

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DIRETORIA DE ENSINO
ACADEMIA DE BOMBEIRO MILITAR
“Coronel Osmar Alves Pinheiro”
CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS**

Cadete BM/2 **CAROLINE** LEITE DA SILVA



**COMBATE A INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS
ENVOLVENDO BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO**

BRASÍLIA
2025

Cadete BM/2 **CAROLINE** LEITE DA SILVA

COMBATE A INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS ENVOLVENDO BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Artigo científico apresentado à disciplina Trabalho de conclusão de curso como requisito para conclusão do Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal.

Orientador: Cel. QOBM/Compl. RRm. **GEORGE** CAJATY BARBOSA BRAGA

BRASÍLIA
2025

Cadete BM/2 **CAROLINE** LEITE DA SILVA

COMBATE A INCÊNDIOS EM VEÍCULOS ELETRIFICADOS ENVOLVENDO BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

Artigo científico apresentado à disciplina Trabalho de conclusão de curso como requisito para conclusão do Curso de Formação de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal.

Aprovado em: 02/06/2025.

BANCA EXAMINADORA

GUILHERME MESSIAS DA SILVA – Maj. QOBM/Comb.
Presidente

RAFAEL COSTA GUIMARÃES – Cap. QOBM/Compl.
Membro

BARBARA JABER CARVALHO SANTOS – 1º Ten. QOBM/Comb.
Membro

GEORGE CAJATY BARBOSA BRAGA – Cel. QOBM/Compl. RRm.
Orientador

RESUMO

Este estudo investiga os desafios e estratégias de combate a incêndios em veículos eletrificados, com ênfase nos riscos associados às baterias de íons de lítio (LIBs). O objetivo principal é produzir uma proposta de capítulo do módulo do Manual básico de combate a incêndio referente ao combate a incêndio em veículos eletrificados. A pesquisa foi conduzida por meio de revisão bibliográfica narrativa baseada em publicações acadêmicas e documentos técnicos dos últimos 15 anos. Além disso, realizou-se uma análise documental de protocolos operacionais do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF) e de guias de resposta a emergências de fabricantes de veículos eletrificados. O estudo identificou que o método mais eficiente para conter incêndios em LIBs é a aplicação de grandes volumes de água para resfriamento, reduzindo o risco de reignição. No entanto, verificou-se a necessidade de aprimoramento dos protocolos atuais do CBMDF, bem como a falta de padronização nas recomendações dos fabricantes. Os incêndios em veículos eletrificados representam desafios específicos, como a fuga térmica e a liberação de gases tóxicos. Diante disso, recomenda-se o desenvolvimento de novos agentes extintores, a atualização de protocolos de combate conforme diretrizes internacionais e treinamentos especializados para bombeiros. Além disso, destaca-se a importância do monitoramento contínuo de inovações tecnológicas na área. Como resultado da pesquisa, foi elaborado um capítulo sobre combate a incêndios em veículos eletrificados para o Manual Básico de Combate a Incêndio do CBMDF.

Palavras-chave: Bateria de íons de lítio; veículos eletrificados, combate a incêndio.

FIREFIGHTING IN ELECTRIFIED VEHICLES INVOLVING LITHIUM-ION BATTERIES

ABSTRACT

This study investigates the challenges and strategies for firefighting in electrified vehicles, with an emphasis on the risks associated with lithium-ion batteries (LIBs). The main objective is to produce a proposal for a chapter in the Basic Firefighting Manual module regarding fire suppression in electrified vehicles. The research was conducted through a narrative literature review based on academic publications and technical documents from the past 15 years. Additionally, a document analysis was carried out on the operational protocols of the Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF) and emergency response guides from electrified vehicle manufacturers. The study identified that the most effective method for containing fires in LIBs is the application of large volumes of water for cooling, reducing the risk of re-ignition. However, it also highlighted the need to improve the current CBMDF protocols and the lack of standardization in manufacturers' recommendations. Fires in electrified vehicles present specific challenges, such as thermal runaway and the release of toxic gases. Given this scenario, it is recommended to develop new extinguishing agents, update firefighting protocols in accordance with international guidelines, and provide specialized training for firefighters. Furthermore, continuous monitoring of technological innovations in the field is essential. As a result of this research, a chapter on firefighting in electrified vehicles was developed for the CBMDF's Basic Firefighting Manual.

Keywords: *Lithium-ion battery; electrified vehicles; firefighting.*

1. INTRODUÇÃO

Com a popularização dos veículos eletrificados e sua integração ao cotidiano urbano, torna-se essencial compreender e mitigar os riscos associados a possíveis incêndios. Esses incidentes possuem características distintas em relação aos veículos convencionais devido às particularidades dos sistemas elétricos e das baterias de íons de lítio (LIBs). Estas baterias são suscetíveis a incêndios que, uma vez iniciados, podem ser difíceis de controlar devido à sua natureza química (Bisschop *et al.*, 2019; Held *et al.*, 2022; ANFAVEA, 2025).

Portanto, incêndios em veículos eletrificados representam um desafio crescente para a gestão de emergências. Assim, é fundamental que os serviços de emergência estejam preparados e com treinamento especializado, equipamentos adequados e protocolos de intervenção específicos para lidar com essas ocorrências de forma eficiente e segura (Bisschop *et al.*, 2019; Łebkowski, 2017).

Esta pesquisa apresenta relevante justificativa social, especialmente no que se refere ao atendimento a emergências. Compreender os riscos associados a incêndios é fundamental para a proteção da vida e do patrimônio em situações desse tipo. Esses incêndios representam perigo para os ocupantes dos veículos, podem atingir moradores de edificações próximas, equipes de resgate e pedestres. Além disso, o estudo pode contribuir para o desenvolvimento de procedimentos de combate mais eficientes e práticos, aprimorando a resposta a essas ocorrências. (Hynynen *et al.*, 2023a).

De igual modo, este tema é relevante para capacitar o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF), possibilitando a adaptação às novas tecnologias e a garantia da segurança nas operações. Isso está alinhado com o objetivo estratégico de desenvolver a especialização na execução das atividades de bombeiro militar por meio da gestão do conhecimento e inovação presente no Planejamento Estratégico (PLANES) 2025-2030 do CBMDF (CBMDF, 2024).

Neste sentido, surgiu-se a necessidade de responder à seguinte questão: **“Quais são os riscos associados a incêndios nas baterias de íons de lítio em**

veículos eletrificados leves e quais as tecnologias disponíveis para tornar o combate mais eficaz e seguro?”

O objetivo geral deste trabalho é **propor um capítulo do módulo do Manual básico de combate a incêndio referente ao combate a incêndio em veículos eletrificados**. E os objetivos específicos são:

- a) identificar os principais riscos associados aos incêndios em baterias elétricas;
- b) analisar a literatura especializada sobre técnicas e tecnologias de combate a incêndios envolvendo veículos eletrificados leves;
- c) apresentar o protocolo adotado pelo CBMDF para atuação em ocorrências envolvendo estes veículos;
- d) listar recomendações dos fabricantes para combate a incêndios em veículos eletrificados.

Para atingir os objetivos mencionados foram realizadas duas pesquisas principais: uma bibliográfica narrativa, baseada em publicações dos últimos 15 anos em bases como SciELO, *Science Direct* e Google Acadêmico, para sintetizar o conhecimento sobre tecnologias de combate a incêndios em veículos elétricos e identificar os riscos associados a esse tipo de ocorrência. Paralelamente, uma pesquisa documental na Biblioteca Digital do CBMDF analisou boletins, manuais e procedimentos para verificar os protocolos adotados pelo CBMDF; e nos guias de resposta a emergências da NFPA (*National Fire Protection Association*) para examinar as recomendações dos fabricantes de VEs (veículos elétricos) em incidentes envolvendo LIBs.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Veículos eletrificados

A eletrificação dos veículos é considerada uma tecnologia promissora para o futuro da mobilidade sustentável. Nesse contexto, os veículos eletrificados surgem como uma alternativa para contribuir com a redução da emissão de gases de efeito estufa, poluentes tóxicos e partículas prejudiciais à qualidade do ar (Santos, 2017; ANFAVEA, 2024).

Há uma distinção conceitual entre os termos “veículo elétrico” e “veículo eletrificado” que é fundamental para compreender as diferentes tecnologias de propulsão. Enquanto o veículo elétrico opera exclusivamente com motores elétricos, o veículo eletrificado inclui qualquer modelo que utilize eletricidade para auxiliar ou substituir a combustão (Kumar, Gupta e Jaim, 2013; Long Jr. *et al.*, 2013; ANFAVEA, 2024). Contudo, essa diferenciação ainda não está totalmente consolidada na literatura, e o termo “veículo elétrico” muitas vezes é utilizado de forma ampla para designar os dois conceitos. Para manter a fidelidade às referências analisadas, esta pesquisa seguirá a nomenclatura utilizada pelos autores nas citações, mas realizará uma análise técnica com abordagem que engloba todos os tipos de veículos eletrificados.

Deste modo, o veículo eletrificado inclui veículos elétricos, elétricos híbridos (HEV), híbridos plug-in (PHEV) e movidos a célula de combustível (FCEV) (Kumar, Gupta e Jaim, 2013; Long Jr. *et al.*, 2013; ANFAVEA, 2024).

Os veículos elétricos ou veículos elétricos a bateria (BEV) são 100% elétricos e apresentam uma bateria recarregável que pode ser abastecida por conexão *plug-in* ou através de frenagem regenerativa. (Long Jr. *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Bibiano, 2025).

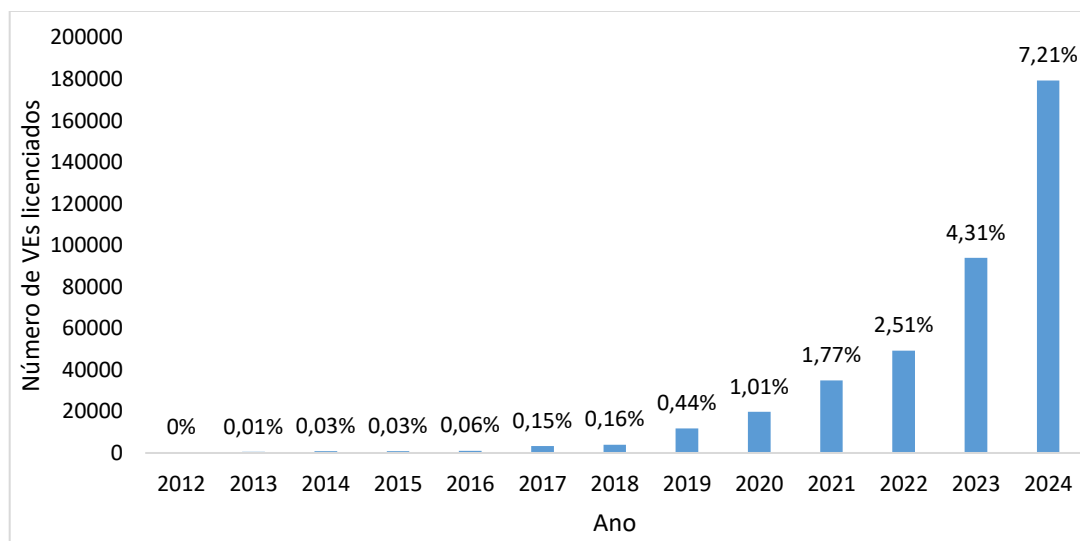
No HEV, há uma combinação entre motor elétrico e motor a combustão, que proporciona maior eficiência no consumo de combustível. O motor a combustível é o principal responsável pela propulsão e recarrega a bateria elétrica. Enquanto o motor elétrico reduz o consumo de combustível e auxilia em momentos de maior demanda de potência (Long Jr. *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Bibiano, 2025).

Os PHEVs possuem um funcionamento semelhante ao dos híbridos convencionais, mas com a diferença de que suas baterias podem ser recarregadas tanto pela frenagem regenerativa quanto pela conexão *plug in* a uma fonte de energia elétrica externa (Long Jr. *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Bibiano, 2025).

Já nos FCEVs, a energia elétrica é gerada a partir da reação química entre o hidrogênio e o oxigênio, eliminando a necessidade de uma grande bateria. Além disso, esses veículos também podem recuperar energia por meio do sistema de frenagem regenerativa (Long Jr. *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2013; Bibiano, 2025).

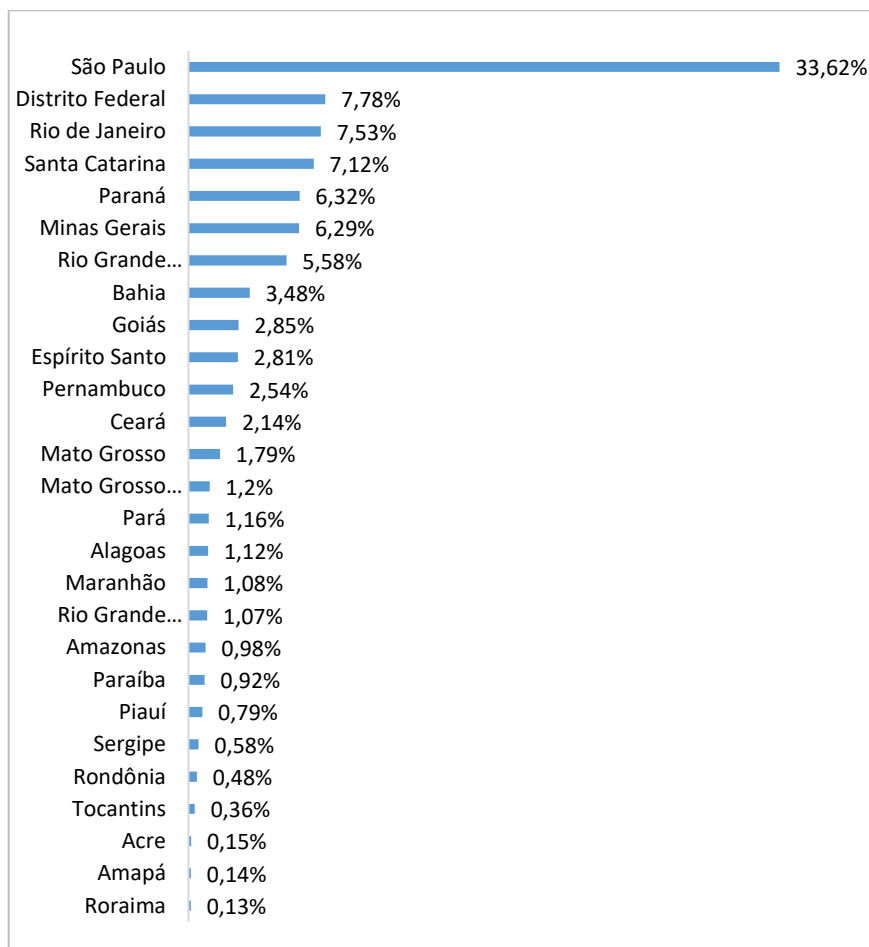
De acordo com dados da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), 16.495 veículos eletrificados foram licenciados no Brasil em janeiro de 2025, o que representou 10,3% do total de veículos licenciados no período. A evolução anual do licenciamento de veículos eletrificados e sua participação no mercado de veículos comerciais leves desde 2012 são apresentadas no Gráfico 1 (ANFAVEA, 2025).

Gráfico 1 - Número de veículos eletrificados licenciados e sua participação no mercado de veículos



Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da ANFAVEA (2025).

A NeoCharge (2025) apresenta dados da distribuição da frota de veículos eletrificados no país, e o Distrito Federal aparece em segundo lugar com 29.122 veículos, representando 7,78% da frota nacional. A distribuição completa pode ser observada no Gráfico 2, os dados foram consultados em 17/02/2025.

Gráfico 2 - Distribuição de veículos eletrificados no país

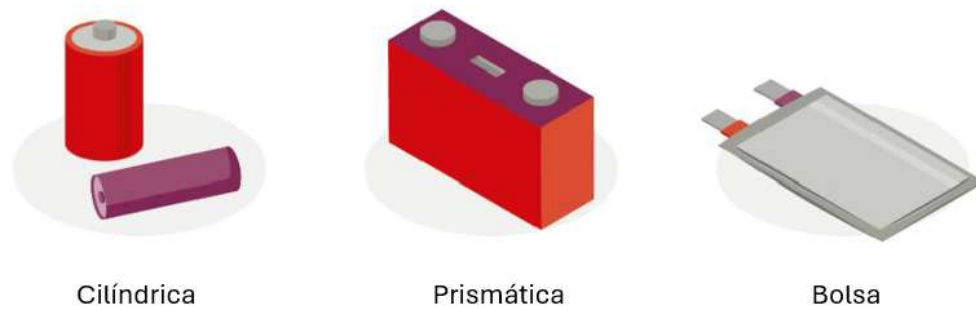
Fonte: Elaborado pela autora a partir de dados da NeoCharge (2025).

2.2. Baterias de íons de lítio

A LIB consiste em células que produzem corrente elétrica através da conversão de energia química em energia elétrica. São muito utilizadas por sua elevada densidade de energia, baixa taxa de autodescarga, mínima perda de capacidade ao longo do tempo, longa vida útil e alta eficiência. Seu uso tem se expandido para veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia em redes elétricas e aplicações no setor militar e aeroespacial (Ün e Aydin, 2020; NTSB, 2020).

