

INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS: UMA VISÃO TÉCNICO-PERICIAL

Jonatas Ribeiro Senna Pires¹

<https://orcid.org/0009-0009-6928-3233>

Willian Leal Nunes²

<https://orcid.org/0009-0004-5963-307X>

RESUMO

Este artigo aborda os incêndios em veículos eletrificados (VEs), enfatizando o fenômeno de thermal runaway em baterias de íons de lítio. O estudo detalha causas internas e externas, dinâmica do incêndio, impacto da química e formato das células, destacando diferenças entre tipos cilíndricos, prismáticos e *pouch*. Com base em testes experimentais e literatura recente, avalia-se a propagação térmica, riscos associados como explosões e emissão de gases tóxicos, além dos desafios operacionais enfrentados pela perícia. Destaca-se a importância da correta identificação de vestígios físicos, utilização de dados eletrônicos dos veículos e aplicação de ferramentas tecnológicas, como análise térmica e visão computacional, nas investigações periciais. O trabalho aponta a necessidade do desenvolvimento de protocolos específicos para perícias em VEs, reforçando a relevância da capacitação contínua dos peritos e parcerias institucionais. Recomenda-se ainda a criação de um banco de dados nacional sobre incêndios em VEs, visando uma atuação preventiva mais eficaz. Por fim, o artigo ressalta que a compreensão técnico-científica aprofundada é essencial para melhorar a segurança dos veículos eletrificados e garantir confiabilidade nos laudos periciais realizados pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC).

Palavras-chave: Veículos Eletrificados; Incêndio Veicular; Thermal Runaway; Bateria de Íons de Lítio; Perícia.

¹ Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Perito em Incêndio e Explosão pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (2025). Bacharel em Engenharia de Computação pela Universidade de Brasília (2019). Atualmente é aluno do Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Email: jonatas.senna.bmsc@gmail.com

² Tenente-Coronel do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Tecnólogo em Gestão de Emergências pela UNIVALI (2009). Perito em Incêndio e Explosão pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (2015). Bacharel em Direito pela UNOESC (2016). Especialista em Políticas e Gestão de Segurança Pública pela Universidade Estácio de Sá (2013). Especialista em Administração Pública com Ênfase na Atividade Bombeiro Militar pela ESAG/UDESC, (2017). Atualmente é Comandante do 15º Batalhão Bombeiro Militar do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Email: wildleal@gmail.com

ELECTRIC VEHICLE FIRES: A TECHNICAL AND FORENSIC PERSPECTIVE

ABSTRACT

This article addresses fires in electric vehicles (EVs), emphasizing the phenomenon of thermal runaway in lithium-ion batteries. The study details internal and external causes, fire dynamics, and the impact of battery chemistry and cell formats, highlighting differences between cylindrical, prismatic, and pouch types. Based on experimental tests and recent literature, the paper evaluates thermal propagation, associated risks such as explosions and toxic gas emissions, and the operational challenges faced in forensic investigations. It emphasizes the importance of correctly identifying physical evidence, utilizing electronic vehicle data, and applying technological tools like thermal analysis and computer vision in forensic analyses. The work highlights the need for developing specific forensic protocols for EV investigations, reinforcing the relevance of continuous training for forensic experts and institutional partnerships. It further recommends creating a national database of EV fires to enable more effective preventive measures. Finally, the article underscores that an in-depth technical and scientific understanding is essential to enhance electric vehicle safety and ensure reliability in forensic reports produced by the Military Fire Department of Santa Catarina (CBMSC).

Keywords: Electric Vehicles; Vehicle Fire; Thermal Runaway; Lithium-ion battery; Forensic Analysis.

Artigo Recebido em 26/05/2024

Aceito em 20/06/2025

Publicado em 02/07/2025

1. INTRODUÇÃO

O crescente uso de veículos eletrificados (VEs) como solução sustentável para mobilidade tem levantado preocupações quanto à segurança associada ao uso massivo de baterias de íons de lítio. Embora apresentem vantagens ambientais e energéticas, essas tecnologias também trazem riscos relevantes de incêndio, explosão e liberação de gases nocivos em situações em que suas baterias são afetadas. O fenômeno conhecido como thermal runaway é a principal preocupação nesse contexto, caracterizando-se por uma reação em cadeia de aquecimento interno que pode levar à ignição espontânea da bateria (BAROWY, 2023; HELD; BRÖNNIMANN, 2016). Com o aumento dos registros de incêndios envolvendo VEs em estacionamentos, rodovias, ambientes urbanos e subterrâneos, cresce a necessidade de compreensão profunda sobre os fatores que desencadeiam essas ocorrências e suas consequências. Diversos estudos recentes têm abordado a dinâmica desses eventos, desde a análise do comportamento térmico das baterias até a investigação dos resíduos gerados após o incêndio (SUN et al., 2020; HELD et al., 2022).

