

ELETROMOBILIDADE COM BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO E A SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS

Trabalho de Perícia ou Inspeção Predial

AMARILIO DA SILVA MATTOS JR
GEOVANA CHAVES LISBOA SALIBA

João Pessoa - PB
2025

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



ELETROMOBILIDADE COM BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO E A SEGURANÇA DAS ESTRUTURAS

RESUMO

O presente trabalho técnico aborda os aspectos fundamentais dos carros elétricos analisando desde o marco regulatório brasileiro até os desafios ambientais, tecnológicos e de segurança associados à sua implementação. O trabalho examina a legislação vigente, incluindo o Projeto de Lei 6020/2019 e normas da ABNT, destacando os incentivos fiscais para mobilidade elétrica. Na perspectiva ambiental são apresentadas visões positivas quanto à redução de emissões de CO₂ e negativas relacionadas à mineração de lítio e descarte de baterias, incluindo a sustentabilidade do ciclo produtivo. O trabalho analisa o mercado nacional e internacional de lítio, posicionando o Brasil como a 7ª maior reserva mundial. Tecnicamente, são detalhados os tipos de baterias de íons de lítio, suas reações químicas, processos de carga e métodos de armazenamento. A análise comparativa entre carros elétricos, etanol e gasolina demonstra vantagens econômicas e ambientais dos veículos elétricos no longo prazo. Os riscos de incêndio, toxicidade e impactos em edificações são avaliados, bem como as medidas preventivas e de combate. Conclui-se que o futuro sustentável dos carros elétricos depende do desenvolvimento de novas tecnologias de baterias e adequação da infraestrutura de segurança.

Palavras-chave: *Carro elétrico; Legislação; Segurança; Sustentabilidade; Bateria de lítio;*

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



SUMÁRIO

1. DESENVOLVIMENTO.....	4
2. CONCLUSÃO.....	24
3. REFERÊNCIAS.....	25

REALIZAÇÃO:



PATROCÍNIO:



1. DESENVOLVIMENTO

1.1 INTRODUÇÃO

O carro elétrico representa uma das mudanças mais significativas do setor automotivo contemporâneo, constituindo-se como alternativa sustentável aos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis. O veículo elétrico, embora não seja uma tecnologia nova, experimentou um renascimento notável nas últimas duas décadas. Os primeiros veículos elétricos comerciais datam do século XIX, mas foram gradualmente substituídos pelos motores a combustão devido às limitações tecnológicas da época, particularmente relacionadas ao armazenamento de energia e autonomia.

Esta revolução contemporânea emergente começou efetivamente no início dos anos 2000, com o desenvolvimento de baterias de íons de lítio mais eficientes e o surgimento de empresas inovadoras no setor. A convergência de fatores tecnológicos, ambientais e econômicos criou um ambiente propício para o crescimento exponencial desta indústria e fundamenta-se na utilização de motores elétricos alimentados por baterias recarregáveis, prometendo redução substancial das emissões de gases de efeito estufa e maior eficiência energética. A transição para a mobilidade elétrica não se limita apenas à substituição do sistema de propulsão, mas envolve uma transformação completa da cadeia produtiva automotiva, da infraestrutura urbana e dos hábitos de consumo.

A evolução dos veículos elétricos pode ser categorizada em diferentes modalidades tecnológicas, cada uma com características específicas de operação e dependência energética. Os veículos totalmente elétricos (*Battery Electric Vehicle - BEV*) operam exclusivamente com energia elétrica armazenada em baterias, enquanto os veículos híbridos (*Hybrid Electric Vehicle - HEV*) combinam motor elétrico e motor a combustão interna. Os híbridos plug-in (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV*) permitem recarga externa das baterias, ampliando a autonomia elétrica. E finalmente os veículos a célula de combustível (*Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV*) utilizam hidrogênio para gerar eletricidade.

Segundo a ABVE (Associação Brasileira do Veículo Elétrico) a frota brasileira atualmente conta com 413.279 veículos eletrificados, e o mercado tem crescido vertiginosamente. E diante desse considerável aumento da frota, surgem questionamentos relacionados à segurança contra incêndio, aos riscos envolvidos e questões de como lidar com as especificidades, levando em consideração que os veículos elétricos ficam na maioria das vezes estacionados em garagens cobertas e/ou em subsolos de edificações.

O contexto brasileiro apresenta particularidades importantes para a adoção de veículos elétricos, considerando a matriz energética predominantemente renovável e a tradição na produção de biocombustíveis. A disponibilidade de recursos minerais estratégicos, especialmente o lítio, posiciona o país como potencial protagonista na cadeia produtiva global de baterias para veículos elétricos. Simultaneamente, os desafios relacionados à infraestrutura de recarga, custos de aquisição e adaptação regulatória demandam análise criteriosa para viabilizar a transição energética no setor de transportes.

1.2 Legislação

O marco regulatório brasileiro para veículos elétricos encontra-se em processo de consolidação, envolvendo múltiplas esferas governamentais e organismos normativos. O Projeto de Lei 6020/2019 representa o principal instrumento legislativo federal para promoção da mobilidade elétrica, estabelecendo diretrizes para incentivos fiscais, investimentos em pesquisa e desenvolvimento da infraestrutura de recarga. Esta proposição legislativa prevê redução do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para veículos elétricos e híbridos, bem como isenção de taxas de importação para componentes não produzidos nacionalmente.

O Programa Rota 2030, instituído pela Lei 13.755/2018, incorpora metas específicas para eficiência energética veicular e incentiva o desenvolvimento de tecnologias de eletrificação. O programa estabelece sistema de bonificação fiscal para montadoras que investirem em pesquisa, desenvolvimento e inovação, incluindo tecnologias relacionadas a veículos elétricos e híbridos. As metas de eficiência energética progressivas até 2030 direcionam a indústria automotiva para soluções de menor consumo e menores emissões.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) vem desenvolvendo conjunto abrangente de normas específicas para veículos elétricos e infraestrutura associada. A NBR 17019:2022 estabelece requisitos de segurança para instalações de recarga de veículos elétricos, definindo critérios para projeto, instalação e manutenção de pontos de carregamento. Esta norma aborda aspectos de segurança elétrica, sinalização, proteção contra incêndios e compatibilidade eletromagnética, garantindo padrões mínimos de segurança para usuários e edificações.

No âmbito ambiental, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) estabelece responsabilidades para fabricantes e importadores de baterias automotivas, incluindo aquelas utilizadas em veículos elétricos. A logística reversa obrigatória para baterias visa garantir destinação ambientalmente adequada ao final da vida útil, prevenindo contaminação ambiental e promovendo recuperação de materiais valiosos. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) desenvolveu resoluções específicas para classificação e gerenciamento de resíduos perigosos oriundos de baterias, porém ainda não há no Brasil protocolo local específico para transporte e/ou local para armazenamento e descarte de baterias de veículos elétricos.

Estados e municípios brasileiros implementaram legislações complementares para incentivo à mobilidade elétrica, incluindo isenção de Imposto sobre Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), utilização de faixas exclusivas e gratuidade em estacionamentos públicos. São Paulo, Rio de Janeiro e Distrito Federal lideram iniciativas de incentivos locais, criando ambiente regulatório favorável para adoção de veículos elétricos.

A Lei Municipal 17.336/2020 exige a previsão de infraestrutura para carregamento de veículos elétricos em condomínios residenciais e comerciais da cidade de São Paulo.

Diante do crescente mercado de veículos elétricos em países como EUA, Coréia do Sul, China e Brasil, diversas entidades como a FSRI (*Fire Safety Research Institute*), UL (*UL Research Institutes*), Corpo de Bombeiros e Universidades estão trabalhando em pesquisas na tentativa de compreender a dinâmica do fogo em caso

de incêndio, a fim de estabelecer formas eficientes para a extinção do mesmo, possibilitando melhorias que possam mitigar o risco e aumentar a segurança patrimonial e de proteção da vida, em caso de incêndio.

1.3 Questão ambiental e sustentabilidade

1.3.1 Visão positiva

A perspectiva ambiental favorável aos veículos elétricos fundamenta-se primariamente na significativa redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo de todo o ciclo de vida útil. Estudos do ciclo de vida demonstram que veículos elétricos emitem, aproximadamente, 30% menos dióxido de carbono comparativamente aos veículos convencionais, considerando a produção do veículo, operação e destinação final. Esta vantagem ambiental torna-se mais pronunciada em países com matriz energética renovável, como o Brasil, onde fontes hidrelétricas, eólicas e solares respondem por mais de 80% da geração de eletricidade.

