

Guía de respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio para los coordinadores en escena de la EPA



Elaborada por el Grupo de Trabajo sobre Baterías de Iones de Litio

Octubre de 2025

Descargo de responsabilidad legal

La información proporcionada en el presente documento tiene fines exclusivamente informativos y no debe interpretarse como asesoramiento jurídico ni como la creación de una relación profesional o contractual con ninguno de los participantes. Las acciones que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), sus contratistas y el personal de soporte llevan a cabo durante incidentes relacionados con baterías de iones de litio (LIB) se basan únicamente en los conocimientos, datos e información disponibles en ese momento. Es importante señalar que, durante cualquier período de respuesta, es posible que el comportamiento de las baterías de iones de litio en diversas situaciones no se comprenda por completo y que las interpretaciones o conclusiones derivadas de análisis posteriores difieran de las aplicadas en ese momento.

La EPA, sus contratistas y el personal de soporte reconocen que las lecciones aprendidas de respuestas anteriores, los datos que surjan y la evolución de los marcos regulatorios pueden orientar futuras acciones y decisiones relacionadas con incidentes con baterías de iones de litio. Por lo tanto, se recomienda a las personas y entidades consultar otras fuentes pertinentes y a expertos en la materia para obtener información y orientación actualizadas sobre la seguridad medioambiental y los protocolos de respuesta ante emergencias. La EPA no asume ninguna responsabilidad por las acciones llevadas a cabo o las decisiones tomadas sobre la base de la información proporcionada en el presente documento.

ÍNDICE

Introducción y alcance	4
Definiciones y siglas	5
Anatomía de las baterías de iones de litio	9
¿Qué es una batería de iones de litio?	9
Estructuras de las baterías de iones de litio	10
Composición química de las baterías de iones de litio	13
Fallas e incendios de baterías de iones de litio	13
Etapas y características de las fallas de las baterías de iones de litio	14
Respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio	16
Consideraciones de salud y seguridad para el personal de respuesta	17
Recomendaciones sobre PPE	18
Monitoreo y muestreo del aire durante la respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio	21
Consideraciones sobre la extinción de incendios	27
Operaciones de remoción de la EPA	33
Consideraciones para la preparación y estabilización del sitio	33
Almacenaje	34
Desmontaje del paquete de baterías	35
Desenergización y tratamiento con salmuera	37
Desmantelación de baterías, también denominada conversión de baterías en "material que ya no es batería"	38
Transporte	42
Eliminación	45
Participación comunitaria y relaciones con los medios	46
Enlaces útiles y recursos adicionales	47
Documento adjunto 1: Análisis de riesgos laborales para la respuesta a incendios forestales	48
Documento adjunto 2: Tabla de monitoreo del aire	49
Documento adjunto 3: Memorando sobre el desarrollo de niveles de acción para partículas	50
Documento adjunto 4: Árbol de decisiones de la EPA para la gestión de sitios con baterías de iones de litio	51
Documento adjunto 5: Orden de exención de emergencia del DOT para los incendios forestales de Maui de 2023	52
Documento adjunto 6: Ejemplos de fichas técnicas para la respuesta a incendios forestales relacionados con baterías de iones de litio	53

Introducción y alcance

El Grupo de Trabajo sobre Baterías de Iones de Litio (LIBTF) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) se creó en 2024 con representantes de la Oficina de Gestión de Emergencias (OEM), las diez regiones, el Equipo de Respuesta Ambiental (ERT), la Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos (ORCR) y la Oficina de Investigación y Desarrollo (ORD). La misión del LIBTF es mejorar la planificación, la preparación y las capacidades técnicas de los coordinadores en escena (OSC) para responder a emergencias relacionadas con incidentes con baterías de iones de litio. El LIBTF también tiene como objetivo aumentar la concientización sobre los peligros y la preparación para responder a incidentes relacionados con baterías de iones de litio entre las agencias de respuesta asociadas a nivel local, estatal, tribal y federal. Además, el LIBTF coordina oportunidades de investigación internas y externas relacionadas con la respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio.

La Guía de respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio para los OSC de la EPA tiene como objetivo ser una guía de uso sencilla y uniforme a nivel nacional que aborde principalmente prácticas técnicas, administrativas y organizativas, específicamente para los OSC de la EPA que participan en la respuesta ante incidentes relacionados con baterías de iones de litio. El alcance de este documento incluye, entre otros temas:

- Información general sobre las baterías de iones de litio
- Consideraciones de salud y seguridad
- Monitoreo del aire
- Concientización sobre incendios
- Operaciones de remoción de la EPA
- Transporte
- Eliminación

La guía se elaboró conforme al mejor conocimiento disponible hasta octubre de 2025 y debe actualizarse y revisarse al menos cada 3 años o cuando haya nueva información disponible.

Si tiene preguntas o comentarios, o si identifica algo en el documento que no sea correcto o que no funcione según lo comprobado durante una experiencia en un sitio, háganoslo saber [aquí](#).



Para obtener otros recursos externos relacionados con la respuesta ante incidentes con LIB, consulte la sección Enlaces útiles al final de este documento.

Tenga en cuenta que esta guía no aborda la respuesta de la EPA a otros tipos de baterías, como las alcalinas, las de plomo-ácido, las de níquel-cadmio (NiCad), las de níquel-hidruro metálico (NiMH), las de litio metálico u otras tecnologías de baterías que no se mencionan o que aún no se han comercializado.

Las baterías de iones de litio son una tecnología en evolución que ha captado la mayor parte del mercado mundial de almacenaje de energía. Actualmente, las baterías de iones de litio están presentes en prácticamente todos los ámbitos de nuestra vida cotidiana. Las baterías de iones de litio son la opción preferida debido a sus características de rendimiento superiores. Su alta densidad energética les permite almacenar una cantidad considerable de energía en relación con su tamaño y peso, lo que posibilita un uso prolongado en dispositivos electrónicos portátiles. Además, ofrecen carga rápida, una larga vida útil con numerosos ciclos de carga y una autodescarga mínima, y requieren relativamente poco mantenimiento. Estas ventajas las hacen ideales para una amplia variedad de aplicaciones, desde teléfonos inteligentes hasta vehículos eléctricos y sistemas de almacenaje de energía a escala de la red eléctrica.

Debido a la gran cantidad de baterías de iones de litio presentes en el mercado de consumo y en la economía mundial, la tasa de fallas de las baterías y de los incidentes asociados está aumentando. Estos incidentes pueden ocurrir en cualquier etapa del ciclo de vida de la batería, desde su fabricación, transporte, uso por parte de los consumidores y manipulación, hasta su reparación o modificación y su eliminación o reciclaje.

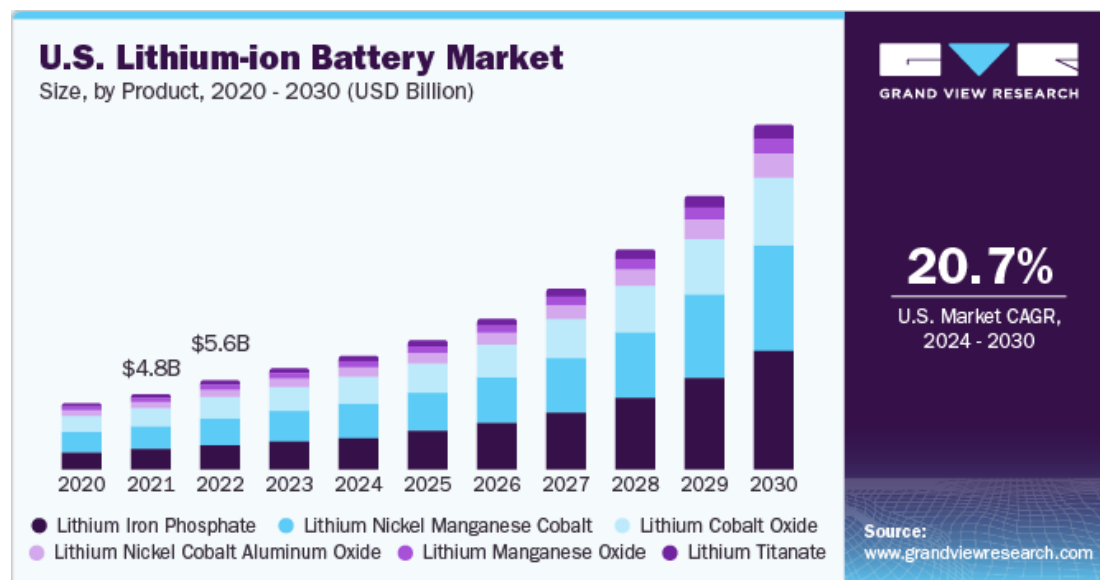


Figura 1. Gráfico de la participación de mercado de las baterías de iones de litio según su composición química.

Definiciones y siglas

Ánodo: electrodo con carga negativa de una batería. En las baterías de iones de litio, el ánodo es a donde se trasladan los iones de litio durante la carga. El grafito es el material de recubrimiento más utilizado sobre el colector de corriente, que normalmente está hecho de cobre.

Celda de batería: conjunto formado por un ánodo y un cátodo separados por un electrolito, que se usa para producir voltaje y corriente. Una batería puede estar compuesta por una o más celdas.

Paquete, módulo y carcasa de baterías: un módulo agrupa celdas individuales de baterías de iones de litio para formar una unidad funcional de mayor tamaño, mientras que un paquete de baterías es el conjunto completo que

contiene estos módulos (o, en algunos casos, un solo módulo), junto con una carcasa exterior protectora (la carcasa del paquete o módulo) y un Sistema de Gestión de Baterías (BMS). Los términos "paquete" y "módulo" pueden utilizarse indistintamente y, en ocasiones, de manera incorrecta para describir diferentes configuraciones.

Sistema de almacenaje de energía en baterías/sistema de almacenaje de energía (BESS/ESS): tipo de sistema de almacenaje de energía que utiliza baterías para almacenar y distribuir energía en forma de electricidad. Los BESS/ESS pueden tener múltiples tamaños, con capacidades de almacenaje que van desde kilovatios-hora (kWh) hasta gigavatios-hora (GWh), según la aplicación, y con dimensiones que van desde el tamaño de una maleta de mano hasta las de un almacén lleno de estanterías con baterías. Se utilizan en entornos residenciales, recreativos y comerciales o industriales.

Sistema de Gestión de Baterías (BMS): tecnología dedicada al mantenimiento de una batería. El BMS gestiona la carga, la descarga y el almacenaje eléctrico del paquete de baterías y evita que las baterías sufran un uso eléctrico inadecuado debido a una sobrecarga o una subcarga. El BMS también puede proporcionar protección térmica al paquete de baterías y mantener su temperatura dentro de rangos óptimos (principalmente en vehículos eléctricos y BESS/ESS). Un BMS puede desactivar una batería para evitar condiciones de sobrecalentamiento.

Salmuera: solución a base de agua que contiene una sal. Pueden utilizarse diferentes sales en distintas concentraciones, según su disponibilidad. El propósito de una solución de salmuera es reducir a casi 0 voltios el voltaje de las baterías dañadas o que podrían estar dañadas para reducir el riesgo de incendio o explosión.

Mejores métodos de administración (BMP): estrategias, técnicas y procedimientos diseñados para prevenir o reducir de manera eficaz y práctica los problemas medioambientales.

Disco de ruptura o disco de alivio: disco ubicado en la parte superior de la celda cilíndrica que actúa como una válvula de alivio de presión. Cuando una batería experimenta una fuga térmica, el disco de ruptura permite la liberación de gases tóxicos e inflamables. Los discos de ruptura no son obligatorios, pero generalmente se incluyen en las celdas cilíndricas.

Cátodo: electrodo con carga positiva de una batería. En las baterías de iones de litio, el cátodo es a donde se trasladan los iones de litio durante la descarga. Existen múltiples composiciones químicas, normalmente sales de litio, para el material que recubre el colector de corriente de aluminio. Las baterías de iones de litio suelen denominarse según la composición química de su cátodo. Por ejemplo, LFP hace referencia al fosfato de hierro y litio (LiFePO_4) y NMC al óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (LiNiMnCoO_2). Para obtener más información, consulte la sección Composición química de las baterías de iones de litio.

Falla de la celda (de la batería): término general que se utiliza cuando el daño o defecto de una batería es suficiente para provocar que la batería experimente una fuga térmica. Los mecanismos de daño más comunes son el maltrato mecánico (perforación o abolladura), la carga incorrecta (ya sea la sobrecarga o la subcarga de la batería, normalmente debido a un sistema de gestión de baterías dañado o incorrecto) y el daño térmico (exposición a temperaturas superiores a 149-170 °F).

Placa o lengüeta colectora: conexión a varios cátodos y ánodos que reúne todos los ánodos y cátodos de la batería en un único punto que actúa como terminal de la batería. Cuando la placa o lengüeta colectora está dañada, puede resultar difícil descargar por completo una batería y aumenta la probabilidad de que quede energía remanente.

Ley Integral de Respuesta, Compensación y Responsabilidad Civil Ambiental (CERCLA): ley ambiental conocida informalmente como Superfund. Permite a la EPA limpiar sitios contaminados. También obliga

a las partes responsables de la contaminación a realizar limpiezas o reembolsar al gobierno por las tareas de limpiezas dirigidas por la EPA.

Baterías de iones de litio dañadas, defectuosas o retiradas del mercado (DDR): término utilizado por el Departamento de Transporte (DOT) para referirse a las baterías de iones de litio que han sido utilizadas indebidamente, maltratadas o sometidas a condiciones que pueden dañarlas. La definición completa se encuentra en el título 49 del CFR, sección 173.185(f). El personal de respuesta de la EPA utiliza coloquialmente este término para describir las baterías dañadas.

<https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2023-03/DDR-brochure.pdf>

Desenergizar: término que se utiliza como sinónimo de "descargar". Consiste en reducir la energía almacenada en una batería hasta obtener mediciones lo más cercanas posible a 0 voltios (V). Puede ser imposible descargarla hasta 0 V, pero se considera que las baterías con una carga inferior a 1 V tienen menos probabilidades de experimentar una fuga térmica.

Dendrita: las dendritas de litio son proyecciones metálicas con una estructura similar a una rama que pueden formarse en el electrodo negativo de una batería de iones de litio durante la carga. Si las dendritas crecen demasiado, pueden dañar el separador y provocar un cortocircuito interno y una fuga térmica. Las dendritas tienden a crecer cuando un sistema de gestión de baterías permite que la batería se sobrecargue o cuando las baterías se cargan a bajas temperaturas.

Departamento de Transporte (DOT) de Estados Unidos: agencia federal responsable de desarrollar y regular la política nacional de transporte en todos sus medios, incluidas las autopistas, la aviación, el ferrocarril y el transporte público. Su misión es garantizar sistemas de transporte seguros, eficientes, accesibles y sostenibles. El DOT también administra fondos para proyectos de infraestructura y establece normas de seguridad en todo el país.

Electrodo: conductor eléctrico de una batería a través del cual fluyen los electrones para generar una corriente. Las baterías de iones de litio contienen dos electrodos: un ánodo y un cátodo. Normalmente, el ánodo y el cátodo se sitúan sobre láminas de cobre o aluminio que actúan como colectores de corriente (es decir, placas colectoras).

Electrolito: solución a través de la cual pasan los iones de litio del ánodo al cátodo. Esta solución suele ser un líquido orgánico y normalmente es inflamable. Por ello, todas las composiciones de electrolitos presentan riesgos similares debido a su naturaleza inflamable. Un ejemplo común de electrolito utilizado en baterías de iones de litio es el hexafluorofosfato de litio en solventes orgánicos. La composición química específica de las soluciones de electrolitos puede variar según el fabricante, y es posible que no haya fichas de datos de seguridad (SDS) disponibles, ya que algunas soluciones pueden considerarse información de propiedad exclusiva o un secreto comercial.

Fin de vida útil (EOL): término que utilizan algunos transportistas de baterías para referirse a baterías que han sido usadas y que se transportan conforme a la normativa del DOT aplicable a las baterías de iones de litio normales que no son DDR.

Batería de iones de litio: compuesta por celdas en las que los iones de litio se desplazan del electrodo negativo al electrodo positivo a través de un electrolito durante la descarga y siguen una trayectoria inversa durante la carga. En este documento, normalmente se hace referencia a ella simplemente como "batería".

Dispositivos de micromovilidad: vehículos pequeños y ligeros para recorrer distancias cortas (por ejemplo, bicicletas eléctricas, *scooters* eléctricos, monopatines eléctricos, patinetas y sillas de ruedas eléctricas) alimentados por baterías de iones de litio. Por lo general, los paquetes de baterías pueden retirarse del dispositivo y contienen entre 50 y 150 celdas cilíndricas.