Paralelamente, a atuação pericial em eventos com VEs requer ferramentas e conhecimentos atualizados, capazes de identificar com precisão as causas e a evolução do sinistro. No âmbito do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC), a perícia tem como objetivo principal a definição das causas do incêndio, buscando a retroalimentação do ciclo operacional e a prevenção de ocorrências futuras. Novas abordagens baseadas em dados operacionais, simulações numéricas e reconhecimento visual por inteligência artificial têm se mostrado promissoras nesse contexto (LIANG, 2024; PU; ZHANG, 2022).

Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica aprofundada sobre incêndios em veículos eletrificados, abordando os principais

mecanismos de ignição, a dinâmica do thermal runaway, os perigos associados (como calor, explosão e contaminação) e as abordagens investigativas aplicáveis à análise pericial. Com base em estudos recentes e experiências, busca-se fornecer um panorama abrangente que auxilie profissionais da área técnico-científica, em especial os peritos do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC), na compreensão desses eventos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica exploratória, de natureza qualitativa, com enfoque descritivo-analítico. O objetivo visou reunir, organizar e analisar criticamente a literatura científica atual sobre os incêndios envolvendo veículos eletrificados (VEs), com ênfase nos riscos associados às baterias de íons de lítio e suas implicações para a atividade pericial no âmbito do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC).

A seleção das fontes seguiu critérios metodológicos baseados na relevância científica e atualidade. As buscas foram realizadas nas bases de dados Google Scholar e Web of Science, reconhecidas pelo amplo acervo de publicações técnico-científicas e por permitirem acesso a artigos de alto fator de impacto. As principais palavras-chave utilizadas nas buscas foram: lithium-ion battery fires, thermal runaway, electric vehicle fire, EV battery fire investigation, entre outras variações. Também foram consideradas traduções para o português em buscas complementares. Os critérios de inclusão adotados foram:

- artigos publicados entre 2016 e 2024;
- estudos que envolvessem veículos eletrificados de uso civil (especialmente automóveis);
- estudos que tratassem sobre fundamentos afetos a baterias de íons de lítio;

- pesquisas que apresentassem dados quantitativos relevantes.

Foram excluídos estudos com foco exclusivo em aspectos legislativos, econômicos ou de viabilidade mercadológica dos VEs, bem como publicações com ausência de rigor técnico.

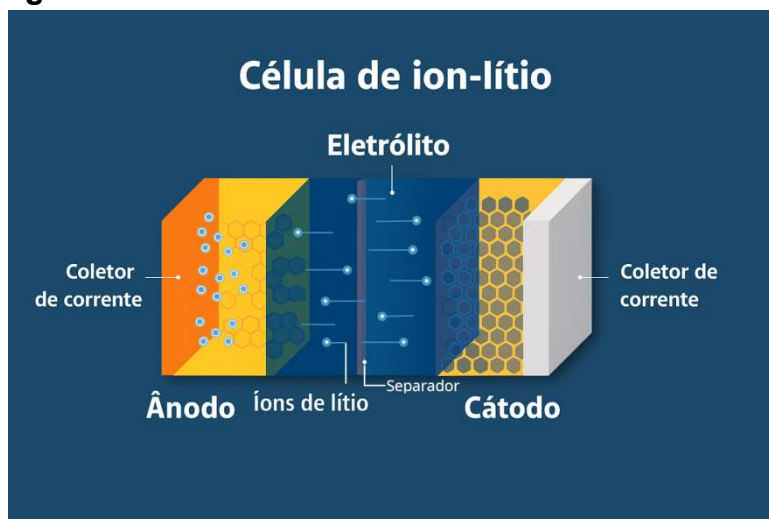
Ao longo do processo, os artigos selecionados foram submetidos a leitura exploratória, seguida de leitura seletiva e analítica, conforme metodologia proposta por Lakatos e Marconi (LAKATOS; MARCONI, 2003). A análise final priorizou trabalhos que contribuíssem com conhecimentos para a aplicação em investigações periciais conduzidas pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, bem como a compreensão do fenômeno do thermal runaway e suas consequências em ambientes confinados.

