v7.n7.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DO DESEMPENHO, VIABILIDADE E IMPACTOS DA TECNOLOGIA DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO NA MOBILIDADE ELÉTRICA URBANA

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE, FEASIBILITY, AND IMPACTS OF LITHIUM-ION BATTERY TECHNOLOGY IN URBAN ELECTRIC MOBILITY

ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO, VIABILIDAD E IMPACTOS DE LA TECNOLOGÍA DE BATERÍAS DE ION DE LITIO EN LA MOVILIDAD ELÉCTRICA URBANA

Felipe Ramos da Silva [1], Ronaldo Gomes Figueira[2], Fabiana Florian[1]

e778499
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i7.8499

PUBLICADO: 07/2026

RESUMO

Este artigo analisa a transição para a mobilidade elétrica urbana como estratégia essencial de descarbonização, destacando o crescimento do mercado de veículos elétricos (VEs) entre 2015 e 2025 com base em dados da ABVE e IEA. A fundamentação teórica detalha o funcionamento das células de íon-lítio via mecanismo reversível de intercalação de íons entre cátodo, ânodo de grafite, eletrólito e separador, examinando os mecanismos de degradação que reduzem a capacidade nominal e elevam a resistência interna, tais como o crescimento da camada passivadora SEI, a deposição de lítio metálico (*lithium plating)* com formação de dendritos, o craqueamento mecânico por variação volumétrica e a oxidação do eletrólito sob altas tensões, processos estes acelerados por temperaturas extremas, limites de Estado de Carga (SoC) e altas taxas de recarga (C-rate) via efeito Joule. Para mitigar o descontrole térmico (*thermal runaway*) —que pode causar explosões acima de 200°C, destaca-se a obrigatoriedade do Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS), que monitora tensão, corrente e temperatura via AFEs, estima o SoC (contagem de Coulomb e Filtro de Kalman) e o Estado de Saúde (SoH), e realiza o balanceamento das células. Ademais, o estudo compara as químicas NMC (alta densidade energética) e LFP (maior estabilidade térmica e vida útil), demonstrando que o Custo Total de Propriedade (TCO) do VE é altamente competitivo frente aos modelos a combustão (ICE), reduzindo os custos de manutenção em até 50%. Por fim, mapeia-se o impacto na infraestrutura urbana, abordando a recarga rápida DC, a tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) e os desafios de segurança pública no combate a incêndios em ambientes confinados.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos Elétricos. Baterias de Íon-Lítio. Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS). Descontrole Térmico. Mobilidade Elétrica Urbana. Custo Total de Propriedade (TCO).

ABSTRACT

This article analyzes the transition to urban electric mobility as an essential strategy for decarbonization, highlighting the growth of the electric vehicle (EV) market between 2015 and 2025 based on ABVE and IEA data. The theoretical framework details the operation of lithium-ion cells via the reversible mechanism of ion intercalation between the cathode, graphite anode, electrolyte, and separator, examining the degradation mechanisms that reduce nominal capacity and increase internal resistance, such as the growth of the solid electrolyte interphase (SEI) layer, lithium plating with dendrite formation, mechanical cracking due to volumetric variation, and

[1] UNIARA - Universidade de Araraquara.
[2] Graduando em Engenharia Elétrica UNIARA - Universidade de Araraquara.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

electrolyte oxidation under high voltages, processes accelerated by extreme temperatures, State of Charge (SoC) operating limits, and high charging rates (C-rate) via Joule heating. To mitigate thermal runaway which can cause explosions above 200°C, the mandatory role of the Battery Management System (BMS) is highlighted, which monitors voltage, current, and temperature via AFEs, estimates the SoC (Coulomb counting and Kalman Filter) and State of Health (SoH), and performs cell balancing. Furthermore, the study compares NMC (high energy density) and LFP (higher thermal stability and cyclic life) chemistries, demonstrating that the EV's Total Cost of Ownership (TCO) is highly competitive against internal *combustion engine (ICE) models, reducing maintenance costs by up to 50%. Finally, it maps the impact on urban infrastructure, addressing DC fast charging, Vehicle-to-Grid (V2G) technology, and public safety challenges in firefighting within confined environments.*