A eliminação das emissões diretas de poluentes atmosféricos constitui benefício imediato dos veículos elétricos para a qualidade do ar urbano. A ausência de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados e material particulado contribui significativamente para redução da poluição atmosférica em centros urbanos. Segundo a ONU e a Sociedade Brasileira de Pneumologia e Tisiologia esta característica é particularmente relevante para saúde pública, considerando que a poluição do ar causa mortalidade prematura anualmente e está associada a doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas.

Segundo o *US Department of Energy* a eficiência energética superior dos motores elétricos, tipicamente entre 85-95%, comparada aos 25-35% dos motores a combustão interna, resulta em melhor aproveitamento da energia primária. Esta eficiência se traduz em menor demanda energética total para a mobilidade, reduzindo pressões sobre recursos naturais e infraestrutura energética. A regeneração de energia durante frenagem, característica exclusiva dos veículos elétricos, contribui adicionalmente para otimização do consumo energético.

Os veículos elétricos também contribuem para a redução da poluição sonora urbana, operando com níveis de ruído substancialmente inferiores aos veículos convencionais. Esta característica melhora significativamente a qualidade de vida em áreas densamente povoadas, representando um benefício adicional.

A integração dos veículos elétricos com fontes renováveis de energia cria oportunidades de sinergia para descarbonização do setor de transportes. Sistemas de carregamento inteligente podem ser sincronizados com a disponibilidade de energia solar e eólica, maximizando o uso de fontes limpas e contribuindo para estabilização da rede elétrica. A tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) permite que veículos elétricos funcionem como dispositivos de armazenamento distribuído, fornecendo energia de volta à rede durante picos de demanda.

A redução da dependência de combustíveis fósseis importados representa benefício geopolítico e econômico da eletrificação veicular. Para o Brasil, que importa significativa parcela dos derivados de petróleo consumidos, a substituição por eletricidade de origem nacional contribui para balança comercial e segurança

energética. A diversificação da matriz de transportes reduz vulnerabilidades a flutuações de preços internacionais de petróleo e instabilidades geopolíticas.

1.3.2 Visão negativa

Apesar dos benefícios operacionais, a cadeia produtiva de veículos elétricos apresenta desafios ambientais significativos. A mineração de lítio, cobalto, níquel e outros minerais estratégicos frequentemente ocorre em regiões ecologicamente sensíveis ou socialmente vulneráveis, resultando em degradação de ecossistemas, consumo excessivo de água, geração de resíduos tóxicos e deslocamento de comunidades tradicionais. O processo de mineração do lítio em salares, particularmente no triângulo do lítio (Chile, Argentina e Bolívia), consome entre 400.000 a 2 milhões de litros de água por tonelada de lítio produzida.

Salares é uma planície natural coberta de sal, formada pela evaporação de um lago ou rio que continha altas concentrações de sais. A palavra "salar" é da língua espanhola e refere-se a este tipo de formação geográfica.

A pegada de carbono da produção de baterias de lítio é substancial, representando entre 30-50% das emissões totais do ciclo de vida de um veículo elétrico. O processo de fabricação das células, que envolve altas temperaturas e processos químicos intensivos em energia, resulta em emissões significativas quando realizado em países com matriz energética baseada em combustíveis fósseis. China, principal produtor mundial de baterias, utiliza predominantemente carvão mineral para geração de eletricidade, amplificando a pegada de carbono dos componentes.

A questão do descarte e reciclagem de baterias automotivas representa desafio ambiental de longo prazo ainda não completamente resolvido. Embora as baterias de íon-lítio contenham materiais valiosos recuperáveis, os processos de reciclagem atuais são tecnicamente complexos, economicamente desafiadores e ambientalmente impactantes. A falta de infraestrutura adequada de reciclagem pode resultar em acúmulo de resíduos perigosos, incêndios e explosões, contaminação de solos e águas subterrâneas com metais pesados e compostos orgânicos tóxicos.

A concentração geográfica da produção de materiais críticos para baterias cria dependências estratégicas preocupantes e impactos ambientais concentrados. A República Democrática do Congo controla aproximadamente 70% da produção mundial de cobalto, frequentemente extraído em condições ambientais e sociais inadequadas. Esta concentração resulta em pressões ambientais intensas em regiões específicas, enquanto os benefícios do transporte limpo são usufruídos globalmente.

O aumento da demanda por eletricidade decorrente da eletrificação massiva do transporte pode intensificar pressões sobre sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Em países com matriz energética predominantemente fóssil, o aumento do consumo elétrico para transportes pode paradoxalmente resultar em aumento das emissões totais. A necessidade de expansão da infraestrutura elétrica, incluindo novas usinas, linhas de transmissão e sistemas de distribuição, implica impactos ambientais adicionais.

De acordo com Dai *et al.* (2025), apesar de todos os avanços da tecnologia das baterias de íons de lítio, o fenômeno da fuga térmica é o principal e mais complexo mecanismo de falha, que pode levar a incêndio e explosões. A fuga térmica é um termo padrão que significa uma reação descontrolada ou irreversível (*thermal runaway*)

ou *runaway reaction*). Dessa forma, mais pesquisas são necessárias, a fim de entender todos os processos e mecanismos da fuga térmica, que podem ser rapidamente influenciados por condições externas e reações internas das baterias de íons de lítio, e com isso pode melhorar a segurança das mesmas.

A fuga térmica nas baterias de íons de lítio, produzem calor e gás, e ela pode ocorrer por causas comuns como mal uso mecânico (colisão, extrusão, penetração), mal uso elétrico (curto-circuito elétrico, sobrecarga, descarga excessiva) ou mal uso térmico (superaquecimento). Assim como por danos como deformação mecânica, crescimento de dendritos de lítio ou pirólise (reação de decomposição por meio de calor).

Segundo Barowy (2024), à medida que os veículos elétricos vão dominando o mercado mundial, “pode-se esperar que os incidentes térmicos e incêndios envolvendo esses veículos ocorram com maior frequência”. E como ainda não há informações suficientes, que consiga caracterizar totalmente a dinâmica do fogo em caso de incêndio em veículos elétricos, a fim de criar estratégias seguras e eficazes de controle para melhorar as táticas de enfrentamento dos potenciais perigos envolvendo o carro elétrico e as baterias de íons de lítio, medidas mitigatórias vão sendo criadas na tentativa de auxiliar os Bombeiros.

Episódios de incêndios em edificações pelo mundo, estão se tornando mais frequentes e envolvem perdas sociais e econômicas. Contudo, edificações podem entrar em colapso durante ou após um incêndio, e desta forma, é de suma importância entender o comportamento dos elementos que compõe uma estrutura de concreto armado, autoportante ou mista quando expostas a altas temperaturas, assim como é imprescindível entender como os perigos dos gases gerados pela fuga térmica em baterias e ausência de ventilação em garagens podem afetar na segurança.

1.3.3 Mercado e produção de lítio

O mercado global de lítio experimenta expansão acelerada impulsionada pela crescente demanda por baterias de veículos elétricos, dispositivos eletrônicos portáteis e sistemas de armazenamento de energia estacionária. A demanda mundial de lítio cresceu de aproximadamente 180.000 toneladas de equivalente de carbonato de lítio (LCE) em 2015 para mais de 500.000 toneladas em 2022, com projeções indicando necessidade de 3 milhões de toneladas até 2030. Este crescimento exponencial resulta em transformações significativas na geografia da produção mineral e nas dinâmicas geopolíticas associadas.

O “triângulo do lítio” sul-americano, compreendendo Chile, Argentina e Bolívia, segundo *United States Geological Survey* (USGS), concentra aproximadamente 56% das reservas mundiais conhecidas de lítio. Ainda segundo o *U.S. Geological Survey* (USGS) os maiores produtores mundiais são: Austrália com 88.000 ton/ano, Chile com 49.000 ton/ano e China com 41.000 ton/ano. O Brasil ocupa a 5ª posição com 15.000 ton/ano.

O Chile produz lítio extraídas principalmente do Salar de Atacama através de processos de evaporação solar que requerem 12-18 meses para concentração das salmouras. A Austrália consolidou-se como importante produtor através da mineração de rocha dura (*spodumene*), especialmente na mina Greenbushes, operada pela Talison Lithium. Esta rota tecnológica permite produção mais rápida

comparativamente à evaporação de salmouras, mas demanda maior intensidade energética e gera maiores impactos ambientais locais. A China, embora possua reservas limitadas, domina o processamento e refino de lítio, controlando mais de 60% da capacidade global de produção de compostos de lítio de grau bateria.