Módulo o paquete de baterías: conjunto de celdas de baterías conectadas en serie o en paralelo, o en una combinación de ambas, que puede tener o no un sistema de gestión de baterías.

Norma Fuera del Sitio: se promulgó el 22 de septiembre de 1993 (Registro Federal [FR], vol. 58, pág. 49200). Su referencia reglamentaria es el título 40 del Código de Reglamentos Federales (40 CFR), sección 300.440. Exige que los desperdicios sujetos a la CERCLA solo se depositen en una instalación que opere de conformidad con la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) u otros requisitos federales o estatales aplicables.

Administración de Seguridad en Tuberías y Materiales Peligrosos (PHMSA): agencia federal dependiente del Departamento de Transporte de Estados Unidos responsable de garantizar el transporte seguro de energía y materiales peligrosos. La PHMSA regula y hace cumplir las normas de seguridad para las tuberías y el transporte de materiales peligrosos por tierra, mar y aire. Su misión es proteger a las personas y al medioambiente de los riesgos asociados con estos materiales.

Batería primaria: batería que no puede recargarse y está diseñada para un solo uso. No es una batería de iones de litio, aunque puede ser una batería de litio metálico. Las baterías alcalinas son otro tipo común de batería primaria.

Propagación: fenómeno que ocurre cuando una fuga térmica en una celda de batería causa daños suficientes en las celdas de batería adyacentes como para provocar que también experimenten una fuga térmica. La propagación puede ocurrir de una celda de batería a otra dentro de un módulo o paquete de baterías.

Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA): ley federal que regula la gestión de desperdicios sólidos y peligrosos en Estados Unidos. Otorga a la EPA autoridad para controlar los desperdicios desde su generación hasta su eliminación, incluido su tratamiento, almacenaje y limpieza.

Batería secundaria: batería que puede recargarse (es decir, una batería de uso múltiple). Las baterías de iones de litio son baterías secundarias.

Separador: componente utilizado para aislar entre sí los dos electrodos y que normalmente está hecho de una membrana polimérica microporosa. El separador evita que los dos electrodos entren en contacto entre sí, pero permite el paso de los iones de litio.

Cortocircuito: en una batería de iones de litio, puede producirse un cortocircuito cuando se forma una conexión entre los dos electrodos dentro de la celda de batería, normalmente debido a que el separador se ha dañado. Un cortocircuito puede provocar el sobrecalentamiento de la celda de la batería y, finalmente, una fuga térmica.

Estado de carga (SOC): medida de la carga restante de una batería de iones de litio en comparación con su capacidad total, que suele expresarse como porcentaje. El SOC no se refiere a la cantidad de voltios que quedan en una batería de iones de litio. Cuando una batería de iones de litio tiene un SOC del 0 %, no significa que tenga 0 voltios. A menudo, una celda individual puede tener más de 3 voltios remanentes cuando el SOC es del 0 %.

Fuga térmica: ocurre cuando una celda de batería dañada o defectuosa falla y genera calor hasta alcanzar una etapa en la que la generación de calor se vuelve autosostenida. Esto produce un aumento exponencial de la temperatura de la celda que normalmente provoca alguna combinación de explosión, incendio y liberación de vapores tóxicos e inflamables. La fuga térmica en una celda dañada o defectuosa puede producirse instantáneamente, en cuestión de segundos, o retrasarse de manera impredecible. Es probable que la fuga térmica se propague a las celdas adyacentes o a las baterías cercanas, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Fuga térmica.

Voltaje/voltios (V): el voltaje es la medida de la diferencia de potencial eléctrico entre dos electrodos. En el caso de las celdas individuales de baterías de iones de litio, una batería completamente cargada (100 % de SOC) normalmente tendrá un voltaje de entre 4.0 y 4.2 voltios, según la composición química de la batería. Una batería de iones de litio con un SOC del 0 % todavía tendrá más de 2.0 voltios, a menudo entre 2.7 y 3.2 voltios, según la composición química de la batería. El voltaje de los paquetes de baterías dependerá de la conexión de las celdas dentro del paquete, pero mostrará una relación similar entre el voltaje y el estado de carga. Por ejemplo, un paquete de baterías de 24 voltios todavía puede tener entre 12 y 18 voltios de energía con un estado de carga del 0 %.

Vatio-hora (Wh): la capacidad nominal en vatios-hora de una batería de iones de litio describe la capacidad energética de la batería. Los vatios-hora son una unidad de energía que mide la cantidad de potencia utilizada a lo largo del tiempo. Por lo general, las baterías más grandes tienen una capacidad nominal mayor expresada en vatios-hora y, por lo tanto, una mayor capacidad energética. Las baterías con una capacidad nominal mayor expresada en vatios-hora pueden expresarse en otras unidades para indicar su escala (por ejemplo, 1 kilovatio-hora (kWh) equivale a 1000 vatios-hora, 1 megavatio-hora (MWh) equivale a 1000 kWh, etc.). El tamaño de una batería no siempre indica el voltaje o el amperaje para el que está diseñada.

Anatomía de las baterías de iones de litio

¿Qué es una batería de iones de litio?

Una LIB es una batería recargable en la que los iones de litio se desplazan del ánodo al cátodo. El ánodo normalmente está recubierto de grafito y la composición química del cátodo puede variar, pero normalmente consiste en una sal de litio. Una solución de electrolito orgánico permite que los iones de litio se desplacen entre el ánodo y el cátodo. Un separador, normalmente una membrana de polímero o plástico, evita que el ánodo y el cátodo entren en contacto.

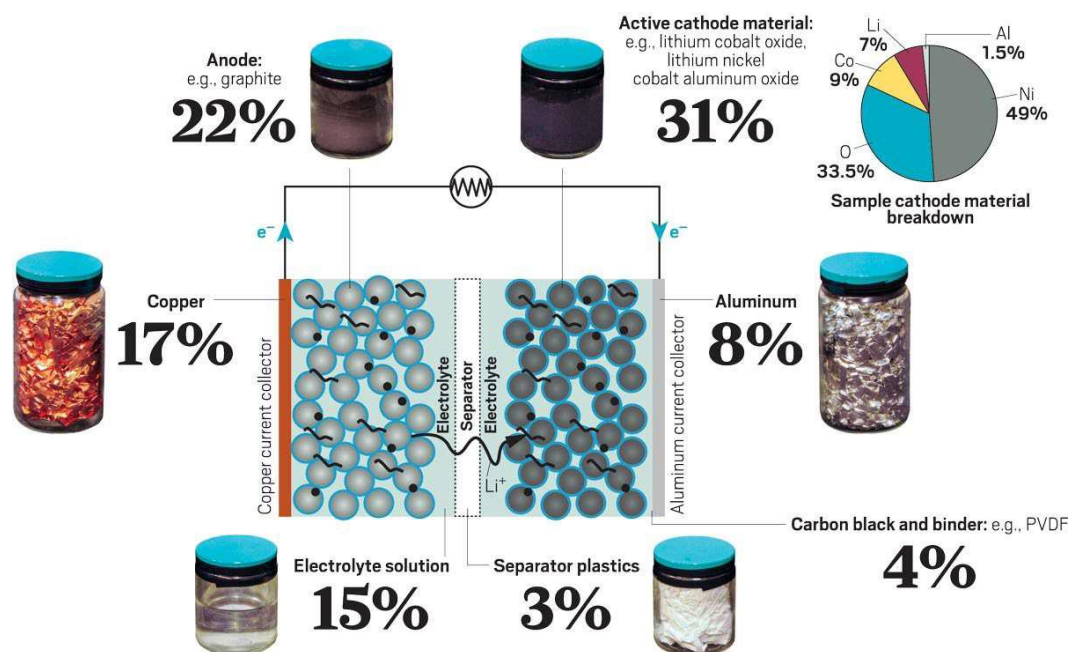


Figura 3. Gráfico que muestra la composición típica de una batería de iones de litio, con ejemplos de los materiales utilizados y su proporción porcentual en la batería.¹

Estructuras de las baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio pueden tener diferentes tamaños y estructuras. La tecnología evoluciona constantemente en cuanto a la forma, la composición química y la densidad de potencia de las baterías.

Si bien las características de las celdas de las baterías varían, los principios científicos y las materias primas metálicas para desarrollar sus estructuras son relativamente similares. Las celdas cilíndricas tienen láminas de materiales enrolladas firmemente unas con otras; mientras que las celdas prismáticas se doblan en los extremos y se alojan en una carcasa de plástico o metal. Las celdas tipo bolsa presentan una configuración similar en capas, pero solo están contenidas dentro de una envoltura de lámina metálica, lo que les da una estructura delgada y flexible. Algunas celdas con estructura de botón también son de iones de litio, pero son menos comunes.

Las estructuras más comunes de las baterías de iones de litio que pueden encontrarse incluyen:

1. **Celdas cilíndricas:** son las baterías más comunes en los dispositivos de micromovilidad (*scooters*, bicicletas eléctricas, etc.). Los vehículos eléctricos (EV) suelen utilizar baterías compuestas por miles de celdas cilíndricas (más de 5000) conectadas en serie, según la marca, el modelo, el año y las opciones del vehículo. Los fabricantes de vehículos utilizan diferentes formatos de baterías: algunos prefieren las celdas cilíndricas, mientras que otros optan por el diseño plano y rectangular de las celdas prismáticas o por la envoltura flexible y blanda de las celdas tipo bolsa. Las celdas cilíndricas también se encuentran en sistemas BESS/ESS a escala residencial. Las celdas cilíndricas suelen identificarse por su tamaño en milímetros (mm): primero se indica el diámetro y luego la longitud. Por ejemplo, una batería 2170 tiene un diámetro de

¹ Fuente: Argonne National Laboratory, publicado en Jacoby, M., 2019. "It's time to get serious about recycling lithium-ion batteries". *Chemical & Engineering News*, volumen 97, número 28, 14 de julio de 2019. Disponible en línea en <https://cen.acs.org/materials/energy-storage/time-serious-recycling-lithium/97/i28>.

21 mm y una longitud de 70 mm. Las baterías 18650 tienen un diámetro de 18 mm y una longitud de 65 mm; el 0 adicional indicaba históricamente que se trataba de una celda cilíndrica fabricada por Sony, pero no todos los fabricantes de baterías lo utilizan. Las baterías 18650 se encuentran principalmente en dispositivos de micromovilidad, mientras que las celdas más grandes se encuentran en EV o unidades BESS/ESS.



Figura 4. Ejemplo típico de una celda cilíndrica de LIB.



Figura 5. Ejemplos de celdas cilíndricas de LIB dañadas.

2. **Celdas prismáticas:** tienen forma rectangular y son más grandes que las celdas cilíndricas. Pueden encontrarse en vehículos eléctricos y algunos vehículos híbridos y almacenan más carga que una celda cilíndrica. Los fabricantes de vehículos suelen colocar las celdas prismáticas en secuencia, sujetas dentro de una carcasa resistente, generalmente en la parte inferior del chasis del vehículo. Según el vehículo y la cantidad de daños sufridos, las carcasas exteriores pueden permanecer en gran medida intactas o parecer no dañadas, pero es posible que no indiquen adecuadamente los daños en las celdas prismáticas de la batería que se encuentran en su interior. Los sistemas comerciales a escala de la red eléctrica y los sistemas BESS/ESS residenciales más nuevos también pueden utilizar este tipo de celda.



Figura 6. Ejemplo típico de una celda prismática de LIB (izquierda), una celda prismática en llamas (centro) y una estructura de batería de EV con celdas prismáticas dañadas, obtenida durante las tareas de respuesta a los incendios forestales del sur de California de 2025.

3. **Celdas tipo bolsa:** se utilizan comúnmente en computadoras y teléfonos celulares. Sin embargo, algunos fabricantes de vehículos utilizan celdas tipo bolsa para complementar la potencia existente o para alimentar completamente el vehículo. Las celdas tipo bolsa pueden ser lo suficientemente pequeñas para dispositivos portátiles o lo suficientemente grandes para alimentar vehículos. Los electrodos se apilan uno sobre otro con un separador entre ellos varias veces antes de sellarse en una bolsa similar a una lámina. Los cátodos y ánodos pueden estar del mismo lado o en lados opuestos, según el módulo de la carcasa.



Figura 7. Ejemplos típicos de celdas tipo bolsa de LIB.

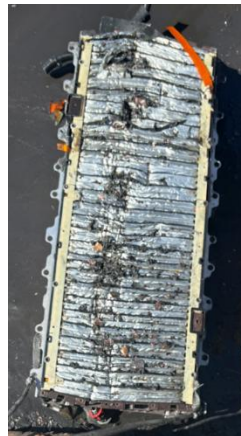


Figura 8. Celdas tipo bolsa dañadas de un vehículo eléctrico.

Composición química de las baterías de iones de litio

No solo existe una gran variedad en la estructura de las baterías de iones de litio, sino también en su composición química. La composición química de una batería afecta su densidad energética, lo que puede influir en la magnitud de la falla de una celda y determina su conveniencia y valor para la industria del reciclaje. Las distintas composiciones químicas de las baterías también generan diferentes emisiones de partículas metálicas durante un incendio. Las composiciones químicas más comunes de las baterías de iones de litio según la información disponible en septiembre de 2025 son:

1. Óxido de litio, níquel, manganeso y cobalto (NMC; LiNiMnCoO_2): aplicaciones diversas, principalmente en dispositivos de micromovilidad, vehículos eléctricos y sistemas BESS/ESS.
2. Fosfato de hierro y litio (LFP; LiFePO_4): aplicaciones diversas, principalmente en sistemas BESS/ESS y algunos vehículos eléctricos.
3. Óxido de litio y cobalto (LCO; LiCoO_2): se encuentra principalmente en dispositivos electrónicos portátiles pequeños, como teléfonos inteligentes, computadoras portátiles y baterías para herramientas eléctricas.
4. Óxido de litio y manganeso (LMO; LiMn_2O_4): se encuentra principalmente en baterías para herramientas eléctricas y dispositivos médicos, a menudo en forma de celdas cilíndricas.
5. Litio rico en manganeso (LMR): se promociona como una tecnología de baterías de próxima generación para algunos fabricantes de automóviles estadounidenses, pero es otra forma de LMO.
6. Óxido de litio, níquel, cobalto y aluminio (NCA; LiNiCoAlO_2): se encuentra principalmente en vehículos eléctricos. Entre los más destacados están el Tesla Model S (2012-presente), el Model X (2015-presente), el Model 3 Long Range (2017-presente), el Model Y Long Range (2020-presente) y el Lucid Air (2021-presente).
7. Titanato de litio (LTO; $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$): se encuentra principalmente en fuentes de alimentación, sistemas de propulsión eléctrica y luminarias públicas solares.

Fallas e incendios de baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio pueden fallar por numerosas razones. Las tres causas más comunes de falla (en las que se centrará este documento) son el uso indebido de tipo eléctrico, físico o térmico (sobrecalentamiento), generalmente relacionado con daños en el separador. Las fallas de las celdas también pueden deberse a defectos en el proceso de fabricación, la composición química de la batería o el sistema de gestión de baterías (BMS) diseñado por el fabricante del equipo original (OEM). Independientemente de la causa de la falla, todas las fallas pueden provocar la liberación de gases tóxicos, humo, incendios y explosiones. Sin embargo, también es posible que una batería falle sin ninguno de esos signos evidentes. Los mecanismos de falla y las posibles exposiciones se describen con mayor detalle a continuación.