Essa abordagem metodológica visa garantir confiabilidade e coerência nos dados e interpretações apresentados, oferecendo subsídios técnicos sólidos para a atuação pericial em cenários envolvendo veículos eletrificados incendiados.

3 BATERIAS DE LÍTIO E SUAS IMPLICAÇÕES NOS INCÊNDIOS

As baterias de íons de lítio têm desempenhado papel central na revolução da mobilidade elétrica e dos dispositivos portáteis desde o final do século XX. O conceito de uma bateria baseada em intercalação de íons foi proposto por Michel Armand na década de 1970, sendo posteriormente desenvolvido por John B. Goodenough e Akira Yoshino, cujos trabalhos resultaram na primeira bateria de íons de lítio comercializada em 1991 pela Sony. O ânodo de grafite, o cátodo de óxidos metálicos e o eletrólito orgânico formaram a base da tecnologia que viria a dominar o mercado de armazenamento de energia (REDDY et al., 2020). A Figura 1 representa a estrutura básica de uma bateria de íons de lítio.

Figura 1. Estrutura básica de uma célula de íons de lítio



Fonte: adaptado de Underwriters Laboratories (UL).

Disponível em: <https://ul.org/research-updates/what-are-lithium-ion-batteries/>.

Acesso em: 14 abr. 2025.

Desde então, diversas variações químicas foram introduzidas, buscando equilibrar densidade energética, estabilidade térmica, segurança e custo. Os principais sistemas incluem LFP (lítio-ferro-fosfato), NMC (níquel-manganês-cobalto), NCA (níquel cobalto-alumínio) e LMO (óxido de manganês). Cada um apresenta características distintas em termos de comportamento térmico, risco de thermal runaway, liberação de gases e severidade do incêndio em caso de falha.

As baterias LFP, por exemplo, são reconhecidas por sua maior estabilidade térmica e menor risco de thermal runaway. Mesmo sob condições extremas, essas células apresentam um comportamento mais previsível, com temperaturas de ignição superiores a 250°C e baixa geração de oxigênio reativo.

Em contrapartida, baterias NMC e NCA possuem maior densidade energética, mas também exibem maior instabilidade térmica. Durante o thermal runaway, essas combinações químicas liberam uma quantidade significativa de calor, gases inflamáveis e oxigênio livre, alimentando a combustão e

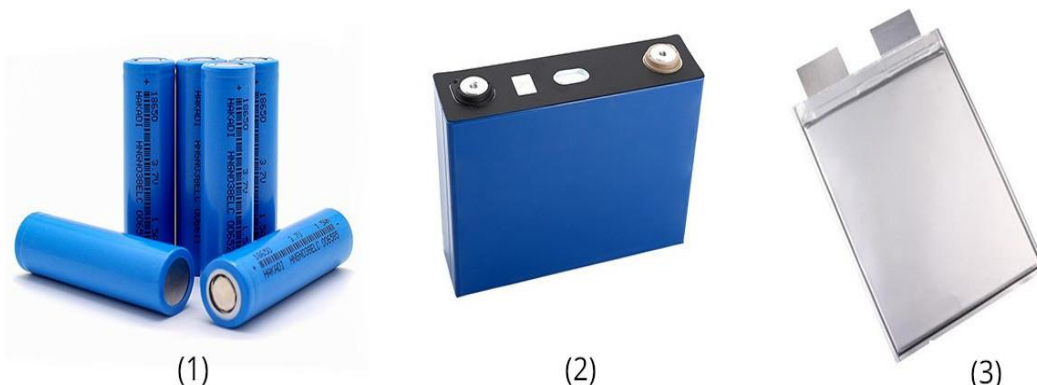
aumentando o risco de explosão (HELD; BRÖNNIMANN, 2016; SUN et al., 2020).

Estudos experimentais demonstram que baterias NMC, ao entrarem em combustão, geram picos de calor superiores a 6 MW, além de liberar gases tóxicos e inflamáveis como HF, CO e hidrocarbonetos leves. A composição do eletrólito e a presença de metais de transição nos eletrodos influenciam diretamente na toxicidade e agressividade dos subprodutos da queima (HELD et al., 2022). Já as baterias LMO, embora menos comuns atualmente, também apresentam comportamento intermediário entre LFP e NMC, com boa potência, mas moderada estabilidade térmica.

Além da composição química, o tipo de célula adotado na construção da bateria impacta diretamente no comportamento do incêndio. Existem três formatos principais de células: cilíndrica, prismática e *pouch* conforme Figura 2. As células cilíndricas possuem invólucro metálico individual, o que proporciona boa resistência mecânica, mas também facilita a propagação térmica por contato direto. São amplamente utilizadas em configurações modulares com muitas células em série ou paralelo, como em veículos da Tesla (SUN et al., 2020; HELD et al., 2022).

