentirían más cómodas si entendieran mejor los impactos ambientales y las medidas de seguridad porque los BESS de ion-litio no presentan necesariamente riesgos superiores a otras instalaciones industriales, pero que es necesario mejorar la comprensión pública mediante información basada en datos, evaluación de riesgos y buenas prácticas de ingeniería.

Documentación de un proyecto

A modo de recomendación se listan a continuación los documentos recomendables para disponer de toda la información de seguridad de un proyecto. Nota: esta lista no es exhaustiva y hace hincapié en la documentación específicamente de seguridad como el HMA, PGI y PE)

Memoria general del proyecto (incl. manuales del producto)

- **Memoria general del proyecto**
 - Recomendable la preparación de un dossier específico de los aspectos de seguridad con las características de seguridad, parámetros de operación, certificaciones de los componentes y materiales utilizados
- **Manual de instalación**
- **Manual de usuario / operación**
- **Manual de mantenimiento**
- **Estudio de Impacto Ambiental**
- **Repositorio de tareas de reparación y mantenimiento**
- **Informe de lecciones aprendidas tras un incidente**
- **Plan de desmantelamiento parcial o total del sistema si queda inoperativo o inseguro**
- **Planes de formación**

Plan de evaluación de riesgos (HMA)

También conocido como Análisis de Mitigación de Riesgos (HMA). Es el documento estratégico que analiza todos los riesgos del sitio. Es el plan madre: de él derivan el PGI (que gestiona el riesgo específico de incendio) y el PE (que define cómo responder ante una emergencia). Sin el HMA no se puede justificar ni el diseño ni las medidas operativas de los otros dos. Debe contener los siguientes puntos:

Descripción del sitio *(info más detallada en la memoria descriptiva del proyecto)*

- Localización, dimensiones, entorno (topografía, vegetación, accesos)
- Tecnologías instaladas (Li-ion, Pb-ac, SCs, etc.)
- Actividades operativas

Identificación de peligros

- Riesgos eléctricos, químicos, mecánicos, ambientales y operativos

Evaluación de riesgos

- Matriz de probabilidad-consecuencia según AS/ISO 31000.

- Clasificación por nivel de riesgo (bajo/moderado/alto/extremo)
- Justificación documental

Mitigación de riesgos

- Controles de prevención (diseño, materiales, procedimientos)
- Controles de contención (supresión, aislamiento, ventilación)
- Controles administrativos (capacitaciones, permisos, monitoreo)

Diseño de la planta

- Justificación de la localización y disposición de equipos
- Caminos de acceso, anillos cortafuego, tanques de agua, zonas de exclusión
- Cumplimiento de distancias térmicas

Análisis medioambiental

- Inventario DG (Dangerous Goods Regulations)
- Informe medioambiental de flora y fauna

Integración con el PGI y PE

- Cómo los riesgos identificados se traducen en medidas operativas
- Mecanismo de revisión coordinada entre los tres planes

Seguimiento y mejora continua

- Auditorías, inspecciones y revisiones periódicas
- Registro de incidentes y “casi incidentes”
- Revisión obligatoria anual o tras incidentes

Aprobaciones y distribución

- Firmas responsables
- Lista de control de versiones y registro de distribución

Plan de gestión de incendios (PGI)

Es el documento operativo que aplica en la práctica los controles del PER para el riesgo de incendio. El PGI es un documento operativo y técnico, mientras que el PER es analítico y estratégico. Todo lo que tenga que ver con fuego, calor, propagación, acceso de brigadas o abastecimiento de agua pertenece al PGI. Debe contener los siguientes puntos:

Descripción del sitio

- Planos generales del proyecto
- Tipos de tecnologías y equipos instalados

- Entorno natural y urbano

Objetivos del plan

- Prevenir ignición
- Controlar propagación
- Garantizar accesibilidad para brigadas
- Minimizar impacto visual

Infraestructura de protección contra incendios

- Abastecimiento de agua
- Sistemas de detección y supresión (automáticos y manuales)
- Extintores portátiles, bombas, carretes
- Señalización y accesos para bomberos

Gestión de la vegetación y combustibles

- Mapa de vegetación y fajas cortafuego
- Programa de mantenimiento y periodicidad
- Procedimientos para eliminación de residuos combustibles

Control de fuentes de ignición

- Permisos de trabajo en caliente
- Control de equipos eléctricos y mecánicos
- Políticas de “No fumar / No fuego abierto”
- Supervisión de contratistas

Roles y responsabilidades

- Coordinador del PGI
- Supervisor de mantenimiento
- Brigada interna

Procedimientos operativos

- Monitoreo meteorológico (suspensión en días extremos)
- Inspección rutinaria
- Corte de energía en incidentes
- Plan de comunicación con bomberos