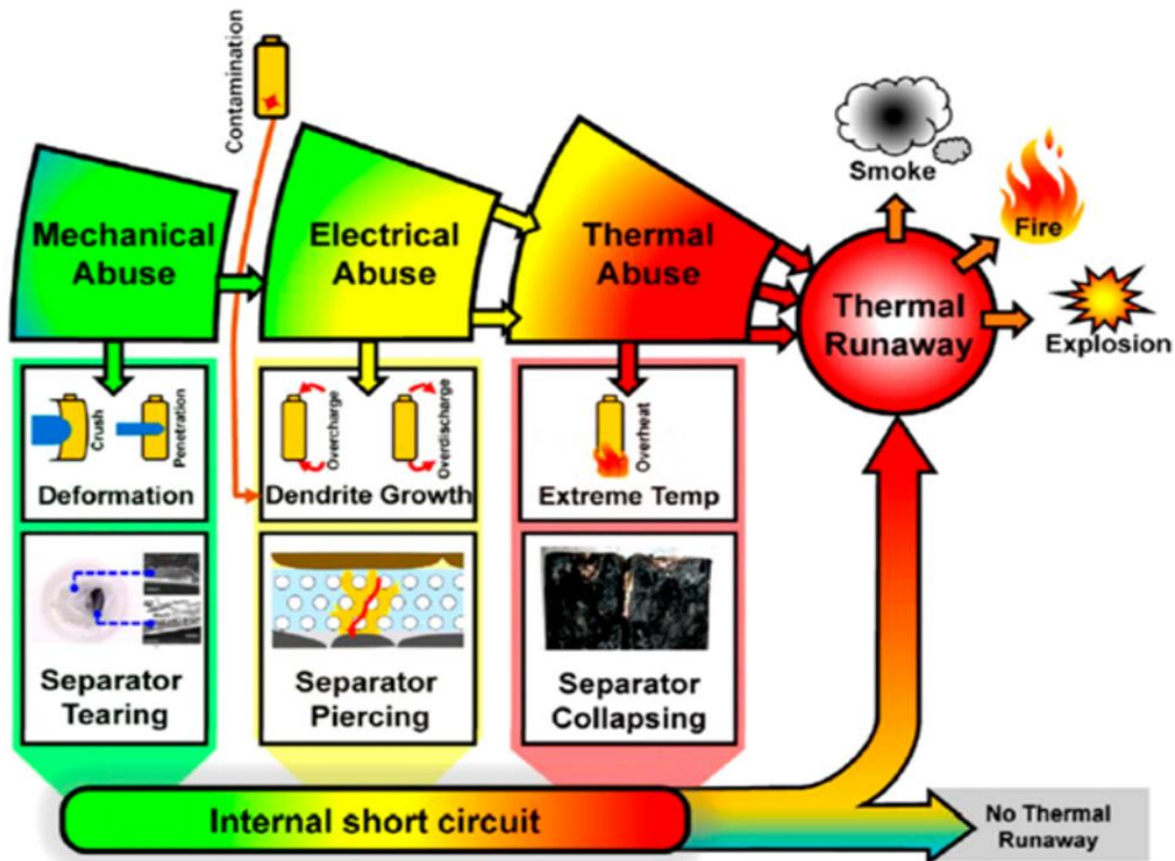


Figura 9. Diagrama que muestra cómo las fallas de la LIB conducen a condiciones de fuga térmica.

Etapas y características de las fallas de las baterías de iones de litio

1. Daño inicial de la batería

Por lo general, una falla de la batería implica daños en el separador que provocan un cortocircuito interno de la batería. Cuando se produce el cortocircuito, la batería se calienta y comienza a hervir el electrolito dentro de la celda cerrada, lo que provoca una acumulación de presión. Finalmente, la presión hace que la celda falle y libere una mezcla de gases a la atmósfera. Por lo general, el separador se daña por uno de tres tipos de uso indebido o afectación.

- Uso mecánico indebido: aplastamiento o perforación de una celda de batería que hace que el separador se deforme o desgarre debido a la fuerza física ejercida sobre la batería.
- Uso eléctrico indebido: sobrecargas o subcargas repetidas pueden provocar el crecimiento de dendritas. Las dendritas son estructuras similares a ramas que se forman en el ánodo o el cátodo y pueden crecer hasta perforar el separador.
- Uso térmico indebido: cuando las baterías se exponen a temperaturas elevadas, de alrededor de 150 °F o más, según el tipo de celda y la composición química de la batería, el separador puede dañarse o colapsar.

* La exposición al agua puede provocar corrosión de los electrodos de la batería y dar lugar a fallas similares a las causadas por el uso mecánico o térmico indebido.

Después de que la batería experimenta uno de estos tipos de uso indebido, se considera DDR según el DOT.

2. Cortocircuito interno

En cualquiera de los casos de uso indebido, la celda de la batería puede sufrir un cortocircuito interno. El momento en que ocurre el cortocircuito y su intensidad pueden variar considerablemente. Algunas celdas pueden sufrir un cortocircuito pequeño y experimentar poco o ningún calentamiento sin llegar nunca a una fuga térmica. Otras celdas pueden sufrir un cortocircuito mayor y entrar inmediatamente en fuga térmica y fallar rápidamente, liberando una mezcla de gases tóxicos que probablemente provoque un incendio o una explosión. Otras baterías pueden resultar dañadas, pero sufrir un cortocircuito retardado y no entrar en fuga térmica hasta mucho tiempo después de que se produzca el daño (horas, días, semanas o meses).

3. Fuga térmica

La fuga térmica se entiende mejor como un calentamiento rápido de los componentes internos de la batería debido a una combinación de un cortocircuito eléctrico interno y una reacción química provocada por el calentamiento. El voltaje de la batería y su composición química determinan la intensidad de la fuga térmica. Una reacción autosostenida en una celda determinada es imposible de interrumpir y generalmente provoca la liberación de gases y un incendio. Una celda que experimenta una fuga térmica normalmente estará a más de 550 °F, y ese calor puede transferirse a las celdas circundantes de la batería, dañándolas térmicamente y haciendo que también entren en fuga térmica. Esta transferencia de calor de una celda de la batería a otra se denomina propagación. Es importante señalar que, una vez que una batería entra en fuga térmica, no hay forma de detener la reacción. La reacción continuará hasta completarse. Sin embargo, las medidas de enfriamiento (aplicación de agua) pueden interrumpir cualquier propagación que se produzca. La fuga térmica en una celda dañada o defectuosa puede producirse inmediatamente después del uso indebido o retrasarse de manera impredecible.

4. Liberación de gases

Durante la etapa de liberación de gases de la falla de una batería, puede escucharse un sonido similar a un chasquido. Se asocia principalmente con las celdas cilíndricas, pero también puede producirse en otros tipos de baterías. En las celdas cilíndricas, el "chasquido" se produce cuando la tapa superior se separa o se abre del cuerpo de la celda debido a la acumulación de presión interna.

5. Incendio o explosión de los gases liberados

A menudo, después de la liberación inicial de gases, las baterías están lo suficientemente calientes como para provocar que los gases se enciendan. En ocasiones, la ignición ocurre al principio de la liberación de gases y el fuego aparece como una llama en forma de chorro, similar a la de una bengala. En otros casos, la ignición puede ocurrir después de que se hayan emitido grandes cantidades de gas; este incendio comenzaría de forma explosiva, ya que todos los gases presentes en las inmediaciones se encenderían rápidamente. En cualquiera de los dos casos, la reacción química exotérmica autosostenida dentro de la celda interna de la batería no puede extinguirse mediante

ningún método tradicional de extinción de incendios, como la aplicación de agua, CO₂, capa de espuma, arena u otros materiales de cobertura. Actualmente, no existe ninguna tecnología ni método conocido para extinguir un incendio de una batería de iones de litio en el nivel interno de la celda donde se origina mientras las baterías experimentan una fuga térmica autosostenida. Además, no existe evidencia científica que demuestre que haya un agente extintor o refrigerante más eficaz que el agua para limitar la propagación del calor a otras celdas. Durante la fuga térmica o el calentamiento de la celda, los gases contienen combustible y oxígeno y, por lo general, suficiente calor para provocar o mantener la ignición. Sumergir en agua las baterías en llamas o aplicar agua de forma intensa no extingue el incendio, pero puede inhibir la propagación a las celdas que no están en llamas en ese momento. La aplicación de agua también puede ser necesaria para evitar que otros materiales combustibles se incendien. Cuando las celdas cilíndricas se incendian, según el daño sufrido por la carcasa circundante, pueden convertirse en proyectiles que pueden salir disparados a una distancia de 50 pies o más². Estos proyectiles pueden impactar a otros objetos y provocar otros incendios o lesionar a una persona cercana. Consulte la sección de Tácticas de extinción de incendios para obtener más información sobre la extinción de incendios de LIB.

6. Incendio de plásticos anexos y otros materiales que no forman parte de las baterías

Las baterías rara vez se transportan únicamente como celdas de batería. A menudo tienen materiales de empaque circundantes, y estos materiales suelen ser inflamables. Los incendios de baterías alcanzan temperaturas suficientemente altas como para incendiar los materiales de empaque circundantes, normalmente plásticos. Los incendios de los plásticos pueden extinguirse por medios habituales con agua u otros agentes inertes.

7. Reignición

La reignición de los incendios de baterías es común. Las celdas individuales no vuelven a incendiarse una vez que han experimentado una fuga térmica y el fuego las ha consumido por completo. Sin embargo, es común que no todas las celdas de un grupo de baterías, paquete de baterías o módulo se quemen. En esos casos, es probable que las baterías que no se consumieron resulten dañadas por las baterías circundantes que están en llamas. Una vez dañada, una batería puede experimentar una fuga térmica en cualquier momento y de manera impredecible. El potencial de reignición es una de las principales preocupaciones en materia de salud y seguridad para la EPA y el personal de respuesta en un sitio donde hay baterías.

Respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio

Responder ante incidentes que involucran baterías de iones de litio representa un desafío complejo y multifacético que requiere modificar los protocolos tradicionales de respuesta ante emergencias. Las características inherentes de las baterías de iones de litio, incluido su potencial de fuga térmica, la liberación de gases tóxicos e inflamables y comportamientos impredecibles como la reignición, requieren

² Observaciones realizadas durante varias respuestas ante incidentes indicaron que las carcasas de las baterías quedaron a 75 pies o más del lugar donde se encontraba la batería. Entre esas respuestas se encuentran una prueba de baterías en San Diego realizada el 23 de febrero de 2024 en un contenedor de transporte, durante la cual las celdas pasaron por encima de las cabezas de observadores que se encontraban a 50 pies de la bolsa sometida a prueba; un autobús del aeropuerto de San Diego en febrero de 2024, donde las celdas llegaron hasta 75 pies del autobús; y un incendio de un camión de FedEx en Monahan, Texas, en febrero de 2023, durante el cual las baterías quedaron esparcidas al menos a 50 pies en todas las direcciones.

consideraciones especiales y la toma de decisiones tácticas para garantizar la seguridad del personal de respuesta y del público. A diferencia de los incendios convencionales o los incidentes con materiales peligrosos, los incidentes con baterías de iones de litio requieren un enfoque adaptado que tenga en cuenta las condiciones específicas de cada evento. Estas consideraciones abarcan una amplia variedad de factores y puntos críticos de toma de decisiones, incluidas las consideraciones de salud y seguridad, las opciones de monitoreo del aire, las tácticas de extinción de incendios y las actividades planificadas de retiro.

Consideraciones de salud y seguridad para el personal de respuesta

La salud y la seguridad del personal de respuesta y del público son objetivos principales en toda respuesta. A continuación, se presentan algunos conceptos que deben tenerse en cuenta; sin embargo, cada incidente o sitio presentará sus propios desafíos y los objetivos pueden variar. El análisis de riesgos laborales (JHA) puede incluirse en cualquier plan de salud y seguridad relacionado con las respuestas ante incidentes con baterías de iones de litio. Se adjuntan como ejemplos algunos JHA recientes de respuestas ante incendios forestales (documento adjunto 1) que pueden modificarse y ampliarse según las condiciones específicas del sitio.

Peligros

Los peligros que pueden encontrarse en un sitio con baterías incluyen peligros físicos, químicos y para la salud. Los peligros físicos pueden dividirse en los relacionados con el entorno de trabajo y los asociados con las baterías. Los peligros físicos del sitio serán los peligros habituales que se encuentran en la mayoría de los sitios de respuesta ante emergencias y de retiro. Estos incluyen los peligros relacionados con equipos pesados, como lesiones por aplastamiento y por golpes con objetos, así como laceraciones y perforaciones causadas por objetos punzantes. Otros peligros incluyen lesiones por movimientos repetitivos relacionadas con la manipulación manual y el levantamiento de objetos pesados y los muy frecuentes resbalones, tropiezos y caídas. Se requerirá equipo protector personal (PPE), por lo que habrá estrés por calor, así como estrés por frío, según la ubicación geográfica. Consulte el [Manual de salud y seguridad para el personal de respuesta ante emergencias de la EPA](#) para obtener orientación detallada sobre el reconocimiento de peligros y la reducción de riesgos (se requiere acceso a la red de la EPA). Las baterías de iones de litio presentan peligros adicionales; algunos son propios de las baterías.

Los sistemas de baterías de mayor tamaño, por ejemplo, los de EV y BESS/ESS, pueden contener una carga eléctrica considerable que puede provocar una electrocución mortal o una descarga de arco eléctrico mortal. Puede ser necesario evaluar una batería de iones de litio dañada para detectar energía remanente o cables energizados antes de manipularla. Una batería de iones de litio suministra corriente continua (CC) y un multímetro debe configurarse en el modo CC para medir su voltaje o corriente con precisión. Es común que los componentes y sistemas de baterías de iones de litio conviertan CC en corriente alterna (CA), y, por motivos de seguridad y según el tipo de configuración de la batería, esta conversión debe ser evaluada por personal autorizado y certificado o capacitado (por ejemplo, un electricista especializado).

Las baterías de iones de litio dañadas pueden experimentar una fuga térmica instantánea o retardada. Los daños, al igual que los defectos, pueden no ser identificables. Por lo tanto, los OSC deben abordar la preparación para incendios en el plan de salud y seguridad del sitio al manipular baterías durante las actividades en el sitio. La sección Consideraciones del sitio y estabilización a continuación presenta algunas consideraciones clave para la planificación de emergencias por incendios en el sitio. Durante una fuga térmica pueden producirse quemaduras térmicas, incendios repentinos y la liberación explosiva de gases contenidos. La liberación explosiva de gases contenidos puede generar peligros de salpicaduras del líquido electrolítico de la batería, así como perforaciones y laceraciones causadas por la fragmentación

de la carcasa de la batería y del equipo en el que está contenida. Las celdas cilíndricas pueden convertirse en proyectiles y causar quemaduras o laceraciones si impactan contra el personal.

Los peligros químicos que pueden encontrarse son gases inflamables y combustibles, gases corrosivos, gases tóxicos y líquidos tóxicos (electrolito y refrigerante). Las sustancias químicas peligrosas específicas asociadas con las baterías de iones de litio se analizan con mayor detalle en la sección de este documento dedicada al monitoreo del aire.

Durante una liberación de gases o un incendio que involucre una batería de iones de litio, el hidrógeno es el principal gas inflamable que se libera. Como el hidrógeno tiene un amplio rango de explosividad, representa un peligro considerable. Este riesgo es especialmente alto en espacios cerrados o confinados, incluidos los cuartos pequeños y los contenedores de transporte. En estas áreas, el gas puede acumularse, lo que puede provocar igniciones o explosiones de gran intensidad. Por este motivo, el personal de respuesta debe extremar las precauciones al trabajar en estos entornos.

El monóxido de carbono (CO) es un peligro grave en un incidente de incendio o de liberación de gases de baterías de iones de litio. Como el segundo gas más abundante, es tanto tóxico como inflamable. Durante un evento de este tipo, las concentraciones de CO pueden aumentar a niveles muy superiores al nivel de inmediatamente peligroso a la vida y a salud (IDLH) y pueden superar el rango operativo del sensor. El personal de respuesta debe reconocer el riesgo de una acumulación considerable de gases en espacios confinados, similar al peligro que representa el hidrógeno.

El gas fluoruro de hidrógeno (HF) es uno de los gases más tóxicos que se generan durante un evento de liberación de gases o incendio de una LIB. Sin embargo, se genera en cantidades mucho menores, medidas en el rango de ppm, que el hidrógeno y el monóxido de carbono (ambos se generan en rangos de concentraciones porcentuales de dos dígitos). La solución electrolítica de la batería normalmente es un líquido tóxico y combustible. Las sustancias tóxicas comunes contenidas en la solución electrolítica son el hexafluorofosfato de litio (LiPF₆) y los solventes orgánicos. Las exposiciones a soluciones que contienen LiPF₆ deben tratarse de manera similar a las exposiciones a soluciones de ácido fluorhídrico. Las emisiones de fugas térmicas e incendios que involucren LiPF₆ pueden producir gas fluoruro de hidrógeno. Además, las soluciones de electrolitos pueden variar según el fabricante, con formulaciones específicas consideradas de propiedad exclusiva. Pueden existir peligros adicionales que no se comprendan completamente según la composición química del electrolito.

Al igual que con todas las acciones de respuesta, implemente controles de ingeniería en la medida de lo posible para reducir o eliminar la necesidad de ciertos tipos de PPE.

Recomendaciones sobre PPE

Conjunto estándar de PPE:

A continuación, se sugieren conjuntos estándar de PPE para incidentes con LIB. Los OSC deben modificar los conjuntos estándar para abordar los riesgos específicos del sitio que no se hayan descrito aquí.