No contexto nacional, o Brasil posiciona-se como líder emergente na produção de lítio, concentrando aproximadamente 8% das reservas mundiais identificadas. Várias empresas já operam ou querem operar em Minas Gerais, onde estão localizados mais de 80% dos depósitos de lítio conhecidos do Brasil. As principais jazidas localizam-se em Minas Gerais, especialmente no Vale do Jequitinhonha, onde a CBL (Companhia Brasileira de Lítio) opera a mina Cachoeira, município de Araçuaí, e também na região de Araçuaí, a Sigma Lithium desenvolve projetos de classe mundial. As reservas brasileiras são predominantemente do tipo rocha dura (pegmatitos), com vantagens logísticas devido à proximidade de infraestrutura portuária e centros de consumo.

Os pedidos feitos ao governo federal para pesquisar e explorar o mineral em Minas Gerais saltaram quase 18 vezes, de 45 em 2021 para 851 em 2023. Este crescimento demonstra o interesse crescente na exploração nacional de lítio, impulsionado pela demanda global por baterias de veículos elétricos.

No entanto, as exportações do mineral ocorrem sem agregar valor de modo a favorecer o desenvolvimento de uma cadeia produtiva interna. O concentrado de espodumênio representa o principal produto de exportação, embora existam iniciativas para desenvolvimento de produtos de maior valor agregado, como carbonato e hidróxido de lítio.

A estratégia brasileira para o setor de lítio enfatiza agregação de valor através do desenvolvimento de capacidades de processamento e refino nacional. O governo federal lançou o Programa Nacional de Lítio, visando incentivar investimentos em toda a cadeia produtiva, desde a mineração até a fabricação de baterias.

1.4 Bateria de íon de lítio

1.4.1 Como funciona

O princípio de funcionamento das baterias de lítio baseia-se no movimento reversível de íons de lítio entre dois eletrodos (o ânodo e o cátodo) através de um eletrólito (condutor iônico). Durante o carregamento, os íons de lítio migram do eletrodo positivo (cátodo) para o negativo (ânodo), processo que é revertido durante a descarga. O ânodo, tipicamente composto por grafite, recebe e armazena os íons de lítio durante o carregamento através de um processo chamado intercalação. A estrutura cristalina do grafite permite que os íons de lítio se insiram entre suas camadas sem causar danos estruturais significativos.

O eletrólito, uma solução de sais de lítio em solventes orgânicos, permite a condução iônica entre os eletrodos enquanto impede a condução eletrônica. Sua composição química é crucial para o desempenho, segurança e durabilidade da bateria, influenciando fatores como resistência interna, estabilidade térmica e janela eletroquímica.

Durante o processo de descarga, os íons de lítio migram do ânodo (eletrodo negativo) para o cátodo (eletrodo positivo) através do eletrólito, enquanto os elétrons

percorrem o circuito externo, fornecendo energia elétrica para alimentar o motor do veículo. Este fluxo de elétrons constitui a corrente elétrica que alimenta todos os sistemas eletrônicos e o motor de tração do veículo elétrico.

O processo de carga inverte o fluxo iônico, com os íons de lítio retornando do cátodo para o ânodo através da aplicação de tensão externa. Durante o carregamento, energia elétrica da rede ou de fontes renováveis é convertida em energia química. A eficiência deste processo de conversão é tipicamente superior a 95%, representando vantagem significativa comparativamente a outras tecnologias de armazenamento de energia.

Os óxidos metálicos utilizados como materiais catódicos, como óxido de cobalto lítio (LiCoO_2), fosfato de ferro lítio (LiFePO_4) ou óxido de níquel manganês cobalto lítio (NMC), possuem estruturas em camadas ou tridimensionais que acomodam a inserção e extração dos íons de lítio. A estrutura cristalina dos materiais catódicos permite intercalação reversível dos íons de lítio sem degradação significativa da estrutura durante milhares de ciclos de carga e descarga. Importante fator para vida útil da bateria.

O sistema de gerenciamento da bateria (*Battery Management System* - BMS) monitora continuamente parâmetros críticos como tensão, corrente, temperatura e estado de carga de cada célula individual. Este sistema eletrônico sofisticado garante operação segura através do balanceamento de cargas entre células, proteção contra sobrecarga e sobredescarga, controle térmico e diagnóstico de falhas. O BMS também otimiza a performance da bateria através de algoritmos que estimam a capacidade restante e a vida útil remanescente.

A arquitetura modular das baterias automotivas permite escalabilidade da capacidade energética através da conexão em série e paralelo de células individuais. Os módulos são organizados em packs que incluem sistemas de resfriamento, monitoramento eletrônico e proteções mecânicas. A tensão nominal dos packs automotivos varia tipicamente entre 350-800 volts, proporcionando potência adequada para tração veicular e permitindo carregamento rápido em corrente contínua.

1.4.2 Composição – lítio e outros elementos

A composição química das baterias de íons de lítio varia significativamente dependendo da tecnologia específica utilizada. O lítio representa tipicamente entre 1% a 2% da massa total da bateria, mas sua função é crítica para o funcionamento do sistema. Apesar de sua pequena proporção em massa, o lítio desempenha um papel crucial no funcionamento das baterias de íons de lítio.

A composição química das baterias de íons de lítio varia significativamente dependendo da tecnologia específica utilizada. As principais químicas de cátodo incluem:

- NMC (Níquel-Manganês-Cobalto)
- LFP (Fosfato de Ferro-Lítio)
- NCA (Níquel-Cobalto-Alumínio)
- LMO (Óxido de Manganês de Lítio)
- LCO (Óxido de Cobalto de Lítio)

Cada uma dessas químicas possui diferentes proporções de materiais ativos, influenciando características como densidade de energia, segurança, custo e vida útil da bateria. A composição das baterias de lítio envolve múltiplos materiais cuidadosamente selecionados para otimizar performance, segurança e durabilidade. O ânodo é tipicamente constituído por grafite sintético ou natural, que oferece capacidade de armazenamento de íons de lítio de aproximadamente 372 mAh/g (miliampère-hora por grama). Desenvolvimentos recentes incluem materiais anódicos avançados como silício, que pode armazenar até 4.200 mAh/g, embora apresente desafios relacionados à expansão volumétrica durante os ciclos de carga.

Os materiais catódicos determinam largamente as características de performance da bateria, incluindo densidade energética, estabilidade térmica e custo. O óxido de cobalto lítio (LiCoO_2) oferece alta densidade energética (140-180 Wh/kg) mas apresenta limitações de estabilidade térmica e custo elevado devido ao cobalto. O fosfato de ferro lítio (LiFePO_4) proporciona excelente estabilidade térmica e longevidade, embora com densidade energética menor (90-120 Wh/kg).

Os óxidos ternários como NMC (níquel-manganês-cobalto) e NCA (níquel-cobalto-alumínio), tecnologias catódicas de última geração, combinam vantagens de diferentes metais de transição.

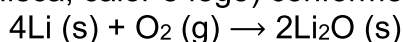
O eletrólito das baterias de íon-lítio consiste em sais de lítio dissolvidos em solventes orgânicos, tipicamente carbonatos como etileno carbonato (EC), dimetil carbonato (DMC) e dietil carbonato (DEC). O hexafluorofosfato de lítio (LiPF_6) constitui o sal mais comumente utilizado, embora apresente instabilidade térmica e formação de ácido fluorídrico em presença de umidade. Aditivos específicos são incorporados para melhorar estabilidade térmica, formar camadas protetivas nos eletrodos e suprimir reações parasíticas.

O separador, componente crítico para segurança, é constituído por membranas poliméricas microporosas, geralmente polietileno (PE) ou polipropileno (PP), que impedem contato direto entre os eletrodos, mas permitem transporte iônico. Separadores multicamada incorporam materiais cerâmicos como óxido de alumínio para melhorar estabilidade térmica e desligar em altas temperaturas. A espessura típica varia entre 12-25 μm , representando compromisso entre segurança e densidade energética.

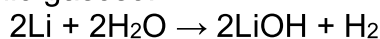
Ou seja, a composição das baterias de lítio inclui uma enorme gama de produtos químicos e minerais.

1.4.3 Reação química

O lítio puro, é um metal alcalino altamente reativo que reage com o ar da atmosfera de maneira exotérmica. Quando exposto ao oxigênio, ele forma óxido de lítio (Li_2O), liberando energia (faísca, calor e fogo) conforme a reação química:



Essa reação ocorre rapidamente, especialmente em condições úmidas, onde o lítio pode também reagir com a água presente na umidade, formando hidróxido de lítio (LiOH) e liberando hidrogênio gasoso:



A reação pode ser violenta devido à alta reatividade dos metais alcalinos (lítio) e pode causar inflamação espontânea do gás hidrogênio liberado.