Formación y simulacros

- Implicación de todo el personal
- Simulacros anuales
- Registro y análisis postejercicio

Revisión y mejora continua

- Auditoría anual o tras incidentes
- Revisión de eficacia de medidas y actualización del plan
- Integración con HMI y PE

Plan de emergencia (PE)

Es el documento que establece cómo se responde durante y después de un incidente. El PE no previene el fuego ni reduce riesgos: gestiona la respuesta cuando el evento ya está ocurriendo. Debe incluir los siguientes puntos:

Datos y planos del sitio

- Descripción de la instalación (infraestructura, operación, dotación, horarios).
- Planos con BESS, subestaciones, líneas, accesos y viales internos; sistemas contra incendios (tanques, bombas, hidrantes, carretes), drenajes, vecinos.

Procedimientos por escenarios

- Procedimientos de respuesta para cada evento creíble, basados en el PER (edificios, infraestructura y vehículos).
- Procedimientos de desenergización y manejo de equipos dañados.
- Notificación temprana a emergencias.

Evacuación y “shelter-in-place”

- Rutas, puntos de reunión, criterios de refugio en sitio cuando ya es tarde para evacuar. Incluir quién decide, cuándo, dónde, cómo comunicar, recursos del lugar y señalización.

Medios y recursos de emergencia

- Inventario: detección y supresión, detección de gases, duchas/lavaojos, contención de derrames, sistemas de alarma y comunicación, botiquines.
- Manifiesto de mercancías peligrosas cuando aplique.

Contactos 24/7

- Personal del sitio y soporte técnico externo relevante para emergencias.
- Contacto con personal cualificado para la remoción segura de módulos dañados.

Bibliografía

Normas o estándares

- IEC 63056 (2027) - Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes. Safety requirements for secondary lithium cells and batteries for use in electrical energy storage systems. [Borrador de norma internacional]
- UL 9540A (2026) - Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems. [Norma USA]
- IEC 62933-5-1 (2025) - Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES). Parte 5-1: Requisitos de seguridad para sistemas ESS integrados en red. Especificación general. [Norma internacional]
- UL 9540 (2025) - Energy Storage Systems and Equipment. [Norma USA]
- IEC 62619 (2022) - Acumuladores con electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos. Requisitos de seguridad para acumuladores y elementos de litio para uso en aplicaciones industriales. [Norma internacional]
- UL 1973 (2022) - Batteries for Use In Stationary and Motive Auxiliary Power Applications. [Norma USA]
- IEC 62485-5 (2021) - Requisitos de seguridad para las baterías e instalaciones de baterías. Parte 5: Funcionamiento seguro de baterías estacionarias de iones de litio. [Norma internacional]
- IEC 62933-5-2 (2021) - Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica (EES). Parte 5-2: Requisitos de seguridad para sistemas ESS integrados en red. Sistemas electroquímicos. [Norma internacional]
- NFPA 855 (2020) - Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems. [Norma USA]

Guías

- CAT (2026) - Criteris ambientals en els projectes de Sistemes de Bateries d'Emmagatzematge d'Energia (BESS). [Guía Cataluña]
- Tesla (2026) - Guía de respuesta a emergencias de baterías de iones de litio industriales - Para productos de Tesla Industrial Energy como Megapack y Powerpack. [Guía USA]
- NFCC (2025) - Grid scale energy storage system planning - Guidance for fire and rescue services [Informe UK]
- BVES (2025) - SICHERHEITSLITFADEN LITHIUM-IONEN-GROßSPEICHERSYSTEME. [Guía Alemania]
- EASE (2025) - EASE Battery Energy Storage System (BESS) Safety Best Practices Guideline. [Guía Europa]
- BEQUINOR (2024) - Guía de almacenamiento y uso de baterías de litio en zonas de producción y almacenes. [Guía España]
- FRA (2024) - Explosion Control Guidance for Battery Energy Storage Systems. [Guía USA]
- UM (2024) - Planning & zoning for battery energy storage systems - A guide for Michigan local governments. [Guía USA]
- CNVVF (2024) - Linee guida di prevenzione incendi per l'individuazione delle metodologie per l'analisi del rischio e delle misure di sicurezza antincendio da adottare per la progettazione, la realizzazione e l'esercizio di sistemi di accumulo di energia elettrica ("battery energy storage system") [Informe Italia]