As células prismáticas, por sua vez, são acondicionadas em carcaças rígidas retangulares, oferecendo maior densidade volumétrica. Entretanto, podem sofrer deformações estruturais sob impactos ou falhas mecânicas, o que compromete a integridade elétrica e térmica do módulo. Por fim, as células *pouch*, formadas por invólucros flexíveis laminados, proporcionam maior flexibilidade de design e redução de peso, mas são mais suscetíveis à perfuração e expansão térmica. As principais características de cada tipo de célula estão dispostas na tabela 1.

Figura 2 - Tipos de células: (1) Cilíndrica; (2) Prismática; (3) *pouch*.



Fonte: Autores (2025)

Tabela 1 - Comparação entre os principais tipos de células de baterias de íons de lítio

Tipo de Célula	Características Construtivas	Vantagens	Desvantagens
Cilíndrica	Invólucro metálico individual, formato tubular	Alta resistência mecânica, baixo custo	Propagação térmica célula a célula facilitada
Prismática	Carcaça metálica rígida, formato retangular	Alta densidade volumétrica	Suscetível a deformações mecânicas e falhas estruturais
<i>Pouch</i>	Envoltório flexível laminado	Leve, versátil no design, menor volume	Alta sensibilidade a impactos, propensão à expansão térmica e perfurações

Fonte: Autores (2025)

Durante o thermal runaway, células *pouch* podem se expandir rapidamente, rompendo o envelope e liberando gases inflamáveis. Isso aumenta a probabilidade de ignição múltipla e propagação acelerada. As prismáticas, por sua vez, tendem a concentrar a pressão interna, o que pode resultar em rupturas explosivas localizadas. Já as cilíndricas, embora mais

robustas individualmente, quando agrupadas em grandes conjuntos favorecem a propagação sequencial célula a célula. Estudos demonstram que a configuração estrutural das células afeta não apenas o risco de ignição, mas também a quantidade e tipo de gases emitidos (BAROWY, 2023; BAI et al., 2024).

Do ponto de vista pericial, a identificação da química da bateria e do tipo de célula é essencial para interpretar corretamente o padrão de queima e a intensidade do dano observado. O conhecimento das características físico-químicas e construtivas da bateria analisada permite ao perito estabelecer relações mais precisas entre os vestígios encontrados e os mecanismos de ignição, contribuindo para a confiabilidade do laudo técnico.

4 THERMAL RUNAWAY EM BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

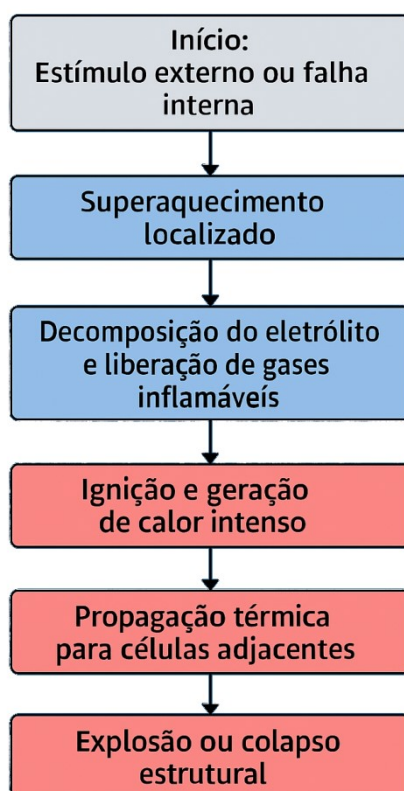
O fenômeno conhecido como thermal runaway constitui um dos principais riscos associados ao uso de baterias de íons de lítio em veículos eletrificados. Trata-se de uma reação exotérmica em cadeia, autossustentada, que pode levar à ignição e explosão da célula, com liberação de calor, chamas e gases tóxicos. Ocorre quando o calor gerado internamente pela bateria ultrapassa a capacidade de dissipação térmica, promovendo o aumento contínuo da temperatura e a decomposição dos materiais ativos da célula (HELD et al., 2022; MALLICK; GAYEN, 2023; FENG et al., 2018).