KEYWORDS: *Electric Vehicles. Lithium-ion Batteries. Battery Management System (BMS). Thermal Runaway. Urban Electric Mobility. Total Cost of Ownership (TCO).*

RESUMEN

Este artículo analiza la transición hacia la movilidad eléctrica urbana como una estrategia esencial de descarbonización, destacando el crecimiento del mercado de vehículos eléctricos (VEs) entre 2015 y 2025 con base en datos de la ABVE y la IEA. La fundamentación teórica detalla el funcionamiento de las celdas de ion-litio mediante el mecanismo reversible de intercalación de iones entre el cátodo, el ánodo de grafito, el electrolito y el separador, examinando los mecanismos de degradación que reducen la capacidad nominal y elevan la resistencia interna, tales como el crecimiento de la capa pasivadora SEI, la deposición de litio metálico (lithium plating) con formación de dendritas, el agrietamiento mecánico por variación volumétrica y la oxidación del electrolito bajo altas tensiones, procesos que son acelerados por temperaturas extremas, límites del Estado de Carga (SoC) y altas tasas de carga rápida (C-rate) mediante el efecto Joule. Para mitigar el descontrol térmico (thermal runaway) que puede causar explosiones por encima de los 200°C, se destaca la obligatoriedad del Sistema de Gestión de Baterías (BMS), el cual monitorea la tensión, corriente y temperatura a través de AFEs, estima el SoC (conteo de Coulomb y Filtro de Kalman) y el Estado de Salud (SoH), y realiza el balanceo de las celdas. Además, el estudio compara las químicas NMC (alta densidad energética) y LFP (mayor estabilidad térmica y vida útil), demostrando que el Costo Total de Propiedad (TCO) del VE es altamente competitivo frente a los modelos de combustión interna (ICE), reduciendo los costos de mantenimiento hasta en un 50%. Por último, se mapea el impacto en la infraestructura urbana, abordando la recarga rápida DC, la tecnología Vehicle-to-Grid (V2G) y los desafíos de seguridad pública en el combate de incendios en entornos confinados.

PALABRAS CLAVE: *Vehículos Eléctricos. Baterías de Ion de Litio. Sistema de Gestión de Baterías (BMS). Embalamiento Térmico. Movilidad Eléctrica Urbana. Costo Total de Propiedad (TCO).*

1. INTRODUÇÃO

Este artigo analisa os principais fatores que aceleram essa expansão, os mecanismos físico-químicos de degradação e falha dos sistemas de armazenamento, os impactos decorrentes da inserção dessa nova carga sobre a infraestrutura da rede elétrica urbana e as perspectivas para o gerenciamento de demanda e armazenamento de energia.

Diante desse cenário multifacetado, justifica-se a necessidade de uma análise integrada que conecte a física das células aos seus impactos socioeconômicos e urbanos. O presente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

trabalho tem como objetivo analisar os princípios de funcionamento, os mecanismos de degradação e os critérios de segurança térmica das baterias de íon-lítio, avaliando como o Sistema de Gerenciamento de Bateria (*Battery Management System* - BMS) e as diferentes composições químicas impactam o desempenho técnico, a viabilidade econômica por meio do Custo Total de Propriedade (TCO) e a integração dos veículos elétricos na infraestrutura e na matriz energética urbana.

A transição para a mobilidade elétrica nas matrizes de transporte urbano tem deixado de ser uma tendência de vanguarda para se consolidar como uma necessidade imperativa de descarbonização e eficiência energética. Impulsionado por políticas públicas restritivas às emissões de gases de efeito estufa (GEE) e pelo avanço tecnológico na densidade energética das baterias, o mercado de veículos elétricos (VEs) apresenta taxas de crescimento expressivas tanto globalmente quanto no cenário nacional.

O adensamento populacional nas metrópoles trouxe à tona a necessidade urgente de reformular os sistemas de transporte rodoviário, historicamente dependentes de combustíveis fósseis e motores de combustão interna (ICE - *Internal Combustion Engine*). De acordo com os dados consolidados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE) e da Agência Internacional de Energia (IEA), o mercado de veículos eletrificados registrou expansões consecutivas na última década, conforme evidenciado nas Tabelas 1 e 2.

