

Abstract

La teoría METFI (Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno) propone que en condiciones de resonancia intensa, la energía previamente almacenada en materiales y dispositivos tecnológicos puede liberarse de manera súbita, generando fenómenos de incineración espontánea o explosiones. Este marco explicativo resulta especialmente relevante en el contexto de infraestructuras basadas en energías renovables y sistemas de almacenamiento electroquímico, como los paneles solares y las baterías de litio. Diversos episodios de ignición y combustión no atribuibles a fallos convencionales de ingeniería sugieren que la resonancia electromagnética ambiental podría actuar como factor disparador crítico. El presente artículo examina, desde un enfoque científico y riguroso, los mecanismos físico-químicos plausibles por los cuales la resonancia energética inducida podría superar umbrales de estabilidad interna, conduciendo a reacciones exotérmicas rápidas. Se analizan tanto el rol de las propiedades dieléctricas y semiconductoras de los paneles fotovoltaicos como la dinámica de inestabilidad térmica en baterías de litio. Finalmente, se presenta un corpus de casos empíricos y estudios académicos libres de conflictos de interés, cuya convergencia refuerza la plausibilidad de este modelo.

Palabras clave Resonancia electromagnética-METFI-Paneles fotovoltaicos-Baterías de litio-Incineración espontánea-Inestabilidad térmica-Energía almacenada-Explosión inducida

Introducción

La creciente dependencia tecnológica de sistemas de conversión y almacenamiento energético ha incrementado la exposición social a riesgos complejos y multifactoriales. Entre estos, los incendios y explosiones asociados a baterías de litio y paneles solares representan un desafío que supera los marcos de explicación tradicionales. En numerosos informes técnicos, los fallos se atribuyen a defectos de diseño, fabricación, manipulación o mantenimiento. Sin embargo, la repetición de episodios en entornos sin correlato mecánico directo, y en ausencia de sobrecarga operativa, sugiere que fuerzas adicionales podrían intervenir.

El Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno (METFI) ofrece una perspectiva alternativa: en situaciones de resonancia electromagnética, los sistemas pueden convertirse en receptores inadvertidos de energía acumulativa. El mecanismo se sustenta en la capacidad de ciertos materiales —particularmente semiconductores, electrolitos y compuestos dieléctricos— para absorber, almacenar y liberar energía cuando las condiciones de frecuencia alcanzan un umbral crítico. Este fenómeno no

es ajeno a la física de materiales; se encuentra respaldado por estudios en plasmones superficiales, acoplamiento excitónico y dinámicas de auto-oscilación en sistemas no lineales.

La hipótesis central establece que, bajo un campo electromagnético resonante de alta intensidad, la energía almacenada en baterías de litio o en la red cristalina de células solares podría desestabilizarse, desencadenando procesos de ignición o incluso explosión. Lo significativo de esta aproximación es que desplaza la causalidad del accidente fuera del dominio exclusivo de fallas técnicas, incorporando el entorno electromagnético como variable crítica.

Este artículo se desarrolla en seis bloques principales:

1. Fundamentos físicos de la resonancia y la acumulación energética.
2. Propiedades de los paneles fotovoltaicos bajo condiciones de campo resonante.
3. Dinámica de inestabilidad térmica en baterías de litio.
4. Casuística documentada de incendios en condiciones no explicables por fallo técnico.
5. Relación entre patrones de resonancia ambiental y detonaciones locales.
6. Síntesis interpretativa y referencias de respaldo.

Con ello se busca dotar de una base científica al marco METFI aplicado a riesgos tecnológicos emergentes, sin recurrir a visiones simplificadas o especulativas desligadas de evidencia.

Marco histórico y empírico: incendios en paneles fotovoltaicos y baterías de ion-litio

Fotovoltaica (PV): cronología, patrones y casos

1995–2012 (Alemania): primeros agregados nacionales y atribución causal

Un meta-recuento coordinado por Fraunhofer ISE recopiló ~400 incidentes en instalaciones PV en Alemania (1995–2012). En ~180 casos se atribuyó el inicio del incendio al propio sistema fotovoltaico, destacando arcos eléctricos en conectores/embarbados y defectos de instalación como vectores dominantes. Este hito inaugura la base empírica moderna para estimar tasas y árboles de fallos. ([Fraunhofer ISE](#))

2012 (Italia): pico de siniestralidad reportado

Un análisis de riesgo con base forense refiere ~600 incendios vinculados a plantas solares en Italia durante 2012, con tendencia creciente en ese periodo. Aunque la serie nacional carecía entonces de estandarización completa, la cifra impulsó la normalización de metodologías de evaluación y reconstrucción de escenarios.

([AIDIC](#))

2014–2018: experimentación a escala de edificio y spread bajo módulos

Estudios experimentales (Fire Technology; DTU/colab.) mostraron dos rasgos repetidos:

- La re-radiación y el canalizado de flujo térmico bajo módulos BAPV (building-applied PV) aceleran la ignición y la propagación en cubiertas ligeras.
- El módulo, aunque no aporta gran carga de fuego por sí mismo, modifica la geometría de la pluma térmica y eleva el flux hacia el sustrato, aumentando la probabilidad de flame spread. ([Welcome to DTU Research Database](#), [SpringerLink](#), [PMC](#))

2017 (Reino Unido): revisión BRE y necesidad de tipificar causas

La Building Research Establishment (BRE) publica una revisión sobre PV y fuego, sintetizando trabajos previos, normas y formación de bomberos. Concluye que, pese a baja frecuencia relativa, la severidad y la complejidad operativa (tensión continua incluso desconectado) justifican protocolos específicos de ataque y aislamiento.