A cadeia de eventos geralmente se inicia com uma falha interna ou externa — como curto-circuito, sobrecarga, perfuração ou aquecimento externo — que provoca o superaquecimento de um ou mais componentes da célula, conforme o fluxograma da Figura 3. A decomposição do eletrólito e do separador pode ter início com temperaturas entre 80°C e 120°C, seguida pela quebra do eletrólito orgânico e liberação de gases inflamáveis, como H₂, CO, e hidrocarbonetos leves. Em baterias com sal condutor, a degradação térmica também gera HF (ácido fluorídrico), altamente tóxico e corrosivo. A ruptura das

células, pode causar a liberação de gases inflamáveis podendo formar nuvens explosivas, especialmente em ambientes fechados ou mal ventilados (SUN et al., 2020; HELD et al., 2022; MALLICK; GAYEN, 2023).

Figura 3 - Fluxograma que representa o processo de thermal runaway.

Processo de Thermal Runaway



Fonte: Autores (2025)

Estudos experimentais demonstram que a temperatura pode escalar rapidamente, ultrapassando 600°C, e os picos de liberação térmica atingem valores superiores a 6 MW, principalmente em baterias do tipo NMC (níquel-mangânês-cobalto) (HELD et al., 2022). Essa magnitude térmica é suficiente para comprometer a estrutura de veículos, provocar o colapso de garagens e gerar riscos adicionais para edificações adjacentes. A propagação térmica

entre células adjacentes é comum, especialmente em arranjos com alta densidade energética e baixo isolamento térmico, o que pode comprometer rapidamente todo o módulo da bateria.

Essa propagação entre células é favorecida por três mecanismos principais: condução térmica direta, convecção dos gases quentes e radiação térmica. O tempo entre a ignição de uma célula e a propagação para a próxima pode variar de poucos segundos a dezenas de segundos, dependendo do tipo de célula, configuração do módulo e a presença de barreiras térmicas (HELD; BRÖNNIMANN, 2016)

A composição química influencia fortemente a severidade do thermal runaway. Baterias do tipo LFP (lítio-ferro-fosfato) apresentam maior estabilidade térmica e menor propensão à ignição, mesmo sob condições críticas. Por outro lado, células NMC (níquel-manganês-cobalto) e NCA (níquel-cobalto-alumínio) apresentam maior risco, devido à alta densidade energética e maior liberação de oxigênio reativo durante a decomposição dos materiais catódicos (REDDY et al., 2020; HELD et al., 2022).

Em operações de investigação de incêndios envolvendo VEs, a identificação do thermal runaway é essencial para a reconstrução do evento. Padrões de queima concentrados na bateria, evidências de propagação térmica sequencial entre células, a presença de resíduos químicos específicos podem indicar que esse fenômeno foi o mecanismo inicial de ignição. A ocorrência do thermal runaway em ambientes confinados, como garagens ou túneis, apresentam uma oportunidade devido ao fato da elevada deposição de metais pesados (Co, Ni, Mn) e fluoretos em superfícies próximas ao local do incêndio conforme revelaram testes conduzidos por Held et al (HELD et al., 2022), o que pode ser verificado em exames complementares de laboratório.

5 DINÂMICA DOS INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS

A ocorrência de incêndios em veículos eletrificados tem ganhado notoriedade nos últimos anos, acompanhando o crescimento da frota de VEs no mercado global. Embora os VEs sejam frequentemente percebidos como mais seguros que os veículos a combustão interna (VCIs) por eliminarem os riscos associados a combustíveis líquidos inflamáveis, os riscos inerentes à tecnologia de baterias de íons de lítio trazem novos desafios.

Estudos como o de Sun et al. (SUN et al., 2020) demonstram que, embora a frequência absoluta de incêndios em VEs ainda seja proporcionalmente menor que em VCIs, os efeitos resultantes de um incêndio envolvendo uma bateria de alta capacidade podem ser significativamente mais perigosos. As principais diferenças incluem a liberação de calor intenso, gases tóxicos como HF (fluoreto de hidrogênio) e CO (monóxido de carbono), além do grande potencial de reignição após a supressão do fogo.

A revisão conduzida por Held et al. (HELD et al., 2022) reforça que, uma vez envolvida em fogo, uma bateria pode liberar uma quantidade de energia térmica comparável ou superior a de um tanque de combustível convencional com autonomia equivalente. Além disso, os materiais combustíveis utilizados na estrutura dos EVs (polímeros, isolantes e plásticos de alta densidade) também contribuem para a severidade do evento.

Outro fator relevante é o SoC (State of Charge), que indica a situação da carga da bateria. Trata-se da carga energética restante no acumulador, que varia entre 0% e 100%. Incêndios em baterias com um SoC elevado tendem a ser mais severos, e essa é uma situação que deve ser considerada durante e depois do incêndio.