As células de bateria vêm em vários formatos e tamanhos: cilíndricas, prismáticas e bolsa, conforme Figura 1. A bateria para um VE consiste em células individuais, compactadas para produzir a voltagem, potência e energia necessárias. As células são montadas em módulos, que são montados em pacotes e sistemas de bateria, Figura 2 (NTSB, 2020).

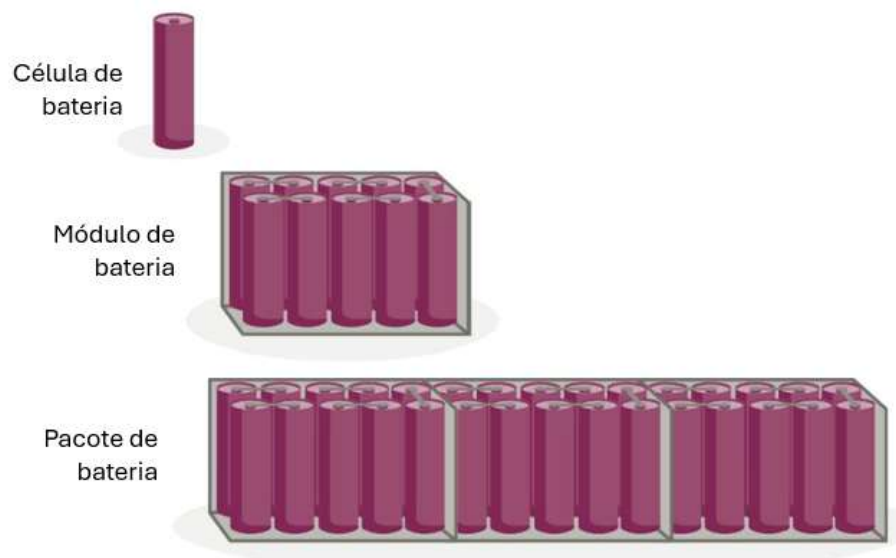
Figura 1 - Formatos de células de bateria



Fonte: Traduzida e adaptada de MSB (2024)

Os sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) garantem a operação segura nos conjuntos de bateria. O BMS monitora dados de tensão e temperatura das células e módulos e estado da carga da bateria para proteger contra sobrecarga e descarga excessiva. As células são protegidas de temperatura extremas por sistemas de gerenciamento térmico, e de sobrepressão, por sistemas de ventilação (Sun *et al.*, 2020; Ghiji *et al.*, 2020; NTSB, 2020).

Figura 2 - Estrutura de baterias de íons de lítio



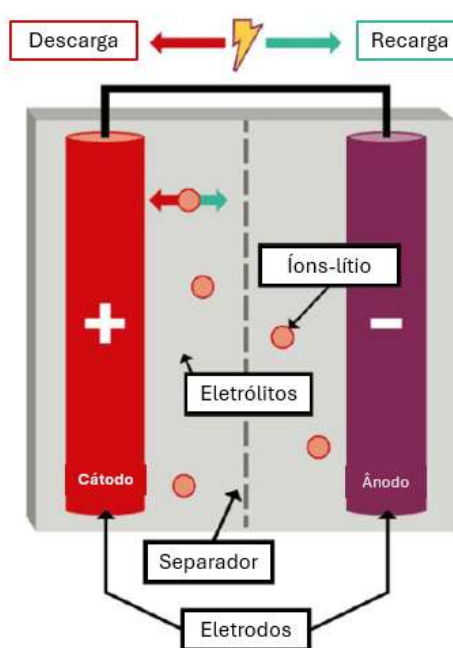
Fonte: Traduzida e adaptada de MSB (2024)

O BMS desconecta automaticamente o sistema de bateria nas seguintes situações: temperatura muito alta, subtensão, sobretensão, sobrecorrente, falha do sistema de resfriamento da bateria, sensor de colisão danificado e/ou falsamente acionado, capotamento, falha de isolamento e falha de corrente, como arco elétrico (Gehandler, Karlsson e Vylund, 2017).

2.2.1. Componentes das células de bateria

Cada célula de bateria apresenta dois eletrodos que conduzem eletricidade, um negativo, ânodo, e outro positivo, cátodo. Uma barreira permeável entre os eletrodos previne o curto-circuito e permite que o eletrólito transfira íons entre os eletrodos (separador). Além disso, a bateria é protegida em uma estrutura projetada para resistir a danos de forças externas, calor e vibração. A estrutura básica de uma célula está apresentada na Figura 3. Cada um desses componentes influencia nas propriedades da bateria em relação a energia específica, vida útil, segurança e custo (Andersson, *et al.*, 2017; NTSB, 2020).

Figura 3 - Estrutura de uma célula de bateria de íons de lítio



Fonte: Traduzida e adaptada de MSB (2024)

Durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo e se inserem nos vazios entre as camadas de cristais de cátodo (intercalação). Ao carregar, os íons de lítio se movem do cátodo e se inserem no ânodo (Ghiji *et al.*, 2020).

2.2.1.1. Cátodo

A composição do cátodo define o grupo de LIB. Óxidos de metal de lítio, exemplificados na Tabela 1, têm sido os mais utilizados devido à sua alta capacidade

de intercalação de lítio e propriedades químicas e físicas compatíveis ao transporte de lítio, como reversibilidade das reações de intercalação (Ghiji *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Óxidos de metal de lítio

Cátodos	
LCO	Óxido de Lítio-Cobalto
NCA	Óxido de Níquel-Cobalto-Alumínio
LCP	Fosfato de Lítio-Cobalto
NCM	Óxido de Níquel-Cobalto-Manganês
LMO	Óxido de Lítio-Manganês
LFP	Fosfato de Lítio-Ferro
LFSF	Fluorossulfato de Lítio-Ferro
LTS	Sulfeto de Lítio-Titânio

Fonte: Elaborada pela autora a partir de dados de Ghiji *et al.* (2020)

2.2.1.2. Ânodo

O material mais comum usado para ânodos em LIB é o grafite devido a seu alto potencial negativo. Outros materiais como titanato de lítio e silicone são menos práticos, pois operam em tensões negativas mais baixas, reduzem a densidade de energia e potência, mas permitem que os íons de lítio fluam mais facilmente, o que diminui a resistência interna e reduz o aquecimento da bateria em comparação com o ânodo de grafite (Ghiji *et al.*, 2020).

2.2.1.3. Separador

O separador impede que os eletrodos positivo e negativo entrem em contato entre si, ao mesmo tempo que permite que o máximo possível de íons condutores flua através dele. Se o separador for violado ou contrair significativamente, existe o risco de ocorrer um curto-circuito interno (Bisschop *et al.*, 2019; Ghiji *et al.*, 2020).

LIBs com eletrólitos orgânicos normalmente usam separadores microporosos, fabricados a partir de materiais como polietileno (PE) e polipropileno (PP). Esses tipos de separadores apresentam baixo ponto de fusão. Se esta barreira derreter ocorre um curto-circuito interno, que pode desencadear uma grande liberação de calor, reações

químicas incontrolláveis e geração de grande quantidade de gás, e resultar em uma explosão se não for ventilado (Bisschop *et al.*, 2019; Ghiji *et al.*, 2020).

Novos separadores baseados em cerâmica ou compósito estão sendo desenvolvidos. Estes materiais oferecem melhor resistência mecânica e térmica, desempenho e vida útil da célula, mas a tecnologia precisa de mais tempo para se desenvolver antes de ser amplamente usada para VEs (Nesler *et al.*, 2014; Bisschop *et al.*, 2019).

2.2.1.4. Eletrólito

O eletrólito preenche o espaço entre o separador e os eletrodos e possibilita o fluxo dos íons de lítio entre eles. A grande maioria dos eletrólitos é não-aquosa e composta de um solvente orgânico inflamável à base de carbonato, exemplos na Tabela 2, com aditivos que incluem os sais de lítio (por exemplo, LiPF_6 , LiClO_4 ou LiBF_4) para melhorar o ciclo. A performance, custo e segurança das LIBs depende da eletroquímica dos eletrólitos (Quant *et al.*, 2023; Ghiji *et al.*, 2020; Bisschop *et al.*, 2019).

Tabela 2 - Eletrólitos

Eletrólitos	
EC	Etileno carbonato
DMC	Dimetil-carbonato
DEC	Dietil-carbonato
EMC	Etil-metil carbonato
PC	Propileno carbonato

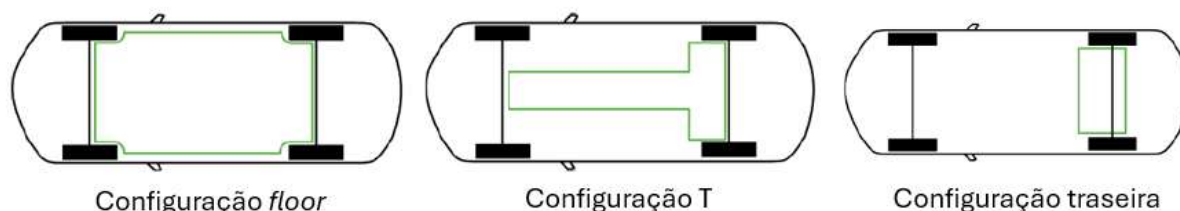
Fonte: Elaborada pela autora a partir de dados de Ghiji *et al.* (2020)

2.2.2. Posicionamento da bateria nos veículos eletrificados

Nos VEs, as células de bateria precisam ser integradas de modo a atingir o maior conjunto de baterias possível para garantir a potência e energia necessárias e manter o nível de segurança. O posicionamento mais comum é em áreas menos sujeitas a colisões, geralmente no centro do chassi, entre os eixos (Bisschop *et al.*, 2019).

Para veículos leves, há três configurações principais nas quais a zona segura é utilizada: *floor*, T e traseira, Figura 4 (Bisschop *et al.*, 2019).

Figura 4 - Configurações de bateria em VEs



Fonte: Adaptada de Bisschop *et al.* (2019).

No tipo *floor*, a bateria inteira fica localizada embaixo do compartimento do passageiro. Isso fornece mais espaço interno para passageiros e bagagem e permite alto armazenamento de energia. A desvantagem é que há uma distância menor entre a bateria e o solo, assim a bateria fica mais suscetível aos detritos (Bisschop *et al.*, 2019).

A configuração T organiza os módulos de bateria em um formato de T dentro da zona segura. Essa configuração permite maior distância entre o solo e a bateria, mas reduz a área de passageiros. É bastante estreita e protegida pelo eixo dianteiro do veículo, isso garante a proteção da bateria contra colisões frontais e impactos laterais (Bisschop *et al.*, 2019).

A solução traseira faz uso do espaço disponível entre as rodas traseiras do veículo. Normalmente, esse tipo de configuração é encontrado em veículos pequenos ou híbridos, que exigem menor capacidade de armazenamento. Para aumentar a energia disponível, alguns VEs utilizam o espaço atrás ou acima das rodas traseiras (Bisschop *et al.*, 2019).

2.3. Riscos de incêndio associados a baterias de íon de lítio

À medida que mais veículos movidos a LIBs entram em circulação, a tendência é que sua participação em incidentes de trânsito aumente proporcionalmente. Enquanto os riscos dos veículos convencionais já são amplamente conhecidos e aceitos pela sociedade, é necessário tempo e pesquisas para alcançar um nível

semelhante de compreensão e confiança em relação aos VEs (Andersson *et al.*, 2017; Bisschop *et al.*, 2019).

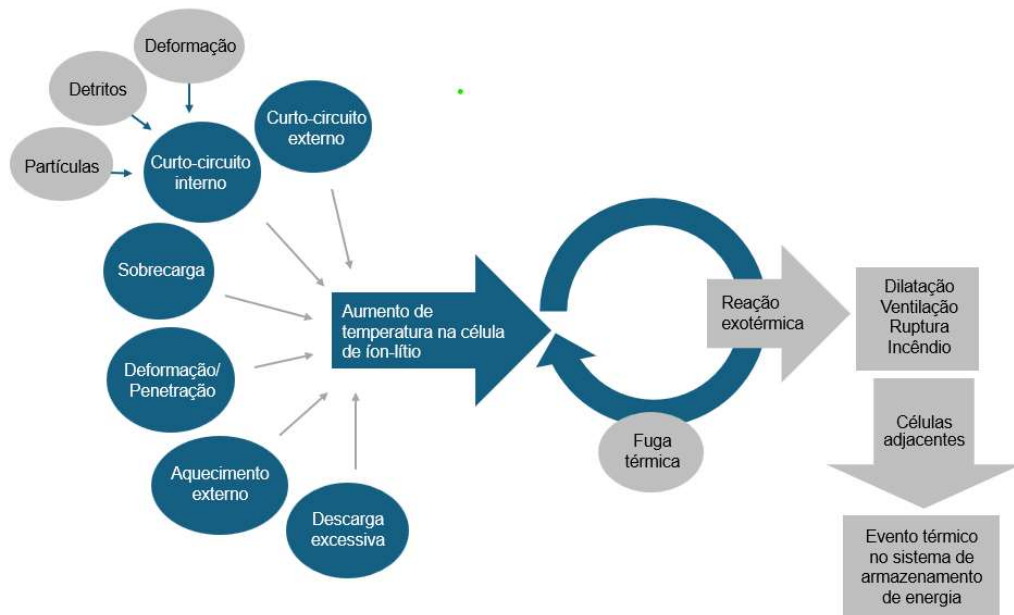
Embora apresentem inúmeras vantagens, como alta densidade de energia e potência, as baterias elétricas possuem limitações relacionadas à segurança. Elas são estáveis apenas dentro de um intervalo restrito de condições operacionais, como faixas específicas de temperatura e voltagem (Andersson *et al.*, 2017).

Fatores como sobrecarga, descarga excessiva, impacto mecânico, superaquecimento e curtos-circuitos podem levar a bateria a um processo de autoaquecimento e resultar em uma fuga térmica. Além disso, impurezas presentes nas células durante a fabricação ou o acúmulo de detritos podem causar curtos-circuitos internos, contribuindo para a ocorrência desse fenômeno. (Nitta *et al.*, 2015; Andersson *et al.*, 2017; Bisschop *et al.*, 2019).

2.3.1. Fuga térmica

A principal preocupação de segurança das baterias elétricas está relacionada à fuga térmica (*thermal runaway*), um fenômeno que pode ocorrer quando os limites de voltagem ou temperatura são excedidos. Nessa condição, reações químicas no interior da bateria podem desencadear um curto-circuito interno ou aumentar a temperatura por diferentes mecanismos. Como consequência, a célula da bateria pode falhar, liberar gases inflamáveis, entrar em combustão, explodir e/ou se tornar um projétil, devido à composição dos seus materiais. Durante o seu uso, há uma combinação de combustível inflamável, potenciais oxidantes e calor gerado por reações exotérmicas, conforme ilustrado na Figura 5 (Bisschop *et al.*, 2019; Held *et al.*, 2022; Bugryniec *et al.*, 2024).

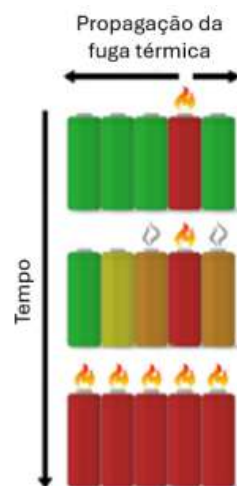
Figura 5 - Fuga térmica esquematizada



Fonte: Traduzida e adaptada de Andersson *et al.* (2017).

Devido ao empacotamento denso das células, o calor gerado durante uma fuga térmica pode ser transferido para as células adjacentes, potencializando o risco de ignição de toda a bateria, como ilustrado na Figura 6. Além disso, conter e resfriar uma célula em fuga térmica é um grande desafio, pois o acesso para dissipação de calor é limitado. Caso o fogo se espalhe, será necessário um processo de resfriamento ainda mais prolongado, dificultando o controle do incêndio (Andersson *et al.*, 2017; Bisschop *et al.*, 2019; Held *et al.*, 2022).

Figura 6 - Fuga térmica



Fonte: Traduzida e adaptada de Bugryniec *et al.* (2024).

2.3.2. Causas de falha de bateria

A falha de uma célula de bateria pode ocorrer devido a: curto-circuito interno, deformações mecânicas e impacto, sobrecarga, descarga, curto-circuito externo, exposição a altas temperaturas (Bisschop *et al.*, 2019).

2.3.2.1. Curto-circuito interno

O curto-circuito interno é a falha mais grave e pode ser causado por defeitos de fabricação ou danos físicos, como deformações mecânicas. Nesse caso, a célula libera sua energia pelo curto-circuito e a passagem da corrente elétrica pelo material condutor gera calor, fenômeno conhecido como efeito Joule. Nessa região, o rápido aumento de temperatura pode levar ao autoaquecimento e à fuga térmica (Bisschop *et al.*, 2019; Ghiji *et al.*, 2020).