As reações secundárias dentro da bateria, embora indesejáveis, são inevitáveis e incluem a decomposição do eletrólito e formação da interface eletrólito-eletrodo sólida (SEI).

A temperatura influencia significativamente a cinética das reações, com baixas temperaturas reduzindo a mobilidade iônica e altas temperaturas acelerando reações secundárias indesejáveis. O gerenciamento térmico adequado é crucial para otimizar desempenho e longevidade.

Quando o lítio entra em combustão, ele produz uma chama que pode ser inicialmente rubra, mas se a queima for intensa, a chama torna-se branca e brilhante. Essa reatividade intensa é uma das razões pelas quais o lítio deve ser armazenado em óleo mineral ou em ambientes controlados para evitar reações indesejadas com o ar e a umidade.

1.4.4 Carga da bateria

O processo de carregamento de baterias de íons de lítio requer controle preciso de corrente e tensão para garantir segurança, maximizar vida útil e otimizar tempo de carregamento. O carregamento típico segue o protocolo CC-CV (Corrente Constante - Tensão Constante), iniciando com corrente constante até atingir a tensão máxima permissível.

O carregamento rápido, possível com correntes superiores a 1C (C=capacidade de armazenamento da bateria), requer sistemas de gerenciamento térmico sofisticados e materiais otimizados. A temperatura durante o carregamento deve ser mantida entre 10°C e 45°C para operação segura, evitando decomposição do eletrólito e formação de gases.

Sistemas de carregamento rápido em corrente contínua (*DC Fast Charging*) utilizam potências entre 50-350 kW para reduzir tempos de carregamento a 15-30 minutos para 80% da capacidade. Estes sistemas requerem gerenciamento térmico ativo para dissipar calor gerado durante carregamento de alta potência, utilizando refrigeração líquida nos cabos de carregamento e sistemas de climatização nas baterias. A curva de potência é modulada conforme estado de carga e temperatura para otimizar velocidade e preservar vida útil. **Imagine que para manter a segurança do carregamento rápido é necessário resfriar os cabos e as baterias.**

Como visto acima, algumas das novas e diferentes tecnologias podem aumentar os riscos de incêndio e iniciar a fuga térmica ou *thermal reaction* do lítio (*run away reaction*).

1.4.5 Armazenamento e descarte

O armazenamento adequado de baterias de íons de lítio é crucial para preservar capacidade e prevenir degradação prematura. Para armazenamento de longo prazo, baterias em estoque devem ser mantidas com carga entre 40% a 60% da capacidade nominal, em temperatura entre 15°C a 25°C com umidade relativa inferior a 65% para minimizar corrosão de componentes metálicos e degradação de eletrólitos.

Temperaturas elevadas aceleram reações químicas parasíticas e decomposição de materiais orgânicos, enquanto temperaturas muito baixas podem

causar precipitação de sais e redução da condutividade iônica diminuindo a capacidade e vida útil da bateria.

A ventilação adequada dos locais de armazenamento é essencial para dispersão de gases potencialmente liberados durante falhas ou degradação das baterias. Sistemas de detecção de gases como fluoreto de hidrogênio (HF), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis devem ser implementados em instalações de grande escala. O projeto de instalações deve considerar resistência ao fogo, sistemas de supressão automática e rotas de evacuação adequadas para emergências.

As regulamentações internacionais para transporte de baterias de lítio, como UN3480 (baterias sozinhas) e UN3481 (baterias em equipamentos), estabelecem requisitos específicos para embalagem, etiquetagem e documentação. O transporte aéreo possui restrições adicionais devido aos riscos de incêndio em altitudes elevadas, limitando quantidade por embalagem e exigindo declarações específicas de materiais perigosos.

O descarte responsável de baterias automotivas envolve múltiplas etapas de processamento para recuperação de materiais valiosos e neutralização de componentes perigosos. Processos pirometalúrgicos utilizam altas temperaturas (1000-1500°C) para fundir metais e recuperar cobalto, níquel e cobre, embora resultem em perda de lítio e manganês. Métodos hidrometalúrgicos empregam soluções ácidas para dissolução seletiva de metais, permitindo recuperação de lítio e manganês com menor impacto energético.

No Brasil ainda não temos locais apropriados para armazenamento e descarte para baterias novas ou usadas, como protocolos inclusive de manuseio e transporte.

1.5 Carro elétrico vs. Etanol ou Gasolina

1.5.1 Custo inicial

A análise comparativa dos custos iniciais entre carros elétricos, veículos a etanol e gasolina revela diferenças substanciais que influenciam decisões de aquisição pelos consumidores. Os veículos elétricos apresentam custos iniciais significativamente superior, com preços típicos 40-80% acima de veículos convencionais equivalentes, principalmente devido ao custo das baterias que representa 30-40% do valor total do veículo.

O custo das baterias, principal componente do diferencial de preço, tem apresentado trajetória declinante consistente, reduzindo de aproximadamente US\$ 1.100/kWh em 2010 para US\$ 132/kWh em 2021, com projeções indicando paridade de custos com motores convencionais por volta de 2026-2027. Esta redução resulta de economias de escala na produção, melhorias nos processos de manufatura, desenvolvimento de químicas de menor custo e otimização das cadeias de suprimento globais.

Veículos flexfuel brasileiros que operam com etanol ou gasolina apresentam custos iniciais intermediários, beneficiando-se de tecnologia madura e produção em escala nacional.

Incentivos governamentais podem mitigar significativamente o diferencial de custo inicial dos veículos elétricos. Países como Noruega, Alemanha e China

oferecem subsídios diretos, isenções fiscais e benefícios não-monetários que reduzem efetivamente o custo de aquisição. No Brasil, propostas legislativas contemplam redução de IPI, ICMS e taxas de importação para veículos elétricos, além de incentivos específicos para produção nacional de componentes.

1.5.2 Custo no longo prazo

A análise de custo total de propriedade (*Total Cost of Ownership* - TCO) ao longo da vida útil demonstra vantagens econômicas crescentes dos veículos elétricos comparativamente a alternativas convencionais. O custo operacional total ou de longo prazo dos veículos elétricos é substancialmente inferior devido à maior eficiência energética dos motores elétricos (85-95%) versus motores a combustão (25-35%), resultando em custos energéticos 60-70% menores por quilômetro percorrido considerando tarifas residenciais médias brasileiras.

Os custos de manutenção dos veículos elétricos são significativamente reduzidos devido à menor complexidade mecânica, ausência de fluidos lubrificantes, filtros, velas e componentes de desgaste como embreagens e escapamentos. Estimativas indicam redução de 40-60% nos custos de manutenção preventiva, com intervalos estendidos. A frenagem regenerativa reduz desgaste de pastilhas e discos de freio, estendendo intervalos de substituição.

A depreciação dos veículos elétricos apresenta comportamento diferenciado, com desvalorização inicialmente mais acentuada devido à rápida evolução tecnológica, mas estabilização superior no longo prazo devido à durabilidade das baterias e menor desgaste mecânico. Garantias estendidas para baterias (tipicamente 8-10 anos ou 160.000 km) proporcionam segurança adicional aos proprietários e sustentam valores residuais. O mercado de veículos elétricos usados ainda está em formação. A tecnologia das baterias está evoluindo para durarem 15 a 20 anos, porém a ser comprovado.

1.5.3 Híbridos versus 100% elétrico

A comparação entre veículos híbridos e totalmente elétricos envolve múltiplos fatores como impacto ambiental, flexibilidade operacional, custos de manutenção e perfil de uso. Veículos híbridos convencionais (HEV) embora proporcionem economia de combustível em torno de 20% a 40% em relação aos veículos a combustão convencionais, os benefícios ambientais são limitados, pois ainda dependem majoritariamente de combustíveis fósseis.

Veículos híbridos (plugin) permitem rodar distâncias até 300 km (dependendo do modelo) em modo 100% elétrico, o que é suficiente para cobrir a maioria dos deslocamentos urbanos diários. Em viagens mais longas, o motor a combustão entra em ação, eliminando a preocupação com a autonomia. Essa configuração híbrida atende bem usuários que combinam trajetos urbanos frequentes com viagens ocasionais, aproveitando os benefícios do modo elétrico sem abrir mão da flexibilidade do abastecimento tradicional.

Veículos totalmente elétricos (BEV) oferecem os maiores benefícios ambientais e menores custos operacionais por quilômetro rodado, com zero emissões locais e menor necessidade de manutenção. Atualmente, a autonomia média dos BEVs varia entre 300 e 600 km, com alguns modelos premium superando os 700 km, graças ao

avanço na densidade energética das baterias. A infraestrutura de recarga também evoluiu significativamente, com redes públicas de carregamento rápido cada vez mais presentes, especialmente em centros urbanos e corredores rodoviários. Ainda assim, viagens longas podem exigir planejamento prévio, especialmente em regiões com menor cobertura de recarga rápida.