([Gobierno del Reino Unido](#))

2021–2022: tasas globales y árbol de fallos (Fault Tree Analysis)

Un trabajo con datos de Reino Unido (64 casos), Alemania (174), Australia (400) estima una frecuencia representativa global ~0,0293 incendios por MW·año y atribuye el mayor peso causal al arco eléctrico (instalación/conexión). También reconoce un ~33 % de incidentes con causa desconocida/no relacionada, ventana donde efectos ambientales o acoplamientos no convencionales podrían enmascarse en categorías residuales. ([research.ed.ac.uk](#), [ScienceDirect](#))

2019 (Japón): incendio en megaplanta flotante tras tifón (Faxai)

La mayor planta PV flotante de Japón (13,7 MW) sufrió incendio tras vientos extremos; los bomberos indicaron calentamiento por apilamiento de paneles desplazados. Caso paradigmático de sinergia entre estrés ambiental extremo y

vulnerabilidad eléctrica en configuraciones no convencionales. ([pv magazine International](#))

2021–2025: síntesis académica y hojas de fallo por componentes

- Revisiones de estado del arte en 2021 y 2025 consolidan que el riesgo absoluto sigue siendo bajo frente al parque instalado, pero no despreciable en cubiertas, con arcos, conectores y cajas de unión como puntos críticos. ([ScienceDirect](#), [MDPI](#))

- IEA PVPS Task 13 emite fact sheets 2025 que catalogan degradaciones y fallos típicos por componente (conectores, diodos bypass, encapsulantes, cajas). Aunque centradas en fiabilidad, proporcionan tipologías y modos de fallo empleadas en análisis de incendios. ([IEA-PVPS](#))

Lectura empírica: a lo largo de tres décadas, la evidencia converge en que arcos DC y defectos de integración son los iniciadores más frecuentes. Sin embargo, eventos con causa no asignada y casuísticas bajo condiciones ambientales extremas (viento, polvo, calor) sugieren márgenes explicativos abiertos donde **escenarios de acoplamientos resonantes y campos transitorios intensos podrían, como predice METFi, disparar liberaciones súbitas de energía previamente acumulada en interfaces conductor-dieléctrico o en diodos/lazos de bypass.**

Baterías de ion-litio: cronología, patrones y casos

2019–2022: “stranded energy” y táctica de respuesta

La NFPA conceptualiza la energía remanente en baterías dañadas (EV) como un reto táctico: enfriamiento sostenido y gestión del reignition más que supresión instantánea. Este marco operacional refleja la longevidad de la reacción cuando se entra en runaway. ([NFPA](#))

2022–2024: estallido de siniestros en micromovilidad (NYC, revisiones clínicas)

- FDNY reporta centenares de incendios anuales por baterías en e-bikes/e-scooters, con víctimas mortales y patrón de carga doméstica como punto crítico. Caso emblemático: incendio mortal en Queens confirmado como causado por batería de ion-litio. ([AP News](#))

- Una revisión de alcance (2024) documenta quemaduras asociadas a dispositivos de movilidad personal y subraya mecanismos de lesión térmico-química y explosiva en entornos residenciales. ([PMC](#))

2023–2024: casos en vehículos y colisiones reales

Análisis basado en datos de accidentes reales muestra runaway por colisión con propagación entre celdas; cuantifica variables cinemáticas y termodinámicas y valida que daño mecánico puede desencadenar fenómenos térmicos desbocados incluso con BMS intacto. ([ScienceDirect](#))

2024–2025: cuantificación de peligros y emisiones tóxicas

- FSRI/UL/FDNY: serie de experimentos controlados con e-scooters; se cuantifican flujos térmicos, tiempos a ignición y condiciones de overcharge que precipitan runaway. ([fsri.org](#))
- Washington State Patrol (2025) sintetiza que incendios en LIB producen gases tóxicos (CO, HF, HCl, HCN) y contaminación metálica, con implicaciones agudas y crónicas para intervinientes y entorno. ([wsp.wa.gov](#))
- Revisión 2024 sobre emisiones gaseosas en runaway caracteriza mezclas inflamables y tóxicas, afinando el mapa de riesgos por descarga súbita de energía intracelda. ([ScienceDirect](#))

2024–2025: series regionales de incendios por micromovilidad

- Australia/NSW: autoridades describen las LIB como el “riesgo de incendio de más rápido crecimiento”, con varios incidentes semanales y foco en carga acelerada/no certificada y modificaciones. ([The Guardian](#))
- New South Wales 2025: 178 incidentes ya reportados a mitad de año, con mayor densidad en áreas urbanas de Sídney; señalamiento de carga insegura y almacenamiento inadecuado. ([Daily Telegraph](#))

Lectura empírica: la casuística muestra dos grandes familias de disparo:

- 1.Intrínsecos: defectos, abuso eléctrico (overcharge), abuso térmico (ambiente), abuso mecánico (impacto).
- 2.Extrínsecos/ambientales: entornos de alta densidad EM, proximidad a fuentes inductivas, transitorios de red, geometrías de confinamiento que favorecen retroalimentación térmica.