Nesse contexto, torna-se essencial que os profissionais envolvidos com a análise pericial estejam atentos aos novos padrões de comportamento dos sinistros envolvendo VEs. Este panorama geral busca servir de base para a compreensão aprofundada dos mecanismos e riscos que serão discutidos nas

seções seguintes.

6 CAUSAS DOS INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS

As causas dos incêndios em veículos eletrificados, no que se diferem dos veículos a combustão interna, podem estar fortemente relacionadas às características das baterias de íons de lítio e ao modo como os diversos componentes eletrônicos interagem sob condições normais e anormais de operação. De forma geral, os principais fatores desencadeantes podem ser classificados em três grupos: falhas internas, fatores externos e condições operacionais inadequadas.

6.1 Falhas Internas

As falhas internas compreendem defeitos no próprio sistema de armazenamento de energia, incluindo desde falhas de fabricação até degradação natural ao longo do tempo. Segundo estudos recentes (SHAHID; AGELIN-CHAAB, 2022; HELD; BRÖNNIMANN, 2016; BAROWY, 2023), dentre os principais mecanismos causadores de falhas, destacam-se:

- **Curto-circuito interno:** ocorre quando há contato direto entre o ânodo e o cátodo da célula, frequentemente provocado por falha do separador ou contaminação por partículas metálicas. Essa falha pode iniciar uma reação exotérmica autossustentada, levando ao aquecimento intenso da célula e subsequente thermal runaway.
- **Degradação de eletrodos:** a deterioração prematura dos eletrodos pode resultar na formação de dendritos de lítio metálico que atravessam o separador e provocam curto-circuitos.
- **Defeitos de fabricação:** desalinhamento de eletrodos, impurezas na célula e falhas de soldagem elétrica são exemplos de não conformidades que aumentam o risco de falha.

6.2 Fatores Externos

Conforme Shahid e Agelin-Chaab (2022), Feng et al. (2018) e Bai et al. (2024), os fatores externos que podem desencadear ou acelerar processos de

ignição em baterias de VEs incluem, mas não se limitam a:

- **Impactos mecânicos:** colisões veiculares, quedas e esmagamento podem danificar o invólucro protetor e as células, comprometendo o isolamento elétrico e iniciando curtos externos ou internos.
- **Perfurações e rupturas:** instrumentos pontiagudos ou objetos projetados durante acidentes podem perfurar diretamente o módulo da bateria, gerando arcos elétricos e ignição de gases.
- **Temperatura ambiente elevada ou fontes externas de calor:** o aquecimento por incêndio externo, exposição prolongada ao sol ou falha no sistema de refrigeração da bateria pode induzir sobreaquecimento.
- **Contato com água salgada:** a exposição a eletrólitos condutivos, como água do mar, pode gerar correntes de fuga, acelerando reações corrosivas e facilitando curto-circuitos.

6.3 Condições Operacionais Inadequadas

Erros na operação, manutenção e recarga das baterias também configuram causas importantes. Entre elas:

- **Sobrecarga:** carregar a bateria acima da tensão nominal eleva o risco de instabilidades químicas no cátodo e liberações gasosas com potencial inflamável.
- **Temperaturas de operação inadequadas:** tanto o carregamento quanto o uso em temperaturas muito baixas ou elevadas podem comprometer a integridade eletroquímica das células.
- **Carga ou descarga anormal:** a carga ou descarga anormal pode gerar pontos quentes, que podem produzir falhas.
- **Falhas no sistema de gerenciamento da bateria:** o BMS (Battery Management System) é responsável por manter a operação segura do conjunto, controlando tensões, correntes, temperatura e balanceamento da carga entre as células. Uma falha nesse sistema pode impedir a detecção de anomalias, agravando as consequências de outras falhas.
- **Infraestrutura de recarga inadequada:** carregadores defeituosos ou mal dimensionados, bem como instalações elétricas mal executadas, podem submeter as baterias a condições inseguras, como surtos de tensão e sobreaquecimento dos conectores.

7 ABORDAGENS PERICIAIS

A investigação de incêndios em veículos eletrificados demanda uma abordagem técnico científica especializada, com ênfase na identificação da origem e causa do sinistro. A perícia realizada pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC), por exemplo, tem como objetivo principal elucidar os fatores determinantes do evento.