Nivel	Respiratorio	Ojo	Traje	Guantes	Pies	Actividad habitual
D	No corresponde	Gafas de seguridad	No corresponde	Guantes de trabajo	Botas de seguridad	Actividades que no impliquen manipulación fuera de la zona de exclusión; movilización/desmovilización; preparación del sitio.

C	Respirador purificador de aire (APR), de media cara o cara completa, con cartucho multipropósito	Gafas de seguridad	Tyvek	Guantes de trabajo	Botas de seguridad	Trabajo en la zona de exclusión después de retirar todas las baterías, pero cuando persistan otros riesgos de exposición.
C con protección resistente a la llama (FR)	APR (de media cara o cara completa) con cartucho multipropósito	Gafas de seguridad cuando se use un APR de media cara o de cara completa	Overol con FR y Tyvek con resistencia al fuego secundario (SFR)	Guantes de trabajo con protección térmica	Botas de seguridad	Aplicable cuando no haya una fuga térmica activa ni un incendio: actividades que no impliquen manipulación dentro de la zona de exclusión con baterías presentes; todas las actividades de manipulación de baterías (recolección, empaque, desmantelamiento de baterías, etc.
B con FR	Equipo de respiración autónoma (SCBA) o suministro de aire	Máscara facial de SCBA	Overol con FR y Tyvek con SFR	Guantes de trabajo con protección térmica	Botas de seguridad	Cualquier incendio; fuga térmica activa; concentraciones en el aire que superen de manera sostenida los niveles establecidos para aumentar el nivel de PPE.

Tabla 1: Recomendaciones de conjuntos estándar de PPE.

A continuación, se presentan explicaciones más detalladas sobre los peligros y las condiciones específicos de las LIB que se tuvieron en cuenta al elaborar el conjunto estándar de PPE recomendado.

Consideraciones sobre la protección dérmica contra el ácido fluorhídrico

Normalmente, el personal de respuesta asocia una liberación de fluoruro de hidrógeno (HF) con un conjunto estándar de PPE de Nivel A debido al riesgo de exposición dérmica. La generación de gas HF y el riesgo de exposición durante un incendio de baterías varían considerablemente según la ubicación, por ejemplo, en interiores o exteriores, los vatios-hora de la batería, el calor del incendio, etc. Las condiciones habituales que se encuentran durante una acción de respuesta típica ante un incidente con baterías no requieren ropa de protección química completamente encapsulada y hermética a los vapores (Nivel A) ni un traje de protección química. En general, no se requiere Nivel A para una respuesta ante un incidente con baterías de iones de litio porque la fuente de gas o vapor de HF está diluida (<30 ppm). Los requisitos de PPE de Nivel A suelen estar asociados con sitios donde existe una fuente de HF en forma de líquido libre o donde hay contacto directo con una fuente anhidra o concentrada. La siguiente tabla se basa en las recomendaciones del Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) que se guían por los niveles de referencia de exposición aguda (AEGL) de 8 horas de la EPA y los valores de IDLH.³

³ American Chemistry Council, Hydrogen Fluoride Panel. (2018). *Emergency Preparedness and Response Guidelines for Anhydrous Hydrogen Fluoride (AHF) and Hydrofluoric Acid (HF)*. Recuperado de: <https://www.americanchemistry.com/content/download/5432/file/Emergency-Preparedness-and-Response-Guidelines-for-Anhydrous-Hydrogen-Fluoride-AHF-and-Hydrofluoric-Acid-HF.pdf>.

Guía de NIOSH para HF

https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponsecard_29750030.html

Concentraciones de HF en el aire con bajo riesgo de peligro de salpicaduras	PPE adecuado
≥30 ppm	Nivel A
>25 ppm y <30 ppm	SCBA con ropa de protección química contra HF
>12 ppm y <25 ppm	APR de cara completa con ropa de protección química contra HF
>1 ppm y <12 ppm	APR de cara completa y ropa FR
<1 ppm	Ropa FR

Tabla 2. Recomendaciones de PPE en relación con las concentraciones de HF en el aire.

Consideraciones sobre la ropa resistente a la llama (FRC) y recomendación de ropa resistente a la llama (FR) desechable

La protección térmica es un control de peligros particular que no suele encontrarse en los sitios de respuesta ante emergencias y retiro de la EPA. Se requieren una planificación y una preparación especiales tanto para el personal de respuesta de la EPA como para los contratistas. El conjunto de PPE para responder ante incidentes con baterías de iones de litio debe incluir consideraciones relativas a la protección contra las llamas y el arco eléctrico. Esto se logra agregando overoles resistentes a la llama (FR) al conjunto estándar de PPE. La ropa FR está diseñada para limitar las lesiones por quemaduras, proporcionar tiempo adicional para escapar y aumentar las probabilidades generales de supervivencia de un trabajador en situaciones con peligro de exposición a las llamas. El material FR no se enciende, no se derrite, no gotea ni continúa ardiendo una vez que la llama inicial se ha extinguido. Las siguientes son las principales normas que la ropa FR debe cumplir o superar:

- [NFPA 2112](#): Norma sobre indumentaria resistente a las llamas para la protección del personal industrial contra exposiciones térmicas de corta duración causadas por incendios.
- [ASTM F1930](#): Método de prueba estándar para evaluar ropa resistente al fuego para protección contra simulaciones de fuego utilizando un maniquí de instrumentos.
- [NFPA 70E](#): Estándar para la seguridad eléctrica en el lugar de trabajo.
- [ASTM F1506](#): Especificación de desempeño estandarizada para ropa de protección resistente a las llamas y con clasificación de arco eléctrico utilizada por trabajadores expuestos a llamas y arcos eléctricos.
- Al comprar ropa FR, considere también las certificaciones realizadas por terceros, como las [Pruebas y certificación de PPE para personal de primera respuesta y servicios de emergencias de Underwriters Laboratory](#).

Los datos sobre emisiones indican que pueden emitirse niveles elevados de metales durante los incendios de baterías de iones de litio, lo que puede representar un riesgo para el personal durante el incendio y después de este debido a la deposición de los metales sobre las baterías y los escombros.⁴

Dado el potencial de exposición a polvo peligroso, los overoles FR utilizados en la zona de trabajo no deben usarse en la zona de apoyo ni salir del sitio de trabajo sin haber sido previamente lavados o protegidos con un overol desechable resistente al fuego secundario (SFR). Existen opciones comerciales de overoles SFR

⁴ <https://teex.org/wp-content/uploads/LITHIUM-ION-BATTERY-FIRES-AND-EMISSIONS-CHARACTERIZATION.pdf>

desechables. Revise cuidadosamente los datos técnicos; por lo general, los overoles SFR desechables están diseñados para usarse sobre la ropa FR principal y protegerla del polvo peligroso, aceites, suciedad y mugre. Es posible que los overoles SFR desechables no cumplan los estándares indicados anteriormente y no deben ser el único componente del conjunto de PPE que proporcione protección contra llamas o arcos eléctricos. A continuación, se presentan ejemplos de overoles SFR desechables disponibles comercialmente.

1. [DuPont™ Tyvek® 400 SFR](#)
2. [DuPont™ ProShield® 6 SFR](#)
3. [Lakeland™ Pyrolon® Series](#)
4. [Kapler™ Zytron® 300 FR](#)

Adecuación de los respiradores purificadores de aire en un entorno con posibles nanopartículas

La inhalación de materiales tóxicos no es algo nuevo al responder ante emergencias con sustancias tóxicas; sin embargo, las emisiones de las baterías de iones de litio no suelen tenerse en cuenta al seleccionar el PPE respiratorio. Los datos preliminares del Laboratorio Nacional de Energías Renovables, compartidos en noviembre de 2024, sugieren que los metales emitidos durante un incendio de baterías de iones de litio tendrán un rango de tamaño de entre 100 nanómetros (nm) y más de 10 micrómetros de diámetro. En la prueba de certificación de filtros utilizada para certificar los cartuchos de los respiradores purificadores de aire, el tamaño de las partículas utilizadas es de aproximadamente 300 nanómetros. El NIOSH realizó pruebas adicionales que demostraron que los respiradores equipados con cartuchos P100 o N95 proporcionaron niveles de desempeño similares o mejores para partículas de 10 a 100 nm en comparación con partículas de mayor tamaño (100 a 400 nm). Además, se determinó que todos los respiradores proporcionaban la protección esperada contra todos los rangos de tamaño de partículas.⁵

Descontaminación

Para la mayoría de las tareas asociadas con la respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio, lo más conveniente es utilizar un método de descontaminación en seco. Los equipos, recursos y la mayoría de los componentes del PPE pueden descontaminarse en seco; sin embargo, los materiales porosos, como las correas de tela de los SCBA y la ropa exterior FRC, pueden requerir lavado o descontaminación en húmedo.

Debido a las altas concentraciones de metales que se producen durante un incendio de baterías de iones de litio, el PPE debe tratarse como contaminado después del trabajo. Los PPE reutilizables, como los overoles FR y los guantes de trabajo con protección térmica, pueden ser difíciles de descontaminar entre turnos o entradas. Si están disponibles, pueden utilizarse overoles SFR desechables para proteger la ropa exterior FRC principal. Si no se dispone de PPE desechable y no es posible descontaminar el PPE, este debe almacenarse en la zona de reducción de la contaminación para colocárselo inmediatamente antes de volver a entrar en la zona de exclusión. En las reuniones diarias de seguridad, asegúrese de que los miembros del equipo comprendan la importancia de tratar el PPE reutilizable de manera que se reduzca la contaminación cruzada. El personal no debe usar ropa que no haya sido descontaminada en vehículos, el puesto de control de incidentes ni otras áreas fuera de la zona de exclusión.

Monitoreo y muestreo del aire durante la respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio

Modelo conceptual del sitio para incendios de baterías

⁵ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26180261/>

Una parte importante de la respuesta ante incidentes con baterías de iones de litio consiste en planificar o reaccionar ante la liberación de vapores o humo de baterías dañadas que experimentan fuga térmica. Para fines de modelación, puede ser útil conocer los volúmenes estimados y la composición de los gases generados por baterías de distintos tamaños. Varios investigadores han publicado estudios para determinar las tasas y cantidades de producción de gases; sin embargo, existen muchas variables (por ejemplo, la composición química de la batería, la solución electrolítica, el tipo de celda, el tamaño de la batería, el voltaje, etc.) que dificultan establecer tasas y cantidades específicas de producción de vapores. Otros materiales involucrados en un incendio de baterías, como los plásticos que rodean un paquete de baterías o las espumas de un EV, también pueden contribuir al volumen de gases y vapores generados. Como regla general, para estimar la producción de gases durante la falla de una sola batería de iones de litio 18650, se estima una producción de 6 litros por vatio-hora⁶ (L/Wh). Por lo general, se ha determinado que el hidrógeno representa aproximadamente entre el 30 % y el 50 % del total de los gases emitidos. Se estima que la producción de fluoruro de hidrógeno oscila entre 20 y 200 miligramos por vatio-hora (mg/Wh) en todas las baterías sometidas a pruebas. Estas estimaciones corresponden a la producción de gases de baterías que experimentan fuga térmica y no tienen en cuenta la combustión de los materiales circundantes (por ejemplo, los plásticos que rodean un paquete de baterías o los plásticos y las espumas de un EV).

Tipo/tamaño de batería	Celda de batería 18650 (10 Wh)	Batería de computadora portátil (30 a 100 Wh)	Batería de scooter/bicicleta eléctrica (100 a 750 Wh)	Batería de EV (50 a 100 kWh)	BESS/ESS (13.5 a 3000 kWh)
Producción estimada de gases	60 L	180 a 600 L	600 a 4500 L	30 000 a 600 000 L	81 000 a 18 000 000 L

Tabla 3. Producción estimada de gases por tipo/tamaño de batería.

Los componentes adicionales de la nube de vapor pueden variar según el tipo de electrolito utilizado en la batería, el estado de carga y la estructura de la batería (cilíndrica, prismática o tipo bolsa). Entre los gases tóxicos que se liberan en porcentajes menores se encuentran el monóxido de carbono, el cianuro de hidrógeno, el cloruro de hidrógeno, el fluoruro de fosforilo, el pentafluoruro de fósforo y el trifluoruro de fósforo. La mezcla de vapores también contiene otros hidrocarburos (por ejemplo, metano, etano, propileno, etc.). Si el vapor se enciende, también se liberan metales. En al menos un estudio en el que se quemaron baterías de iones de litio se detectaron metales como aluminio, cobalto, cobre, litio, manganeso y níquel, entre otros⁷. Otros estudios no publicados, como un ensayo de quema en el que participó la EPA junto con el Departamento de Bomberos de San Diego en 2024, indicaron resultados similares.

Las tácticas de extinción de incendios determinarán cómo abordar los impactos medioambientales de un incendio de baterías. Si se opta por actividades de supresión del incendio, como la aplicación de agua, puede ser apropiado establecer un plan de monitoreo del aire más localizado. Si se opta por actividades de supresión del incendio, como la aplicación de agua, se debe procurar recolectar el agua de escorrentía generada por las actividades de los bomberos para evaluar posteriormente los contaminantes, particularmente los metales, y

⁶Existe una gran cantidad de estudios que evalúan la composición y el volumen de los gases producidos durante eventos de falla de baterías de iones de litio. Los resultados varían considerablemente según el tipo de celda y el estado de carga de las baterías sometidas a prueba. La regla general que la EPA suele utilizar como valor de entrada para la modelación es 6 L/Wh, con base en la experiencia adquirida en diversos sitios con baterías de iones de litio.

⁷ <https://teex.org/wp-content/uploads/LITHIUM-ION-BATTERY-FIRES-AND-EMISSIONS-CHARACTERIZATION.pdf>

determinar las opciones de eliminación. La decisión de dejar arder un incendio de baterías puede afectar a la comunidad circundante, lo que puede hacer necesario ampliar el monitoreo del aire y considerar posibles recomendaciones para que el público o el personal de respuesta se resguarden en el lugar o evacúen.

El muestreo del suelo y de las vías de escorrentía no se ha estudiado ampliamente y, por lo general, no se realiza en incidentes con baterías de iones de litio. Corresponde al OSC determinar si es necesario realizarlo.

Monitoreo del aire

El monitoreo del aire es una herramienta para evaluar los entornos con el fin de determinar las medidas de salud y seguridad del personal, establecer zonas calientes y evaluar el potencial de exposición de la comunidad. En esta sección se analizarán los instrumentos incluidos en la Lista Nacional de Equipos (NEL) del Grupo Técnico de Respuesta ante Emergencias (ERTG). Sin embargo, existe una variedad de unidades portátiles y de monitoreo perimetral del aire que no figuran en la NEL y que son similares a los instrumentos descritos en esta sección. Se ha elaborado una Tabla de monitoreo de aire (documento adjunto 2), organizada por analito específico, instrumentos adecuados y sus niveles de detección, niveles de acción (niveles de referencia de exposición aguda [AEGL], criterios de acciones protectoras [PAC] y directrices para la planificación de la respuesta en situaciones de emergencia [ERPG]) y referencias para el muestreo del aire.

Tabla de monitoreo del aire

Durante la liberación de gases y los incendios activos de baterías de iones de litio se liberan diversas sustancias químicas. Muchas de estas sustancias químicas se han identificado en entornos de laboratorio, pero es posible que no se haya demostrado de manera concluyente que se liberen de todas las composiciones químicas de baterías en situaciones reales. La Tabla de monitoreo de aire (documento adjunto 2) está organizada para mostrar primero las sustancias químicas con mayor probabilidad de ser emitidas o de influir en la toma de decisiones durante una respuesta (primarias) y, en segundo lugar, destacar otros compuestos que podrían liberarse, pero que probablemente no influirán en la toma de decisiones (secundarias). A continuación, se incluye una tabla resumida de las sustancias químicas de interés primarias y secundarias.

Sustancias químicas/metales de interés primarios	Sustancias químicas/metales de interés secundarios
Hidrógeno	Dióxido de azufre
Fluoruro de hidrógeno	Cianuro de hidrógeno
Monóxido de carbono	Cloruro de hidrógeno
Níquel	Sulfuro de hidrógeno
Litio	Amoníaco
Manganeso	Formaldehído
Cobalto	Pentafluoruro de fósforo
Cobre	Fluoruro de fosforilo
Negro de carbón	Trifluoruro de fósforo
Aluminio	Óxido de zinc
	Cadmio
	Plomo
	Plata
	Antimonio
	Estaño

	Bario
	Hierro
	Talio

Tabla 4. Sustancias químicas de interés primarias y secundarias durante incendios de baterías de iones de litio.