A escolha entre um veículo híbrido ou elétrico puro deve considerar o perfil de uso individual, a disponibilidade de infraestrutura de recarga, os custos totais de propriedade e os objetivos ambientais do usuário.

1.6 Riscos

1.6.1 Incêndio

O risco de incêndio em veículos elétricos apresenta características únicas comparativamente a veículos convencionais, principalmente devido ao fenômeno de fuga térmica nas baterias de lítio. Este processo auto catalítico ocorre quando temperatura interna da bateria excede limites críticos (tipicamente 130-140°C), resultando em decomposição térmica irreversível dos materiais ativos, eletrólitos e separadores, liberando gases inflamáveis e calor adicional que propagam a reação para células adjacentes.

A fuga térmica representa o principal mecanismo de ignição em baterias de íons de lítio durante ou após o carregamento. Durante o carregamento pode haver corrente irregular na bateria de lítio, aumentando sua temperatura e podendo ocorrer o incêndio.

Segundo Dai *et al.* (2025), o curto-circuito interno (ISC) que se caracteriza pelo encolhimento do separador entre o ânodo e o cátodo, é uma grande preocupação de segurança, pois pode desencadear ou agravar o processo de fuga térmica.

A sobrecarga é uma das principais causas de fuga térmica, podendo ser causada por mau funcionamento do carregador, falha do sistema de gerenciamento de bateria (BMS) ou operação inadequada. Quando há corrente irregular ou excessiva durante o carregamento, ocorre um aumento na temperatura que se ultrapassa limites seguros desencadeia reações irreversíveis e o processo de fuga térmica.

Segundo Chen *et al.* (2022), o aumento da taxa de temperatura, a temperatura média, a corrente e a tensão da bateria de potência de íons de lítio, são fatores e estão relacionados com a fuga térmica.

Os resultados mostram que a taxa de aumento de temperatura pode caracterizar de forma significativa a ocorrência da fuga térmica e, quando essa taxa ultrapassa 1°C/s, a bateria de íons de lítio apresenta alta probabilidade de fuga térmica. Além disso, quando a temperatura média excede 80°C, existe um risco potencial de fuga térmica nessas baterias.

Os resultados do estudo indicam que temperaturas elevadas levam mais tempo para desencadear a fuga térmica, e o aquecimento da bateria ocorre de forma mais lenta. O tempo necessário para que a fuga térmica ocorra, a temperatura e tensão máxima atingida estão fortemente relacionadas ao fluxo de sobrecarga ou em condições de abuso por sobrecarga.

Segundo Chen *et al.* (2022), estudos mostram que 45,71% das fugas térmicas ocorrem durante a condução em cenários mistos de carga e descarga, enquanto

41,91% acontecem quando o veículo está estacionado após carregamento completo. As principais causas incluem:

1. Curtos-circuitos internos: Podem ocorrer devido a defeitos de fabricação, contaminação por partículas estranhas ou danos mecânicos;
2. Envelhecimento da bateria: O processo natural de degradação pode criar condições propícias à fuga térmica;
3. Falhas no BMS: Problemas no sistema de gerenciamento da bateria podem permitir condições perigosas mesmo com o veículo desligado;
4. Formação de dendritos: Cristais que podem se formar entre ânodo e cátodo, criando caminhos para curtos-circuitos internos.

Segundo Sauer (2024), tanto baterias de íons de lítio encontradas em carros elétricos, como dispositivos de mobilidade eletrônica como bicicletas, patinetes, skates elétricos, e cortadores de grama, durante uma fuga térmica podem produzir gases capazes de comprometer uma estrutura ou os socorristas em caso de incêndio ou explosão.

A ignição de baterias de lítio pode ser desencadeada por múltiplos fatores, incluindo sobrecarga, danos mecânicos, penetração de objetos, superaquecimento externo, defeitos de manufatura ou degradação natural dos componentes. Uma vez iniciada, a fuga térmica é extremamente difícil de interromper devido à natureza exotérmica das reações químicas, podendo atingir temperaturas superiores a 1000°C e persistir por várias horas mesmo após extinção aparente das chamas visíveis.

A reignição constitui característica particularmente desafiadora dos incêndios em baterias de íons de lítio, com possibilidade de reacendimento espontâneo horas ou dias após extinção inicial. Este fenômeno resulta da persistência de pontos quentes internos, lítio residual e gases combustíveis acumulados no interior das células danificadas. Bombeiros reportam casos de reignição de até 72 horas após combate inicial, exigindo monitoramento prolongado e resfriamento contínuo das baterias afetadas.

Estatísticas de incidentes indicam que veículos elétricos apresentam frequência de incêndios inferior aos veículos convencionais. Dados coletados entre 2011 e 2020 mostram que, proporcionalmente, apenas 1,2% dos incêndios atingiram veículos elétricos, sendo 11 vezes menos propensos a pegar fogo do que os carros movidos a gasolina. Também devido a maior proporção dos carros convencionais e a idade da frota. Entretanto, a intensidade, duração e complexidade de combate dos incêndios em veículos elétricos requerem procedimentos específicos e equipamentos especializados por parte dos serviços de emergência.

1.6.2 Impacto nas edificações

O impacto de veículos elétricos nas edificações onde são estacionados ou carregando requer adaptações significativas nos projetos de segurança contra incêndio, sistemas de ventilação e infraestrutura elétrica. A concentração de veículos elétricos em garagens residenciais e comerciais cria cenários de risco diferenciados que demandam revisão de códigos de construção e normas de segurança predial para garantir proteção adequada de ocupantes e estruturas.

Outro ponto altamente danoso para o desempenho das estruturas em caso de incêndio, de acordo com Couri (2023) é o *spalling* ou lascamento que ocorre quando

o concreto é exposto a temperaturas elevadas, ocasionando a dilatação térmica do aço e consequente deslocamento, submetendo as armaduras à ação direta o fogo.

A carga térmica elevada das baterias de lítio, resulta em liberação de energia mais intensa durante incêndios. Esta característica pode exceder capacidades de resistência ao fogo de estruturas projetadas conforme padrões convencionais, especialmente em garagens subterrâneas com ventilação limitada. A temperatura de combustão superior que varia entre 1000°C e 1200°C, pode comprometer elementos estruturais de concreto e aço em tempos reduzidos comparativamente a incêndios convencionais.

Atualmente temos Normas como a NBR 6118, NBR 15200, NBR 16955, NBR 14323, NBR 14432 e Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros Estaduais, que regulamentam as exigências para a segurança das estruturas em situação de incêndio.

O Corpo de Bombeiros de São Paulo colocou em consulta pública o Parecer Técnico nº CCB-001/800/24 referente a Ocupações com Estações de Recarga para Veículos Elétricos, a fim de sugerir ações de Segurança Contra Incêndio para garantir a segurança das edificações, devido ao aumento da frota e consequente aumento da probabilidade de ocorrências. Como um incêndio em veículos elétricos é de difícil extinção, devido a bateria, a necessidade de grande volume de água, a alta dissipação de calor e gases tóxicos e ao elevado potencial de reinição do incêndio, o parecer é de extrema importância.

Diante da complexidade na extinção do fogo em caso de incêndio, alguns critérios foram estabelecidos, como: Instalação dos pontos de carregamento conforme NBR 17019; Instalações devem ser regularizadas por meio de projeto técnico completo, sendo vetado o licenciamento simplificado, com exceção em locais descobertos; Segurança estrutural sem nenhuma desobrigação; Afastamento mínimo de 5 metros entre vagas ou instalação de paredes corta-fogo com resistência de 60-90 minutos; Ponto de desligamento manual em cada estação de recarga; Para estacionamentos cobertos e subsolo, as medidas incluem instalação de chuveiros automáticos (sprinklers); Sistemas de detecção de incêndio e Sinalização de emergência referente a vaga que possui ponto de carregamento.

A infraestrutura elétrica predial requer *upgrading* substancial para acomodar múltiplos pontos de carregamento simultâneo, com demandas típicas de 7-22 kW por veículo. Garagens residenciais podem necessitar aumento da capacidade de entrada de energia elétrica de 10-15 kVA para 30-50 kVA para suportar carregamento de múltiplos veículos. Sistemas de gerenciamento de carga são essenciais para evitar sobrecarga da infraestrutura durante picos de demanda.

1.6.3 Toxicidade (fumaça)

A toxicidade dos gases liberados durante incêndios de baterias de lítio constitui risco significativo que diferencia substancialmente estes eventos de incêndios convencionais.