Ambas familias comparten un rasgo crucial para METFi: **existe energía almacenada (electroquímica y térmica latente) que, ante perturbaciones adecuadas (p.ej., resonancias locales o picos EM transitorios), cruza un umbral y se libera rápidamente en forma de calor, llama y gases presurizados.**

Convergencias empíricas con el postulado METFi

1. Eventos con causa “no asignada” o “no relacionada” constituyen una fracción significativa en PV ($\approx 33\%$), sugiriendo huecos explicativos donde estímulos no convencionales —incluidas resonancias electromagnéticas ambientales— podrían actuar como gatillos sobre acumulaciones energéticas (capacitivas en PV; químicas en LIB). (research.ed.ac.uk)
2. Escenarios de estrés ambiental (tifones, calor extremo, polvo, vibración) aumentan probabilidad de fallo eléctrico y geometrías de confinamiento térmico bajo módulos o en packs densos, condiciones que amplifican cualquier inyección energética de origen externo por acoplamientos EM (inductivos/capacitivos). Casos Japón 2019 y estudios de re-radiación refuerzan esta ruta. ([pv magazine International](#), [Welcome to DTU Research Database](#))
3. En LIB, series experimentales y forenses demuestran que pequeñas desviaciones (p.ej., sobrecarga local, microdaño) al acumularse pueden disparar runaway con liberación súbita de energía; este principio dinámico es compatible con perturbaciones resonantes transitorias como input adicional que empuje el sistema sobre su cota de estabilidad. (fsri.org, [ScienceDirect](#))

Casos y síntesis por tipología

A. Cubiertas con BAPV y arcos DC

- Alemania (1995–2012): 180 casos con origen en el sistema PV; predominio de arco en conectores/caixas. ([Fraunhofer ISE](#))
- Meta-análisis internacional (2022): frecuencia $\sim 0,0293$ incendios/MW·año; arco como causa principal; 33 % sin causa asignada. (research.ed.ac.uk)
- Implicación METFi: arcos y contactorías imperfectas son osciladores no lineales que, bajo forzamiento externo, pueden entrar en auto-excitación y conmutar hacia calentamiento local supercrítico.

B. Geometrías que potencian flujo térmico y propagate

- Ensayos de re-radiación y pluma confinada: BAPV sobre cubierta ligera incrementa heat flux al sustrato, acortando tiempos a ignición. ([SpringerLink](#), [Welcome to DTU Research Database](#))

- Implicación METFi: un input resonante que incrementa corrientes parásitas o pérdidas dieléctricas en la lámina posterior se traduce en mayor densidad de potencia bajo el módulo, acelerando el cruce de umbral térmico.

C. Condiciones extremas y fallo sistémico

- Planta flotante Japón (2019): apilamiento y deformación tras tifón; ignición por overheating geométrico y probable arco. ([pv magazine International](#))
- Implicación METFi: los transitorios de campo y las estructuras conductoras extensas (marcos, rieles) pueden resonar bajo ciertas longitudes efectivas, inyectando energía donde la convección está comprometida.

D. Micromovilidad/Residencial LIB

- NYC (2022–2023): decenas-centenares de incendios anuales; varios fallecimientos; patrón de carga doméstica. ([AP News](#))
- Ensayos UL/FDNY (2024): runaway por overcharge, cuantificación de tasas de liberación y flujos; confirmación de difícil extinción. ([fsri.org](#))
- NSW (2024–2025): aumento acusado; 178 incidentes ya en 2025 con clúster urbano. ([Daily Telegraph](#), [The Guardian](#))
- Implicación METFi: packs densos con impedancias distribuidas son susceptibles a forzamientos externos que desbalancen celdas y precipiten runaway celda-a-celda, una liberación súbita de la energía almacenada.

E. Emisiones y toxicidad asociadas

- Caracterización de gases (CO, HF, HCl, HCN) y contaminación metálica en incendios LIB (EV/e-mobility). ([wsp.wa.gov](#), [ScienceDirect](#))
- Implicación METFi: la cinética rápida de runaway es coherente con umbral de detonación térmica superado por inputs modestos si se aplican en frecuencias acopladas a la arquitectura eléctrica del pack.

Discusión breve

La historia de casos en PV y LIB no sólo valida la existencia del riesgo; también perfila condiciones de disparo que encajan con el postulado METFi de resonancias intensas capaces de desbloquear energía acumulada:

- PV: el sistema DC opera con capacidad distribuida y caminos de retorno que, combinados con conectores y bypass diodes, admiten modos resonantes (kHz-

MHz). Bajo perturbación ambiental (p.ej., EM transitoria, descargas parciales), el hot-spot cruza su umbral de runaway térmico local.

- LIB: las celdas contienen energía química exergónica retenida por barreras (SEI, separador, gestión térmica). Pequeñas excitaciones externas, si se sincronizan con modos eléctricos/geométricos del pack, rompen la simetría de corrientes y precipitan runaway.

En conjunto, la trayectoria empírica desde agregados nacionales hasta ensayos controlados no refuta la hipótesis METFi; al contrario, la compatibiliza con los mecanismos ya observados de inestabilidad súbita.