Enfoque inicial sugerido para el monitoreo del aire

El enfoque inicial para el monitoreo del aire durante un incendio activo de baterías de iones de litio es similar al utilizado habitualmente en incendios industriales. El despliegue inicial debe incluir lo siguiente:

- **medidores de 5 gases**, con un
 - sensor de nivel mínimo explosivo (LEL) (capaz de detectar hidrógeno),
 - sensor de oxígeno (O₂),
 - sensor de monóxido de carbono (CO),
 - sensor/detector de fotoionización (PID) y
 - sensor de cianuro de hidrógeno (HCN);
- **SPM flex** con cintas para ácidos minerales configuradas para mostrar HF;
- **monitores de partículas**;
- **equipo de muestreo del aire para el análisis de metales** (casete de éster de celulosa mixta [MCE] de 37 mm, 225-3-01).

Las tácticas de monitoreo del aire durante la fase de remoción de un sitio de baterías de iones de litio, cuando no hay un incendio activo, pero se están manipulando las baterías y podría producirse un incendio, no son necesariamente diferentes de las utilizadas durante un incendio activo. Sin embargo, el alcance del monitoreo puede limitarse al monitoreo en el sitio o el perímetro. Se consideran adecuados instrumentos y niveles de acción similares.

Consideraciones para el monitoreo del aire

Como se describió anteriormente, es probable que durante los incidentes con baterías de iones de litio se necesite un conjunto considerable de instrumentos para el monitoreo del aire. A continuación, se presentan consideraciones más detalladas sobre las tácticas de monitoreo del aire durante incidentes con baterías de iones de litio.

Detectores de fotoionización, indicadores de gases combustibles y sensores de CO

Los MultiRAE y AreaRAE deben contar con un sensor detector de fotoionización (PID) que mida compuestos orgánicos volátiles (VOC) y un indicador o sensor de gases combustibles que mida el nivel mínimo explosivo (LEL). Ninguno de los sensores puede diferenciar la sustancia química a la que responde. Además, los PID suelen estar equipados con una lámpara de 10.6 electronvoltios (eV) y solo responderán a compuestos cuyo potencial de ionización sea menor o igual a 10.6 eV.

Los sensores de LEL indican el riesgo de incendio o explosión en la atmósfera. Este sensor mide en el rango porcentual y podría indicar la presencia de concentraciones elevadas. Debido a la cantidad de hidrógeno que se produce durante la liberación de gases de las baterías, el sensor de LEL es fundamental para establecer una zona caliente, reconocer una posible atmósfera explosiva e implementar controles de ingeniería. Según el instrumento de monitoreo utilizado y la tecnología del sensor que lo acompaña, es posible que el sensor de LEL no pueda detectar hidrógeno. Se sabe que los sensores de LEL infrarrojos (IR), que no detectan hidrógeno, son habituales en algunos de los equipos que tienen en inventario las regiones de la EPA. Los instrumentos de RAE Systems suelen utilizar un sensor de LEL con tecnología de perla catalítica que detecta hidrógeno. Verifique que

los sensores puedan detectar hidrógeno antes de utilizarlos. Utilice siempre sensores de LEL junto con sensores de O₂. Los entornos con deficiencia de oxígeno pueden provocar lecturas inexactas de los sensores de LEL.

Sensibilidad cruzada al hidrógeno

La configuración estándar de los sensores electroquímicos de los equipos MultiRAE y AreaRAE de la EPA incluye O₂, un PID para medir VOC, un indicador de gases combustibles para LEL, CO y sulfuro de hidrógeno (H₂S). El hidrógeno (H₂) presenta sensibilidad cruzada con los sensores electroquímicos de CO y con el sensor electroquímico combinado de CO/H₂S. Esto se debe a que el hidrógeno reacciona de manera similar dentro del electrodo del sensor y genera una respuesta. Se sabe que durante la liberación de gases de las baterías se producen CO y H₂, lo que significa que parte de la lectura del sensor de CO corresponderá a CO real y otra parte será el resultado de una reacción de sensibilidad cruzada al H₂. Por lo tanto, puede resultar difícil cuantificar las concentraciones de CO o H₂. El sensor de CO sigue siendo un buen indicador general de niveles bajos de liberación de gases, por debajo del rango de medición de un sensor de LEL.

Para conocer los factores de corrección específicos, consulte la Nota técnica TN-114 de RAE Systems by Honeywell, *Especificaciones de los sensores y sensibilidades cruzadas*. En general, esta sensibilidad cruzada se observa en otros sensores electroquímicos de diversos dispositivos de monitoreo del aire de otros fabricantes.

Algunos fabricantes, como RAE Systems, también comercializan sensores de CO compensados para H₂, que presentan una sensibilidad cruzada al hidrógeno mucho menor. Por lo general, la EPA tiene en inventario sensores de CO sin compensación; sin embargo, se debe verificar qué sensor se está utilizando y conocer sus sensibilidades cruzadas.

Gases ácidos

RAE Systems cuenta con sensores electroquímicos para monitorear la presencia de cloruro de hidrógeno (HCl), HF y HCN en el aire ambiental. Sin embargo, los sensores de HCl y HF solo pueden utilizarse en los equipos AreaRAE Pro y requieren métodos de calibración específicos. Debido a que los instrumentos de RAE Systems incluyen otros sensores que pueden dañarse por la exposición a gases ácidos, no se recomienda utilizarlos para detectar gases ácidos y, en general, se debe evitar colocarlos en entornos en los que estarán expuestos durante períodos prolongados a concentraciones elevadas de estos gases. El sensor de HCN está disponible para los equipos MultiRAE y AreaRAE Pro.

El Honeywell SPM Flex es un instrumento que puede utilizarse como monitor portátil o perimetral del aire ambiental. El SPM Flex utiliza una cinta Chemcassette tratada con un reactivo químico que reacciona con el gas objetivo a medida que este atraviesa el instrumento. Un lente óptico interpreta la reacción y genera una lectura digital que se muestra en la pantalla del instrumento. Las cintas Chemcassette se formulan individualmente para un gas específico o una familia de gases que pueden monitorearse. El SPM Flex solo puede utilizar una cinta Chemcassette a la vez para monitorear un gas específico o una familia de gases, según lo indicado por el tipo de cinta Chemcassette (por ejemplo, ácidos minerales, hidruros, HCN, etc.). El HF y el HCl forman parte de la familia de gases de ácidos minerales, mientras que para el HCN se utiliza una cinta Chemcassette específica para este compuesto. Puede ser necesario utilizar varias unidades SPM Flex para monitorear múltiples componentes. El personal de respuesta debe tener en cuenta los límites de detección del SPM Flex, ya que los datos históricos han demostrado que la liberación de gases de las LIB puede alcanzar o superar el límite de detección, lo que provoca la saturación del dispositivo.

Las unidades SPM Flex tienen diferentes configuraciones de calibración cuando se utilizan a altitudes superiores a 3000 ft y no pueden utilizarse a altitudes superiores a 6000 ft. Al seleccionar y utilizar los instrumentos, debe actuarse con precaución y teniendo en cuenta este riesgo.

Metales

Actualmente, no existe en la NEL ningún instrumento portátil reconocido que pueda medir en tiempo real las concentraciones de metales en el aire ambiente. Los monitores de partículas, incluidos el TSI DustTrak II (portátil), el TSI DustTrak DRX (fijo) y el Met One E-BAM, pueden utilizarse para medir el tamaño de las partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) en el aire ambiental. Los monitores de aire DustTrak miden partículas con tamaños que oscilan entre 0.1 y 10 micrones (lo que incluye los tamaños de partículas que actualmente se sabe que se emiten durante un incendio de baterías, incluidos los metales). Los monitores de partículas no distinguen entre los diferentes componentes de las partículas. Los niveles generales de acción para las concentraciones de partículas se han tomado de *El humo de incendios forestales: una guía para funcionarios de salud pública* (revisado en 2019), de AirNow de la EPA.

Categoría de AQI	PM _{2.5} µg/m ³ Promedio de 24 horas	Medidas recomendadas
Buena (0-50)	0-12	Si se pronostica un episodio de humo, implementar un plan de comunicación.
Moderada (51-100)	12.1-35.4	Emitir comunicados de servicio público en los que se informe a la población sobre los efectos del humo en la salud, los síntomas y las formas de reducir la exposición.
Insalubre para grupos sensibles (101-150)	35.5-55.4	Si se prevé que el episodio de humo será prolongado, evaluar posibles lugares que puedan utilizarse como refugios de aire más limpio e informar sobre ellos.
Insalubre (151-200)	55.5-150.4	Considerar la cancelación de eventos al aire libre teniendo en cuenta aspectos relacionados con la salud pública y los desplazamientos.
Muy insalubre (201-300)	150.5-250.4	Cancelar los eventos al aire libre que impliquen actividad física. Considerar el cierre de las escuelas y la cancelación de eventos al aire libre que no impliquen actividad física.
Peligroso (301 o más)	250.4-500	Cancelar los eventos al aire libre. Considerar el cierre de las escuelas. Considerar la calidad del aire interior para las actividades laborales que impliquen actividad física. Considerar la evacuación de las poblaciones en riesgo.

Tabla 4: Niveles generales de acción para las concentraciones de partículas.

En otros sitios de remoción donde al menos una parte de las partículas corresponde a partículas metálicas, puede establecerse un nivel de acción específico para el sitio en función de las

concentraciones conocidas de metales en los suelos que están siendo alterados. Debido a que las baterías de iones de litio constituyen una amenaza emergente, las emisiones de metales no están bien caracterizadas. No se sabe si las emisiones de metales durante un incendio se mantienen constantes durante todo el incendio o si la concentración varía a medida que este avanza.

Con base en los datos disponibles hasta octubre de 2025, el Grupo de Trabajo sobre Baterías de Iones de Litio consultó a un toxicólogo de la EPA para desarrollar un nivel de acción recomendado para partículas, que se resume en la Tabla 5 a continuación. El desarrollo de estos niveles de acción se detalla en el memorando adjunto, documento adjunto 3.

Tipo de batería	Nivel de acción para el público	Elevación del nivel D al nivel C	Elevación del nivel C al nivel B
LIB de composición desconocida	100 µg/m ³	100 µg/m ³	1600 µg/m ³
LFP LIB	100 µg/m ³	100 µg/m ³	2000 µg/m ³
NMC LIB	160 µg/m ³	160 µg/m ³	1600 µg/m ³

Tabla 5: Niveles de acción propuestos para PM-10.

Consideraciones para el muestreo del aire

Según el modelo conceptual del sitio (CSM), puede considerarse la realización de un muestreo del aire en la zona de respiración del personal para confirmar que no exista exposición a la resuspensión de partículas depositadas durante el incendio de las baterías. Además, la información sobre las condiciones de la calidad del aire puede utilizarse para tomar decisiones críticas, como las relacionadas con la necesidad de resguardo en el lugar o evacuación.

Metales

Existen diversos métodos analíticos para el muestreo de metales en el aire. Mientras las baterías experimentan una fuga térmica, la liberación de partículas metálicas al aire constituye un peligro. Consulte la Tabla de monitoreo del aire del documento adjunto 2 para conocer los métodos analíticos, el caudal de bombeo y el volumen total necesarios para una muestra de metales.

Compuestos de fluoruro

El Método 7906 del NIOSH es un método de muestreo del aire para cuantificar el HF y los iones de fluoruro. El calcio, el hierro y el aluminio pueden causar interferencias negativas.

Consulte la Tabla de monitoreo del aire del documento adjunto 2 para conocer los métodos analíticos, el caudal de bombeo y el volumen total necesarios para una muestra de metales.

Consideraciones sobre la extinción de incendios

Descargo de responsabilidad Los OSC de la EPA no son bomberos. La información que figura a continuación, basada en los aportes de socios de respuesta del servicio de bomberos, tiene como objetivo proporcionar información a los OSC, mejorar la colaboración con los departamentos de bomberos o contratar servicios privados de extinción de incendios cuando sea necesario. Es importante que los OSC comprendan las consideraciones estratégicas y tácticas relacionadas con la extinción de incendios para trabajar eficazmente con los equipos de bomberos durante las respuestas ante incidentes con baterías de

iones de litio y gestionar las reactivaciones del incendio en sitios de la EPA. La información que figura a continuación tampoco pretende establecer instrucciones de la EPA para los bomberos.

Posibles socios de respuesta durante un incendio de baterías de iones de litio:

- personal/técnicos de BESS/ESS/parte potencialmente responsable
- EPA: 1-800-424-8802
- agencia ambiental estatal
- Departamento de Salud
- equipos de materiales peligrosos
- departamentos/agencias de bomberos locales, estatales y federales
- empresa de servicios de gas/electricidad/electricistas
- contratistas privados y terceros contratados

Jerga de los bomberos

"A la derecha o a la izquierda de la explosión". Esta expresión proviene de contextos militares y de seguridad, especialmente de la lucha contra el terrorismo, la desactivación de explosivos y la respuesta ante emergencias. Puede imaginarse como una línea de tiempo que avanza de izquierda a derecha. La "explosión" representa el momento en que ocurre el incidente principal. "A la izquierda de la explosión" abarca todas las medidas previas al incidente, como la prevención, la recopilación de información, la detección y la disuasión. "A la derecha de la explosión" abarca todas las acciones posteriores al incidente, como la respuesta, el control de daños, la atención médica, la investigación y la recuperación. Por lo tanto, cuando alguien habla de mejorar las capacidades a la derecha de explosión, se refiere a estar mejor preparados para responder eficazmente una vez que ocurre un incidente de este tipo.

Consideraciones generales para responder a incendios de baterías de iones de litio

El abordaje de cualquier incidente relacionado con un incendio de baterías de iones de litio debe seguir las prioridades habituales para los incidentes y los perfiles de exposición propios de los incendios (vida, medioambiente, bienes y actividad comercial); y, en lo que respecta a los materiales peligrosos, este tipo de incidente debe considerarse un material conocido y habitual (no diferente de la gasolina, el gas natural o el GLP) dentro de las capacidades normales de las compañías o unidades de bomberos no especializadas y con recursos convencionales de personal y equipos. El personal de bomberos que responda inicialmente debe tener, como mínimo, certificación como primer respondiente en materiales peligrosos. Si bien el personal con capacitación superior en materiales peligrosos y las unidades y los equipos especializados pueden ser útiles o necesarios para responder a algunos incidentes relacionados con baterías de iones de litio, no deberían considerarse indispensables para iniciar las acciones de emergencia habituales destinadas a proteger la vida, estabilizar el incidente o conservar los bienes y el medioambiente. El incendio producido por la ignición de los gases de las celdas de las baterías de iones de litio no puede extinguirse mediante métodos tradicionales de extinción de incendios, como la aplicación de agua, CO₂, capas de espuma, arena u otros materiales de cobertura, etc. Actualmente, no se conoce ninguna tecnología o método que pueda desplegarse en el lugar del incidente para extinguir un incendio de baterías de iones de litio que esté experimentando una fuga térmica. No existen pruebas científicas que demuestren que algún agente extintor patentado sea significativamente más eficaz que el agua utilizada por un bombero bien capacitado de una empresa de bomberos con recursos convencionales.

Para responder a incendios de baterías de iones de litio mediante empresas de bomberos no especializadas con recursos convencionales de personal y equipos, se han identificado las siguientes estrategias:

- **"Ofensiva"**: esta estrategia implica establecer, mediante intervención física invasiva, un contacto directo o forzado con los componentes estructurales, compartimentos o espacios energizados de la batería, o introducirse en ellos, y debe considerarse de muy alto riesgo y no recomendable.
- **"Defensiva"**: esta estrategia implica establecer, sin intervención física invasiva, un contacto directo o forzado con los componentes estructurales, compartimentos o espacios energizados de la batería, o introducirse en ellos, y debe considerarse de menor riesgo y como la estrategia principal. Las consideraciones tácticas de la estrategia defensiva incluyen, entre otras: evaluación, prevención y mitigación del riesgo de explosión; búsqueda y rescate; control del incendio, el humo y los gases; protección de las exposiciones; manipulación, levantamiento o desplazamiento o reubicación no invasivos del material o las unidades de batería, etc.
- **"No intervención"**: esta estrategia supone que los bomberos no intervengan directamente en el incendio de la batería ni en la situación. El objetivo es preservar la seguridad de los bomberos cuando el riesgo es extremo, la exposición al peligro es innecesaria, el componente, el vehículo o la estructura ya está perdido, o las condiciones no permiten garantizar la supervivencia. A menudo, esta estrategia incluye el monitoreo, la emisión de advertencias al público o permitir que el incendio continúe ardiendo o que el peligro asociado al incidente se resuelva por sí solo bajo condiciones controladas. Esta estrategia debe considerarse la de menor riesgo y utilizarse cuando la estrategia defensiva no pueda implementarse de manera segura o cuando ya se hayan alcanzado los objetivos defensivos.