Além da análise tradicional dos vestígios materiais, a investigação em VEs exige conhecimento aprofundado sobre o funcionamento dos sistemas de armazenamento de energia, eletrônica embarcada e protocolos de segurança específicos das baterias de íons de lítio. A avaliação pericial pode incluir a inspeção de módulos de bateria remanescentes, análise de imagens térmicas, leitura de dados dos sistemas de gerenciamento da bateria (BMS) e cruzamento de informações com os padrões de queima observados. Essas práticas são fundamentais para diferenciar, por exemplo, um incêndio iniciado por falha interna da bateria de um provocado por causas externas, como colisões ou sobrecarga elétrica, aumentando a precisão do laudo técnico e contribuindo para a prevenção de novos sinistros.

7.1 Levantamento e Preservação de Vestígios

A primeira etapa pericial consiste na preservação do cenário e no registro fotográfico sistemático, com foco na documentação de danos em compartimentos específicos do veículo, como o módulo de baterias, inversores, conectores de carga e habitáculo. A delimitação da área sinistrada deve ser feita de forma criteriosa, mantendo intactos os indícios físicos que possam contribuir para a reconstituição do evento. A coleta de informações visuais detalhadas permite ao perito mapear os padrões de propagação do fogo, bem como estimar o tempo de atuação do calor em diferentes zonas do veículo.

É importante

que o levantamento incluía vestígios indiretos, como marcas de fuligem em superfícies internas, deformações por calor em componentes plásticos e a direção das chamas marcadas em estruturas metálicas. A identificação do ponto de maior destruição, geralmente associado à origem do fogo, pode ser determinante para a análise da causa. A correta preservação desses elementos contribui significativamente para a construção de hipóteses técnicas e para a fundamentação do laudo pericial.

7.2 Análise do Compartimento da Bateria

Dada a sensibilidade da bateria e como fonte principal de energia do veículo, é imprescindível realizar uma inspeção detalhada no sistema de armazenamento de energia. O exame deve contemplar o estado físico das células, módulos e chicotes, verificando indícios de curtos ou sobreaquecimento localizado, por exemplo. Elementos como derretimento assimétrico, soldas rompidas ou carbonização de placas de circuito impresso podem indicar falhas internas progressivas (HELD; BRÖNNIMANN, 2016).

Além disso, a análise deve considerar a disposição dos componentes e possíveis rotas de propagação térmica. A existência de barreiras de contenção, a integridade das válvulas de alívio, quando existentes, e a presença de resíduos químicos são indicadores valiosos para a reconstituição da sequência de eventos. Sempre que possível, recomenda-se o uso de inspeção por imagem térmica e documentação tridimensional da área analisada, agregando precisão ao processo investigativo.

7.3 Histórico de Operação e Dados Eletrônicos

O acesso a dados do sistema de gerenciamento da bateria (BMS), da unidade de controle veicular (ECU) e de aplicativos específicos do veículo envolvido, quando disponíveis, podem fornecer evidências fundamentais sobre o estado da bateria antes do incêndio. Informações como tensão das células,

correntes de carga/descarga, temperaturas máximas registradas, registros de falhas e histórico de carga podem ajudar a identificar comportamentos anômalos. Tais dados são especialmente úteis quando não há testemunhas do início do fogo ou quando os danos físicos impossibilitam a análise direta do ponto de origem.

A coleta estruturada de dados internos de sistemas dos VEs pode requerer acesso técnico a ferramentas e softwares dos fabricantes, o que ressalta a importância da cooperação institucional entre peritos e montadoras para que as investigações sejam tecnicamente robustas.

7.4 Reconhecimento Visual Automatizado

Com o avanço das técnicas de visão computacional, torna-se possível empregar modelos de inteligência artificial para apoiar o trabalho pericial. Sistemas de segmentação semântica como o proposto por Pu e Zhang (2022) são capazes de identificar, classificar e quantificar áreas afetadas pelo fogo em imagens de veículos incendiados, distinguindo entre regiões pouco afetadas, moderadamente danificadas e totalmente comprometidas.

Essas ferramentas permitem reconstruir visualmente a progressão do fogo, orientar inspeções presenciais e até mesmo padronizar critérios de avaliação da severidade dos danos. Seu uso pode ser particularmente útil em locais com múltiplos focos ou onde o padrão de queima é complexo, como em garagens coletivas. A integração entre análise visual automatizada e a experiência prática dos peritos pode elevar a qualidade e a agilidade das perícias.