2.3.2.2. Deformações mecânicas e impacto

Deformações mecânicas podem provocar curto-circuito interno, arcos elétricos e causar o vazamento de líquidos inflamáveis e condutores e resultar em incêndio. Deformações severas podem ocorrer devido a colisões ou impactos contra o solo e devem ser evitadas (Bisschop *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020; Ghiji *et al.*, 2020).

2.3.2.3. Sobrecarga

As baterias de íons de lítio são desenvolvidas para absorver e armazenar uma quantidade determinada de energia dentro de um intervalo de tempo específico. Quando esses limites são ultrapassados, seja por carregamento excessivamente rápido ou sobrecarga, o desempenho da célula pode se deteriorar, podendo resultar em falha (Bisschop *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020).

O nível de carga das baterias é geralmente definido em termos de estado de carga (SOC), cujos limites podem ser definidos de 0-100%. No entanto, a capacidade total da bateria permite que sua capacidade nominal seja ultrapassada, tanto no limite superior quanto inferior (Bisschop *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020).

A sobrecarga pode ocorrer quando a tensão da célula é detectada incorretamente pelo sistema de controle de carga, seja por falha no carregador ou pelo uso de um carregador inadequado. Nesse processo, o material do ânodo pode sofrer uma litiação excessiva e formar depósitos de metal de lítio. Esses depósitos podem crescer como dendritos que, ao se alongarem, podem perfurar o separador e provocar um curto-circuito interno. No cátodo, ocorre o efeito contrário, a sobrecarga pode causar uma deslitiação excessiva e resultar na decomposição térmica do material e na geração de calor (Bisschop *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020).

2.3.2.4. *Descarga*

A descarga excessiva ocorre quando as células da bateria são descarregadas abaixo de sua voltagem mínima, podendo resultar na liberação de partículas condutoras no eletrólito, o que aumenta o risco de curto-circuito. Esse fenômeno pode acontecer quando uma bateria é descarregada e suas células individuais apresentam níveis de carga desequilibrados. Embora os sistemas de segurança sejam projetados para evitar essa condição, falhas nesses sistemas ainda podem ocorrer, tornando a descarga excessiva um risco potencial interno (Bisschop *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020).

2.3.2.5. *Curto-circuito externo*

O curto-circuito externo é outra forma de abuso elétrico que pode comprometer a estabilidade da bateria. Esse problema pode surgir quando a bateria é submetida a condições adversas, como deformações mecânicas severas, impactos, imersão em água, corrosão ou choques elétricos durante a manutenção (Bisschop *et al.*, 2019).

2.3.2.6. *Exposição a altas temperaturas*

A estabilidade térmica é um dos principais fatores que influenciam a segurança das células de íons de lítio. Quando a temperatura externa ultrapassa a interna da bateria, ela absorve calor, e, ao atingir certos limites, ocorrem processos de decomposição que intensificam o processo de geração de calor. Além disso, o conjunto de baterias pode ser exposto a incêndios externos, como os causados pelo vazamento e ignição de combustível acumulado sob o pacote de baterias,

aumentando o risco de falhas nas células e propagação do fogo pelo sistema. Outro fator de risco é a exposição prolongada a altas temperaturas decorrentes de falhas de fabricação, como conectores soltos entre células da bateria (Bisschop *et al.*, 2019).

2.3.3. Toxicidade dos gases liberados durante um incêndio em bateria elétrica

A toxicidade das emissões de baterias de íons de lítio é uma área de preocupação para a segurança dos passageiros de veículos elétricos, bombeiros e outros profissionais de resposta a emergências, e para o meio ambiente. Esse risco é aumentado quando o veículo emite gases em um espaço fechado, como um estacionamento ou túnel (Hynynen *et al.*, 2023b).

Gases tóxicos são liberados em todos os incêndios, mas alguns materiais e produtos representam maior preocupação devido às suas emissões tóxicas, como por exemplo, os plásticos presentes em todos os veículos atuais. A combustão e aquecimento desse material pode gerar irritantes orgânicos e compostos cancerígenos, além de fluoreto de hidrogênio (HF). A queima do fluido de ar-condicionado também pode liberar uma quantidade significativa de HF (Quant *et al.*, 2023; Bisschop *et al.*, 2019; Hynynen *et al.*, 2023b).

Nos veículos elétricos, as LIBs liberam gases tóxicos durante o incêndio, principalmente da combustão do eletrólito. O eletrólito contém hexafluorofosfato de lítio (LiPF₆) e pode incluir outros compostos contendo flúor que fornecem o potencial de emissão de HF durante o aquecimento e a combustão (Bisschop *et al.*, 2019).

Se a combustão não ocorre, gases inflamáveis, como hidrogênio (H₂), monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄), podem ser mais perigosos que os gases tóxicos devido ao risco imediato de explosão. Se a bateria estiver submersa em água salgada, devido à eletrólise, pode ocorrer ainda a produção de gás hidrogênio (inflamável) e gás cloro (tóxico) (Bisschop *et al.*, 2019; Hynynen *et al.*, 2023b).

Lecocq *et al.*, (2012) realizaram um estudo comparativo das consequências de um incêndio em veículos elétricos e veículos a combustão interna. O estudo concluiu que quando expostos ao mesmo estresse térmico externo, o comportamento geral de ambos os veículos foi semelhante. A análise dos gases de combustão de incêndios

de carros destacou que as massas cumulativas de CO₂, CO, hidrocarbonetos totais, NO, NO₂, HCl e HCN foram semelhantes para ambos os tipos de veículos. Uma quantidade significativa de HF foi medida durante os testes de incêndio nos dois tipos de veículos, mas a quantidade cumulativa de HF foi maior em veículos elétricos devido a combustão da LIB.

A Tabela 3 apresenta as características e os riscos associados aos gases mais comuns liberados durante um incêndio veicular (Bugryniec *et al.*, 2024).

Tabela 3 - Riscos associados aos gases da combustão

Gás	Riscos associados
Dióxido de carbono (CO ₂)	Causa dor de cabeça, tontura, confusão, perda de consciência e asfixia em altas concentrações.
Monóxido de carbono (CO)	Tóxico se inalado e extremamente inflamável, podem causar danos ao feto, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida.
Hidrogênio (H ₂)	Extremamente inflamável.
Fluoreto de hidrogênio (HF)	Fatal se ingerido, fatal em contato com a pele, fatal se inalada e causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos.
Cianeto de Hidrogênio (HCN)	Fatal se ingerido, fatal em contato com pele, fatal se inalado, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida, muito tóxico para vida aquática (com efeitos duradouros) e é um líquido e vapor extremamente inflamável.
Ácido clorídrico (HCl)	Causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos, é tóxico se inalado, causa danos a fertilidade ou ao feto, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida, pode ser corrosivo para metais, pode causar irritações em via respiratória, contém gás sob pressão e pode explodir se aquecido.
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Fatal se inalado, Causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos, pode causar ou intensificar o incêndio (oxidante).
Gás cloro (Cl ₂)	Tóxico.
Hidrocarbonetos totais (THC)	Inflamáveis.

Fonte: Traduzida e adaptada de Bugryniec *et al.* (2024).

2.4. Técnicas e Tecnologias de combate a incêndios em veículos eletrificados

O conhecimento sobre o mecanismo de combate a incêndios em baterias de íons de lítio ainda é limitado e grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em testes de supressão de incêndios de pequena escala em LIBs portáteis. Consequentemente, a eficácia dos agentes de supressão e a confiabilidade das estratégias atuais para conter incêndios em VEs são frequentemente questionadas (Sun *et al.*, 2020).

O combate a incêndios em LIBs deve priorizar o resfriamento das células para evitar a propagação do calor, em vez de focar apenas na extinção do fogo em uma única célula. Se o resfriamento for insuficiente, as células vizinhas podem entrar em fuga térmica e aumentar o risco de reignição da bateria, o que representa um grande desafio para os serviços de emergência. Dessa forma, as estratégias de supressão devem ir além da extinção das chamas, garantindo o resfriamento eficaz tanto da célula afetada quanto das adjacentes (Ghiji *et al.*, 2020).

2.4.1. Agentes extintores

2.4.1.1. Água

Os agentes extintores à base de água são amplamente utilizados no combate a incêndios devido à sua eficiência no resfriamento e ao baixo custo. A água possui alta capacidade calorífica e elevado calor latente de vaporização, por isso é eficaz em conter ou interromper a propagação da fuga térmica para células adjacentes da bateria (Sun *et al.*, 2020; Ghiji *et al.*, 2020; Quant *et al.*, 2023).

No entanto, seu uso pode gerar efeitos adversos, como a possibilidade de curtos-circuitos e a contaminação ambiental pelo escoamento de substâncias tóxicas. Além disso, a água pode reagir com os sais de lítio e resultar na formação de fluoreto de hidrogênio. O HF pode ser reduzido pelo lítio metálico, gerando hidrogênio inflamável, o que aumenta o risco de combustão (Sun *et al.*, 2020; Ghiji *et al.*, 2020).

Ghiji *et al.* (2020) dividem os agentes extintores de água em quatro categorias: jato de água, spray de água ou sprinkler, água com surfactantes, névoa de água.

Os supressores do tipo jato de água direcionam um fluxo contínuo de água sobre materiais em chamas, promovendo o resfriamento e reduzindo o risco de reignição. No entanto, seu uso não é recomendado em equipamentos elétricos que estejam energizados, pelo risco de choque elétrico (Ghiji *et al.*, 2020).

Os supressores de spray de água, como os sprinklers, dispersam um jato de pequenas gotículas de água, cada uma envolta por ar, que atua como isolante elétrico. O spray possui força suficiente para permitir que as gotículas atravessem a pluma de fogo, resfriem as superfícies atingidas, além de absorver parte da energia térmica por meio da vaporização, contribuindo para o resfriamento do ar ao redor (Ghiji *et al.*, 2020).

A incorporação de surfactantes à água pode aumentar sua eficácia na extinção de incêndios. Esses agentes reduzem a tensão superficial da água, permitindo que ela se espalhe melhor sobre os materiais em chamas, proporcionando um resfriamento mais eficiente (Ghiji *et al.*, 2020).

A névoa de água consiste em uma mistura de gotículas com diâmetro inferior a 1000 μm , sendo significativamente menores do que as emitidas por um sprinkler. As gotículas menores apresentam uma maior relação entre área de superfície e volume em comparação com gotas maiores, o que permite uma absorção mais eficiente da energia térmica do ar quente para uma mesma quantidade de água. Ao mesmo tempo, as gotas maiores presentes na distribuição de tamanhos conseguem atravessar a pluma de fogo e resfriar diretamente o material em combustão (Ghiji *et al.*, 2020).

2.4.1.1. *Espuma*

A espuma pode ser utilizada em incêndios de Classe A (sólidos inflamáveis) e Classe B (líquidos inflamáveis), o que os torna uma opção viável para combater incêndios em LIBs. A espuma resfria e sela a superfície do material em chamas, criando uma barreira que impede a liberação de vapores inflamáveis e bloqueia o contato com o oxigênio, privando o fogo de ar. No entanto, para ser eficaz, a espuma precisa envolver completamente a célula da bateria, o que pode ser um grande desafio, pois os incêndios em LiBs tendem a ocorrer em múltiplos estágios,

frequentemente acompanhados por jatos de gases inflamáveis liberados em alta velocidade (Ghiji *et al.*, 2020).

2.4.1.3. Agentes químicos secos

Os agentes químicos secos atuam interrompendo as reações químicas do fogo. No entanto, apesar de extinguir as chamas, eles não promovem o resfriamento necessário, o que pode resultar na reignição. Além disso, o uso desses pós químicos pode representar riscos à saúde, especialmente em ambientes fechados, devido à possibilidade de inalação e problemas respiratórios (Ghiji *et al.*, 2020).

2.4.1.4. Dióxido de carbono

O dióxido de carbono extingue o fogo por abafamento, deslocando o oxigênio na zona de combustão e substituindo-o por CO₂. Ele é indicado para incêndios de Classe A e B, além de ser seguro para incêndios elétricos (Classe E). Apesar de não deixar resíduos, seu uso pode causar problemas respiratórios, especialmente em ambientes fechados. No entanto, o CO₂ não é o agente extintor mais adequado para incêndios em LIBs, pois sua capacidade de resfriamento é limitada (Ghiji *et al.*, 2020).

2.4.1.5. À base de hidrocarboneto halogenado

O halon é um hidrocarboneto halogenado composto por elementos como flúor, cloro, bromo e iodo. Atua no combate ao fogo interrompendo quimicamente as reações de combustão. No entanto, seu uso foi restringido devido ao impacto ambiental, pois contribui para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio, resultando na interrupção de sua produção. Apesar disso, ainda é amplamente empregado em sistemas de segurança contra incêndios em navios, aeronaves, tanques e submarinos. Vale ressaltar que os extintores à base de halon não promovem resfriamento (Ghiji *et al.*, 2020).

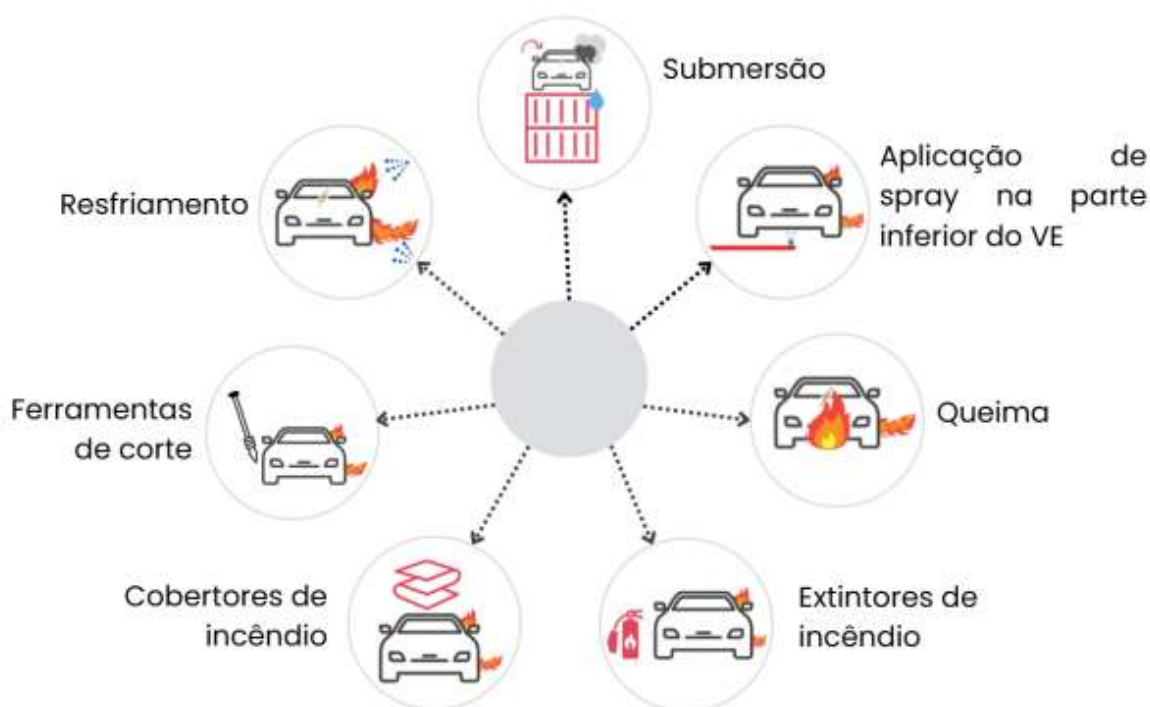
Ghiji *et al.* (2020) fizeram uma análise dos métodos de supressão aplicáveis ao combate a incêndio em veículos elétricos: água, espuma, CO₂, pós extintores e halogenados. O estudo concluiu que o incêndio envolvendo baterias de íon de lítio pode ser extinto por vários métodos, mas os efeitos da fuga térmica são mais difíceis

de gerenciar e resfriamento contínuo é necessário. Segundo os autores, a névoa de água com aditivos e surfactantes, ou em conjunto com um meio de extinção gasoso (fluxo de gás inerte como o nitrogênio), é considerada o método de extinção e resfriamento mais promissor para baterias de lítio.

2.4.2. Métodos de supressão

O Governo da Austrália por meio do seu Departamento de Defesa apresentou alguns métodos de supressão para incêndios em LIBs: resfriamento, queima, submersão, cobertores de incêndio, extintores, ferramentas de corte, aplicação *spray* na parte inferior do veículo, Figura 7.

Figura 7 - Métodos de supressão para incêndios em LIBs



Fonte: Elaborada pela autora a partir de dados do Australian Government (2021).

A Tabela 4 descreve cada método bem como suas vantagens e desvantagens (Australian Government, 2021).