Seguridad de la vida

Es la prioridad; las operaciones deben seguir los procedimientos normales de respuesta y extinción de incendios:

- Colocarse el PPE adecuado, evitar el humo cuando sea posible y acercarse o ingresar desde una posición a barlovento o en áreas bien ventiladas.
- Evaluar si existe riesgo de explosión asociado con el material, el paquete o el espacio o recinto, y determinar si la situación se encuentra "a la izquierda de la explosión" o "a la derecha de la explosión"; considerar medidas de prevención y mitigación para garantizar la seguridad.
- Determinar si existe un perfil de riesgo para la seguridad de la vida y alcanzar los parámetros operativos habituales del servicio de bomberos.

Dejar que arda

- Considerar una estrategia defensiva o de no intervención y dejar que la batería de iones de litio continúe ardiendo hasta consumirse, siempre que los perfiles de exposición lo permitan:
 - Proteger las exposiciones que puedan afectar a la vida, el medioambiente, los bienes y la actividad comercial, siempre que las condiciones de seguridad lo permitan.
 - Salvo que exista una prioridad relacionada con la seguridad de la vida, el personal no debe acercarse, manipular, manejar ni mover paquetes, ni entrar o introducirse por la fuerza en contenedores intermodales, remolques de camión o espacios cerrados, garajes residenciales, etc., respecto de los cuales exista un informe o evidencia de fuga térmica o liberación de gases de una batería de iones de litio, hasta que se haya evaluado el riesgo de explosión y se haya determinado si la situación se encuentra "a la izquierda de la explosión" o "a la derecha de la explosión"; considerar medidas de prevención y mitigación para garantizar la seguridad.
 - Puede requerir varios períodos operativos y permitir una vigilancia contra incendios prolongada.

- Cuando sea factible hacerlo, el monitoreo de la temperatura y la liberación de gases debe realizarse a nivel de celda. La ausencia de una temperatura elevada no indica que las celdas dañadas de la batería estén estables, pero las temperaturas elevadas pueden indicar un riesgo inmediato de que continúe la fuga térmica.
- Informar a la comunidad circundante y a otros equipos de respuesta según los niveles de preocupación establecidos y los criterios de medidas de protección.

Movimiento de baterías

- Como parte de la estrategia defensiva, trasladar, cuando sea posible, el material, paquete o contenedor de baterías de iones de litio involucrado a un lugar más seguro y con el menor riesgo posible de exposición:
 - Evaluar si existe riesgo de explosión asociado con el material, el paquete o el espacio o recinto, y determinar si la situación se encuentra "a la izquierda de la explosión" o "a la derecha de la explosión"; considerar medidas de prevención y mitigación para garantizar la seguridad.
 - Salvo que exista una prioridad relacionada con la seguridad de la vida, el personal no debe acercarse ni mover baterías de iones de litio que hayan experimentado una fuga térmica o liberación de gases hasta que se haya evaluado el riesgo de explosión; considerar medidas de prevención y mitigación para garantizar la seguridad.
 - Si el riesgo de explosión ha sido evaluado y abordado mediante medidas de prevención y mitigación y ya no supone un riesgo crítico, o si paquete o contenedor del material se encuentra "a la derecha de la explosión", y las condiciones de seguridad están dentro de límites aceptables, considerar trasladar el material a un lugar más seguro y con el menor riesgo posible de exposición. La reubicación puede realizarse en cualquier lugar que se determine que ofrece la mejor protección para los bomberos y los civiles en lo que respecta a la seguridad de la vida, o que sea adecuado para proteger las exposiciones del medioambiente, los bienes y la actividad comercial.

Situaciones en las que se aplica agua

- Cualquier táctica de aplicación de agua requerirá un suministro abundante y constante.
- Aplicar agua ÚNICAMENTE si es necesario proteger la exposición.
- La aplicación de agua directamente sobre las celdas expuestas de la batería es la más eficaz para enfriarlas y evitar la propagación a las celdas adyacentes. Las carcasas de las baterías u otras obstrucciones pueden impedir un enfriamiento adecuado.
- Extinguir y proteger otras exposiciones, como las estructuras de infraestructura circundantes, las superestructuras y la vegetación.
- Prevenir la propagación del incendio enfriando con agua las celdas adyacentes de la batería que no hayan experimentado una fuga térmica ni hayan sido destruidas por el incendio.
- Se prefieren las cortinas de agua defensivas y las líneas de agua sin personal; utilizar un patrón de niebla de agua de 30 grados para las cortinas de agua.
- Aplicar agua desde una distancia segura y desde una posición a barlovento, si es posible.
- Recolectar el agua de contacto, que puede presentar, entre otros contaminantes, un bajo nivel de preocupación en cuanto al pH.
- Tener en cuenta las consecuencias de los arcos eléctricos al utilizar agua.
- Al aplicar agua, puede producirse un aumento de la cantidad de vapor y humo. Mantenerse alejado de ambos.

- Puede producirse una **reignición** en cualquier momento en celdas de la batería que estén dañadas (incluidos los daños causados por el agua).
- Nunca se debe cortar, aplastar, perforar ni abrir un paquete de baterías, un BESS, un ESS o una batería de alto voltaje de un EV para extinguir un incendio (sin adoptar las precauciones adecuadas descritas más adelante en este documento).
- Utilizar una cámara termográfica para comprobar si el calentamiento continúa. Sin embargo, deben tenerse en cuenta los efectos de blindaje que pueden impedir detectar baterías que se encuentran a temperaturas elevadas.

Consideraciones específicas para distintos tipos de incendios de baterías de iones de litio

Extinción de incendios en BESS/ESS

- Evaluar si existe riesgo de explosión dentro del contenedor, espacio o recinto del BESS/ESS y determinar si la situación se encuentra "a la izquierda de la explosión" o "a la derecha de la explosión"; considerar medidas de prevención y mitigación para garantizar la seguridad.
- NO INGRESAR A UN BESS.
- Revisar los planes de emergencia previamente elaborados para las instalaciones comerciales y determinar si es posible acceder de manera segura a un interruptor del tablero para desconectar el sistema.
- Contactar al personal encargado de la operación del BESS/ESS para realizar una desconexión remota.
- Permitir que los dispositivos de seguridad del sistema funcionen según su diseño.
- Monitorear el tablero de alarmas y activar manualmente los dispositivos de seguridad cuando corresponda.
- BESS/ESS en tránsito (generalmente de tamaño intermodal): considerar el uso de maquinaria pesada y vehículos de remolque y recuperación de gran capacidad para facilitar los movimientos y limitar el contacto o la exposición del personal.

Extinción de incendios de vehículos eléctricos

- Consultar la Guía de respuesta ante emergencias (ERG) correspondiente a la marca y el modelo específicos del vehículo para obtener indicaciones sobre cómo cortar de forma segura el suministro eléctrico de la batería de iones de litio, realizar el rescate y aplicar las tácticas de extinción de incendios recomendadas. [Sitio web de las ERG de la NHTSA](#)
- **Si el EV se encuentra en un garaje subterráneo, un garaje residencial o un área de espacio limitado o confinado, tener en cuenta la atmósfera tóxica que se está generando, el posible riesgo de que se forme una atmósfera explosiva y las posibles consecuencias del incendio para la estructura.**
- Evitar el contacto involuntario con los cables de color naranja debido al riesgo de electrocución por alto voltaje.
- Realizar el rescate y comprobar si hay víctimas; acercarse desde una posición a barlovento.
- Inmovilizar las ruedas para evitar que el vehículo se desplace.
- Una vez atendidas las prioridades relacionadas con la seguridad de la vida y confirmado que las baterías del EV están involucradas, dejar que las baterías ardan, si es posible, proteger las exposiciones y evacuar la zona en todas las direcciones hasta una distancia de 330 pies, de acuerdo con la Guía de respuesta ante emergencias (ERG).

- Si es necesario combatir el incendio, hacerlo como un incendio vehicular normal y utilizar agua. Si las celdas de la batería quedan expuestas debido a daños en la carcasa de la batería, dirigir directamente un chorro de agua hacia la zona expuesta.
- Las espumas no son significativamente más eficaces que el agua y podrían encapsular los vapores tóxicos y explosivos de las baterías de iones de litio que estén experimentando una fuga térmica. Sin embargo, la espuma puede ser eficaz para combatir incendios de clase A.
- Considerar inclinar el vehículo para acceder al paquete de baterías y realizar operaciones de enfriamiento (algunas baterías están ubicadas en otras zonas del vehículo).
- Considerar dirigir agua hacia las rejillas de ventilación laterales del paquete de baterías, si están presentes y son accesibles.
- Consideraciones para la empresa de remolque
 - Asegurarse de que el EV sea remolcado en una plataforma. No permitir que las ruedas se muevan.
 - El frenado regenerativo transmite energía a las baterías. Esto puede provocar un incendio debido a la fuerza de rotación de las ruedas.
 - Almacenar el vehículo alejado de todas las exposiciones.
 - Mantener el depósito de vehículos incautados asegurado y bajo vigilancia.
- **Para obtener información más detallada sobre la extinción de incendios de baterías de iones de litio de EV, consultar:**
<https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/electric-vehicle-fire-rescue-response-operations.pdf>

Extinción de incendios de dispositivos de micromovilidad

Dispositivos como bicicletas eléctricas, scooters eléctricos, monopatines eléctricos, etc.

- **Si están al aire libre**
 - Establecer un perímetro.
 - Dejar que los dispositivos de micromovilidad se quemen por completo.
 - Evitar la propagación a otros dispositivos o paquetes de baterías trasladando fuera del área los dispositivos que no estén ardiendo.
 - Si no es posible trasladar los dispositivos circundantes que no estén afectados, considerar opciones de enfriamiento o mantas térmicas para protegerlos.
- **Si están en interiores**
 - Combatir el incendio residencial como un incendio normal.
 - **Durante las operaciones de extinción, un dispositivo de micromovilidad no involucrado pero dañado puede incendiarse a espaldas del personal.**
 - Trasladar los dispositivos que no estén ardiendo fuera del lugar del incidente, preferentemente al aire libre y alejados de materiales combustibles.
 - Trasladar todas las celdas y los dispositivos de baterías de iones de litio a un lugar seguro, alejado de las operaciones de extinción, ANTES de realizar las operaciones de revisión.
 - Utilizar una pala con mango de madera para recoger las baterías. NO MANIPULAR LAS BATERÍAS CON LAS MANOS DESPROTEGIDAS.
 - Retirar las baterías del espacio interior; se prefiere un lugar al aire libre.
 - Considerar utilizar un baño, una bañera, un lavabo o una cubeta metálica y llenarlos con agua si no es posible trasladarlas a un lugar al aire libre.
 - Utilizar SCBA durante las operaciones de revisión.

- Informar a los investigadores sobre la posible presencia de baterías de iones de litio.
- Solicitar la asistencia de un equipo de materiales peligrosos para la estabilización, la mitigación, el sobreembalaje y la eliminación de la batería.
- Establecer una línea de protección durante los procedimientos de sobreembalaje.

Extinción de incendios en instalaciones de reciclaje, acumulación y almacenaje de baterías

- Las instalaciones de reciclaje, acumulación y almacenaje presentarán características similares durante un incendio. El personal de respuesta debe revisar las tácticas generales de extinción de incendios y abordar el incendio de manera similar a un incendio industrial de plásticos. Será difícil extinguirlo y el incendio puede mantenerse activo durante un período prolongado.

Operaciones de remoción de la EPA

Los sitios con baterías de iones de litio, al igual que todos los sitios sujetos a operaciones de remoción, pueden variar en tamaño y alcance. Estas diferencias afectarán el enfoque de limpieza. Las tácticas y consideraciones descritas más adelante en esta sección pueden utilizarse en distintas combinaciones para completar la limpieza de los sitios de manera segura y eficiente, minimizando al mismo tiempo los costos generales. Se adjunta para consulta el árbol de decisiones de la EPA para la gestión de sitios con baterías de iones de litio, que resume las distintas fases y opciones de remoción de baterías; vea el documento adjunto 4. Las tácticas de las operaciones de remoción de baterías de iones de litio deben considerarse modulares y aplicarse únicamente cuando las condiciones del sitio lo justifiquen. Los módulos, que se analizan con mayor detalle en las secciones siguientes, son:

Consideraciones para la preparación y estabilización del sitio: muchas de estos mejores métodos de administración (BMP) serían aplicables a todos los sitios.

Desmontaje del paquete de baterías: el desmontaje del paquete de baterías es una operación intermedia opcional que se realiza cuando las condiciones del sitio lo justifican.

Desenergización y tratamiento con salmuera: estas recomendaciones se aplican a las baterías energizadas que han sufrido daños, por lo que se consideran baterías DDR. La desenergización no es necesaria si las baterías no son DDR.

Desmantelamiento de baterías: el desmontaje de baterías es una etapa posterior al proceso de desenergización que consiste en destruir una batería de modo que deje de cumplir con la definición de batería de la EPA o del DOT.

Transporte y eliminación: el transporte y la eliminación se llevarán a cabo en prácticamente todos los sitios con baterías de iones de litio.

Consideraciones para la preparación y estabilización del sitio

La siguiente sección incluye características y BMP aplicables a los sitios con baterías de iones de litio. Las BMP y las características de preparación del sitio serán específicas de cada sitio y pueden aplicarse o no en cada caso.

En un sitio con baterías de iones de litio, una de las primeras determinaciones que deben realizarse es si las baterías presentes son baterías dañadas o DDR. La guía del DOT⁸ para determinar si una batería es DDR o no incluye indicadores visuales y se basa en el conocimiento del uso o uso indebido de la batería. Es poco probable que un OSC se encuentre con una situación en la que se sepa que las baterías están sin daños; sin embargo, si se presenta ese caso, debe consultarse la guía del DOT. En la mayoría de las situaciones de respuesta ante emergencias y operaciones de remoción, debido a la falta de información previa sobre un sitio, es imposible conocer si las baterías involucradas han sufrido daños físicos o eléctricos previamente o si han estado expuestas al agua o al calor. Por este motivo, la determinación predeterminada debe ser que todas las baterías presentes en un sitio de remoción son baterías DDR.

Las baterías de iones de litio DDR deben almacenarse a una distancia segura (como mínimo, 75 pies, de acuerdo con los requisitos de evacuación de la Guía 147 de la ERG para medidas de precaución inmediatas) de otros materiales peligrosos o del público en general. Si el material de las baterías de iones de litio se ve involucrado en un incendio y se emiten gases y humo, la distancia de seguridad debe aumentarse (hasta un mínimo de 330 pies en todas las direcciones, de acuerdo con los requisitos de evacuación de las Guías 173 o 174 de la ERG para medidas de precaución inmediatas). Debe considerarse la prevención de la "macropropagación" (la propagación de un paquete o módulo de baterías a los paquetes o módulos circundantes) durante una fuga térmica en cascada. Debe considerarse la segregación o compartimentación de las baterías. Las baterías deben agruparse de manera que se limite el tamaño de cualquier penacho de fuego o humo generado por una fuga térmica imprevista.

Se recomienda que el departamento de bomberos correspondiente, el equipo de materiales peligrosos o la agencia ambiental estatal recorran el sitio para conocer las operaciones en caso de emergencia y, cuando corresponda, aportar sus recomendaciones sobre la gestión de las baterías de iones de litio dañadas.

Otras consideraciones para la preparación del sitio son:

- Deben establecerse vías seguras de acceso y salida para los trabajadores y los servicios de emergencia, de modo que, en caso de emergencia, los trabajadores puedan evacuar rápidamente y los recursos de extinción de incendios dispongan del espacio necesario para responder.
- Debe considerarse la distancia respecto de residentes, escuelas, guarderías, lugares de culto, sitios de importancia cultural, empresas y vegetación. También deben tenerse en cuenta las zonas densamente pobladas, como una carretera con mucho tráfico, donde puede ser necesario controlar el tránsito o establecer un desvío durante las operaciones para mantener la seguridad pública.
- El trabajo debe realizarse en un área bien ventilada, preferentemente al aire libre.
- Disponer de una manga de viento y una estación meteorológica en el sitio permitirá conocer las condiciones meteorológicas hiperlocales.
- Debe dejarse suficiente espacio para separar las baterías entre sí a fin de evitar la macropropagación durante una emergencia. También debe considerarse el espacio necesario para los trabajadores y los equipos a medida que avance la limpieza del sitio.