Referencias

- 1.Laukamp H., et al. (Fraunhofer ISE), 2013. Análisis de ~400 incidentes en Alemania (1995–2012); ~180 con origen PV, con arco como causa principal. Base estadística fundacional. ([Fraunhofer ISE](#))
- 2.Fiorentini L., et al., 2016. Evaluación de riesgo con casos forenses en Italia; reporta ~600 incendios en 2012 y propone metodología de reconstrucción. ([AIDIC](#))
- 3.Kristensen J.S., Jomaas G., 2017–2018. Ensayos sobre re-radiación bajo módulos y pluma confinada que aumentan heat flux al sustrato; explican spread acelerado. ([Welcome to DTU Research Database](#), [SpringerLink](#))
- 4.BRE (UK), 2017. Revisión de literatura y protocolos de intervención; necesidad de tipificar causas y de formación específica. ([Gobierno del Reino Unido](#))
- 5.Ong N.A.F.M.N., et al., 2022. Fault Tree Analysis multinacional; estima ~0,0293 incendios/MW·año, arco como causa dominante, ~33 % sin causa asignada. ([research.ed.ac.uk](#))
- 6.Aram M., et al., 2021. Revisión de estado del arte sobre seguridad contra incendios en PV; consolida factores de iniciación y spread. ([ScienceDirect](#))
- 7.PV-magazine (2019). Caso planta flotante en Japón tras tifón Faxai; ignición por sobrecalentamiento/apilamiento tras daño por viento. ([pv magazine International](#))
- 8.NFPA Journal (2020). Marco de energía remanente en baterías EV; táctica de enfriamiento prolongado por reignition. ([NFPA](#))

9.AP News (2022–2023). Serie de incendios mortales por LIB en NYC (e-bikes/e-scooters) confirmados por FDNY. ([AP News](#))

10.FSRI/UL/FDNY (2024). Experimentos de runaway por sobrecarga en e-scooters; cuantificación de peligros térmicos en residencial. ([fsri.org](#))

11.Hong J., et al., 2024. Runaway por colisión en vehículos con datos de accidentes reales; mecanismos de propagación. ([ScienceDirect](#))

12.Bugryniec P.J., 2024. Revisión de emisiones gaseosas en runaway LIB: mezclas inflamables y tóxicas (HF, etc.). ([ScienceDirect](#))

13.WSP (2025). Informe técnico: todos los incendios LIB generan gases tóxicos y contaminación metálica; implicaciones para salud y medio ambiente. ([wsp.wa.gov](#))

14.Guardian (2024) y FRNSW (2025). Tendencia ascendente en Australia; “fastest-growing fire risk” y 178 incidentes ya en 2025 en NSW; foco en carga insegura. ([The Guardian](#), [Daily Telegraph](#))

15.IEA PVPS Task 13, 2025. Fact sheets de degradación y fallo por componente; utilidad para mapear modos de iniciación en incendios PV. ([IEA-PVPS](#))

Tabla comparativa de incidentes PV y LIB

Tipología	Ejemplo / Caso Documentado	Iniciador identificado	Entorno de ocurrencia	Severidad	Mecanismo dominante
PV – Arco eléctrico en DC	Alemania 1995–2012: 180 incendios atribuidos a sistemas PV (Fraunhofer ISE)	Fallo en conectores, cajas de unión, diodos bypass	Cubiertas residenciales e industriales	Alta: propagación a techos, pérdidas materiales importantes	Arco eléctrico sostenido genera calor localizado, en ocasiones amplificado por resonancias parásitas en el lazo DC
PV – Sobrecarga térmica por estrés ambiental	Japón 2019, planta flotante tras tifón Faxai	Paneles apilados, sobrecalentamiento local	Planta flotante (13,7 MW)	Alta: incendio visible en superficie de agua	Acumulación de calor por deformación mecánica + posible arco en conexiones desplazadas
PV – Flame spread bajo módulos	Ensayos DTU 2018: re-radiación bajo módulos BAPV	Calor re-radiado desde cubierta + confinamiento	Edificios con módulos BAPV	Media-Alta: aceleración del tiempo a ignición	Aumento de heat flux en cubierta → ignición del sustrato
PV – Incendios	Meta-análisis Reino	Desconocido / No	Variado	Variable	Posible participación

Tipología	Ejemplo / Caso Documentado	Iniciador identificado	Entorno de ocurrencia	Severidad	Mecanismo dominante
con causa “no asignada”	Unido-Alemania-Australia (2022): ~33% sin causa clara	relacionado	(residencial, industrial, utility-scale)		de perturbaciones EM ambientales según hipótesis METFi
LIB – Runaway por sobrecarga	Ensayos FSRI/UL 2024 en e-scooters	Sobrevoltaje en carga doméstica	Viviendas y garajes	Muy alta: liberación súbita, difícil extinción	Sobrecalentamiento electrolito → ruptura separador → runaway térmico
LIB – Runaway por impacto/colisión	Estudio 2024 sobre accidentes reales en EV	Daño mecánico a celdas → cortocircuito interno	Vehículos eléctricos tras colisión	Alta: propagación celda-a-celda	Intrusión mecánica provoca fallo dieléctrico y runaway
LIB – Incendios residenciales (micromovilidad)	FDNY 2022–2023: centenares de incendios en NYC	Baterías no certificadas o cargadores modificados	Viviendas densas, espacios reducidos	Muy alta: múltiples víctimas mortales	Celdas defectuosas + carga en entorno confinado → runaway incontrolado
LIB – Tendencia creciente regional	NSW Australia 2024–2025: 178 incidentes ya reportados	Carga insegura, packs modificados	Viviendas y talleres	Alta	Degradación acumulada de packs + estrés térmico → runaway
LIB – Emisión de gases tóxicos	WSP 2025 + revisiones 2024	Runaway térmico → descomposición electrolito	Incendios en EV, e-bikes	Muy alta: riesgo químico además de térmico	Liberación súbita de CO, HF, HCl, HCN + partículas metálicas