De acordo com o estudo experimental de Sauer *et al.* (2024) publicado na revista FUEL, os gases tóxicos e inflamáveis liberados durante a fuga térmica em baterias de íons de lítio (sejam de veículos elétricos, dispositivos de micromobilidade ou equipamentos como cortadores de grama) incluem principalmente:

- Monóxido de carbono (CO): Concentrações podem atingir 500 vezes o limite permitido pela OSHA (50 ppm em 8 horas). Causa asfixia e danos cardiovasculares. Em áreas fechadas podem causar inconsciência em minutos e morte.

- Compostos orgânicos voláteis (VOCs) diversos são liberados durante decomposição de eletrólitos, separadores poliméricos e materiais de encapsulamento, incluindo carbonatos, éteres e hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos. Muitos destes compostos apresentam propriedades carcinogênicas ou neurotóxicas que podem causar efeitos agudos e crônicos em indivíduos expostos, particularmente bombeiros e equipes de emergência.

- Formaldeído: Alcança até 150 vezes o limite da OSHA (*Occupational Safety and Health Administration* ou Administração de Segurança e Saúde Ocupacional dos EUA) de 0,75 ppm em 8 horas. Carcinógeno e irritante respiratório.

- Fluoreto de hidrogênio (HF): representa um dos compostos mais perigosos, formado através da decomposição térmica do eletrólito LiPF_6 em presença de umidade. Altamente corrosivo. Concentrações superiores a 3 ppm causam irritação e queimaduras severas na pele e nas vias respiratórias, enquanto exposições a 30 ppm por períodos prolongados podem ser fatais.

- Cianeto de hidrogênio (HCN): Neurotóxico que inibe a respiração celular. Detectado em quantidades perigosas.

- Hidrocarbonetos voláteis: Como etileno, acetileno e 1,3-butadieno (até 446 vezes o limite da OSHA). Inflamáveis e irritantes.

Esses compostos não resultam diretamente da reação do lítio com oxigênio ou água, mas sim da decomposição térmica dos componentes da bateria:

1. Eletrólito são compostos orgânicos (carbonatos como etileno carbonato) se decompõem liberando CO, CO_2 , ácido fluorídrico, formaldeído e hidrocarbonetos.

2. No cátodo (ex.: NMC, LFP) libera oxigênio durante a **delitização**, que reage com o eletrólito gerando CO e CO_2 . O termo **delitização** refere-se ao processo de remoção dos íons de lítio do cátodo durante a descarga da bateria.

3. O ânodo (grafite) contribui para a formação de etileno via redução do eletrólito.

4. Contaminantes: A presença de água desencadeia hidrólise do eletrólito, produzindo HF e outros ácidos.

Além da toxicidade, a mistura de gases é altamente inflamável e explosiva. Em espaços confinados (como garagens), a ignição pode causar explosões capazes de comprometer estruturas e ferir socorristas. Partículas metálicas (lítio, cobalto, níquel) também são liberadas, com toxicidade respiratória aguda.

Sauer *et al.* (2024) demonstram que baterias de 5–10 kWh (equivalentes a cortadores de grama elétricos ou e-bikes) já produzem gás suficiente para danificar estruturas residenciais, enquanto baterias de veículos elétricos (>40 kWh) podem gerar riscos catastróficos.

A corrosividade dos gases de combustão, principalmente devido ao HF (ácido fluorídrico), causa danos extensivos a equipamentos eletrônicos, sistemas de ventilação e estruturas metálicas em edificações. Esta característica pode resultar em custos de recuperação substancialmente superiores aos de incêndios convencionais, devido à necessidade de substituição de equipamentos corroídos e descontaminação de superfícies afetadas.

Segundo estudo apresentado pelo CEO da BYD no Workshop Internacional de Eletromobilidade & Segurança nas Edificações, a fumaça branca tem mais eletrólitos e mais chance de incêndio, e como é uma fumaça altamente tóxica nós não devemos entrar em contato.

A fumaça pode ser branca devido à presença de vapores de eletrólito e gotículas de água, mas a cor não é um indicativo direto da concentração de eletrólitos ou do risco de incêndio.

As edificações com veículos elétricos em garagens cobertas e subsolos precisam ter ventilação, barreiras, fluxo de fumaça, câmera termográfica, detector de fumaça e sprinklers acima dos veículos, e em caso de incêndio, somente a equipe do Corpo de Bombeiros devidamente paramentada com roupas especiais e máscaras com filtros devem iniciar o combate.

1.6.4 Risco no processo de recarga

Os riscos associados ao processo de carregamento de veículos elétricos abrangem aspectos elétricos, térmicos e químicos que requerem medidas específicas de segurança e proteção. Falhas de isolamento elétrico podem resultar em choques elétricos potencialmente fatais devido às tensões elevadas (tipicamente 400-800V) presentes nos sistemas de carregamento. O risco é amplificado em condições de umidade, quando resistência elétrica de superfícies e equipamentos é reduzida significativamente.

Sobrecargas elétricas durante carregamento podem ser causadas por defeitos nos carregadores, falhas no sistema de gerenciamento da bateria (BMS) ou problemas na infraestrutura elétrica predial. Estas condições podem resultar em aquecimento excessivo de componentes, degradação acelerada de isolamentos e eventual formação de arcos elétricos que podem iniciar incêndios. Sistemas de proteção adequados incluem disjuntores diferencial-residuais (DR), dispositivos de proteção contra surtos (DPS) e monitoramento contínuo de parâmetros elétricos.

O aquecimento durante carregamento rápido representa risco térmico significativo, especialmente quando sistemas de gerenciamento térmico são inadequados ou defeituosos. Carregamento em correntes (amperes) acima do limite de corrente da bateria pode elevar a temperatura das células além de limites seguros, acelerando degradação e aumentando a probabilidade de fuga térmica (*thermal runaway*). Sistemas de monitoramento térmico contínuo e interrupção automática do carregamento são essenciais para operação segura.

Incompatibilidades entre veículos e estações de carregamento (fator crítico) podem resultar em parâmetros de carregamento inadequados, incluindo tensões ou correntes fora das especificações do veículo. Protocolos de comunicação padronizados como ISO 15118 e IEC 61851 estabelecem *handshake* (sintonia) entre veículo e carregador para verificar compatibilidade antes de iniciar transferência de energia. Falhas nesta comunicação podem resultar em danos aos sistemas de ambos os equipamentos.

1.7 Prevenção e combate

1.7.1 Manta

As mantas térmicas são ferramentas no combate a incêndios de veículos elétricos e constituem tecnologia específica desenvolvida para contenção do fogo em baterias de lítio. Estas mantas são fabricadas com materiais resistentes ao fogo, como fibras cerâmicas, tecidos de sílica ou materiais compostos multicamadas que suportam temperaturas superiores a 1000°C. O princípio de funcionamento baseia-se no isolamento térmico e limitação do suprimento de oxigênio para as reações de combustão.

A eficácia das mantas depende criticamente da velocidade de aplicação, idealmente dentro de 2-5 minutos após detecção do incêndio para prevenir propagação térmica para células adjacentes. Sistemas automatizados de implantação estão sendo desenvolvidos para garagens e estacionamento de alto risco, incluindo sensores de detecção de gases e temperatura que acionam liberação automática das mantas. A capacitação adequada de equipes de emergência é essencial para manuseio seguro e eficaz destes equipamentos.

Limitações das mantas incluem dificuldade de aplicação em veículos em movimento ou posições de difícil acesso, necessidade de múltiplas unidades para veículos grandes e eficácia limitada quando fuga térmica já está estabelecida em múltiplas células.

Em maio/25 a *Fire Protection Research Foundation* e o Instituto de pesquisa da UL realizaram um experimento a fim de estudar a eficácia do cobertor de incêndio/manta térmica no controle de incêndios. Os experimentos conduzidos pela FSRI demonstraram um potencial risco de explosão quando as mantas são usadas durante os esforços de supressão do incêndio em veículos elétricos, quando há o envolvimento da bateria. Ela pode ser utilizada como ferramenta no combate ao incêndio, mas a operação é perigosa e apresenta risco de explosão devido aos gases que ficam enclausurados.

Desta forma, os experimentos reforçaram a necessidade de contínuas pesquisas sobre as táticas para o combate a incêndios de veículos elétricos.

1.7.2 Sprinkler

Os sistemas de sprinklers para proteção contra incêndios de veículos elétricos requerem adaptações específicas comparativamente a sistemas convencionais devido às características únicas de combustão das baterias de lítio. Sprinklers convencionais são inadequados devido à necessidade de volumes superiores de água para resfriamento eficaz das baterias e capacidade limitada de penetração da água nos packs de baterias hermeticamente selados. Sistemas especializados utilizam bicos aspersores de alto fluxo capazes de fornecer 20-40 L/min/m² comparado aos 5-12 L/min/m² de sistemas convencionais.