Almacenaje

Deben considerarse soluciones de almacenaje en contenedores o jaulas para asegurar las baterías DDR que no vayan a ser desenergizadas de inmediato, a fin de reducir el riesgo de incendios cuando el sitio no esté ocupado. Los contenedores abiertos tipo roll-off con planchas de malla metálica expandida

⁸ <https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2023-03/DDR-brochure.pdf>

lastradas constituyen un ejemplo de solución de almacenaje para reducir los riesgos en un sitio con baterías DDR. Los tambores de acero con las bocas abiertas y el aro de sujeción y su cierre de perno sin apretar constituyen otro ejemplo de solución de almacenaje para volúmenes menores de baterías o celdas. La inmersión de baterías dañadas en agua (adoptando medidas para evitar la proyección de componentes) es otra opción de almacenaje que debe considerarse, ya que el contacto continuo con el agua ayudará a evitar la propagación.

Debe considerarse la gestión de las precipitaciones para evitar cualquier contacto no deseado de las baterías con el agua. El contacto con el agua puede provocar un cortocircuito en una batería y desencadenar una fuga térmica. Las baterías expuestas al agua se consideran baterías DDR y las exposiciones breves al agua pueden dañarlas sin permitir la descarga de energía. La inmersión intencional durante un proceso planificado de desenergización o como medida de estabilización del sitio es una práctica aceptable. La gestión de las baterías puede requerir etiquetar dispositivos, contenedores, módulos o paquetes de múltiples celdas. Puede ser necesario utilizar revestimiento para viviendas Tyvek, especialmente durante las labores de respuesta a incendios forestales, para contener baterías sueltas, proporcionar un empaque exterior a módulos o paquetes de baterías contaminados y controlar cualquier borde filoso. El revestimiento también permite marcar manualmente el paquete o colocar identificadores (por ejemplo, códigos de barras, etiquetas RFID o números de bulto) en el exterior del paquete para facilitar su gestión.



Figura 10. ¿Baterías en una piscina? (Foto de la IZQUIERDA). Las unidades de pared BESS/ESS recogidas de los incendios forestales de Maui se almacenan envueltas en Tyvek para minimizar la dispersión de cenizas tóxicas. Se coloca una malla metálica expandida encima y se lastra con sacos de arena para evitar la expulsión de celdas cilíndricas con energía, lo que podría provocar un incendio de la vegetación (foto de la DERECHA).

Desmontaje del paquete de baterías

El desmontaje de paquetes de baterías DDR puede no ser necesario cuando el paquete es lo suficientemente pequeño como para transportarlo en un empaque adecuado y las celdas pueden desenergizarse sin retirar el paquete.

Puede ser necesario desmontar los paquetes de baterías o las baterías de BESS/ESS para evaluar adecuadamente el estado de las celdas individuales contenidas en el paquete o para prepararse para el proceso de desenergización. Algunas carcasas de baterías impiden eficazmente la infiltración de humedad y, por lo tanto, deben retirarse como preparación para el proceso de desenergización. Una operación de desmontaje (para retirar las carcasas de las baterías) deberá planificarse cuidadosamente para garantizar la seguridad de los

trabajadores. El tamaño de los paquetes de baterías determinará las operaciones de desmontaje. Estas operaciones pueden requerir una excavadora, una plataforma para desmontaje o desmantelamiento, un recipiente de emergencia con solución de salmuera, un contenedor para chatarra metálica, un sistema de extinción de incendios, como un tanque y una manguera presurizada, y suficiente personal para gestionar la operación de manera segura. También deberá implementarse el nivel de protección adecuado (descrito anteriormente en la sección de Salud y seguridad), según la operación y el estado de las baterías. Durante las operaciones de desmontaje, es PROBABLE que se produzcan arcos eléctricos o fugas térmicas.

Algunos ejemplos de situaciones que requieren desmontaje incluyen, entre otros:

- Las baterías dañadas y energizadas deben desenergizarse, pero el paquete de baterías parece ser o es impermeable e impide su desenergización mientras permanece intacto.
- Realizar una evaluación visual del estado de las celdas de las baterías dentro del paquete para determinar cómo proceder.
- Cuando las celdas de las baterías no están energizadas, pero deben someterse a un proceso de desmantelamiento para su transporte.
- Cuando un OSC determina que las celdas de las baterías deben pasar al proceso de desmantelamiento de baterías.



Figura 11. Vista aérea del área de desmontaje de baterías de iones de litio durante la respuesta a los incendios forestales de Maui de 2023.

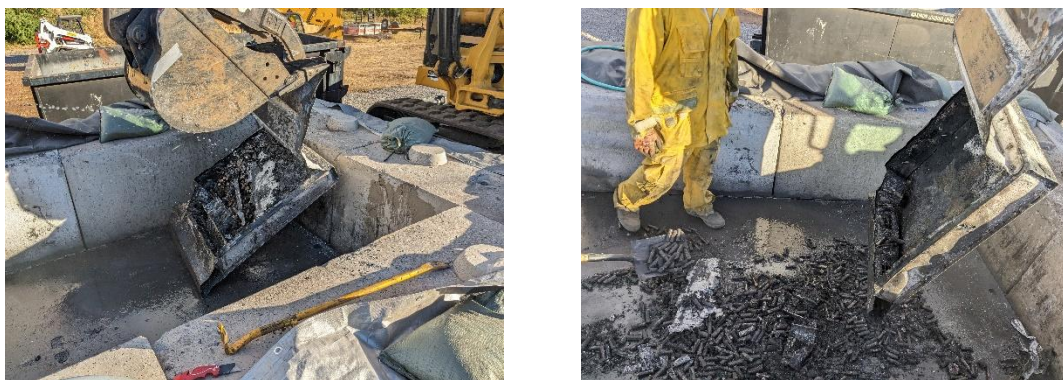


Figura 12. Una excavadora con pulgar abre un sistema BESS/ESS, dejando al descubierto las celdas cilíndricas en su interior; se aplica agua para controlar el polvo durante la respuesta a los incendios forestales de Maui de 2023.

Desenergización y tratamiento con salmuera

La desenergización no es necesaria para las baterías que no son DDR. La desenergización no es un paso exigido por la normativa para las baterías DDR antes de su envío y eliminación y no modifica los requisitos de envío aplicables a las baterías DDR. Sin embargo, la EPA recomienda desenergizar las baterías DDR antes de su envío como mejor práctica de gestión (BMP) debido a la inestabilidad conocida de las baterías DDR, analizada en la sección *Fallas e incendios de baterías de iones de litio* de este documento. Esta inestabilidad podría provocar reacciones de fuga térmica en el sitio, durante el transporte o incluso en la instalación de eliminación. Además, los OSC suelen manipular mayores volúmenes de baterías durante las respuestas ante emergencias y las operaciones de remoción, lo que aumenta las oportunidades de que se produzcan fallas. Varios incidentes, tanto en sitios de la EPA como en sitios ajenos a la EPA y durante el transporte de baterías DDR, respaldan esta práctica.

Colocar las baterías DDR en una solución de salmuera es un método para reducir el voltaje de las baterías, lo que disminuye el riesgo de fuga térmica. Los OSC pueden considerar la realización de un estudio de tratabilidad a pequeña escala para determinar la eficacia de la desenergización mediante salmuera en las condiciones específicas del sitio antes de llevar a cabo las operaciones a gran escala en sitios con grandes cantidades de baterías.

Otro método para reducir el voltaje de las baterías consiste en utilizar una unidad de descarga de baterías disponible comercialmente. Sin embargo, su uso práctico durante las respuestas ante emergencias y las acciones de remoción puede ser limitado o ineficiente cuando se manejan grandes cantidades de baterías de iones de litio o cuando esas baterías están dañadas hasta el punto de que el cableado interno del paquete de baterías puede no funcionar.

La selección del método adecuado de descarga de las baterías debe tener en cuenta el tamaño de las baterías y el grado de daño que hayan sufrido (es decir, si los paquetes de baterías parecen conservar intacto todo el cableado interno y el BMS). La desenergización de las baterías puede reducir el voltaje de las celdas de aproximadamente 4 voltios a 0.5 voltios o menos. Al reducir el voltaje, se mitiga considerablemente el riesgo de incendio y de formación de arcos eléctricos en el sitio, durante el transporte y en una instalación de eliminación. Alcanzar un voltaje inferior a 1 V se considera una desenergización exitosa.

Consideraciones sobre el tratamiento con salmuera:

La desenergización mediante salmuera consiste en sumergir las baterías en una solución de sal (salmuera). Si las baterías se encuentran dentro de un dispositivo (por ejemplo, una computadora portátil, un cigarrillo

electrónico, etc.), deben retirarse del dispositivo antes de sumergirlas en la solución de salmuera. Una vez sumergidas, las baterías experimentan una reacción de electrólisis que reduce la carga. Es probable que esta reacción genere gas hidrógeno. Debe considerarse el recipiente utilizado para la salmuera a fin de gestionar la posible acumulación de una atmósfera explosiva. Una solución de salmuera típica contiene entre un 5 % y un 10 % de cloruro de sodio (NaCl); sin embargo, continúan las investigaciones para determinar la salmuera óptima. La EPA ha demostrado en estudios en curso que el bicarbonato de sodio (NaHCO_3) es mucho menos eficaz. Otras soluciones, como NaOH al 5 % y FeSO_4 al 5 %, han demostrado ser eficaces para descargar rápidamente la energía con una corrosión mínima de las celdas de las baterías. Esta investigación continúa y es posible que sus resultados se compartan más adelante. Para obtener la información más actualizada, puede contactarse al subgrupo de investigación del Grupo de Trabajo sobre Baterías de Iones de Litio. Según el tipo y el estado de la batería y la solución de salmuera elegida, las baterías pueden necesitar permanecer en la solución de 4 horas a varias semanas. Puede utilizarse un multímetro para monitorear periódicamente el voltaje de las baterías a medida que se desenergizan y determinar cuándo están completamente descargadas y listas para su empaque. Según la solución de salmuera elegida, la corrosión de las baterías puede dificultar la obtención de mediciones precisas del voltaje de CC.

Por lo general, las soluciones de salmuera no necesitan reemplazarse después de varias tandas de baterías descargadas. La mejor manera de monitorear la eficacia de la solución de salmuera es basarse en los resultados de la descarga de las baterías. Continúan las investigaciones sobre la eficiencia de la descarga y podrían obtenerse datos que indiquen que la conductividad puede utilizarse para monitorear la eficacia de la solución de salmuera; sin embargo, todavía no se ha establecido un valor mínimo de conductividad. Una vez finalizadas las operaciones de desenergización, o si se determina que una solución de salmuera ya no es eficaz, la solución de salmuera debe caracterizarse para su eliminación. La experiencia en sitios anteriores de la EPA ha demostrado que la solución de salmuera se ha caracterizado como no peligrosa mediante el procedimiento de lixiviación para la característica de toxicidad (TCLP); no obstante, también se recomienda realizar una caracterización mediante TCLP en futuros sitios, siempre que sea posible. Un estudio ha demostrado que puede haber metales que normalmente no forman parte del análisis TCLP en la solución de salmuera en concentraciones que podrían afectar zonas ambientalmente sensibles y superar los estándares estatales de calidad del agua.

Algunos tipos de baterías no son adecuados para su descarga mediante salmuera. Las baterías con pequeñas pestañas, como las celdas tipo bolsa, o con cables como electrodos de conexión principales, como algunas celdas cilíndricas utilizadas en pequeños productos de consumo, como los cigarrillos electrónicos, pueden no descargarse adecuadamente en una solución de salmuera. La corrosión provocada por una solución de salmuera de NaCl daña rápidamente los pequeños electrodos e impide que se produzca la reacción de electrólisis. Es posible que las salmueras menos corrosivas sean eficaces para estos tipos de baterías, pero todavía no se han sometido a pruebas.

Desmantelación de baterías, también denominada conversión de baterías en "material que ya no es batería"

La desmantelación es el proceso de modificar físicamente las baterías hasta el punto de que dejen de cumplir las definiciones de batería de la EPA y del DOT, por lo que pasan a estar sujetas a estándares regulatorios diferentes como "material que ya no es batería".

Debido a las reglamentaciones del DOT sobre el envío de baterías DDR, puede haber situaciones en las que la seguridad en el sitio, la seguridad durante el transporte y la eficiencia en términos de materiales y

costos mejoren al dismantelar las baterías hasta convertirlas en "material que ya no es batería". La dismantelación de baterías no siempre será un paso necesario en las respuestas y los sitios relacionados con baterías de iones de litio, pero constituye una opción que queda a discreción del OSC.

El proceso de dismantelación se considera tratamiento conforme a la RCRA. Por lo tanto, los OSC deberán considerar esta regulación como un requisito aplicable o relevante y apropiado (ARAR) de la CERCLA en un sitio de baterías de iones de litio de la EPA. La dismantelación de baterías sin la supervisión de un OSC de la EPA o sin un permiso de tratamiento no está permitida conforme a la RCRA.

Es probable que sea necesario realizar un dismantelamiento cuando ocurran incidentes en un área desde la cual las baterías deban transportarse en una embarcación hasta las instalaciones de eliminación final. Recientemente, las empresas navieras han restringido el transporte de baterías DDR en sus embarcaciones debido a su naturaleza impredecible. La dismantelación también puede ser apropiada cuando la magnitud del incidente sea tan grande que cumplir con las restricciones de envío de baterías DDR resulte demasiado costoso o requiera demasiado tiempo.

El DOT define una batería o celda de iones de litio en el título 49 del CFR, sección 171.8, como una celda o batería electroquímica recargable en la que tanto el electrodo positivo como el negativo son compuestos de litio y ninguno de ellos está construido con litio metálico. Una celda o batería de polímero de litio que utilice composiciones químicas de iones de litio descritas en esta definición está regulada como celda o batería de iones de litio.

La EPA define una batería en el título 40 del CFR, sección 273.9, como un dispositivo compuesto por una o más celdas electroquímicas conectadas eléctricamente, diseñado para recibir, almacenar y suministrar energía eléctrica. Una celda electroquímica es un sistema compuesto por un ánodo, un cátodo y un electrolito, además de las conexiones eléctricas y mecánicas que sean necesarias para permitir que la celda suministre o reciba energía eléctrica. El término batería también incluye una batería intacta y sin daños a la que se le haya retirado el electrolito.

Para dismantelar las baterías de manera eficaz, de modo que ya no cumplan las dos definiciones anteriores, pueden utilizarse maquinaria pesada o trituradoras industriales. Las excavadoras con pulgar pueden utilizarse para dismantelar celdas prismáticas y tipo bolsa, perforándolas con los dientes del cucharón. Un rodillo de tambor liso puede utilizarse para dismantelar celdas cilíndricas mediante aplastamiento. También puede utilizarse, si está disponible, una trituradora de baterías del tamaño adecuado para el tipo de celda de batería. **Las baterías deben desenergizarse antes de proceder a su dismantelamiento.** Debe construirse un área de dismantelamiento que impida la dispersión de contaminantes y contenga cualquier celda que no haya sido completamente desenergizada antes del dismantelamiento.

En los incendios forestales de Maui de 2023 y del sur de California de 2025 se estableció el siguiente tipo de área de dismantelamiento. Se colocó una placa de acero de 8 pies x 20 pies y 1 pulgada de espesor en una zona sin vegetación cercana. Se colocaron bloques de contención en tres lados de la placa de acero y se revistieron con dos capas de plástico Visqueen, con una lona como capa superior para proporcionar protección adicional contra desgarros. Se colocó un rodillo vibratorio en la entrada del área. Cerca se dispusieron tambores de acero para recibir el material triturado "que ya no es batería". Se dispuso cerca una manguera de agua presurizada para atender cualquier emergencia relacionada con incendios. El personal utilizó palas para distribuir las baterías en una capa delgada sobre la placa de acero y recoger el material "que ya no es batería". El personal también inspeccionó este material para asegurarse de que la destrucción hubiera sido completa. Debe tenerse cuidado de no sobrecargar la plataforma de trituración con baterías, ya que algunas podrían perderse y no quedar

completamente desmanteladas. Puede ser necesario realizar pruebas para determinar las tasas óptimas de carga. Pueden ser necesarias varias pasadas del rodillo para lograr el desmantelamiento completo de todas las baterías. El agua puede contenerse colocando un rollo de fibra debajo del Visqueen para formar un dique en el extremo abierto de la plataforma de procesamiento.