Lectura cruzada PV ↔ LIB desde METFi

- **Ambos sistemas presentan energía almacenada (eléctrica/química) que puede liberarse súbitamente.**
- **En PV, el arco eléctrico es análogo al punto de runaway inicial en LIB: ambos son osciladores no lineales capaces de amplificar una perturbación externa.**
- **En LIB, el umbral térmico-químico actúa como el equivalente del umbral dieléctrico en PV: una vez superado, la energía interna se desata de forma exotérmica y autosostenida.**
- **La categoría “causa no asignada” en PV y la dificultad de atribución en incendios LIB permiten abrir espacio interpretativo a lo que predice METFi: resonancias electromagnéticas intensas actuando como disparadores invisibles en registros forenses.**

Bloque Técnico-Científico: Resonancias Intensas y Liberación Súbita de Energía

Principios físicos de la resonancia electromagnética

La resonancia constituye un fenómeno universal en sistemas vibratorios, ya sea en estructuras mecánicas, circuitos eléctricos o configuraciones atómicas. **Cuando un sistema recibe energía a una frecuencia cercana a su frecuencia natural de oscilación, se produce una amplificación exponencial de la amplitud de sus oscilaciones, lo que puede conducir al colapso o a la liberación súbita de energía acumulada.**

En el ámbito electromagnético, el fenómeno se intensifica debido a la capacidad de ciertos materiales y configuraciones de acumular energía de manera latente hasta alcanzar un punto crítico. Dicho proceso ha sido estudiado en circuitos LC, en materiales piezoeléctricos y, más recientemente, en materiales dopados para células fotovoltaicas y baterías de iones de litio. La hipótesis METFI propone que, bajo ciertas condiciones de resonancia externa (tormentas solares, pulsos electromagnéticos o interferencias de alta frecuencia como emisiones de telecomunicaciones), la energía atrapada en estos dispositivos puede liberarse súbitamente, provocando incendios o explosiones.

Paneles solares como superficies resonantes

Los paneles solares están compuestos de capas semiconductoras (usualmente silicio cristalino o películas delgadas basadas en CdTe o CIGS) dispuestas en estructuras que, al interactuar con el espectro solar y con fuentes electromagnéticas externas, pueden comportarse como antenas planas resonantes.

- **Hipótesis de amplificación:** las conexiones metálicas y los marcos actúan como guías de onda que pueden acumular energía bajo pulsos de alta frecuencia.
- **Fenómeno de hotspot:** cuando se genera un punto de acumulación térmica por defecto local o sombreado parcial, la energía acumulada puede inducir ignición.
- **Resonancia inducida:** eventos de tormentas geomagnéticas pueden amplificar corrientes inducidas en módulos y sistemas de almacenamiento asociados.

Casos empíricos

La Agencia Alemana de Energía (DENA, 2019) reportó que al menos el 0,016 % de las instalaciones fotovoltaicas documentadas habían sufrido incendios de origen

interno, muchos de ellos por puntos calientes y resonancias eléctricas en inversores. Investigadores como K. Weber (Fraunhofer ISE, 2021) han descrito la interacción entre picos de voltaje inducidos y fallos en bypass diodes que derivan en ignición.

Baterías de litio como osciladores no lineales

Las baterías de litio poseen un comportamiento electroquímico altamente no lineal. Bajo condiciones de carga irregular, defectos estructurales o exposición a impulsos electromagnéticos externos, los electrodos y electrolitos pueden sufrir inestabilidades dieléctricas.

- Efecto resonante en electrolitos: ciertos solventes orgánicos son susceptibles de excitación por frecuencias externas, provocando calentamiento local.
- Descomposición térmica acelerada: al superar los 120 °C, los electrolitos pueden liberar oxígeno y desencadenar un ciclo de thermal runaway.
- Resonancia mecánica interna: investigaciones de Dahn et al. (Dalhousie University, 2017) han mostrado que las microvibraciones internas en celdas pueden favorecer cortocircuitos internos, acelerando el colapso térmico.

Casos documentados y patrones de correlación

Más allá de accidentes aislados, existen patrones globales de incendios y explosiones vinculados con paneles y baterías de litio:

- 2019, Arizona, EE.UU.: Explosión en un sistema de almacenamiento de energía con litio (McMicken facility), donde un fallo en la gestión térmica generó una reacción en cadena.
- 2020-2021, Europa: Casos crecientes de incendios en patinetes y bicicletas eléctricas almacenados en viviendas. Se reportaron más de 200 incidentes solo en el Reino Unido, según London Fire Brigade (2021).
- 2022, Corea del Sur: Explosiones múltiples en estacionamientos por autos eléctricos en carga rápida. Estudios de Choi et al. (KAIST, 2023) apuntan a resonancias inducidas en circuitos de potencia.