A seleção de fluidos extintores é crítica para eficácia dos sistemas sprinkler em incêndios de baterias. Água permanece como agente primário devido à alta capacidade de absorção de calor, mas aditivos específicos podem melhorar penetração e resfriamento. Espumas formadoras de filme aquoso (AFFF) de baixa expansão melhoram molhamento de superfícies hidrofóbicas e criam barreira contra reignição. Alguns sistemas utilizam névoa d'água (*water mist*) para maximizar superfície de contato e eficiência de resfriamento.

A configuração dos sistemas sprinkler deve considerar geometria específica dos veículos elétricos e localização das baterias. Sistemas de diluição (*deluge*) que ativam simultaneamente múltiplos sprinklers em zona afetada são preferíveis a sistemas de ação prévia devido à rápida propagação potencial da fuga térmica. A densidade de sprinklers deve ser aumentada em áreas de carregamento devido ao risco elevado durante operação das estações de recarga.

O Corpo de Bombeiros de São Paulo estabeleceu como alternativa obrigatória a instalação de chuveiros automáticos em todo o pavimento onde houver vagas para veículos elétricos, acompanhados de sistema de detecção de incêndio. Esta medida visa garantir resposta rápida e eficaz em caso de emergências, considerando as características específicas dos incêndios em veículos elétricos.

Segundo a NFPA *National Fire Protection Association* é importante destacar que, caso a fuga térmica se inicie em múltiplas células da bateria de íons de lítio, a reação do lítio com a umidade do ar ou com a água utilizada no combate ao incêndio pode gerar hidrogênio (H_2), um gás altamente inflamável que pode alimentar e intensificar as chamas. Embora a aplicação de água ou espuma seja recomendada para resfriamento e controle do fogo, existe o risco de reinição caso nem todas as células afetadas sejam completamente extintas, já que o processo de fuga térmica pode se propagar entre as células remanescentes. O incêndio só será totalmente extinto quando todo o material reativo da bateria, especialmente o lítio metálico, for consumido ou estabilizado.

1.7.3 Barreiras

As barreiras físicas para contenção de incêndios de veículos elétricos incluem elementos estruturais passivos e sistemas ativos projetados para limitar propagação térmica, conter gases tóxicos e facilitar operações de combate. Barreiras térmicas são construídas com materiais resistentes ao fogo como concreto refratário, blocos cerâmicos ou painéis compostos capazes de resistir a temperaturas superiores a 1200°C por períodos prolongados. Estas estruturas criam compartimentação entre veículos ou entre áreas de estacionamento e ocupação.

As normas propostas pelo Corpo de Bombeiros de São Paulo especificam paredes corta-fogo como alternativa às medidas de afastamento. Para áreas externas, as vagas devem ser separadas por paredes com resistência de 60 minutos, altura de 1,60m e comprimento de 5m. Em subsolos, a resistência deve ser de 90 minutos com 5m de comprimento e fechamento junto ao teto, isolando completamente a vaga com estação de recarga.

1.7.4 Estacionamento coberto

Os estacionamentos cobertos para veículos elétricos requerem projeto especializado que considera riscos únicos associados ao carregamento e armazenamento de veículos com baterias de alta energia. Códigos de construção específicos estabelecem requisitos mínimos de ventilação, com taxas de renovação de ar tipicamente 50-100% superiores a garagens convencionais devido à necessidade de dispersão rápida de gases tóxicos em caso de fuga térmica e incêndio. Sistemas de ventilação mecânica devem incluir controles automáticos ativados por detectores de gases.

A estrutura de proteção contra incêndio deve incorporar sistemas de supressão especializados dimensionados para cargas térmicas elevadas das baterias de íons de lítio. Sistemas de hidrantes internos com mangueiras de alta pressão e vazão são essenciais para resfriamento direto de baterias em combustão e carros no entorno. Reservatórios de água dedicados podem ser necessários para garantir suprimento adequado durante operações prolongadas de combate, considerando possibilidade de reinição.

O projeto elétrico requer segregação rigorosa entre circuitos de carregamento e outros sistemas prediais, com proteções específicas contra sobrecorrentes, surtos e falhas de isolamento. Quadros elétricos devem ser localizados em áreas protegidas com acesso facilitado para desligamento de emergência. Sistemas de monitoramento contínuo de isolamento e detecção de arcos elétricos reduzem riscos de ignição durante carregamento.

As normas do Corpo de Bombeiros de São Paulo estabelecem duas alternativas para estacionamentos subterrâneos: instalação de sprinklers em todo o pavimento com sistema de detecção, ou sistema de detecção pontual em cada vaga com paredes corta-fogo de 90 minutos separando as vagas entre si e das demais. Estas medidas visam garantir contenção adequada de incêndios e proteção de ocupantes e estruturas.

Podemos perceber que estamos longe de nos adequar para termos a segurança necessária. O carro elétrico apesar de todas as vantagens descritas nesse trabalho pode gerar um grave evento com perdas patrimoniais e de vidas humanas.

1.7.5 Perspectivas para 2025 e o futuro da tecnologia das baterias

O ano de 2025 marca um momento de consolidação para o mercado brasileiro de veículos elétricos. Segundo dados da ABVE, as vendas cresceram 31,5% em março comparado ao mesmo período do ano anterior. Este crescimento sustentado indica maturação do mercado e maior aceitação pelos consumidores.

Para 2025, está previsto o lançamento de 23 carros elétricos no Brasil, incluindo modelos das marcas Audi (Q6 e-tron Sportback), BYD (Sea Lion 07 e Dolphin renovado), Chevrolet (Spark EUV e Wuling Starlight S), além de novidades de outras montadoras, mostrando a diversidade do setor.

A BYD e outras montadoras estão desenvolvendo inovações significativas que permitirão recargas com maior quantidade de energia (kWh), possibilitando a carga completa das baterias em menos tempo. Essas tecnologias de carregamento rápido tendem a elevar a temperatura das baterias durante o processo, o que exige uma avaliação criteriosa sobre o potencial aumento do risco de incêndio associado a esse avanço.

O futuro das tecnologias de baterias para veículos elétricos está sendo moldado por avanços revolucionários que prometem superar limitações atuais de densidade energética, segurança e custo. As baterias de estado sólido representam a próxima geração tecnológica, substituindo eletrólitos líquidos por condutores iônicos sólidos como sulfetos de lítio, óxidos cerâmicos ou polímeros condutivos.

A nova tecnologia da bateria sólida promete aumentar a autonomia, durabilidade da bateria e tempo de recarga dos carros elétricos. Densidade

energética, segurança e operação em temperaturas extremas são vantagens reais, mas aumentam os riscos.

Os pesquisadores e cientistas devem sempre avaliar e balancear a equação entre benefício e segurança nos novos desenvolvimentos.

1.7.6 Sustentável até que ponto?

A sustentabilidade dos carros elétricos deve ser avaliada através de análise holística que considera todo o ciclo de vida, desde extração de matérias-primas até destinação final, incluindo impactos ambientais, sociais e econômicos. Embora veículos elétricos apresentem vantagens ambientais claras durante operação, especialmente em países com matriz energética renovável, questões críticas persistem relacionadas à mineração de materiais para baterias, processamento industrial intensivo em energia e gestão de resíduos minerais e eletrônicos.

A mineração de lítio, cobalto, níquel e outros minerais estratégicos para o veículo elétrico frequentemente ocorre em regiões ecologicamente sensíveis com impactos significativos em recursos hídricos, biodiversidade e comunidades locais. O desenvolvimento de tecnologias de extração mais limpas, incluindo extração direta de lítio de salmouras e reciclagem urbana de materiais críticos, é essencial para reduzir a pegada ambiental da cadeia de suprimento. Iniciativas de certificação sustentável e rastreabilidade da cadeia de suprimento ganham importância crescente.

A economia circular, que traz o descarte para o início da produção, incluindo a logística reversa, emerge como paradigma fundamental para sustentabilidade de longo prazo, priorizando reutilização, remanufatura e reciclagem de componentes de baterias. Tecnologias de reciclagem em desenvolvimento prometem recuperação de 95% dos materiais valiosos, reduzindo dependência de mineração primária e minimizando resíduos perigosos.

A descarbonização da cadeia produtiva, incluindo mineração, processamento, manufatura e transporte, é crítica para maximizar benefícios climáticos dos veículos elétricos. A transição para fontes renováveis de energia em processos industriais intensivos, especialmente produção de baterias, pode reduzir a pegada de carbono do ciclo de vida em 30-50%. Políticas públicas e incentivos de mercado são essenciais para acelerar esta transição.