Tabela 4 - Métodos de supressão

Método de supressão	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Resfriamento	Consiste em utilizar o jato neblinado para extinguir as chamas e aplicar jatos de resfriamento na parte externa da bateria, a fim de reduzir a reação exotérmica causada pela fuga térmica.	Recomendado por todas as fabricantes de VEs.	Não direciona a água para a área necessária; o consumo de água pode ultrapassar 10.000 litros; o escoamento deverá ser monitorado e recolhido, especialmente nas proximidades de corpos d'água.
Queima	Consiste em permitir que a LIB queime por conta própria, rapidamente e com altas temperaturas.	Recomendado por alguns fabricantes de VEs; queima a maioria das células ativas, deixando apenas sucata; elimina a energia residual e o risco de ignição secundária.	O tempo de queima depende do tamanho da bateria, estado de carga, temperatura ambiente e outros fatores; riscos para a qualidade do ar, é necessário monitorar e alertar sobre exposições nas proximidades.
Extintores de incêndio	Qualquer extintor de incêndio pode ser utilizado, incluindo aqueles comercializados especificamente para uso em incêndios de metal ou incêndios de bateria de íons de lítio.	Os extintores de incêndio para VEs podem ser eficazes quando células individuais estão em fuga térmica em áreas abertas.	Não conseguem acessar as células da bateria, que estão protegidas por módulos; são necessários mais testes para assegurar a eficácia e a segurança dos socorristas; podem gerar uma falsa sensação de segurança, expondo as pessoas a gases, chamas e risco de explosão.
Submersão	Consiste em submergir o VE uma unidade de contenção preenchida com água até o nível do pacote de bateria.	Controla a propagação do fogo; gerencia o incidente de forma relativamente rápida.	As unidades de contenção podem não estar disponíveis ou não ser próximas o suficiente; o uso de água pode ultrapassar 10.000 litros; o VE pode precisar ficar submerso por dias ou até semanas; a fuga térmica continuará mesmo submersa; o tempo necessário para a fuga térmica cessar depende da capacidade da bateria e do estado de carga; a água utilizada precisará ser tratada para descarte, o que pode ser dispendioso.

Continua...

Continuação

Método de supressão	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Cobertores de incêndio	Grande cobertor térmico de incêndio que é colocado sobre um VE para conter as chamas.	Se utilizado a tempo, o cobertor conterá as chamas e evitará a propagação do fogo para áreas adjacentes; pode ser deixado no VE enquanto ele é removido da cena.	Cada cobertor pesa aproximadamente 25 kg, ou seja, são necessários 2 bombeiros com EPR para aplicá-lo; não pode extinguir ou impedir a fuga térmica; a fuga térmica continuará sob o cobertor, somente poderá ser desacelerada; a liberação de gases continuará sob o cobertor; não há procedimento seguro de descontaminação; se o cobertor for acidentalmente levantado pode causar explosão da nuvem de vapor.
Ferramentas de corte	Ferramentas utilizadas para perfurar, explodir ou cortar uma bateria de VE, para a aplicação direta de água de resfriamento nas células da bateria.	Testes iniciais sugerem que a fuga térmica pode ser controlada em minutos devido à aplicação direta de água nas células.	Nenhum fabricante recomenda o corte ou perfuração de uma bateria; as ferramentas são caras e pesadas; risco de chamas semelhantes a jato e de explosão ao usar ferramentas de corte; eletrocussão por contato com sistemas de alta tensão; o uso de uma ferramenta de corte em uma bateria que não esteja em fuga térmica pode desencadear a fuga, tornando o incidente mais complexo.
Aplicação de spray na parte inferior do veículo	Sistema do tipo 'sprinkler' que pode ser deslizado por baixo de um VE para aplicar água de resfriamento diretamente para a bateria.	Método de trabalho seguro para bombeiros, eliminando a necessidade de estar próximo a um VE em fuga térmica; pode ajudar a conter a propagação do fogo, dependendo da largura do jato de água.	O resfriamento pode retardar a duração da fuga térmica, quando comparado ao método de queima; a unidade pode ser cara, e seu tamanho pode dificultar o transporte.

Fonte: Elaborada pela autora a partir de dados do Australian Government (2021).

3. METODOLOGIA

Este estudo é categorizado como uma pesquisa básica estratégica em relação à sua finalidade, pois se concentra na ampliação do conhecimento teórico sobre os riscos associados a incêndios envolvendo as LIBs de veículos eletrificados com o intuito de solucionar problemas práticos, e não em sua aplicação prática imediata (Gil, 2017; Appolinário, 2011).

Segundo Gil (2017), com relação aos objetivos, o estudo é classificado como pesquisa descritiva, uma vez que busca detalhar as particularidades dos incêndios em os veículos eletrificados estão envolvidos, examinando suas características, identificando variáveis relevantes e explorando possíveis relações entre elas.

Em termos de metodologia, este estudo adota uma abordagem qualitativa, buscando realizar uma análise hermenêutica das informações apresentadas em estudos recentemente publicados na literatura especializada. A análise dessas informações foi conduzida de maneira subjetiva, explorando interpretações e significados (Appolinário, 2011).

Foi realizada pesquisa bibliográfica narrativa, concebida a partir de materiais publicados nos últimos 15 anos, em bases de pesquisa como SciELO, *Science Direct* e Google Acadêmico com o intuito de informar de forma sintética o que a literatura especializada apresenta sobre tecnologias de combate a incêndios em veículos elétricos; e identificar este tipo de ocorrência (Prodanov e Freitas, 2013).

Em paralelo, uma pesquisa documental, que utiliza materiais que não receberam tratamento analítico (Prodanov e Freitas, 2013), foi realizada na base de dados da Biblioteca digital do CBMDF em busca de Boletins de informação técnico-profissional, Manuais e procedimentos operacionais padrão, objetivando verificar quais são os protocolos aplicados pelo CBMDF para lidar com este tipo de ocorrência.

Além disso, foi conduzida uma pesquisa documental nos guias de resposta a emergências disponíveis na base de dados da NFPA, com o objetivo de analisar as recomendações dos fabricantes de VEs sobre a atuação em incidentes envolvendo LIBs.

4. RESULTADOS

4.1. Protocolo do CBMDF para atendimento a ocorrências envolvendo veículos elétricos

Atualmente, o CBMDF possui um Boletim de Informação Técnico-Profissional (BITP) sobre o tema, o BITP N° 017/2020-CETOP: “Acidentes veiculares com veículos elétricos e elétricos híbridos”, que traz o protocolo para atendimento de ocorrências envolvendo veículos elétricos (CBMDF, 2019).

O passo a passo para a atuação apresentado no BITP consiste em:

- Identificação do veículo;
- Imobilização do veículo;
- Desarme do sistema elétrico do veículo;
- Desencarceramento;
- Extinção do incêndio;
- Revisão da operação (CBMDF, 2019).

O primeiro desafio dos bombeiros assim que chegam em uma ocorrência é identificar se o veículo é elétrico. Uma das formas possíveis é através de símbolos dispostos sobre a capa do motor ou ao longo da carroceria. Porém em alguns casos, estes símbolos podem não estar visíveis após uma colisão, pela fumaça presente ou mesmo terem sido removidos pelo proprietário. Outras formas de identificar um VE é através do cabeamento e componentes elétricos que por padrão são de cor laranja e através da presença do plug de carregamento elétrico. Uma característica que também pode auxiliar na identificação de um BEV é a ausência de escapamento, uma vez que estes veículos não possuem motor a combustão (CBMDF, 2019).

Assim como um veículo convencional, os veículos elétricos precisam ser imobilizados para evitar deslocamentos acidentais. Em veículos manuais, o câmbio da marcha deve ser colocado na posição neutra. No caso de veículos automáticos, o câmbio deve ser colocado na posição “P”. Em seguida é preciso acionar o freio de estacionamento (CBMDF, 2019).

Veículos elétricos podem hibernar e, deste modo, não fica claro se o veículo está desligado ou não. É possível confirmar por meio das luzes do painel de instrumentos, que devem estar desligadas. Em todo o caso, deve-se proceder com o desligamento da ignição e retirada da chave (CBMDF, 2019).

Para proceder com o desarme do veículo, após o desligamento da ignição, é realizado o desligamento da bateria de 12 V. A desconexão da bateria de 12 V reduz o risco de incêndio por curto-circuito, de ativação de airbags e pré-tensionador de cinto (CBMDF, 2019).

Para o desarme do sistema de alta voltagem, é necessário desconectar o plug de serviço. Cada fabricante instala o plug segundo seus próprios parâmetros técnicos. Podem estar, por exemplo: entre bancos, no porta-malas, atrás do encosto dorsal do banco traseiro de passageiro, no assoalho, sob o banco traseiro do passageiro, sob o banco do condutor. O conector tem uma capa verde e indica claramente que ele se refere a uma conexão de alta voltagem (CBMDF, 2019).

Caso o incidente envolva a retirada de vítimas, se faz necessário realizar previamente a imobilização e desativação do veículo elétrico. Os bombeiros que realizam o desencarceramento devem sempre verificar visualmente a presença de cabos elétricos de alta tensão e componentes relacionado ao sistema elétrico antes de iniciar corte ou deslocamento. Nenhum componente elétrico de alta tensão deve ser cortado (CBMDF, 2019).

Para o combate a um incêndio em veículos elétricos os agentes extintores convencionais como água, espuma ou CO₂ podem ser utilizados. Devido ao difícil acesso à bateria de alta tensão, o combate é feito de forma indireta, por meio do resfriamento da carcaça metálica que envolve a bateria. Por isso a extinção de incêndio em veículos elétricos é mais demorada e demanda uma maior quantidade de água em comparação a um veículo convencional (CBMDF, 2019).

Durante a revisão, os bombeiros devem verificar se o incêndio foi completamente extinto. Devem ainda garantir que o compartimento da bateria não está produzindo fumaça, faísca ou som de bolhas. A câmera térmica pode ser utilizada para verificar se ainda há regiões quentes que ainda necessitem de resfriamento (CBMDF, 2019).

4.2. Recomendações de fabricantes de veículos elétricos

O site da NFPA apresenta os guias de respostas a emergências de várias montadoras de veículos eletrificados (NFPA, 2025). Algumas dessas recomendações estão listadas na Tabela 5.

Em resumo, as recomendações gerais dos fabricantes incluem: aplicação de grandes volumes de água, utilização de EPI e EPRA, monitoramento da temperatura e uso de extintores do tipo ABC. A Figura 8 compila essas orientações. Vale destacar que os fabricantes que não mencionam esses aspectos em seus documentos simplesmente omitem essas informações, sem apresentar recomendações contrárias (NFPA, 2025).

Tabela 5 - Recomendações dos fabricantes de veículos eletrificados

Fabricante	Recomendações
Nissan	Utilizar o equipamento de proteção individual (EPI) completo, incluindo o aparelho de respiração autônomo (EPRA) ao combater incêndios; evitar o acesso ao plugue de serviço se houver fumaça ou odor de queimado e verificar a temperatura da bateria antes da sua remoção; não armazenar o veículo em locais fechados se a bateria estiver danificada; usar grandes volumes de água, e para pequenos incêndios elétricos ou de óleo combater com um extintor ABC; alerta para o risco de incêndio retardado.
Porsche	Usar grandes volumes de água para resfriar a LIB durante incêndios e areia seca e CO ₂ para chamas na bateria; alerta que temperaturas extremas podem causar explosões nas células da bateria e recomenda manter distâncias seguras ao lidar com o fogo.
Stellantis	Evitar cortes em áreas de risco, bem como em tanques e linhas de fluidos; aplicar grandes volumes de água em forma de nebulização, em caso de atividade térmica; alerta que LIBs danificadas podem liberar gases perigosos, como H ₂ , que é altamente explosivo, e HF, que pode causar queimaduras e dificuldades respiratórias; garantir a ventilação do veículo, ao abrir portas e remover vidros; usar termômetros infravermelhos para monitoramento da temperatura devido ao risco de ignição retardada.
Tesla	Utilizar grandes volumes de água em nebulização para extinguir incêndios em baterias de alta tensão; monitorar a temperatura por 24 horas; resfriar a bateria antes de liberar o veículo; evitar a submersão do veículo ou abertura da bateria; utilizar CO ₂ ou outros agentes extintores, caso a água não esteja disponível; câmeras térmicas são recomendadas para monitoramento até que a temperatura ambiente seja atingida, prevenindo reignição; usar EPI completo e ferramentas isoladas devido ao risco de liberação de gases tóxicos.

Continua...

Continuação

Fabricante	Recomendações
BYD	Utilizar grandes volumes de água em caso de incêndio; alerta para a possibilidade de reignição.
Toyota	Utilizar grandes quantidades de água para combater incêndios na bateria de alta tensão; permitir que a bateria queime, caso a aplicação de água seja inviável; alerta para o risco de reignição; consultar o layout do veículo antes do manuseio de amortecedores a gás ou molas pré-carregadas, pois podem se tornar projéteis.
Hyundai	Usar grandes volumes de água em caso de incêndios que envolvam a LIB; utilizar extintores ABC para pequenos focos, sem envolvimento da bateria a fabricante; desativar o sistema de alta voltagem; usar EPIs adequados; monitorar a temperatura com câmeras térmicas para evitar reignição antes de remover o veículo, em caso de danos ou vazamento de eletrólito.
Volkswagen	Evitar a propagação do fogo para dispositivos de armazenamento de energia, como tanques de combustível ou baterias. utilizar agentes extintores comuns, como água, espuma, CO ₂ ou pó, considerar a situação específica e os recursos disponíveis no local.
Honda	Usar EPI para manusear cabos ou componentes de alta tensão ao extinguir incêndios em baterias; utilizar grande volume de água, direcionado às áreas sob os bancos dianteiros, mantendo a aplicação até cessar sinais de fogo ou fumaça; utilizar um extintor ABC, caso a água não esteja disponível; monitorar a temperatura da bateria com uma câmera térmica após a extinção para evitar reignição.

Fonte: Elaborada a partir de dados da NFPA (2025).

Figura 8 - Recomendações gerais dos fabricantes de veículos eletrificados

Fabricante	Grandes volumes de água	Uso de EPI e EPRA	Monitorar temperatura	Extintor ABC
Nissan	✓	✓	✓	✓
Porsche	✓	-	-	-
Stellantis	✓	-	✓	-
Tesla	✓	✓	✓	✓
BYD	✓	-	-	-
Toyota	✓	-	-	-
Hyundai	✓	✓	✓	✓
Volkswagen	✓	-	-	-
Honda	✓	✓	✓	✓
Mitsubishi	✓	✓	-	✓

Fonte: Elaborada a partir de dados da NFPA (2025).

5. DISCUSSÃO

O principal objetivo desta pesquisa foi produzir uma proposta de capítulo para o Manual Básico de Combate a Incêndios do CBMDF. Foram identificados os principais riscos, revisadas as tecnologias de combate a incêndios em veículos eletrificados, analisado o protocolo do CBMDF e as recomendações dos fabricantes.

Os resultados desta pesquisa destacam a fuga térmica como o principal desafio no combate a incêndios em baterias de íons de lítio, devido à rápida propagação do calor e ao risco de reignição. Os estudos mostram que incêndios em veículos liberam gases tóxicos, como CO₂, CO, HCN e NOx. No entanto, nos veículos eletrificados, a combustão das LIBs resulta em uma emissão mais significativa de HF. O método mais eficaz identificado para o combate a esses incêndios é a aplicação de grandes volumes de água para resfriamento, conforme recomendado por fabricantes e pesquisas especializadas, apesar dos desafios operacionais envolvidos.

A análise do protocolo do CBMDF sobre acidentes veiculares com veículos elétricos e elétricos híbridos revela que o documento é voltado principalmente para colisões e não é abrangente para incêndios fora deste contexto. Portanto, é essencial a atualização contínua dos protocolos e a realização de treinamentos especializados para garantir maior segurança e eficácia na atuação dos bombeiros no combate a incêndios em veículos eletrificados.

A pesquisa baseou-se em fontes secundárias, sem testes experimentais próprios, e constatou, a partir da análise da recomendação de diversos fabricantes, uma falta de padronização, o que limita a aplicabilidade universal das recomendações obtidas por cada fabricante. Além disso, a evolução constante dos veículos eletrificados pode tornar alguns achados obsoletos, e a análise focada no protocolo do CBMDF pode não refletir a realidade de outras regiões.

Os resultados impactam diretamente a atuação dos bombeiros e as políticas de segurança contra incêndios em veículos eletrificados. O CBMDF pode atualizar suas diretrizes considerando recomendações internacionais e melhores práticas. A capacitação contínua dos bombeiros deve incluir uso de água, manuseio seguro de baterias danificadas e prevenção de riscos tóxicos. Além disso, é essencial

desenvolver novos agentes extintores e estratégias de resfriamento mais eficientes, além de buscar maior padronização das recomendações. A colaboração da indústria automobilística é necessária para o desenvolvimento de veículos com baterias mais seguras e sistemas de supressão de incêndios mais eficientes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo abordou os desafios e as técnicas de combate a incêndios em veículos eletrificados, com ênfase nos riscos associados às baterias de íons de lítio. Foram analisadas as principais causas de falha dessas baterias, os procedimentos recomendados por fabricantes e o protocolo adotado atualmente pelo CBMDF. A pesquisa demonstrou que, embora diversas técnicas de combate sejam aplicáveis, a necessidade de resfriamento prolongado e a possibilidade de reignição são desafios que ainda precisam ser superados.