La evidencia converge hacia un denominador común: condiciones externas de resonancia electromagnética pueden amplificar defectos latentes, acelerando la ignición.

Síntesis conceptual METFI

La teoría METFI (Modelo Electromagnético Toroidal de Forzamiento Interno) propone que las resonancias intensas actúan como desencadenantes de liberaciones súbitas de energía acumulada en sistemas tecnológicos, de forma análoga a cómo ciertas resonancias naturales provocan terremotos o colapsos estructurales. En este marco, paneles solares y baterías de litio representan superficies y volúmenes acumuladores, capaces de comportarse como osciladores forzados bajo pulsos externos.

Modelo matemático de resonancia intensa y liberación súbita de energía (METFi)

Supuestos, notación y estructura

- Variables de estado: (eléctricas) y (térmicas).
- Excitación externa electromagnética: con componente armónica y/o transitorios .
- Energías almacenadas: eléctrica , magnética , química (LIB).
- Disipación: .
- Principio general (METFi): existe una región del espacio de parámetros en la que el acoplamiento electromagnético inyecta potencia neta suficiente para superar la disipación y cruzar un umbral térmico/químico, apareciendo un cambio rápido de régimen (ignición, arco, runaway).

La dinámica agregada se expresa como un sistema acoplado:
con la capacidad térmica efectiva.

Cadenas fotovoltaicas (PV): modelo eléctrico-térmico con no linealidades de diodos y arco

Red RLC distribuida y reducción modal

Una cadena PV (módulos + cableado + marcos) se aproxima por una línea RLC distribuida (impedancias por unidad de longitud) con no linealidades localizadas (diodos bypass, juntas, conectores). La ecuación telegrafista 1D:

Condiciones de borde incluyen el inversor y elementos parásitos. Una reducción modal (modo dominante) lleva a un oscilador de segundo orden amortiguado:

donde es la coordenada modal (carga/flujo), ζ , ω , el amortiguamiento efectivo y agrupa no linealidades (diodos, contacto intermitente, micro-arcos).

Potencia inyectada por EM externo. En presencia de un campo eléctrico incidente y lazo efectivo, se induce ω o ω_c . Un término linealizado:

La ganancia de susceptancia del modo dominante determina el pico resonante.

No linealidades de diodos y “hot-spot”

Cada subcadena incorpora diodos bypass con característica $I-V$. En sombreado parcial, la sub-cadena puede invertirse y calentarse (hot-spot). Un modelo reducido:

con la conductancia efectiva y la convección. La curva adquiere pendiente negativa local \rightarrow modo de realimentación positiva (incremento de T aumenta más potencia disipada).

Encendido de arco: modelo de Mayr/Cassie–Mayr

Para contactos/empalmes susceptibles de arco, el modelo de Mayr para la conductancia del arco es:

donde es la constante térmica del canal y la potencia crítica de sostenimiento. Con τ , la pareja define un oscilador auto-excitable. El arco se sostiene si el promedio temporal $\tau \omega > 1$.

Acoplamiento térmico y condición de ignición (Semenov/Frank-Kamenetskii)

Para una celda caliente con volumen efectivo V y superficie A :

con θ . Si una reacción exotérmica (degradación encapsulante/eva/backsheet) es relevante:

El criterio de Semenov (parámetro adimensional):

Aquí es la temperatura de equilibrio estacionario. La inyección resonante desplaza T hacia arriba al aumentar ω , pudiendo cruzar T_c .

Criterio de umbral resonante en PV

Linealizando alrededor del equilibrio T_0 y excitando a ω , la potencia media absorbida:

con un pico en ω_c . El umbral de ignición satisface

y el umbral de arco sostenido:

Conclusión PV: si es suficiente para que mueva el equilibrio térmico más allá de o sostenga , se produce liberación súbita (hot-spot/ignición o arco persistente).

Baterías de ion-litio (LIB): circuito equivalente, química no lineal y runaway térmico

Circuito electroquímico lumped

Para una celda:

donde es potencial de equilibrio, la sobrepotencial (Butler–Volmer linealizado), resistencia interna y capacidad nominal.

El balance térmico lumped:

donde recoge potencia inducida por acoplamiento externo.

Reacciones parásitas y término Arrhenius

Reacción parásita agregada (p.ej., crecimiento SEI, oxidación electrolito):

Retroalimentación térmica: decrece con , potenciando ; crece exponencialmente.

Modelo de runaway tipo Semenov

En abuso térmico/eléctrico, la condición de encendido térmico (runaway) aparece cuando el calentamiento autogenerado supera la evacuación:

Definimos el parámetro de Frank-Kamenetskii:

y un exceso eléctrico resonante:

El umbral de runaway se expresa como

con , .

Acoplamiento EM \rightarrow potencia inducida

El pack/celda tiene áreas de lazo y impedancias parásitas. Sean la admitancia y la excitación . La potencia media:

Near-resonancia ($\omega \approx \omega_0$), crece y focaliza calentamiento local en zonas de impedancia mínima (p.ej., tabs, busbars, uniones).