Outro ponto preocupante é o descarte da água utilizada no combate ao incêndio de veículos elétricos, que estará com diversos componentes químicos e não deve ser descartada de qualquer forma. Os fluídos dos veículos elétricos contêm eletrólitos tóxicos, assim como ácido clorídrico e fluorídrico que são tóxicos.

1.7.7 A estrutura do local está segura em caso de incêndio?

A segurança estrutural de edificações em caso de incêndios envolvendo veículos elétricos requer avaliação criteriosa das normas existentes e potenciais adaptações necessárias. As características específicas destes incêndios podem demandar modificações nos critérios de projeto estrutural.

Estruturas de concreto demonstram boa resistência a incêndios, mas a exposição prolongada a altas temperaturas (acima de 1000 °C) e gases corrosivos, em incêndios com carros elétricos podem comprometer a integridade de longo prazo.

Revestimentos protetivos e sistemas de ventilação adequados são essenciais para preservar a capacidade estrutural.

Elementos estruturais metálicos requerem proteção adequada contra corrosão acelerada causada por fluoreto de hidrogênio e outros gases ácidos. Revestimentos especializados e sistemas de proteção passiva devem ser especificados considerando a natureza específica dos produtos de combustão.

Sistemas de ancoragem e fundações podem ser afetados por água de combate contaminada, requerendo impermeabilização adequada e sistemas de drenagem que impeçam a infiltração de líquidos corrosivos no solo e estruturas enterradas.

A ventilação estrutural assume importância crítica, não apenas para segurança dos ocupantes, mas também para preservação da própria estrutura. Sistemas inadequados podem resultar em acúmulo de gases corrosivos que aceleram a deterioração de materiais de construção.

Normas técnicas deverão entrar em processo de atualização para incorporar os riscos específicos dos veículos elétricos. A revisão das Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros e normas da ABNT devem considerar cargas térmicas específicas, produtos de combustão únicos e necessidades de ventilação diferenciadas.

2. CONCLUSÃO

Devido a diversas variáveis e especificidades das baterias de íons de lítio da eletromobilidade, e levando em consideração a segurança das edificações é possível concluir que: As edificações, principalmente as residenciais, não estão preparados para um incêndio da magnitude gerada por baterias com íons de lítio; As Instruções Técnicas do Corpo de Bombeiros deveram ser seguidas com responsabilidade a fim de garantir a segurança das edificações, assim que forem publicadas; Os desafios na operacionalização como gases tóxicos, riscos de eletrificação, fuga térmica e reignição, limite de veículos nas garagens, descarte da água pós incêndio, gerenciamento do lixo pós incêndio, devem ser cuidadosamente e minuciosamente avaliados; É necessário pensar nos riscos de incêndios também nas micromobilidades como patinetes, skates, mobiletes e bicicletas elétricas.

A indústria de veículos elétricos enfrenta o desafio urgente de aprimorar a tecnologia de segurança das baterias, especialmente no que diz respeito à recorrente questão da fuga térmica em baterias de íons de lítio, componente crucial desses veículos. Diante desse cenário, torna-se fundamental que o setor desenvolva soluções eficazes para a prevenção e o controle da fuga térmica, além de investir em modelos de simulação robustos que orientem o projeto seguro dos sistemas de baterias. Paralelamente, é imprescindível que o governo junto com órgãos técnicos, como a ABNT e o mercado atuem no desenvolvimento de métodos eficientes de teste e simulação, estabelecendo Normas Técnicas adequadas para o setor. Essas ações, em conjunto, são essenciais para reduzir o risco de fuga térmica em produtos comercializados, protegendo a vida, o patrimônio das pessoas e promovendo a confiança e o avanço sustentável da mobilidade elétrica.

3. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17019: Sistemas de recarga para veículos elétricos rodoviários – requisitos gerais e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (ABVE). **Veículos elétricos e a segurança energética no Brasil**. Disponível em: <https://abve.org.br/colunistas/veiculos-eletricos-e-a-seguranca-energetica-no-brasil/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

BATTERY UNIVERSITY. BU-704a: **Shipping Lithium-based Batteries by Air**. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-704a-shipping-lithium-based-batteries-by-air>. Acesso em: 01 jun. 2025.

BAROWY, Adam. **Fire Safety of Batteries and Electric Vehicles**. Disponível em: <http://fsri.org>. Acesso em: 19 set. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. **Dispõe sobre o programa Rota 2030 – Mobilidade e Logística**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 dez. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2023**. Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 30 jun. 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 492, de 26 de dezembro de 2018. **Estabelece critérios e procedimentos para importação de veículos automotores e máquinas agrícolas usados**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 dez. 2018.

CHEN, S. et al. **Research on the Early Warning Mechanism for Thermal Runaway in Lithium-Ion Batteries**. Hindawi, v. 2022, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/8573396>. Acesso em: 30 jun. 2025.

DAI, Yixin, PANAHI, Aidin. **Thermal runaway process in lithium-ion batteries: A review**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2024.100186>. Next Energy, volume 6, 2025.

HAWKINS, T. R.; SINGH, B.; MAJEAU-BETTEZ, G.; STRØMMAN, A. H. **Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles**. Journal of Industrial Ecology, v. 17, n. 1, p. 53-64, fev. 2013. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>. Acesso em: 01 jun. 2025.

HYUNDAI; GOLDENERGY. **O que é tecnologia V2G e como ela pode ajudar a descarbonizar o sistema energético**. Disponível em: <https://hyundai.pt/noticias/tecnologia-v2g/>. Acesso em: 30 jun. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2023: catching up with climate ambitions**. Paris: IEA Publications, 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Security**. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energy-security>. Acesso em: 30 jun. 2025.

LARSSON, F. et al. **Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires.** Nature Scientific Reports, v. 7, 2017. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5577247/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY (NTU). **Air pollution linked to 135 million premature deaths worldwide.** 2024. Disponível em: <https://www.ntu.edu.sg/news/detail/air-pollution-linked-to-135-million-premature-deaths-worldwide>. Acesso em: 01 jun. 2025.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA). **Alternative Fuel Vehicles Safety Training: Emergency Field Guide – Electric Vehicle Lithium-ion Battery Emergency.** Quincy, MA: NFPA, 2022. Disponível em: <https://www.nfpa.org/ev>. Acesso em: 2 jul. 2025.

NYKVIST, Björn; NILSSON, Måns. **Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles.** Nature Climate Change, v. 5, n. 4, p. 329-332, 2015.

OLIVETTI, Elsa A. et al. **Lithium-ion battery supply chain considerations: analysis of potential bottlenecks in critical metals.** Joule, v. 1, n. 2, p. 229-243, 2017.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – COMANDO DO CORPO DE BOMBEIROS. **Instrução Técnica nº 20/2019: segurança contra incêndio para líquidos combustíveis e inflamáveis.** São Paulo: CBPMESP, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO – COMANDO DO CORPO DE BOMBEIROS. **Parecer Técnico nº CCB-001/800/24. Ocupações com estações de recarga para veículos elétricos.** NBI nº CCB-081/810/23, São Paulo, 2024.

SAUER, Nathaniel G., GAUDET, Benjamin, BAROWY, Adam. **Experimental Investigation of Explosion Hazard From Lithium-ion Battery Thermal Runaway Effluent Gas.** Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132818>. Acesso em: 19 set. 2024.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE PNEUMOLOGIA E TISIOLOGIA (SBPT). **Poluição do ar e doenças respiratórias.** Disponível em: <https://sbpt.org.br/portal/publico-geral/doencas/poluicao-do-ar-e-doencas-respiratorias/>. Acesso em: 01 jun. 2025.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries 2023: lithium.** Reston: USGS, 2023.

WANG, Qingsong et al. **Thermal runaway caused fire and explosion of lithium-ion battery.** Journal of Power Sources, v. 208, p. 210-224, 2012.

WEBER, Christian J. et al. **Thermal runaway and fire behavior of large-format lithium-ion batteries.** Fire Technology, v. 57, n. 1, p. 67-97, 2021.

TOYOTA. **Toyota announces solid-state battery breakthrough.** Disponível em: <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/39614761.html>. Acesso em: 2 jul. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **All-Electric Vehicles.** Disponível em: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_ev.html. Acesso em: 30 jun. 2025.

VAMOSI, T. J. **Toxicology of the Lithium Ion Battery Fire.** Massachusetts Department of Fire Services, 2021. Disponível em: <https://www.mass.gov/doc/toxicology-of-the-lithium-ion-battery-fire/download>. Acesso em: 2 jul. 2025.