A crescente popularização dos veículos eletrificados exige uma revisão contínua das técnicas de resposta a emergências envolvendo esses veículos. Diferentemente dos automóveis convencionais, estes veículos apresentam riscos específicos, como a fuga térmica e a liberação de gases tóxicos durante um incêndio. Dessa forma, a capacitação dos bombeiros, o desenvolvimento de novas tecnologias de supressão e a atualização de protocolos são essenciais para garantir a segurança da população e das equipes de resgate.

Os resultados indicam que o uso de grandes volumes de água é o método mais eficiente para resfriar baterias de íons de lítio, embora existam limitações quanto ao tempo necessário para evitar a reignição. O protocolo atual do CBMDF é eficiente, mas pode ser aprimorado para lidar com casos específicos de incêndio que envolvam LIBs. Além disso, observa-se que os guias de resposta a emergências de fabricantes variam em suas recomendações, o que reforça a necessidade de padronização e treinamento contínuo.

Com base na análise realizada, algumas sugestões podem ser feitas como o desenvolvimento de novos agentes extintores que combinem resfriamento eficiente e segurança elétrica; o aprimoramento de protocolos com base nas mais recentes recomendações internacionais e estudos experimentais; o treinamento especializado por meio de capacitações regulares acerca dos riscos e das melhores técnicas de combate a incêndios; e o monitoramento de inovações tecnológicas para acompanhar a evolução das baterias elétricas e adaptar estratégias de combate de acordo com as novas especificações técnicas. Dessa forma, o enfrentamento de incêndios em

veículos eletrificados pode se tornar mais eficaz e seguro, garantindo a proteção da vida e do patrimônio em emergências.

O estudo resultou na proposta de um capítulo referente ao combate a incêndio em veículos eletrificados a ser incluído no módulo do Manual básico de combate a incêndio do CBMDF, com o intuito de aprimorar a eficiência e a segurança da atuação dos bombeiros nesses tipos de ocorrências. Esse material foi desenvolvido a partir da análise de diversas publicações e documentos ao longo do trabalho, permitindo uma compreensão aprofundada do tema e está apresentado no Apêndice A.

REFERÊNCIAS

- ANDERSSON, P.; WIKMAN, J.; ARVIDSON, M.; LARSSON, F.; WILLSTRAND, O. Safe introduction of battery propulsion at sea. **Research Institute of Sweden - RISE**. SP Rapport 2017:34. Borås, 2017. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1118026>. Acesso em: 17 dez. 2024.
- ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). **Quais são os tipos de veículos eletrificados?** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/quais-sao-os-tipos-de-veiculos-eletrificados/>. Acesso em: 21 jan. 2024.
- ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). **Autoveículos – Produção, licenciamento, exportações em unidades de montados e CKD (desmontados), exportações em valor e emprego**. São Paulo, [2025]. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/edicoes-em-excel/>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- APPOLINÁRIO, F. **Dicionário de metodologia científica: um guia para a produção do conhecimento científico**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2011. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS. **Elétricos rumo a 150 mil emplacamentos em 2024**. São Paulo, 2024. Disponível em: <http://www.abve.org.br/rumo-a-150-mil-eletricos-emplacados-em-2024/>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- AUSTRALIAN GOVERNMENT. **EV FireSafety: Enhancing safety for emergency responders at electric vehicle traction battery fires**. Australia: Department of Defense, 2021. Disponível em: <https://www.evfiresafe.com/>. Acesso em: 14 mai. 2024.
- BIBIANO, L. M. **Estimativa da inserção de veículos elétricos no Brasil até o ano de 2030**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/34203>. Acesso em: 22 de fev. 2025.
- BISSCHOP, R.; WILLSTRAND, O.; AMON, F.; ROSENGREN, M. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. **Research Institute of Sweden - RISE**. RISE Report 2019:50. Borås, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336640117_Fire_Safety_of_Lithium-Ion_Batteries_in_Road_Vehicles. Acesso em: 22 jan. 2024.
- BUGRYNIEC, P. J.; RESENDIZ, E. G.; NWOPHOKE, S. M.; KHANNA, S.; JAMES, C.; BROWN, S. F. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. **Journal of Energy Storage**, v. 87, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24008739>. Acesso em: 20 out. 2024.

CBMDF (Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal). Acidentes veiculares com veículos elétricos e elétricos híbridos. **Boletim de Informação Técnico-Profissional nº 17/2020**. Brasília, 2019.

CBMDF (Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal). **Plano Estratégico do CBMDF 2025-2030**. Brasília: CBMDF, 2024. Disponível em: <https://www.cbm.df.gov.br/wp-content/uploads/taimacan-items/31031/36776/Portaria-de-13-de-janeiro-de-2025-Planejamento-Estrategico-do-CBMDF-2025-2030.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

GEHANDLER, J.; KARLSSON, P.; VYLUND, L. Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages. SP Technical **Research Institute of Sweden - RISE**, SP Report 2017:14. Borås, 2017. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1081095&dswid=2663>. Acesso em: 15 mai. 2024.

GHIJI, M.; NOVOZHILOV, V.; MOINUDDIN, P. J.; BURCH, I.; SUENDERMAN, B.; GAMBLE, G. A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. **Energies**, vol. 13, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/19/5117>. Acesso em 06 nov. 2024.

GIL, ANTONIO CARLOS. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

HELD, M. TUCHSCHMID, M.; ZENNEGG, M.; FIGI, R.; SCHREINER, C.; MELLERT, L. D.; WELTE, U.; KOMPATSCHER, M.; HERMANN, M.; NACHEF, L. Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 165, p. 1-13, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122003793>. Acesso em: 30 out. 2023.

HYNYNEN, J.; QUANT, M.; PRAMANIK, R.; OLOFSSON, A.; ZHEN LI, Y.; ARVIDSON, M.; ANDERSSON, P. Electric vehicle fire safety in enclosed spaces. **Research Institute of Sweden - RISE**, RISE Report 2023:42. Sweden, 2023a. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1744882/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

HYNYNEN, J.; WILLSTRAND, O.; BLOMQVIST, P.; ANDERSSON, P. Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. **Fire Safety Journal**, v. 139, p. 103829, 2023b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711223000978>. Acesso em: 02 dez. 2024.

KUMAR, L.; GUPTA, K.K.; JAIN, S. Architecture and configuration of electrified vehicles: A review. In: **2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Taipei, Taiwan, 2013, pp. 1-6. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6563825/authors#authors>. Acesso em: 26 mar. 2025.

LECOCQ, A.; BERTANA, M.; TRUCHOT, B.; MARLAIR, G. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. In: **International Conference On Fires In Vehicles**, 2012. Chicago: FIVE 2012. p.183-194. Disponível em: <https://ineris.hal.science/ineris-00973680/>. Acesso em: 30 out. 2024.

ŁEBKOWSKI, A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System. **Przegląd Elektrotechniczny**. v. 93(1), p. 329-332. Gdynia, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311924171_Electric_Vehicle_Fire_Extinguishing_System. Acesso em: 28 jan.2024.

LIU, C.; CHAU, K. T.; WU, D.; GAO, S. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. **Proceedings of the IEEE**. v. 101, n. 11, p. 2409-2427. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6571224>. Acesso em: 15 agosto 2024.

LONG JR., R. T.; BLUM, A. F.; BRESS, T. J.; COTTS, B. R. T. **Best Practices for Emergency Response to Incidents involving Electric Vehicle Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results**. 1. ed. Quincy, 2013. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/final_report_nfpa.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap). **Vägledning - Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer**. Stockholm, 2024. Disponível em: <https://www.msb.se/sv/publikationer/vagledning---raddningsinsats-dar-litiumjonbatterier-forekommer/>. Acesso em: 09 nov. 2024.

NEOCHARGE. **Veículos Elétricos pelo Brasil**. São Paulo, 2025. Disponível em: https://www.neocharge.com.br/carros-eletricos-brasil?srsId=AfmBOooeG17qwbBIMRuAEkqh05BcNsw7JpN3dZI_jbBoCUggloTjGDAA. Acesso em: 17 fev. 2025.

NESLER, T.; SCHMID, R.; MÜNCHGESANG, W.; BAZHENOV, V.; SCHLIM, J.; LEISEGANG, T.; MEYER, D. Separators - Technology Review: Ceramic based Separators for Secondary Batteries. In: **AIP CONFERENCE PROCEEDINGS** 1597, p. 155-184, 2014. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/1597/1/155/800002/Separators-Technology-review-Ceramic-based>. Acesso em: 28 fev. 2025.

NFPA (National Fire Protection Association). **Emergency response guides**. USA, 2025. Disponível em: [https://www.nfpa.org/education-and-research/emergency-response/emergency-response-guides#aq=%40culture%3D%22en%22&cq=%40taglistingpage%3D%3D\(%22EV%20Guides%22\)%20%20&numberOfResults=12&sortCriteria=%40title%20ascending](https://www.nfpa.org/education-and-research/emergency-response/emergency-response-guides#aq=%40culture%3D%22en%22&cq=%40taglistingpage%3D%3D(%22EV%20Guides%22)%20%20&numberOfResults=12&sortCriteria=%40title%20ascending). Acesso em: 15 mai. 2024.

NITTA, N.; WU, F.; LEE, J. T.; YUSHIN, G. Li-Ion Battery Materials: Present and Future. **Materials Today**, vol. 18, p. 252-264, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702114004118>. Acesso em: 07 nov. 2024.

NTSB (National Transportation Safety Board). **Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles**. Washington, 2020. Disponível em: <https://www.nts.gov/safety/safety-studies/Pages/HWY19SP002.aspx>. Acesso em: 22 fev. 2025.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013. Disponível em: <https://www.feevale.br/institucional/editora-feevale/metodologia-do-trabalho-cientifico---2-edicao>. Acesso em: 27 mai. 2024.

QUANT, M.; WILLSTRAND, O.; MALLIN, T.; HYNYNEN, J. Ecotoxicity Evaluation of Fire-Extinguishing Water from Large-Scale Battery and Battery Electric Vehicle Fire Tests. **Environmental Science e Technology**, v. 57, p. 4821-4830, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.2c08581>. Acesso em: 20 out. 2024.

SANTOS, A. C. F. R. **Análise da viabilidade técnica e econômica de um veículo elétrico versus veículo a combustão**. 2017. Monografia (Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos) – Universidade Federal de Santa Maria, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/12590>. Acesso em: 22 fev. 2025.

SUN, P.; BISSCHOP, R.; NIU, H.; HUANG, X. A Review of Batteries Fires in Electric Vehicles. **Fire Technology**, v. 56, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338542510_A_Review_of_Battery_Fires_in_Electric_Vehicles. Acesso em: 25 jun. 2024.

UN, C.; AYDIN, K. Thermal runaway and fire suppression for electric vehicle batteries. In: **International Conference on Progresses in Automotive Technologies**, Istanbul. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348151002_Thermal_Runaway_and_Fire_Suppression_for_electric_vehicle_batteries. Acesso em: 24 fev. 2025.

APÊNDICE A - ESPECIFICAÇÃO DO PRODUTO

1. **Aluna:** Cadete BM/2 **Caroline** Leite da Silva
2. **Nome:** Proposta de Capítulo do Manual básico de combate a incêndio do CBMDF referente ao Combate a incêndios em veículos eletrificados.
3. **Descrição:** Proposta de Capítulo do Manual básico de combate a incêndio do CBMDF elaborada com foco no combate a incêndios em veículos eletrificados. O conteúdo abrange os principais riscos associados às baterias de íons de lítio, mecanismos de fuga térmica, gases tóxicos liberados, métodos e agentes extintores mais eficazes, recomendações de fabricantes e uma proposta de protocolo de atuação padronizado para as equipes de emergência.
4. **Finalidade:** Apresentar aos bombeiros os principais riscos associados aos incêndios em veículos eletrificados leves que envolvam as baterias elétricas e as tecnologias de combate apresentadas pela literatura especializada.
5. **A quem se destina:** A todos os bombeiros militares do CBMDF.
6. **Funcionalidades:** Não se aplica.
7. **Especificações técnicas:** O documento foi elaborado em formato A4 com base no modelo padrão utilizado no Manual básico de combate a incêndio do CBMDF. Seu formato digital foi gerado em arquivo formato PDF, o qual possui 41 páginas e está dividido em 8 seções.
8. **Instruções de uso:** Não se aplica.
9. **Condições de conservação, manutenção, armazenamento:** Não se aplica.

Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Manual básico de combate a incêndio



Módulo 3

- Técnicas de combate a incêndios –

Manual básico de combate a incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

Proposta de Capítulo do Manual básico de combate a incêndios do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal referente ao Combate a incêndios em veículos eletrificados.

Elaboração

CAD./2 QOBM/Comb. CAROLINE LEITE DA SILVA, mat. 12624-6 CBMSE

Brasília-DF, 8 de abril de 2025.

14. Combate a incêndios em veículos eletrificados envolvendo baterias de íons de lítio

Os veículos eletrificados estão se tornando cada vez mais comuns no cotidiano urbano. Então, torna-se essencial compreender e mitigar os riscos associados a possíveis incêndios que envolvam estes veículos. Esses incidentes possuem características distintas em relação aos veículos convencionais devido às particularidades dos sistemas elétricos e das baterias de íons de lítio (LIBs). Estas baterias são suscetíveis a incêndios que, uma vez iniciados, podem ser difíceis de controlar devido à sua natureza química^{1,2}.

Portanto, incêndios em veículos eletrificados representam um desafio crescente para a gestão de emergências. É fundamental que os serviços de emergência estejam preparados e com treinamento especializado, equipamentos adequados e protocolos de intervenção específicos para lidar com essas ocorrências de forma eficiente e segura^{1,3}.

Este capítulo tem o objetivo de apresentar aos bombeiros os principais riscos associados aos incêndios em veículos eletrificados leves

que envolvam as baterias elétricas e as tecnologias de combate apresentadas pela literatura especializada.

14.1. Tipos de veículos eletrificados

Apesar de ainda não estar bem consolidada na literatura, existe uma distinção conceitual entre os termos “veículo elétrico” e “veículo eletrificado”: o veículo elétrico opera exclusivamente com motores elétricos, enquanto o veículo eletrificado inclui qualquer modelo que utilize eletricidade para auxiliar ou substituir a combustão^{4,5,6}.

Deste modo, os tipos de veículos eletrificados (VEs) estão apresentados na Tabela 1 e esquematizados na Figura 1.

Tabela 6 – Abreviaturas e respectivos tipos de veículos eletrificados

Abreviatura	Tipo
BEV	Veículos elétricos ou veículos elétricos a bateria
HEV	Veículos elétricos híbridos
PHEV	Veículos elétricos híbridos <i>plug-in</i>
FCEV	Veículos elétricos movidos a célula de combustível

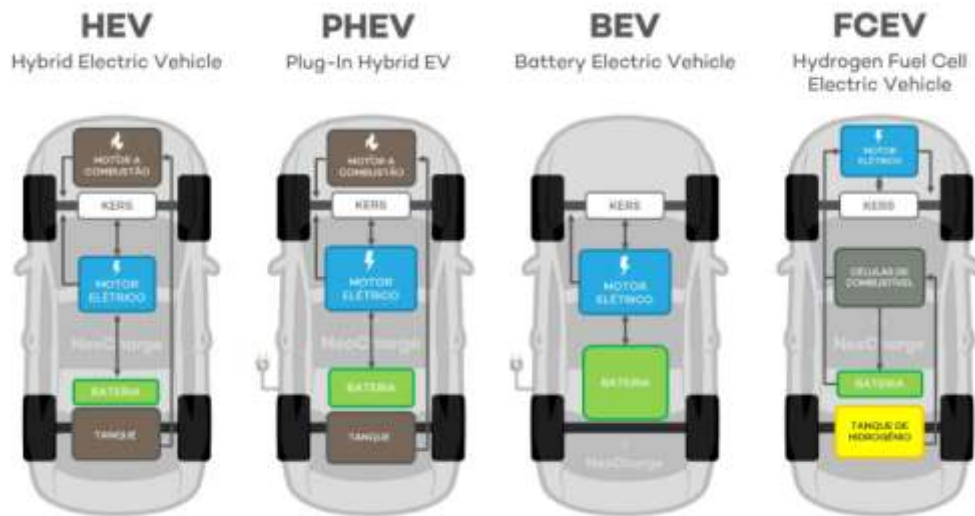
Fonte: Elaborada a partir de dados de Quais são os tipos de veículos eletrificados?⁶

Os BEVs são 100% elétricos e apresentam uma bateria recarregável que pode ser abastecida por conexão plug-in ou através de frenagem regenerativa^{5,7,8}.

No HEV, há uma combinação entre motor elétrico e motor a combustão, que proporciona maior eficiência no consumo de combustível. O motor a combustível é o principal responsável pela propulsão e recarrega a bateria elétrica. Enquanto o motor elétrico reduz o consumo de combustível e auxilia em momentos de maior demanda de potência^{5,7,8}.

Os PHEVs possuem um funcionamento semelhante ao dos híbridos convencionais, mas com a diferença de que suas baterias podem ser recarregadas tanto pela frenagem regenerativa quanto pela conexão plug in a uma fonte de energia elétrica externa^{5,7,8}.