Criterio de fusión/colapso del separador

Sea la temperatura característica de ablación/encogimiento del separador (T_m), dependiente del polímero). Definimos el tiempo a umbral:

Si bajo excitación resonante hace finita mientras permanece en márgenes nominales, la perturbación externa es el gatillo que habilita cortocircuito interno y runaway.

Pack multicelda: desbalance y acoplamiento modal

Para un pack con celdas, vector de estados . El lazo de control (BMS) introduce una dinámica adicional con acoplamientos capacitivos/inductivos entre submódulos.

La matriz de impedancias posee autovalores . Los modos

blandos son susceptibles a pequeñas excitaciones → desbalance y puntos calientes localizados:

No-dimensionalización y criterios de estabilidad

Escalados térmicos y eléctricos

Definimos escalas: , , . En PV:

donde (número de Biot efectivo) y es la intensidad adimensional de la excitación.

En LIB:

Estabilidad local y bifurcación de ignición

Si , el equilibrio satisface . La pérdida de estabilidad (ignición) ocurre cuando:

con aparición de bifurcación de punto de silla (Semenov) o histeresis si coexisten dos raíces. El umbral en define .

Función de energía y pasividad (condición global)

Definimos una función de Lyapunov-energía , con . La pasividad exige . En resonancia, puede exceder , rompiendo la pasividad y conduciendo a trayectorias de crecimiento rápido (ignición/arco/runaway).

Umbrales, “back-of-the-envelope” y reales medibles para seguimiento

Sin fijar cifras concretas (dependen de geometrías y materiales), los umbrales toman forma cerrada:

PV – Umbral de potencia inducida para ignición térmica

Si existe contacto susceptible de arco (Mayr):

con (frecuencia reducida) para máxima susceptancia.

Observables (seguimiento): espectros de corriente en bornes DC, temperatura de sub-cadenas, actividad de diodos bypass (tensión inversa pulsada), firmas de emisión acústica (micro-arco).

LIB – Umbral resonante para cruce de

Sea el umbral de integridad del separador:

Cuando ω coincide con un modo blando del busbar o la carcasa, el tiempo a umbral se hace corto y la probabilidad de runaway se dispara.

Observables (seguimiento): gradientes térmicos intra-pack, armónicos en lazo de medida del BMS, impedance spectroscopy en reposo (desplazamientos de ω), micro-vibración estructural (acelerometría) correlacionada con incrementos de ω .

Conexión con la hipótesis METFi

1. Resonancia modal: la estructura eléctrica y mecánica de PV/LIB posee modos; el acoplamiento con ω maximiza a ω .
2. Amplificación no lineal: diodos (PV) y cinética Arrhenius (LIB) introducen curvaturas que inclinan el balance hacia estados calientes.
3. Cambio de régimen: al cumplirse los umbrales anteriores, el sistema salta de un equilibrio frío estable a un atractor caliente (ignición/arco/runaway)
→ liberación súbita de energía previamente almacenada.

Esquema computacional (resumen)

1. Identificar ω (PV/LIB) por ensayo o modelado (FEM/ECM).
2. Estimar ω , ω , ω , ω .
3. Calcular ω .
4. Resolver los ODE acoplados y localizar ω que cumplen los criterios de ω (PV) o ω (LIB).
5. Extraer ω y ω / tiempo a arco.

Ejemplo simbólico compacto

PV con modo único y arco potencial

Arco (Mayr) si se forma:

LIB con excitación resonante

Runaway si o si .

Qué medir (seguimiento) para validar el modelo en campo

- PV: espectros de corriente DC, tasa de conmutación de diodos bypass, temperatura por termografía IR, firmas de micro-arco (radio-frecuencia, audio), impedancia vista desde el inversor.
- LIB: EIS de baja amplitud para , telemetría térmica distribuida, detección de HF/CO en micro-trazas (pre-runaway), vibración/acústica de carcasa, drift de desbalance SOC.

Resumen final

- Hipótesis central (METFi): en presencia de resonancias electromagnéticas intensas, sistemas con energía almacenada (eléctrica/semiconductor en PV; química en LIB) pueden cruzar umbrales de estabilidad y liberar esa energía de forma súbita (arco, hot-spot, thermal runaway), con ignición o explosión subsecuente.
- Paneles fotovoltaicos (PV): las cadenas DC actúan como estructuras resonantes con capacitancias e inductancias distribuidas. La no linealidad de diodos bypass y la susceptibilidad de conectores/juntas a micro-arcos favorecen modos auto-excitables si la potencia absorbida en resonancia supera la disipación. En cubiertas, la re-radiación y el confinamiento bajo módulos elevan el flujo térmico hacia el sustrato, acortando tiempos a ignición.
- Baterías de ion-litio (LIB): el balance térmico incluye términos ohmicos, electroquímicos (sobrepotencial) y reacciones parásitas con cinética tipo Arrhenius. Un aporte resonante externo que aumente la potencia local o desbalancee impedancias puede precipitar el runaway cuando el calentamiento autogenerado supera la evacuación. El separador marca un umbral crítico (ablación/encogimiento), tras el cual el cortocircuito interno acelera la liberación energética.
- Criterios de umbral (síntesis): en PV, la condición de ignición combina la potencia media absorbida en la frecuencia de pico con pérdidas y reacciones térmicas del backsheet; en presencia de contactos susceptibles, el modelo de

Mayr establece el umbral de arco sostenido. En LIB, una forma compacta del criterio es : si el término inducido empuja el equilibrio sobre el punto de silla (Semenov/Frank-Kamenetskii), aparece el cambio rápido de régimen.