En los incendios forestales del sur de California de 2025 también se implementó una operación de trituración. La operación utiliza una trituradora industrial de gran tamaño que se carga por la parte superior mediante una tolva. El material se tritura hasta obtener piezas pequeñas antes de caer en un cucharón. En el sur de California, los tambores con baterías desenergizadas se cargaban por la parte superior, directamente desde el tambor, mientras que el material final caía en el cucharón de una minicargadora situado debajo de la trituradora, lo que permitía cargarlo para su transporte. Entre las opciones adicionales podría incluirse un sistema de cinta transportadora para automatizar y regular el proceso de carga.

Las operaciones de desmantelamiento, especialmente cuando el material se procesa hasta obtener partículas demasiado finas, pueden generar cantidades importantes de polvo. Los polvos metálicos pueden considerarse polvo combustible cuando alcanzan tamaños pequeños medidos en micrómetros. A medida que disminuye el tamaño de las partículas (100 micrómetros o menos), aumenta el riesgo de explosión. Las partículas pequeñas también son más peligrosas cuando se inhalan y son más difíciles de contener. Deben establecerse controles de ingeniería para gestionar el polvo fugitivo y reevaluar constantemente el riesgo durante las operaciones pertinentes.

Hasta la fecha, no se han completado operaciones de desmantelamiento a gran escala fuera de las respuestas de la EPA a incendios forestales, aunque algunos sitios recientes podrían intentar realizar esta operación.



Figura 13. Ejemplo de distribución de un área de desmantelamiento mediante aplastamiento.



Figura 15. Fotografía de una operación de desmantelamiento en curso.



Figura 14. Producto final del desmantelamiento mediante aplastamiento.



Figura 16. Producto final obtenido mediante trituración de baterías.



Figura 17. Ejemplo de una operación de trituración.

Transporte

Transporte de baterías de iones de litio dañadas, defectuosas o retiradas del mercado (DDR)

El transporte de baterías DDR está regulado por el DOT conforme al título 49 del CFR, sección 173.185(f).

Las baterías DDR se definen de la siguiente manera:

Las celdas o baterías de litio que hayan sufrido daños o que el fabricante haya identificado como defectuosas por motivos de seguridad, y que puedan producir una liberación peligrosa de calor, un incendio o un cortocircuito (por ejemplo, aquellas que se devuelven al fabricante por motivos de seguridad), solo pueden transportarse por autopista, ferrocarril o vía marítima. Está estrictamente **prohibido transportar por vía aérea** estas celdas o baterías.

Además, deben empacarse de acuerdo con las disposiciones del título 49 del CFR, sección 173.185(f), que incluyen:

- Colocar la celda o batería en un empaque interior individual no metálico que la encierre completamente.
- Colocar material de amortiguación alrededor del empaque interior, que sea incombustible, no conductor de electricidad y absorbente.
- Colocar el empaque interior en un empaque con un nivel de desempeño correspondiente al Grupo de Empaque I. Cabe señalar que solo puede colocarse un empaque interior en cada empaque exterior (es decir, una sola celda o batería por paquete).
- Marcar el empaque exterior con una indicación de que contiene una batería dañada, además de cualquier otra marca y etiqueta exigida para el empaque.

<https://www.phmsa.dot.gov/sites/phmsa.dot.gov/files/2023-07/Lithium%20Battery%20Guide.pdf>

Hay cuatro formas de transportar baterías de iones de litio DDR:

- transporte plenamente regulado según lo descrito anteriormente y desarrollado con más detalle en el título 49 del CFR, sección 173.185(f);
- permiso especial;
- exención de emergencia;
- fuera del ámbito comercial.

Las normas para el transporte de baterías DDR implican que el transporte de grandes cantidades de baterías DDR requiera mucho tiempo y recursos y resulte costoso. Puede optarse por transportar las baterías DDR mediante métodos distintos del transporte sujeto íntegramente a la normativa para reducir la carga regulatoria y, al mismo tiempo, trasladarlas de manera segura y legal. Estos mecanismos se analizan a continuación.

Exención de emergencia

Orden de exención de emergencia: se trata de una exención que normalmente el DOT otorga a la EPA para realizar trabajos correspondientes a la Función de Soporte ante Emergencias n.º 10 (ESF-10) de conformidad con la Ley Stafford y el Marco Nacional de Respuesta. Permite a los trabajadores recoger materiales peligrosos y transportarlos a un área central de almacenamiento sin cumplir las Reglamentaciones de Materiales Peligrosos (HMR) del DOT. Esta exención se emite para facilitar una respuesta y recuperación rápidas en una zona afectada por un desastre, y las autorizaciones específicas se describirán en la exención. En el documento adjunto 5 de este documento se incluye un ejemplo correspondiente a la respuesta a los incendios forestales de Maui de 2023. Esta orden no permite una exención especial de las HMR para el transporte desde el área de concentración hasta la instalación de eliminación.

Permiso especial del DOT de EE. UU.

- Ya existen varios permisos especiales otorgados a empresas para transportar baterías DDR fuera de las reglamentaciones del DOT sobre baterías DDR descritas anteriormente (Call2Recycle, Labelmaster, KULR, etc.). Los permisos especiales existentes pueden consultarse [aquí](#). Normalmente, el permiso especial se otorga a una empresa que fabrica el contenedor de transporte. En ese caso, el permiso especial describirá el uso adecuado del empaque y cualquier limitación relativa al peso o a los vatios-hora de las baterías que pueden transportarse.
- Algunas empresas contratistas de los Servicios de Emergencia y Respuesta Rápida (ERRS) de la EPA pueden tener ya un permiso especial que hayan solicitado para sitios anteriores y que pueda utilizarse en otros sitios.
- Algunos permisos especiales exigen que el usuario sea incluido como "parte autorizada" del permiso especial antes de poder utilizarlo. Otros permisos especiales pueden permitir que el usuario utilice el permiso especial siempre que cumpla todos los requisitos que este establece.
- Si no existe un permiso especial que satisfaga las necesidades del sitio, la EPA puede solicitar un permiso especial específico para ese sitio. El DOT revisará la solicitud y responderá con preguntas o con la aprobación.
 - En una respuesta de emergencia de la CERCLA, el plazo entre la solicitud y la aprobación puede ser de tan solo una o dos semanas.

- Durante una operación de remoción de carácter urgente conforme a CERCLA, especialmente cuando la remoción está dirigida por una parte responsable, el proceso de solicitud puede tardar cerca de 90 días, ya que el permiso debe publicarse para recibir comentarios del público.
- Los permisos especiales específicos para un sitio no pueden utilizarse en otros sitios y cada sitio deberá solicitar su propio permiso. Por lo general, el proceso de elaboración del permiso requiere la asistencia de un abogado para redactar el documento y el OSC debe mantener una coordinación estrecha con un representante regional del DOT para facilitar el proceso de aprobación.
- Si no participa un representante regional del DOT en el sitio, los OSC pueden comunicarse a través del Equipo Regional de Respuesta (RRT) de la EPA o directamente con Eddie Murphy, del DOT/PHMSA (eddie.murphy@dot.gov).

Transporte fuera del ámbito comercial

Las normas del DOT establecen cuándo se aplican las reglamentaciones sobre materiales peligrosos, pero también contemplan determinadas funciones a las que estas no se aplican. La función pertinente para los OSC es la siguiente:

- Título 49 del CFR, sección 171.1(d), funciones no sujetas a los requisitos de las HMR:
 - (5) Transporte de un material peligroso en un vehículo automotor, aeronave o embarcación operados por un empleado del gobierno federal, estatal o local exclusivamente para fines gubernamentales federales, estatales o locales no comerciales.
- La EPA no ha utilizado esta opción en la práctica, aunque se analizó como una posibilidad durante la respuesta a los incendios forestales del sur de California de 2025. La conclusión de ese análisis fue:
 - Si un empleado del gobierno conduce un vehículo gubernamental, por lo general se considera que el transporte no se realiza "en el comercio".
 - Si conduce un contratista del gobierno o posiblemente si el vehículo no es de propiedad exclusiva del gobierno, el transporte se consideraría "en el comercio".
 - Es posible que se necesite información adicional para implementar correctamente esta opción de transporte.

Transporte de material desmantelado "que ya no es batería"

El transporte del "material que ya no es batería" debe seguir un proceso similar al utilizado para transportar cualquier otro desperdicio. Los desperdicios deben caracterizarse para su transporte de acuerdo con la clase de peligro del DOT.

La experiencia adquirida durante las respuestas de la EPA a incendios forestales ha demostrado que el "material que ya no es batería" aún puede producir hidrógeno en pequeñas cantidades. Durante la respuesta a los incendios forestales de Maui de 2023, se evaluó el material para determinar si correspondía a la clase de peligro 4.3: Peligroso cuando está mojado, debido a que el "material que ya no es batería" estaba húmedo como consecuencia de las medidas de control del polvo. La evaluación utilizada fue la Prueba n.º 5 de las Naciones Unidas (ONU) para materiales reactivos al agua que emiten gases inflamables o tóxicos. Se determinó que no se cumplían los parámetros de esta prueba y, por lo tanto, no era necesario utilizar un cartel de peligro 4.3.

Los sitios futuros podrían considerar y caracterizar esta generación de gas hidrógeno, ya que actualmente no se comprende por completo. Se sospecha que las baterías de iones de litio liberan hidrógeno en varias condiciones: durante la carga y descarga, como consecuencia de la descomposición del electrolito y cuando la humedad entra en contacto con el ánodo. Las pruebas de campo han demostrado que incluso después de que el material de las baterías de iones de litio se haya consumido completamente en un incendio, así como después de destruir y secar material que no haya sufrido daños por incendio, puede persistir hidrógeno y no ser posible eliminarlo por completo. Se utilizó empaque modificado para permitir la ventilación del hidrógeno durante el transporte. Específicamente, se utilizaron tambores con tubos de ventilación de PVC y aros de sujeción y sus cierres de perno sin apretar, cajas de una yarda cúbica con cubierta de plástico y filtro de gas y contenedores tipo roll-off revestidos con tapas y revestimientos que permitían una buena ventilación y estaban asegurados para controlar el polvo fugitivo.

Eliminación

Al igual que en todos los sitios sujetos a operaciones de remoción, la eliminación final de los desperdicios es un factor clave para determinar el plazo de las operaciones en el sitio. Debido al carácter relativamente reciente de las operaciones de limpieza relacionadas con baterías de iones de litio, su eliminación presenta mayores dificultades de lo habitual. Muchas instalaciones de eliminación de desperdicios peligrosos pueden tener restricciones específicas para aceptar baterías o quizá nunca hayan aceptado este tipo de desperdicios. Las instalaciones de reciclaje pueden tener restricciones respecto del tipo de baterías, los métodos de procesamiento en el sitio y los contenedores de transporte que aceptarán.

Reciclaje

- Actualmente, el método de eliminación preferido para las baterías consiste en enviarlas a reciclar. Sin embargo, el reciclaje de desperdicios de baterías suele costar considerablemente más que otras opciones de eliminación y las instalaciones de reciclaje pueden tener restricciones para aceptar los desperdicios que podrían afectar las operaciones en el sitio.
- Para que el reciclaje de las baterías sea una opción viable, probablemente será necesario responder "sí" al menos a las siguientes preguntas:
 - ¿Pueden las baterías separarse adecuadamente según su composición química? ¿La batería parece estar completamente intacta o mayormente intacta? (Es decir, no está quemada hasta el punto de resultar irreconocible y tener electrodos metálicos sobresaliendo de la carcasa).
 - ¿Las baterías están libres de contaminación de otros desperdicios (o pueden descontaminarse fácilmente)?
- La coordinación con las instalaciones de reciclaje puede poner de manifiesto otras preguntas que deberán responderse antes de que las instalaciones puedan aceptar el material.
- Las baterías que hayan sido sometidas a desmantelamiento hasta convertirse en "material que ya no es batería" podrían reciclarse. Será necesario mantener una coordinación estrecha con una instalación de reciclaje y el costo de reciclar este material podría ser mayor que el de eliminarlo.
- Los OSC deben iniciar el proceso de solicitud de propuestas (RFP) para el reciclaje lo antes posible o tan pronto como se conozcan los volúmenes aproximados correspondientes a cada composición química de batería. Una vez seleccionada una instalación de reciclaje, debe coordinarse directamente con ella para determinar cómo deben separarse las baterías si en el sitio hay distintas composiciones químicas (las medidas de separación necesarias variarán según la instalación de reciclaje). Además, debe consultarse con la instalación seleccionada

acerca de las limitaciones relativas al procesamiento en el sitio (por ejemplo, la selección de la solución de salmuera o las posibles opciones de desmantelamiento).

- Los OSC deben asegurarse de que el documento de RFP incluya una solicitud de certificados de reciclaje, para evitar que los desperdicios se envíen a un reciclador pero no se reciclen oportunamente.

Eliminación en vertedero

- Puede haber situaciones en las que resulte imposible separar las baterías según su composición química y una instalación de reciclaje no acepte los desperdicios. La mayoría de las instalaciones de eliminación no aceptan baterías intactas, independientemente de que hayan sido desenergizadas o no. Sin embargo, existen excepciones y probablemente será necesario eliminar las baterías en un vertedero de desperdicios peligrosos. Por ejemplo, en la Región 4, la instalación de desperdicios peligrosos de Emelle, Alabama, acepta baterías que hayan sido macroencapsuladas. Para transportar las baterías macroencapsuladas se requiere un permiso especial del DOT.
- Las baterías que hayan sido sometidas a desmantelamiento hasta convertirse en "material que ya no es batería" pueden eliminarse en un vertedero de desperdicios peligrosos o no peligrosos (según los resultados de la caracterización de los desperdicios peligrosos). Antes de aceptar los desperdicios, la instalación de eliminación puede solicitar pruebas adicionales a las de la caracterización habitual de desperdicios (por ejemplo, la instalación de eliminación utilizada para los incendios forestales del sur de California realizó una prueba de reactividad del lixiviado del sitio antes de aceptar los desperdicios).
- La Norma Fuera del Sitio se aplica a las baterías DDR y al material desmantelado que ya no es batería cuando se destinan a eliminación o reciclaje. Se aplica en los casos de reciclaje porque el proceso de reciclaje incluye el proceso de "recuperación" del "material agotado". Título 40 del CFR, sección 261.2(c).

Participación comunitaria y relaciones con los medios

Debido a que las baterías de iones de litio constituyen una amenaza emergente y todavía son pocos los sitios que las han involucrado, no existen muchos ejemplos de fichas técnicas que puedan utilizarse como modelos. En general, un OSC puede utilizar descripciones similares a las de un incendio industrial o de plásticos al hablar con los medios de comunicación o con el público sobre sitios con LIB.

Por ejemplo:

- "Ninguna cantidad de humo es buena para usted. Manténgase alejado del humo".
- "Si está afuera y huele a humo, entre en un lugar cerrado".
- "Intente mantenerse a barlovento del humo. Permanecer debajo del penacho de humo aún puede provocar exposición".

Por lo general, los departamentos de bomberos locales seguirán la ERG para tomar decisiones sobre zonas de seguridad, evacuación y refugio en el lugar. Puede realizarse un monitoreo del aire para evaluar de manera continua o en tiempo real los peligros para el público y fundamentar las decisiones sobre evacuación o refugio en el lugar. La mayoría de los instrumentos de monitoreo del aire no son específicos para determinadas sustancias químicas y los resultados del muestreo del aire pueden tardar varios días en llegar del laboratorio.

Se adjuntan como ejemplos dos fichas técnicas específicas para respuestas a incendios forestales, pero es posible que no sean aplicables según el tipo de sitio con baterías de iones de litio en el que se esté trabajando; vea el documento adjunto 6.

Enlaces útiles y recursos adicionales

- response.epa.gov/R4LithiumIonBatteryOutreach
- <https://www.phmsa.dot.gov/lithiumbatteries>
- <https://www.epa.gov/recycle/used-lithium-ion-batteries>
- <https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/electric-vehicle-fire-rescue-response-operations.pdf>

Documento adjunto 1: Análisis de riesgos laborales para la respuesta a incendios forestales

Documento adjunto 2: Tabla de monitoreo del aire

Documento adjunto 3: Memorando sobre el desarrollo de niveles de acción para partículas

Documento adjunto 4: Árbol de decisiones de la EPA para la gestión de
sitios con baterías de iones de litio

Documento adjunto 5: Orden de exención de emergencia del DOT para
los incendios forestales de Maui de 2023

Documento adjunto 6: Ejemplos de fichas técnicas para la respuesta a incendios forestales relacionados con baterías de iones de litio