Já nos FCEVs, a energia elétrica é gerada a partir da reação química entre o hidrogênio e o oxigênio, eliminando a necessidade de uma grande bateria. Além disso, esses veículos também podem recuperar energia por meio do sistema de frenagem regenerativa^{5,7,8}.



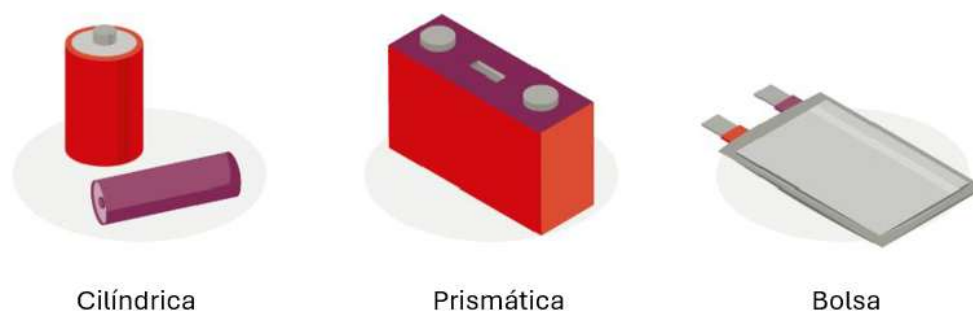
Fonte: Veículos Elétricos pelo Brasil.⁹

Figura 9 – Tipos de veículos eletrificados

14.2. Baterias de íons de lítio (LIBs)

A bateria de íon lítio consiste em células que produzem corrente elétrica através da conversão de energia química em energia elétrica. São muito utilizadas por sua elevada densidade de energia, baixa taxa de autodescarga, mínima perda de capacidade ao longo do tempo, longa vida útil e alta eficiência. Seu uso tem se expandido para veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia em redes elétricas e aplicações no setor militar e aeroespacial^{10,11}.

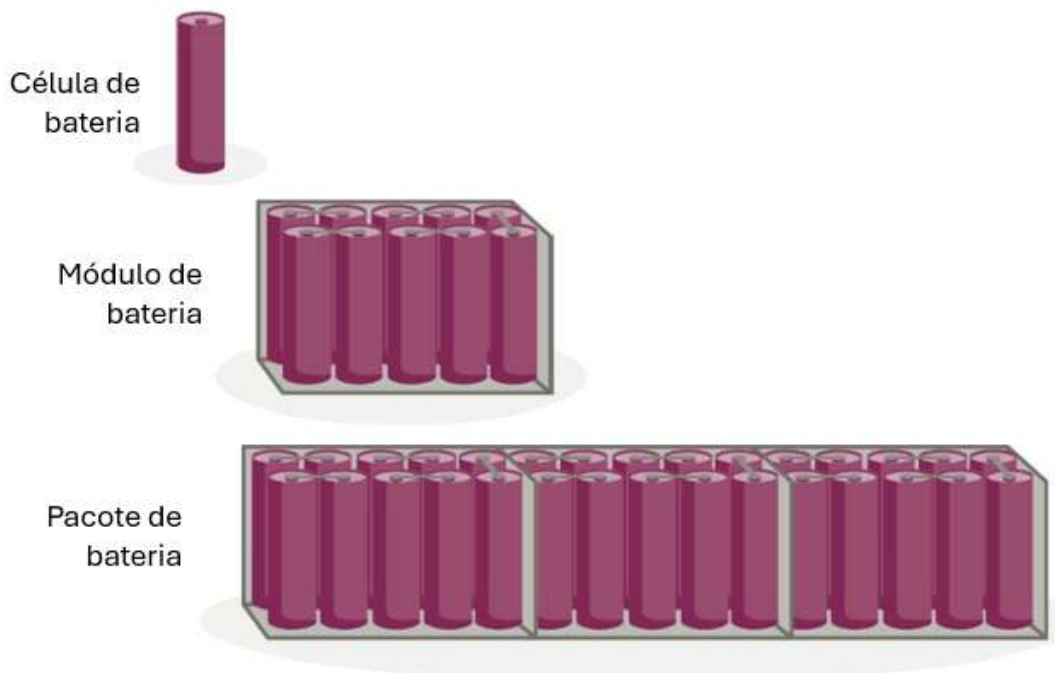
As células de bateria vêm em vários formatos e tamanhos: cilíndricas, prismáticas e bolsa¹¹, apresentados na Figura 2.



Fonte: Traduzida e adaptada de Vägledning - Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer.¹²

Figura 10 - Formatos de células de bateria

A bateria para um VE consiste em células individuais, compactadas para produzir a voltagem, potência e energia necessárias. As células são montadas em módulos, que são montados em pacotes e sistemas de bateria¹¹, esquematizados na Figura 3.



Fonte: Traduzida e adaptada de Vägledning - Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer.¹²

Figura 11 - Estrutura de baterias de íons de lítio

Os sistemas de gerenciamento de bateria (BMS) garantem a operação segura nos conjuntos de bateria. O BMS monitora dados de tensão e temperatura das células e módulos e estado da carga da bateria para proteger contra sobrecarga e descarga excessiva. As células são protegidas de temperatura extremas por sistemas de gerenciamento térmico, e de sobrepressão, por sistemas de ventilação^{11,13,14}.

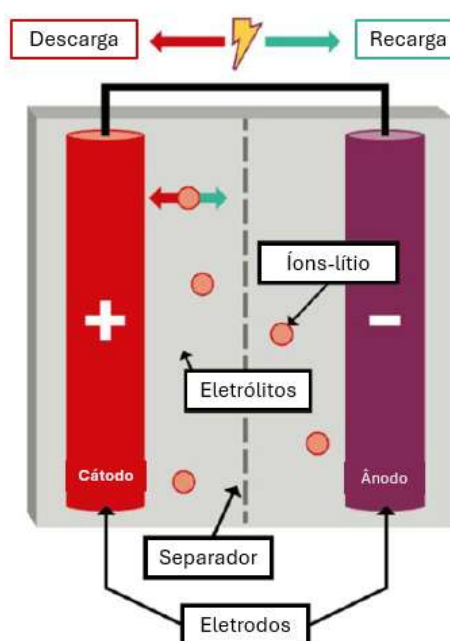
O BMS desconecta automaticamente o sistema de bateria nas seguintes situações: temperatura muito alta, subtensão, sobretensão, sobrecorrente, falha do sistema de resfriamento da bateria, sensor de colisão danificado e/ou falsamente acionado, capotamento, falha de isolamento e falha de corrente, como arco elétrico¹⁵.

Cada célula de bateria apresenta dois eletrodos que conduzem eletricidade, um negativo, ânodo, e outro positivo, cátodo. Uma barreira permeável entre os eletrodos previne o curto-circuito e permite que o eletrólito transfira íons entre os eletrodos (separador). O eletrólito preenche o espaço entre o separador e os eletrodos e possibilita o fluxo dos íons de lítio entre eles. Além disso, bateria é protegida em uma

estrutura projetada para resistir a danos de forças externas, calor e vibração^{1,11,14,16}.

A estrutura básica de uma célula está apresentada na Figura 4. Cada um desses componentes influencia nas propriedades da bateria em relação a energia específica, vida útil, segurança e custo^{11,16}.

Durante a descarga, os íons de lítio se movem do ânodo e se inserem nos vazios entre a camadas de cristais de cátodo (intercalação). Ao carregar, os íons de lítio se movem do cátodo e se inserem no ânodo¹⁴.



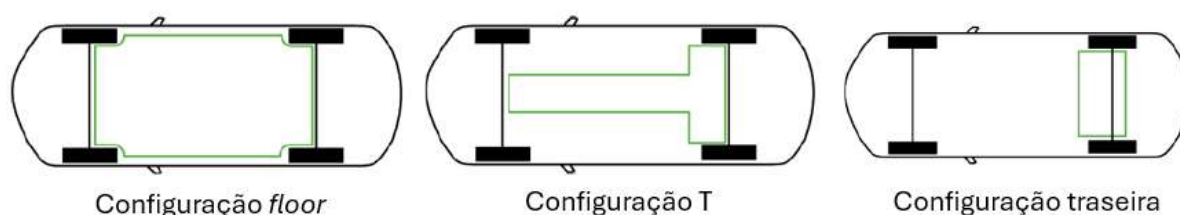
Fonte: Traduzida e adaptada de Vägledning - Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer.¹²

Figura 12 - Estrutura de uma célula de bateria de íon-lítio

14.3. Posicionamento da bateria nos veículos eletrificados

Nos VEs, as células de bateria precisam ser integradas de modo a atingir o maior conjunto de baterias possível para garantir a potência e energia necessárias e manter o nível de segurança. O posicionamento mais comum é em áreas menos sujeitas a colisões, geralmente no centro do chassi, entre os eixos¹.

Para veículos leves, há três configurações principais nas quais a zona segura é utilizada: *floor*, T e traseira¹, apresentadas na Figura 5.



Fonte: Traduzida e adaptada de *Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles*.¹

Figura 13 – Configurações de bateria em VEs

No tipo *floor* a bateria inteira fica localizada embaixo do compartimento do passageiro. Isso fornece mais espaço interno para passageiros e bagagem e permite alto armazenamento de energia. A desvantagem é que há uma distância menor entre a bateria e o solo, assim a bateria fica mais suscetível aos detritos do solo¹.

A configuração T organiza os módulos de bateria em um formato de T dentro da zona segura. Essa configuração permite maior

distância entre o solo e a bateria, mas reduz a área de passageiros. É bastante estreita e protegida pelo eixo dianteiro do veículo, isso garante a proteção da bateria contra colisões frontais e impactos laterais¹.

A solução traseira faz uso do espaço disponível entre as rodas traseiras do veículo. Normalmente, esse tipo de configuração é encontrado em veículos pequenos ou híbridos, que exigem menor capacidade de armazenamento. Para aumentar a energia disponível, alguns VEs utilizam o espaço atrás ou acima das rodas traseiras¹.

14.4. Riscos de incêndio associados a baterias de íons de lítio

À medida que mais veículos movidos a LIBs entram em circulação, a tendência é que sua participação em incidentes de trânsito aumente proporcionalmente. Enquanto os riscos dos veículos convencionais já são amplamente conhecidos e aceitos pela sociedade, é necessário tempo e pesquisas para alcançar um nível semelhante de compreensão e confiança em relação aos VEs^{1,16}.

Embora apresentem inúmeras vantagens, como alta densidade de energia e potência, as baterias elétricas possuem limitações relacionadas à segurança. Elas são estáveis apenas dentro de um

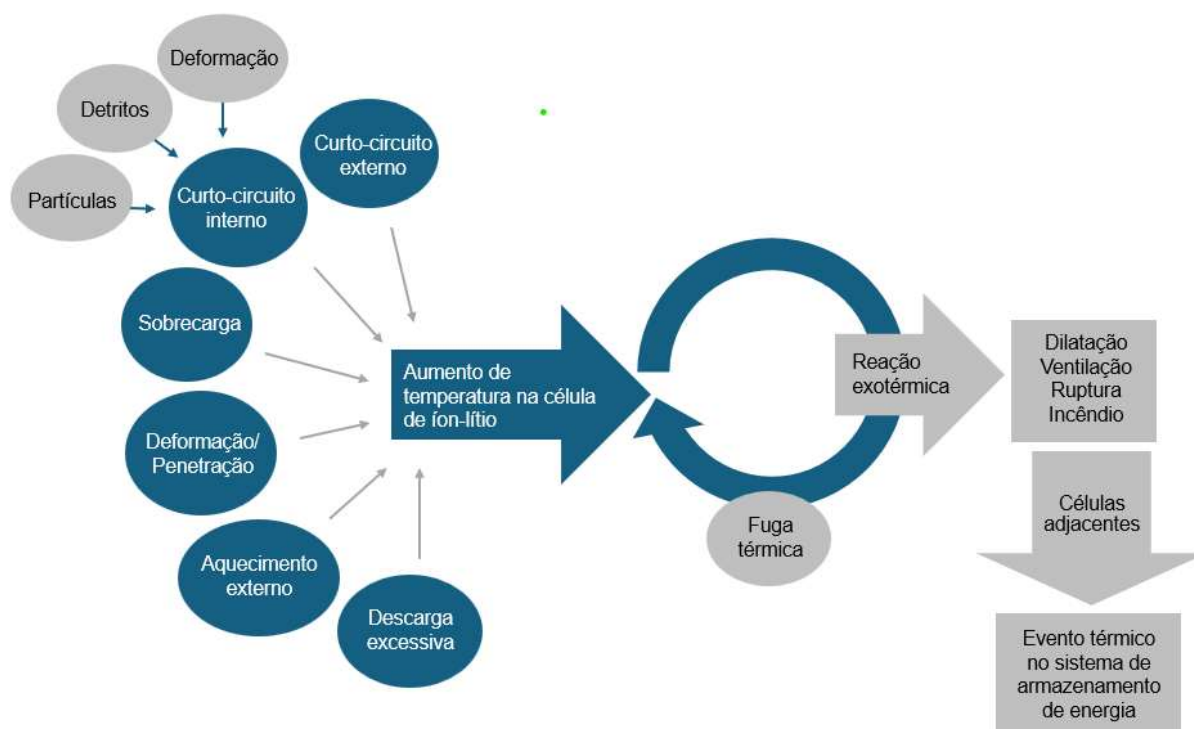
intervalo restrito de condições operacionais, como faixas específicas de temperatura e voltagem¹⁶.

Fatores como sobrecarga, descarga excessiva, impacto mecânico, superaquecimento e curtos-circuitos podem levar a bateria a um processo de autoaquecimento e resultar em uma fuga térmica. Além disso, impurezas presentes nas células durante a fabricação ou o acúmulo de detritos podem causar curtos-circuitos internos, contribuindo para a ocorrência desse fenômeno^{1,16,17}.

a) Fuga térmica

A principal preocupação de segurança das baterias elétricas está relacionada à fuga térmica (*thermal runaway*), um fenômeno que pode ocorrer quando os limites de voltagem ou temperatura são excedidos. Nessa condição, reações químicas no interior da bateria podem desencadear um curto-circuito interno ou aumentar a temperatura por diferentes mecanismos. Como consequência, a célula da bateria pode falhar, liberar gases inflamáveis, entrar em combustão, explodir e/ou se tornar um projétil, devido à composição dos seus materiais. Durante o seu uso, há uma combinação de combustível

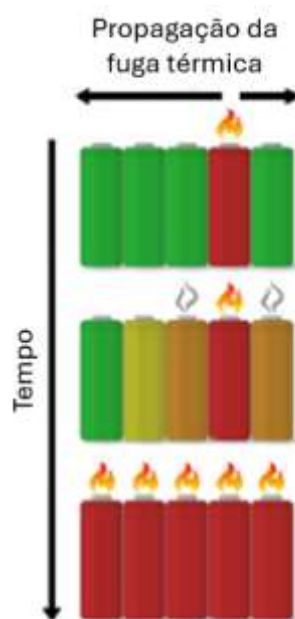
inflamável, potenciais oxidantes e calor gerado por reações exotérmicas^{1,2,18}, conforme ilustrado na Figura 6.



Fonte: Traduzida e adaptada de *Safe introduction of battery propulsion at sea*.¹⁶

Figura 14 - Fuga térmica esquematizada

Devido ao empacotamento denso das células, o calor gerado durante uma fuga térmica pode ser transferido para as células adjacentes, potencializando o risco de ignição de toda a bateria, como ilustrado na Figura 7. Além disso, conter e resfriar uma célula em fuga térmica é um grande desafio, pois o acesso para dissipação de calor é limitado. Caso o fogo se espalhe, será necessário um processo de resfriamento ainda mais prolongado, dificultando o controle do incêndio^{1,2,16}.



Fonte: Traduzida e adaptada de *Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure*.¹⁸

Figura 15 - Fuga térmica

b) Causas de falha de bateria

A falha de uma célula de bateria pode ocorrer devido a: curto-circuito interno, deformações mecânicas e impacto, sobrecarga, descarga, curto-circuito externo, exposição a altas temperaturas¹.

Curto-circuito interno

O curto-circuito interno é a falha mais grave e pode ser causado por defeitos de fabricação ou danos físicos, como deformações mecânicas. Nesse caso, a célula libera sua energia pelo curto-circuito e a passagem da corrente elétrica pelo material condutor gera calor, fenômeno conhecido como efeito Joule. Nessa região, o rápido

aumento de temperatura pode levar ao autoaquecimento e à fuga térmica^{1,14}.

Deformações mecânicas e impacto

Deformações mecânicas podem provocar curto-circuito interno, arcos elétricos e causar o vazamento de líquidos inflamáveis e condutores e resultar em incêndio. Deformações severas podem ocorrer devido a colisões ou impactos contra o solo e devem ser evitadas^{1,13,14}.

Sobrecarga

As baterias de íons de lítio são desenvolvidas para absorver e armazenar uma quantidade determinada de energia dentro de um intervalo de tempo específico. Quando esses limites são ultrapassados, seja por carregamento excessivamente rápido ou sobrecarga, o desempenho da célula pode se deteriorar, podendo resultar em falha^{1,13}.