- CFA (2023) - Design Guidelines and Model Requirements - Renewable Energy Facilities v4. [Guía Australia]
- RAAEY (2023) - Installation, Performance and Safety Specifications of Battery Energy Storage Systems (BESS) [Informe Grecia]
- BS (2023) - Vejledning om brandsikring af større oplag af litiumionbatterier samt BESS [Informe Dinamarca]
- EURALARM (2022) - Guía de soluciones integradas de protección contra incendios para baterías de iones de litio. [Guía España]

Informes

- BATTERYPLAT (2025) - Estudio técnico sobre seguridad en instalaciones BESS de Li-ion e identificación de actividades de innovación. [Informe España]
- CTEH (2025) - Moss Landing Incident Preliminary Air Monitoring Summary [Informe USA]
- AFAC (2025) - Large-scale battery energy storage system installations [Informe Australia]
- SDG&E (2024) - Air Quality Report [Informe USA]
- SDG&E (2024) - Water Quality Report [Informe USA]
- BS (2024) - Temahæfte Indsats ved brand i BESS [Informe Dinamarca]
- FNC (2024) - Health and Safety Guidance for Grid Scale Electrical Energy Storage Systems [Informe UK]
- BARPI (2022) - Involvement of Lithium-ion batteries in accidents occurring in non-waste business sectors. [Informe Francia]
- BVLAT (2022) - Energy storage systems (ESS)- Energie Energy storage systems (ESS)- Energie opslag systemen [Informe Bélgica]
- FPA (2022) - Need to Know Guide RE1 - Battery energy storage systems: commercial lithium-ion battery installations [Informe UK]
- MOE (2022) - Forslag til brandtekniske krav til BESS og oplag af litium-ion batterier [Informe Dinamarca]
- FDMA (2011) - Examination report on the approach to safety measures concerning lithium ion batteries in dangerous facilities [Informe Japón]

Artículos científicos

- Qingyu Zhoua, Guowei Zhanga, Guoqing Zhua, Diping Yuana, Energy and Combustion Science (2026) - Multidimensional Characteristic Analysis of Fire Accidents in Electrochemical Energy Storage Stations and Study on Current Fire Safety Status [Paper internacional]
- Wentao Chen, Shaopeng Shen, Biao Ma, Danhua Li, Mingxuan Liu, Shijie Zhang, Chenglong Jiang, Lei Liu, Shiqiang Liu, Fang Wang, Energy Storage (2026) - Comparative Study on Thermal Runaway and Gas [Paper internacional]
- Wojciech Mrozik, Joseph McDonald, Emma Shuttleworth, Artur Ankowski, Journal of Power Sources (2026) - Comparative safety analysis of current and next-generation battery technologies [Paper internacional]
- Changbao Qi, Hewu Wang, Minghai Li, Cheng Li, Yalun Li, Chao Shi, Ningning Wei, Yan Wang, Huipeng Zhang, Batteries (2025) - Research on the Thermal Runaway Behavior and Flammability Limits of Sodium-Ion and Lithium-Ion Batteries [Paper internacional]
- Peter J. Bugryniec, Erik G. Resendiz, Solomon M. Nwophoke, Simran Khanna, Charles James, Solomon F. Brown, Journal of Energy Chemistry (2024) - Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure [Paper internacional]

- Shouyi Yuan, Kai Ding, Xiaoyuan Zeng, Duan Bin, Yingjie Zhang, Peng Dong and Yonggang Wang, *Advanced Materials* (2023) - Advanced Nonflammable Organic Electrolyte Promises Safer Li-Metal Batteries: From Solvation Structure Perspectives [Paper internacional]
- Ola Willstrand, Mohit Pushp, Petra Andersson, Daniel Brandell, *Journal of Energy Chemistry* (2023) - Impact of different Li-ion cell test conditions on thermal runaway characteristics and gas release measurements [Paper internacional]
- Manh-Kien Tran, Anosh Mevawalla, Attar Aziz, Satyam Panchal, Yi Xie, Michael Fowler, *Processes* (2022) - A Review of Lithium-Ion Battery Thermal Runaway Modeling [Paper internacional]
- Yuqing Chen, Yuqiong Kang, Yun Zhao, Li Wang, Jilei Liu, Yanxi Li, Zheng Liang, Xiangming He, Xing Li, Naser Tavajohi, Baohua Li, *Journal of Energy Chemistry* (2021) - A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards [Paper internacional]
- Weifeng Li, Shun Rao, Yang Xiao, Zhenhai Gao, Yupeng Chen, Hewu Wang, Minggao Ouyang, *iScience* (2021) - Fire boundaries of lithium-ion cell eruption gases caused by thermal runaway [Paper internacional]
- Xuning Feng, Dongsheng Ren, Xiangming He, and Minggao Ouyang, *Joule* (2020) - Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries [Paper internacional]