7.5 Desafios e Recomendações

A principal limitação nas perícias envolvendo veículos eletrificados está na dificuldade de acesso aos dados técnicos dos sistemas de baterias e no caráter fechado de muitas arquiteturas veiculares. A ausência de protocolos

padronizados para investigação de EVs, associada à variabilidade entre modelos e fabricantes, impõe desafios metodológicos importantes. O perito deve estar preparado para lidar com incertezas, recorrer a múltiplas fontes de informação e documentar cuidadosamente os indícios coletados.

Recomenda-se o estabelecimento de diretrizes específicas para a perícia em VEs, contemplando desde a abordagem da cena até a análise laboratorial de componentes. A capacitação continuada dos profissionais e o desenvolvimento de parcerias com instituições de pesquisa e montadoras são estratégias fundamentais para o fortalecimento dessa área. A criação de um banco de dados nacional com registros de incêndios em veículos eletrificados pode contribuir para a identificação de padrões e a prevenção de novos sinistros.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aumento da frota de veículos eletrificados e a adoção em larga escala dessa tecnologia exigem uma compreensão aprofundada dos riscos associados, em especial no que se refere aos incêndios provocados por falhas em sistemas de baterias de íons de lítio. A dinâmica do thermal runaway, os mecanismos de propagação célula a célula e a liberação de substâncias nocivas tornam esses eventos complexos, demandando atenção técnica específica dos profissionais responsáveis pela perícia na elaboração de seus laudos a fim de retroalimentar de forma categórica o ciclo operacional.

A literatura recente oferece uma base sólida para compreender os fenômenos envolvidos nos incêndios de VEs, incluindo os fatores que os desencadeiam, a intensidade da energia liberada e os perigos adicionais causados pela emissão de gases nocivos. Testes laboratoriais e simulações em escala real têm contribuído para evidenciar a severidade desses eventos e apontar caminhos para mitigação dos riscos. A integração entre conhecimento

técnico, evidências empíricas e ferramentas computacionais é indispensável para aprimorar as estratégias de investigação.

Nesse cenário, o papel da perícia técnico-científica, como a realizada pelo CBMSC, é essencial para a elucidação dos fatores causais dos incêndios em VEs. A adoção de metodologias robustas, que integrem levantamento de vestígios, análise técnica de componentes, acesso a dados eletrônicos e uso de inteligência artificial podem contribuir significativamente para a construção de laudos fidedignos. A padronização de procedimentos e o fortalecimento institucional por meio de formação continuada e parcerias interinstitucionais são elementos-chave para aprimorar a qualidade das investigações e fomentar a prevenção de novos sinistros envolvendo veículos eletrificados.

Por fim, destaca-se a importância da criação de diretrizes específicas para a perícia em VEs, incluindo protocolos de coleta, análise e interpretação de vestígios em contextos de incêndio. O investimento em capacitação técnica, pesquisa aplicada e integração entre órgãos de segurança pública, indústria e centros acadêmicos é determinante para o avanço da segurança veicular e da confiabilidade dos resultados periciais frente aos desafios impostos pelo novo paradigma de mobilidade que vem se consolidando na sociedade global.

REFERÊNCIAS

BAI, Z. et al. Study on fire characteristics of lithium battery of new energy vehicles in a tunnel. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 186, p. 728-737, 2024.

BAROWY, A. *The Science of Fire and Explosion Hazards from Lithium-Ion Batteries*. Fire Safety Research Institute, UL, 2023.

FENG, X. et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, v. 10, p. 246-267, 2018.

HELD, M.; BRÖNNIMANN, R. Safe cell, safe battery? Battery fire investigation using FMEA, FTA and practical experiments. *Microelectronics Reliability*, v. 64,

p. 705-710, 2016.

HELD, M. et al. Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 165, p. 112474, 2022.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. d. A. Metodologia do trabalho científico. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MALLICK, S.; GAYEN, D. Thermal behaviour and thermal runaway propagation in lithium-ion battery systems—A critical review. Journal of Energy Storage, v. 62, p. 106894, 2023.

PU, J.; ZHANG, W. Electric vehicle fire trace recognition based on multi-task semantic segmentation. Electronics, v. 11, n. 11, p. 1738, 2022.

REDDY, M. et al. Brief history of early lithium-battery development. Materials, v. 13, n. 8, p. 1884, 2020.

SHAHID, S.; AGELIN-CHAAB, M. A review of thermal runaway prevention and mitigation strategies for lithium-ion batteries. Energy Conversion and Management: X, v. 16, p. 100310, 2022.

SUN, P. et al. A review of battery fires in electric vehicles. Fire Technology, v. 56, p. 1361-1410, 2020.