O nível de carga das baterias é geralmente definido em termos de estado de carga (SOC), cujos limites podem ser definidos de 0-100%. No entanto, a capacidade total da bateria permite que sua capacidade nominal seja ultrapassada, tanto no limite superior quanto inferior^{1,13}.

A sobrecarga pode ocorrer quando a tensão da célula é detectada incorretamente pelo sistema de controle de carga, seja por falha no carregador ou pelo uso de um carregador inadequado. Nesse processo, o material do ânodo pode sofrer uma litiação excessiva e formar depósitos de metal de lítio. Esses depósitos podem crescer como dendritos que, ao se alongarem, podem perfurar o separador e provocar um curto-circuito interno. No cátodo, ocorre o efeito contrário, a sobrecarga pode causar uma deslitiação excessiva e resultar na decomposição térmica do material e na geração de calor^{1,13}.

Descarga

A descarga excessiva ocorre quando as células da bateria são descarregadas abaixo de sua voltagem mínima, podendo resultar na liberação de partículas condutoras no eletrólito, o que aumenta o risco de curto-circuito. Esse fenômeno pode acontecer quando uma bateria é descarregada e suas células individuais apresentam níveis de carga desequilibrados. Embora os sistemas de segurança sejam projetados para evitar essa condição, falhas nesses sistemas ainda podem ocorrer, tornando a descarga excessiva um risco potencial interno^{1,13}.

Curto-circuito externo

O curto-circuito externo é outra forma de abuso elétrico que pode comprometer a estabilidade da bateria. Esse problema pode surgir quando a bateria é submetida a condições adversas, como deformações mecânicas severas, impactos, imersão em água, corrosão ou choques elétricos durante a manutenção¹.

Exposição a altas temperaturas

A estabilidade térmica é um dos principais fatores que influenciam a segurança das células de íons de lítio. Quando a temperatura externa ultrapassa a interna da bateria, ela absorve calor, e, ao atingir certos limites, ocorrem processos de decomposição que intensificam o processo de geração de calor. Além disso, o conjunto de baterias pode ser exposto a incêndios externos, como os causados pelo vazamento e ignição de combustível acumulado sob o pacote de baterias, aumentando o risco de falhas nas células e propagação do fogo pelo sistema. Outro fator de risco é a exposição prolongada a altas temperaturas decorrentes de falhas de fabricação, como conectores soltos entre células da bateria¹.

14.5. Toxicidade dos gases liberados durante um incêndio em bateria elétrica

A toxicidade das emissões de baterias de íons de lítio é uma área de preocupação para a segurança dos passageiros de veículos elétricos, bombeiros e outros profissionais de resposta a emergências, e para o meio ambiente. Esse risco é aumentado quando o veículo emite gases em um espaço fechado, como um estacionamento ou túnel¹⁹.

Gases tóxicos são liberados em todos os incêndios, mas alguns materiais e produtos representam maior preocupação devido às suas emissões tóxicas, como por exemplo, os plásticos presentes em todos os veículos atuais. A combustão e aquecimento desse material pode gerar irritantes orgânicos e compostos cancerígenos, além de fluoreto de hidrogênio (HF). A queima do fluido de ar-condicionado também pode liberar uma quantidade significativa de HF^{1,19,20}.

Nos veículos eletrificados, as LIBs liberam gases tóxicos durante o incêndio, principalmente da combustão do eletrólito. O eletrólito contém hexafluorofosfato de lítio (LiPF₆) e pode incluir outros

compostos contendo flúor que fornecem o potencial de emissão de HF durante o aquecimento e a combustão¹.

Se a combustão não ocorre, gases inflamáveis, como hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4), podem ser mais perigosos que os gases tóxicos devido ao risco imediato de explosão. Se a bateria estiver submersa em água salgada, devido à eletrólise, pode ocorrer ainda a produção de gás hidrogênio (inflamável) e gás cloro (tóxico)^{1,19}.

Lecocq *et al.* realizaram um estudo comparativo das consequências de um incêndio em veículos elétricos e veículos a combustão interna. O estudo concluiu que quando expostos ao mesmo estresse térmico externo, o comportamento geral de ambos os veículos foi semelhante. A análise dos gases de combustão de incêndios de carros destacou que as massas cumulativas de CO_2 , CO, hidrocarbonetos totais, NO, NO_2 , HCl e HCN foram semelhantes para ambos os tipos de veículos. Uma quantidade significativa de HF foi medida durante os testes de incêndio nos dois tipos de veículos, mas a quantidade cumulativa de HF foi maior em veículos elétricos devido a combustão da LIB²¹.

A Tabela 2 apresenta as características e os riscos associados aos gases de combustão mais comuns liberados durante um incêndio veicular.

Tabela 7 - Riscos associados aos gases da combustão

Gás	Riscos associados
Dióxido de carbono (CO ₂)	Causa dor de cabeça, tontura, confusão, perda de consciência e asfixia em altas concentrações.
Monóxido de carbono (CO)	Tóxico se inalado e extremamente inflamável, podem causar danos ao feto, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida.
Hidrogênio (H ₂)	Extremamente inflamável.
Fluoreto de hidrogênio (HF)	Fatal se ingerido, fatal em contato com a pele, fatal se inalada e causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos.
Cianeto de Hidrogênio (HCN)	Fatal se ingerido, fatal em contato com pele, fatal se inalado, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida, muito tóxico para vida aquática (com efeitos duradouros) e é um líquido e vapor extremamente inflamável.
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Fatal se inalado, Causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos, pode causar ou intensificar o incêndio (oxidante).
Gás cloro (Cl ₂)	Tóxico.

Continua...

Continuação

Gás	Riscos associados
Ácido clorídrico (HCl)	Causa severas queimaduras na pele e danos aos olhos, é tóxico se inalado, causa danos a fertilidade ou ao feto, causa danos aos órgãos em caso de exposição prolongada ou repetida, pode ser corrosivo para metais, pode causar irritações em via respiratória, contém gás sob pressão e pode explodir se aquecido.
Hidrocarbonetos totais (THC)	Inflamáveis.

Fonte: Elaborada a partir de dados de Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure.¹⁸

14.6. Técnicas e Tecnologias de combate a incêndios em veículos eletrificados

a) Princípios de combate

O conhecimento sobre o mecanismo de combate a incêndios em baterias de íons de lítio ainda é limitado e grande parte dos estudos disponíveis concentra-se em testes de supressão de incêndios de pequena escala em LIBs portáteis. Consequentemente, a eficácia dos agentes de supressão e a confiabilidade das estratégias atuais para conter incêndios em VEs são frequentemente questionadas¹³.

O combate a incêndios em LIBs deve priorizar o resfriamento das células para evitar a propagação do calor, em vez de focar apenas na extinção do fogo em uma única célula. Se o resfriamento for

insuficiente, as células vizinhas podem entrar em fuga térmica e aumentar o risco de reignição da bateria, o que representa um grande desafio para os serviços de emergência. Dessa forma, as estratégias de supressão devem ir além da extinção das chamas, garantindo o resfriamento eficaz tanto da célula afetada quanto das adjacentes¹⁴.

Princípio do combate:

- Foco no resfriamento contínuo para evitar reignição.

b) Agentes extintores

Água

Os agentes extintores à base de água são amplamente utilizados no combate a incêndios devido à sua eficiência no resfriamento e ao baixo custo. A água possui alta capacidade calorífica e elevado calor latente de vaporização, por isso é eficaz em conter ou interromper a propagação da fuga térmica para células adjacentes da bateria^{13,14,20}.

No entanto, seu uso pode gerar efeitos adversos, como a possibilidade de curtos-circuitos e a contaminação ambiental pelo escoamento de substâncias tóxicas. Além disso, a água pode reagir com os sais de lítio e resultar na formação de fluoreto de hidrogênio. O HF

pode ser reduzido pelo lítio metálico, gerando hidrogênio inflamável, o que aumenta o risco de combustão^{13,14}.

Ghiji *et al.* dividem os agentes extintores de água em quatro categorias: jato de água, *spray* de água ou *sprinkler*, água com surfactantes, névoa de água¹⁴.

Os supressores do tipo jato de água direcionam um fluxo contínuo de água sobre materiais em chamas, promovendo o resfriamento e reduzindo o risco de reignição. No entanto, seu uso não é recomendado em equipamentos elétricos que estejam energizados, pelo risco de choque elétrico¹⁴.

Os supressores de *spray* de água, como os sprinklers, dispersam um jato de pequenas gotículas de água, cada uma envolta por ar, que atua como isolante elétrico. O *spray* possui força suficiente para permitir que as gotículas atravessem a pluma de fogo, resfriem as superfícies atingidas, além de absorver parte da energia térmica por meio da vaporização, contribuindo para o resfriamento do ar ao redor¹⁴.

A incorporação de surfactantes à água pode aumentar sua eficácia na extinção de incêndios. Esses agentes reduzem a tensão

superficial da água, permitindo que ela se espalhe melhor sobre os materiais em chamas, proporcionando um resfriamento mais eficiente¹⁴.

A névoa de água consiste em uma mistura de gotículas com diâmetro inferior a 1000 µm, sendo significativamente menores do que as emitidas por um *sprinkler*. As gotículas menores apresentam uma maior relação entre área de superfície e volume em comparação com gotas maiores, o que permite uma absorção mais eficiente da energia térmica do ar quente para uma mesma quantidade de água. Ao mesmo tempo, as gotas maiores presentes na distribuição de tamanhos conseguem atravessar a pluma de fogo e resfriar diretamente o material em combustão¹⁴.

Espuma

A espuma pode ser utilizada em incêndios de Classe A (sólidos inflamáveis) e Classe B (líquidos inflamáveis), o que os torna uma opção viável para combater incêndios em LIBs. A espuma resfria e sela a superfície do material em chamas, criando uma barreira que impede a liberação de vapores inflamáveis e bloqueia o contato com o oxigênio, privando o fogo de ar¹⁴.

No entanto, para ser eficaz, a espuma precisa envolver completamente a célula da bateria, o que pode ser um grande desafio, pois os incêndios em LiBs tendem a ocorrer em múltiplos estágios, frequentemente acompanhados por jatos de gases inflamáveis liberados em alta velocidade¹⁴.

Agentes químicos secos

Os agentes químicos secos atuam interrompendo as reações químicas do fogo. No entanto, apesar de extinguir as chamas, eles não promovem o resfriamento necessário, o que pode resultar na reignição. Além disso, o uso desses pós químicos pode representar riscos à saúde, especialmente em ambientes fechados, devido à possibilidade de inalação e problemas respiratórios¹⁴.

Dióxido de carbono

O dióxido de carbono extingue o fogo por abafamento, deslocando o oxigênio na zona de combustão e substituindo-o por CO₂. Ele é indicado para incêndios de Classe A e B, além de ser seguro para incêndios elétricos (Classe E). Apesar de não deixar resíduos, seu uso pode causar problemas respiratórios, especialmente em ambientes fechados. No entanto, o CO₂ não é o agente extintor mais adequado

para incêndios em LIBs, pois sua capacidade de resfriamento é limitada¹⁴.

À base de hidrocarboneto halogenado

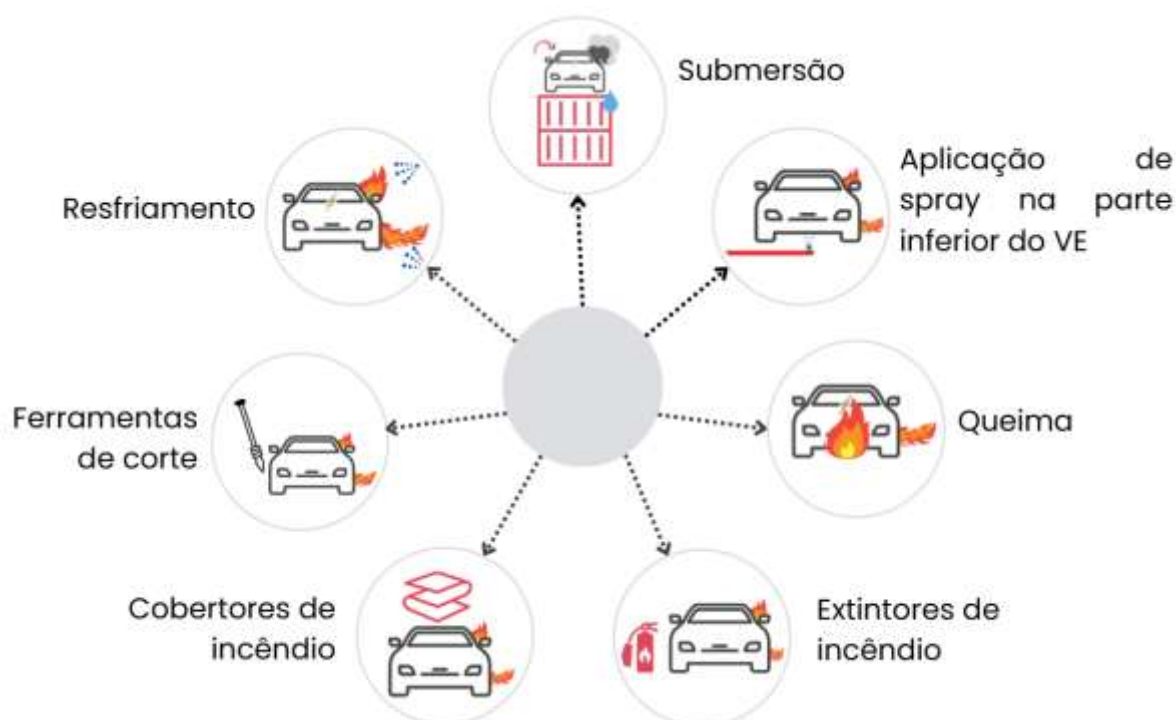
O halon é um hidrocarboneto halogenado composto por elementos como flúor, cloro, bromo e iodo. Atua no combate ao fogo interrompendo quimicamente as reações de combustão. No entanto, seu uso foi restringido devido ao impacto ambiental, pois contribui para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio, resultando na interrupção de sua produção. Apesar disso, ainda é amplamente empregado em sistemas de segurança contra incêndios em navios, aeronaves, tanques e submarinos. Vale ressaltar que os extintores à base de halon não promovem resfriamento¹⁴.

Ghiji *et al.* fizeram uma análise dos métodos de supressão aplicáveis ao combate a incêndio em veículos elétricos: água, espuma, CO₂, pós extintores e halogenados. O estudo concluiu que o incêndio envolvendo baterias de íon de lítio pode ser extinto por vários métodos, mas os efeitos da fuga térmica são mais difíceis de gerenciar e resfriamento contínuo é necessário. Segundo os autores, a névoa de água com aditivos e surfactantes, ou em conjunto com um meio de

extinção gasoso (fluxo de gás inerte como o nitrogênio), é considerada o método de extinção e resfriamento mais promissor para baterias de lítio¹⁴.

c) Métodos de supressão

O Governo da Austrália através do Departamento de Defesa apresentou alguns métodos de supressão para incêndios em LIBs: resfriamento, queima, submersão, uso de cobertor, extintores, ferramentas de corte, aplicação spray na parte inferior do veículo, Figura 8²². As Figuras 9 a 15 apresentam as vantagens e desvantagens de cada método.



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 16 - Métodos de supressão para incêndios em LIBs

Resfriamento

Consiste em utilizar o jato neblinado para extinguir as chamas e aplicar jatos de resfriamento na parte externa da bateria, a fim de reduzir a reação exotérmica causada pela fuga térmica²².