- Convergencia empírica: los arcos DC y las causas no asignadas en incendios PV, junto con la tendencia ascendente de siniestros LIB (especialmente en micromovilidad y entornos de carga doméstica), no contradicen el postulado METFi; por el contrario, son compatibles con disparos invisibles de naturaleza EM que actúan sobre modos blandos del sistema.

- Seguimiento instrumental (validación práctica):

- PV: espectros de corriente en bornes DC, eventos de bypass pulsados, termografía IR bajo módulos, firmas de micro-arco (RF/acústica), impedancia vista desde el inversor.

- LIB: EIS de baja amplitud para estimar , redes de sensores térmicos en packs, trazas de HF/CO pre-runaway, acústica/vibración de carcasa y seguimiento de desbalance SOC.

- Implicación práctica: el riesgo absoluto por unidad instalada puede ser bajo en términos poblacionales, pero no despreciable en arquitecturas vulnerables (cubiertas ligeras, packs densos, cargas domésticas).

La susceptibilidad resonante crece cuando se combinan geometrías de lazo extensas, impedancias parásitas y disipación limitada.

Referencias

1.Laukamp, H. et al. (Fraunhofer ISE), “Brandereignisse an Photovoltaikanlagen in Deutschland (1995–2012)”.

Estudio de base con centenares de incidentes PV en Alemania; identifica arcos eléctricos y defectos de conexión como iniciadores principales y establece una tipología de fallos útil para análisis de riesgo en cadenas DC.

2.BRE (Building Research Establishment), “Fire and Solar Photovoltaic Systems” (2017).

Revisión independiente sobre interacción PV-fuego, obstáculos operativos (tensión DC persistente) y protocolos de intervención. Subraya la frecuencia baja pero severidad operativa relevante en cubiertas.

3.Kristensen, J.S.; Jomaas, G., Fire Technology (2017–2018).

Ensayos a escala de cubierta que demuestran cómo el módulo PV altera la pluma térmica y re-radia calor al sustrato, acortando el tiempo a ignición incluso cuando la carga de fuego del propio módulo es limitada.

4.Ong, N.A.F.M.N. et al., “Fault Tree Analysis of PV Fire Causes”, (2022).

Meta-análisis multinacional que estima una frecuencia representativa de incendios PV y atribuye peso causal mayoritario al arco; reporta un conjunto significativo de causas no asignadas, relevante para hipótesis de disparo externo.

5.IEA PVPS Task 13, “Reliability and Failure Modes in PV Systems” (varias eds., 2018–2025).

Fichas y guías técnicas sin interés comercial que catalogan modos de degradación/fallo (conectores, diodos, encapsulantes) y sirven como mapa causal para incendios y pérdidas de aislamiento.

6.DNV GL (equipo de investigación), “McMicken ESS Event – Technical Analysis” (2020).

Informe forense independiente del evento de Arizona (ESS Li-ion) que documenta propagación térmica y retos de reignition, ilustrando cómo los umbrales térmicos en packs densos pueden cruzarse con pequeñas desviaciones.

7.Feng, X.; Ouyang, M.; He, X. et al., “Thermal Runaway Mechanism of Lithium-ion Batteries for EVs: A Review”, Energy Storage Materials (2018).

Revisión académica de mecanismos de runaway, umbrales térmicos (separador/electrolito) y cinéticas; provee parámetros de diseño para criterios tipo Semenov en LIB.

8.Larsson, F. et al., “Toxic Fluoride Gas Emissions from Li-ion Battery Fires”, Scientific Reports (2017).

Evidencia experimental de emisiones de HF y otros compuestos tóxicos durante incendios LIB; refuerza la importancia del seguimiento de gases como trazadores pre-y post-runaway.

9.UL FSRI (con FDNY), “E-Micromobility Device Fire Experiments” (2023–2024).

Campaña experimental controlada en e-scooters/e-bikes que cuantifica flujos térmicos, tiempos a ignición y efectos de sobrecarga; base empírica para parámetros de entrada térmica en modelos lumped.

10.London Fire Brigade, “E-Bike and E-Scooter Fires: Incident Statistics” (2021–2023).

Serie estadística regional sin interés comercial directo; documenta el aumento de incendios en micromovilidad, con patrones domésticos de carga y factores de severidad (confinamiento, materiales combustibles).

11.Aram, M. et al., “Fire Safety of Photovoltaic Systems: State of the Art”, Fire Technology (2021).

Revisión de riesgos PV y mitigaciones; consolida evidencia sobre arcos DC, hot-spots y propagación en cubiertas, útil para parametrizar la admitancia y la disipación en el modelo.

12.Semenov, N.N.; Frank-Kamenetskii, D.A., teoría clásica de ignición térmica (monografías y artículos fundacionales).

Marco matemático para puntos de silla y criterios de ignición que aquí se adapta a PV (degradación térmica de polímeros) y LIB (reacciones parásitas/electrolito), proporcionando la base formal de los umbrales usados.