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 17 - Vantagens e desvantagens do resfriamento

Queima

Consiste em permitir que a LIB queime por conta própria, rapidamente e com altas temperaturas²²

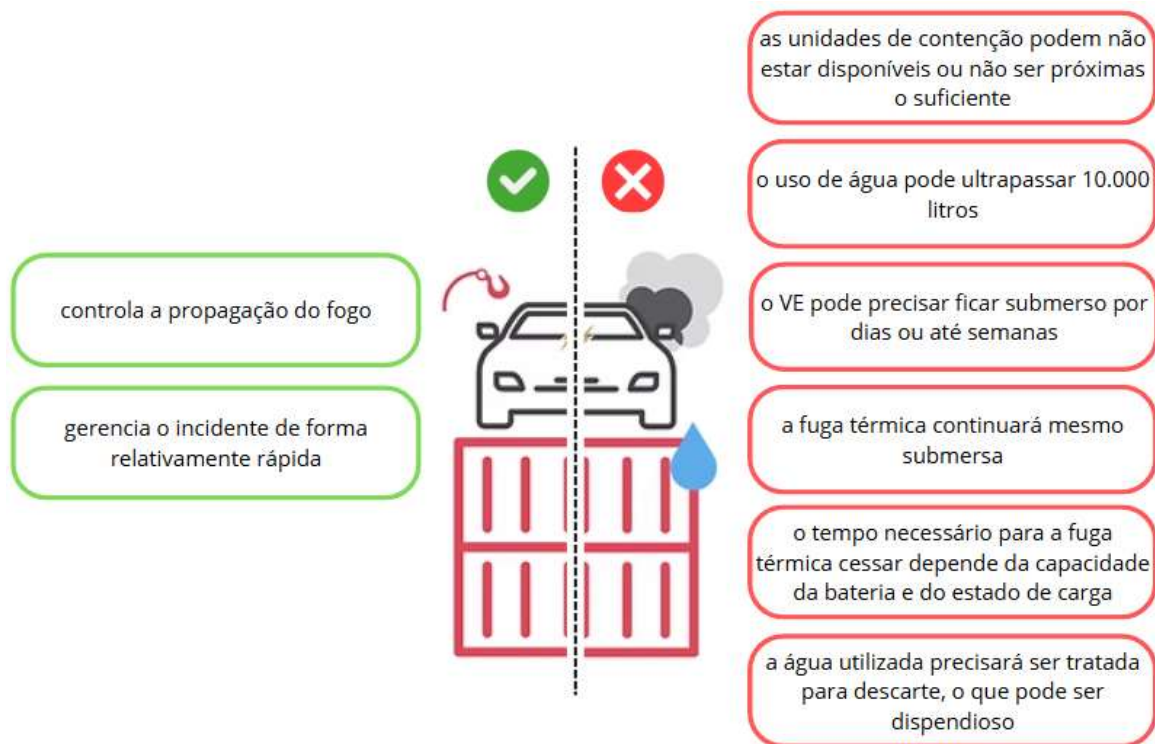


Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 18 - Vantagens e desvantagens da queima

Submersão

Consiste em submergir o VE uma unidade de contenção preenchida com água até o nível do pacote de bateria²².



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 19 - Vantagens e desvantagens da submersão

Cobertores de incêndio

Grande cobertor térmico de incêndio que é colocado sobre um VE para conter as chamas²².



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 20 - Vantagens e desvantagens do cobertor de incêndio

Extintores de incêndio

Qualquer extintor de incêndio pode ser utilizado, incluindo aqueles comercializados especificamente para uso em incêndios de metal ou incêndios de bateria de íons de lítio²².

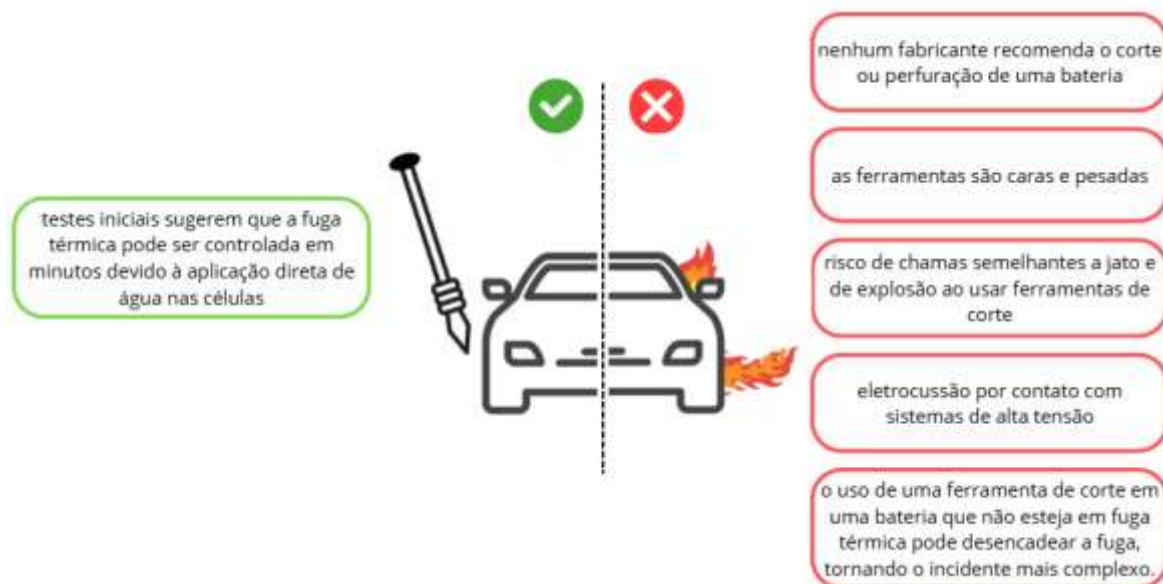


Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 21 - Vantagens e desvantagens dos extintores de incêndio

Ferramentas de corte

Ferramentas utilizadas para perfurar, explodir ou cortar uma bateria de VE, para a aplicação direta de água de resfriamento nas células da bateria²².



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 22 - Vantagens e desvantagens das ferramentas de corte

Aplicação de spray na parte inferior do veículo

Sistema do tipo '*sprinkler*' que pode ser deslizado por baixo de um VE para aplicar água de resfriamento diretamente para a bateria²².



Fonte: Elaborada a partir de dados de EV battery fire suppression.²²

Figura 23 - Vantagens e desvantagens da aplicação de *sprinkler* na parte inferior do veículo

14.7. Recomendações de fabricantes de veículos eletrificados

O site da NFPA (National Fire Protection Association) apresenta guias de respostas a emergências de várias fabricantes de veículos eletrificados²³. Algumas dessas recomendações estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 8 - Recomendações dos fabricantes de veículos eletrificados

Fabricante	Recomendações
Nissan	Utilizar o equipamento de proteção individual (EPI) completo, incluindo o aparelho de respiração autônomo (EPRA) ao combater incêndios; evitar o acesso ao plugue de serviço se houver fumaça ou odor de queimado e verificar a temperatura da bateria antes da sua remoção; não armazenar o veículo em locais fechados se a bateria estiver danificada; usar grandes volumes de água, e para pequenos incêndios elétricos ou de óleo combater com um extintor ABC; alerta para o risco de incêndio retardado.

Continua...

Fabricante	Recomendações
Porsche	Usar grandes volumes de água para resfriar a LIB durante incêndios e areia seca e CO ₂ para chamas na bateria; alerta que temperaturas extremas podem causar explosões nas células da bateria e recomenda manter distâncias seguras ao lidar com o fogo.
Stellantis	Evitar cortes em áreas de risco, bem como em tanques e linhas de fluidos; aplicar grandes volumes de água em forma de nebulização, em caso de atividade térmica; alerta que LIBs danificadas podem liberar gases perigosos, como H ₂ , que é altamente explosivo, e HF, que pode causar queimaduras e dificuldades respiratórias; garantir a ventilação do veículo, ao abrir portas e remover vidros; usar termômetros infravermelhos para monitoramento da temperatura devido ao risco de ignição retardada
Tesla	Utilizar grandes volumes de água em nebulização para extinguir incêndios em baterias de alta tensão; monitorar a temperatura por 24 horas; resfriar a bateria antes de liberar o veículo; evitar a submersão do veículo ou abertura da bateria; utilizar CO ₂ ou outros agentes extintores, caso a água não esteja disponível; câmeras térmicas são recomendadas para monitoramento até que a temperatura ambiente ser atingida, prevenindo re ignição; usar EPI completo e ferramentas isoladas devido ao risco de liberação de gases tóxicos.
BYD	Utilizar grandes volumes de água em caso de incêndio; alerta para a possibilidade de re ignição.
Toyota	Utilizar grandes quantidades de água para combater incêndios na bateria de alta tensão; permitir que a bateria queime, caso a aplicação de água seja inviável; alerta para o risco de re ignição; consultar o layout do veículo antes do manuseio de amortecedores a gás ou molas pré-carregadas, pois podem se tornar projéteis.

Continua...

Continuação

Fabricante	Recomendações
Hyundai	Usar grandes volumes de água em caso de incêndios que envolvam a LIB; utilizar extintores ABC para pequenos focos, sem envolvimento da bateria a fabricante; desativar o sistema de alta voltagem; usar EPIs adequados; monitorar a temperatura com câmeras térmicas para evitar reiguição antes de remover o veículo, em caso de danos ou vazamento de eletrólito.
Volkswagen	Evitar a propagação do fogo para dispositivos de armazenamento de energia, como tanques de combustível ou baterias; utilizar agentes extintores comuns, como água, espuma, CO ₂ ou pó, considerar a situação específica e os recursos disponíveis no local.
Honda	Usar EPI para manusear cabos ou componentes de alta tensão ao extinguir incêndios em baterias; utilizar grande volume de água, direcionado às áreas sob os bancos dianteiros, mantendo a aplicação até cessar sinais de fogo ou fumaça; utilizar um extintor ABC, caso a água não esteja disponível; monitorar a temperatura da bateria com uma câmera térmica após a extinção para evitar reiguição.
Mitsubishi	Usar grandes volumes de água ou extintor ABC em incêndios veiculares, mantendo uma distância segura; utilizar EPI adequado devido à liberação de vapores tóxicos em incêndios em baterias elétricas; desconectar a alta tensão seguindo procedimentos específicos após o incêndio, sempre utilizando EPI isolante; usar folhas isolantes para prevenir choques elétricos no transporte do veículo ou da bateria.

Fonte: Elaborada a partir de dados da Emergency response guides.²³

Em resumo, as recomendações gerais dos fabricantes incluem: aplicação de grandes volumes de água, utilização de EPI e EPRA, monitoramento da temperatura e uso de extintores do tipo ABC. A

Figura 16 compila essas orientações. Vale destacar que os fabricantes que não mencionam esses aspectos em seus documentos simplesmente omitem essas informações, sem apresentar recomendações contrárias²².

Fabricante	Grandes volumes de água	Uso de EPI e EPRA	Monitorar temperatura	Extintor ABC
Nissan	✓	✓	✓	✓
Porsche	✓	-	-	-
Stellantis	✓	-	✓	-
Tesla	✓	✓	✓	✓
BYD	✓	-	-	-
Toyota	✓	-	-	-
Hyundai	✓	✓	✓	✓
Volkswagen	✓	-	-	-
Honda	✓	✓	✓	✓
Mitsubishi	✓	✓	-	✓

Fonte: Elaborada a partir de dados da Emergency response guides.²³

Figura 24 - Recomendações gerais dos fabricantes de veículos eletrificados

14.8. Protocolo de atuação

Objetivo: estabelecer diretrizes operacionais para o combate a incêndios em veículos eletrificados, com foco na segurança das equipes de resgate, eficiência da resposta e minimização dos impactos ambientais.

a) Identificação do veículo

- Verificar a presença de cabeamento laranja, ausência de escapamento e conectores de recarga;
- Observar emblemas ou simbologia indicativa de veículo eletrificado;
- Confirmar via painel (quando operacional) se o sistema de alta tensão está ativo.

b) Isolamento e segurança inicial

- Isolar a área;
- Evacuar civis e manter distância segura para as equipes;
- Imobilizar o veículo (câmbio em "P" ou neutro, freio de mão);
- Utilização obrigatória de EPI completo, incluindo EPRA;

Atenção a ambientes fechados como garagens e túneis!

c) Desativação do sistema elétrico

- Desligar ignição e remover a chave;
- Desconectar a bateria de 12V;
- Localizar e desconectar o plugue de serviço de alta tensão conforme modelo do fabricante.

Jamais cortar cabos de alta tensão!

d) Combate ao incêndio

- Aplicar grandes volumes de água em névoa ou *spray* diretamente sobre a carcaça da bateria;
- Direcionar água nas áreas onde fica localizada a bateria;

- Permitir queima controlada se combate for inviável (conforme recomendação de fabricante);
- Empregar cobertor de incêndio para contenção térmica, sem expor equipe à fumaça;
- Alternativas: CO₂ ou pó químico (em casos específicos);
- Extintores ABC para pequenos focos;
- Evitar submersão, exceto em ambiente controlado.

e) Cuidados com gases tóxicos

- Utilização obrigatória de EPRA;
- Promover ventilação;
- Atenção a HF, HCN, CO, NO₂;
- Evitar exposição da guarnição e população.

f) Reavaliação final da ocorrência

- Verificar sinais de reignição: presença de fumaça, faíscas, sons de borbulhamento;
- Utilizar câmera térmica para monitorar temperatura;
- Monitoramento mínimo de 1 hora após extinção;
- Confirmar temperatura ambiente no conjunto da bateria;
- Realizar resfriamento adicional, se necessário;
- Não armazenar em local fechado se houver risco.

g) Encerramento da ocorrência

- Revisão final com câmera térmica;
- Lavagem e descontaminação dos EPIs;
- Registro completo da ocorrência: temperatura, duração do monitoramento.

A atuação em incêndios envolvendo veículos eletrificados requer preparação técnica, atualização contínua e equipamentos adequados.

A aplicação de grandes volumes de água, o monitoramento da temperatura e o conhecimento sobre o veículo são fatores essenciais para uma resposta segura e eficaz.

Bibliografia

- ¹BISSCHOP, R.; WILLSTRAND, O.; AMON, F.; ROSENGREN, M. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. *Research Institute of Sweden - RISE*. RISE Report 2019:50. Borås, 2019.
- ²HELD, M. TUCHSCHMID, M.; ZENNEGG, M.; FIGI, R.; SCHREINER, C.; MELLERT, L. D.; WELTE, U.; KOMPATSCHER, M.; HERMANN, M.; NACHEF, L. Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 165, p. 1-13, 2022.
- ³ŁEBKOWSKI. A. Electric Vehicle Fire Extinguishing System. *Przegląd Elektrotechniczny*. v. 93(1), p. 329-332. Gdynia, 2017.
- ⁴KUMAR, L.; GUPTA, K.K.; JAIN, S. Architecture and configuration of electrified vehicles: A review. In: *2013 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Taipei, Taiwan, 2013, pp. 1-6.
- ⁵LONG JR., R. T.; BLUM, A. F.; BRESS, T. J.; COTTS, B. R. T. *Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicle Battery Hazards*. A Report on Full-Scale Testing Results. 1. ed. Quincy, 2013.

⁶ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). *Quais são os tipos de veículos eletrificados?* São Paulo, 2024.

⁷LIU, C.; CHAU, K. T.; WU, D.; GAO, S. Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. *Proceedings of the IEEE*. v. 101, n. 11, p. 2409-2427. 2013.

⁸BIBIANO, L. M. *Estimativa da inserção de veículos elétricos no brasil até o ano de 2030*. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2025.

⁹NEOCHARGE. *Veículos Elétricos pelo Brasil*. São Paulo, 2025.

¹⁰UN, C.; AYDIN, K. Thermal runaway and fire suppression for electric vehicle batteries. In: *International Conference on Progresses in Automotive Technologies*, Istanbul. 2020

¹¹NTSB (National Transportation Safety Board). *Safety Risks to Emergency Responders from Lithium-Ion Battery Fires in Electric Vehicles*. Washington, 2020.

¹²MSB (Myndigheten för samhällsskydd och beredskap). *Vägledning - Räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer*. Stockholm, 2024.

¹³SUN, P.; BISSCHOP, R.; NIU, H.; HUANG, X. *A Review of Batteries Fires in Electric Vehicles. Fire Technology*, v. 56, 2020.

¹⁴GHIJI, M.; NOVOZHILOV, V.; MOINUDDIN, P. J.; BURCH, I.; SUENDERMAN, B.; GAMBLE, G. A Review of Lithium-Ion Battery Fire Suppression. *Energies*, vol. 13, 2020.

¹⁵GEHANDLER, J.; KARLSSON, P.; VYLUND, L. Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages. *SP Technical Research Institute of Sweden - RISE*, SP Report 2017:14. Borås, 2017.

¹⁶ANDERSSON, P.; WIKMAN, J.; ARVIDSON, M.; LARSSON, F.; WILLSTRAND, O. Safe introduction of battery propulsion at sea. *Research Institute of Sweden - RISE*. SP Rapport 2017:34. Borås, 2017.

¹⁷NITTA, N.; WU, F.; LEE, J. T.; YUSHIN, G. Li-Ion Battery Materials: Present and Future. *Materials Today*, vol. 18, p. 252-264, 2015.

¹⁸BUGRYNIEC, P. J.; RESENDIZ, E. G.; NWOPHOKE, S. M.; KHANNA, S.; JAMES, C.; BROWN, S. F. Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure — Considering toxic and flammable compounds. *Journal of Energy Storage*, v. 87, 2024.

¹⁹HYNYNEN, J.; WILLSTRAND, O.; BLOMQVIST, P.; ANDERSSON, P. Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, v. 139, p. 103829, 2023.

²⁰QUANT, M.; WILLSTRAND, O.; MALLIN, T.; HYNENEN, J. Ecotoxicity Evaluation of Fire-Extinguishing Water from Large-Scale Battery and Battery Electric Vehicle Fire Tests. *Environmental Science e Technology*, v. 57, p. 4821-4830, 2023.

²¹LECOCQ, A.; BERTANA, M.; TRUCHOT, B.; MARLAIR, G. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. In: *International Conference on Fires in Vehicles*, 2012. Chicago: FIVE 2012. p.183-194.

²²AUSTRALIAN GOVERNMENT. EV *FireSafety: Enhancing safety for emergency responders at electric vehicle traction battery fires*. Australia: Department of Defense, 2021.

²³NFPA (National Fire Protection Association). *Emergency response guides*. USA, 2025.