1.1. Cenário de Crescimento de Mercado

Tabela 1. Evolução das vendas de veículos eletrificados no Brasil (2015–2025)

Ano	Unidades Vendidas
2015	846
2016	1.091
2017	3.296
2018	3.975
2019	11.858
2020	19.745
2021	34.990
2022	49.245
2023	93.927
2024	157.947
2025	223.912

Fonte: Adaptado de ABVE (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Tabela 2. Crescimento global de vendas de veículos elétricos (2015–2025)

Ano	Volume Global (Milhões de Unidades)
2015	0,5
2017	1,2
2019	2,2
2021	6,6
2023	14,0
2024	17,0
2025	20,0

Fonte: Adaptado de IEA (2026).

2. METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza aplicada com abordagem mista (qualitativa e quantitativa), cujo propósito é analisar a viabilidade, o desempenho e os impactos das baterias de íon-lítio na mobilidade elétrica urbana. Para tanto, adota um delineamento bibliográfico e documental que fundamenta em relatórios técnicos e regulatórios do setor, aliado a uma análise comparativa que confronta a eficiência, os custos e a sustentabilidade dessa tecnologia frente a alternativas energéticas e aos veículos a combustão. Assim, a integração desses métodos permite quantificar indicadores operacionais e qualificar os desafios de infraestrutura e descarte, fornecendo subsídios teóricos e práticos para o avanço do transporte urbano sustentável.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA: O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA DE ÍON-LÍTIO

O princípio de funcionamento de uma bateria de íon-lítio baseia-se em um mecanismo eletroquímico reversível conhecido como intercalação. Nesse processo os íons de lítio (Li+) não sofrem reações químicas que alteram permanentemente sua natureza elementar; alternativamente, eles se alojam e se desalojam repetidamente dentro das lacunas das estruturas cristalinas dos eletrodos. Esse fluxo contínuo confere ao sistema a denominação análoga de bateria do tipo "cadeira de balanço" (*rocking-chair battery*), visto que os íons oscilam entre o ânodo e o cátodo conforme os estados de carga e descarga.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1. Componentes básicos da célula

Para a viabilização do fluxo iônico e eletrônico, a célula é constituída por quatro componentes principais:

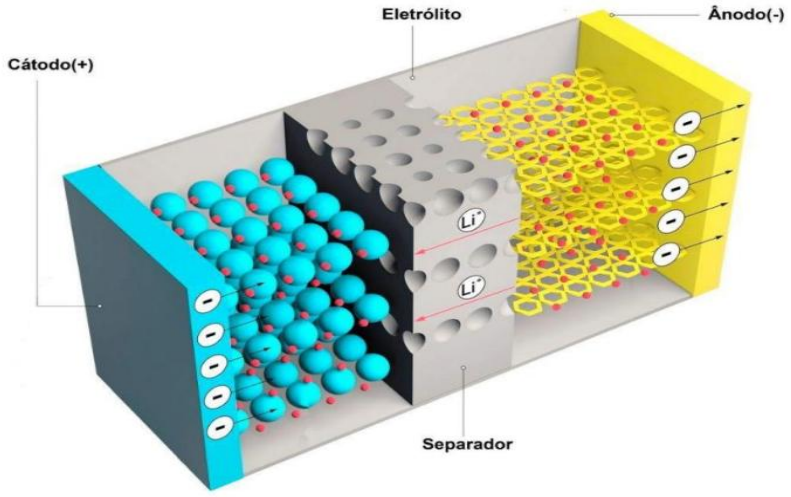
Cátodo (Polo Positivo): Composto por óxidos metálicos transicionais, como Níquel-Manganês-Cobalto (NMC), ou por fosfatos, como o Fosfato de Ferro-Lítio (LFP). Constitui o sítio hospedeiro original dos íons de lítio quando a bateria se encontra descarregada.

Ânodo (Polo Negativo): Tradicionalmente fabricado em grafite (folhas de carbono dispostas em camadas hexagonais), responsável por armazenar os íons de lítio intercalados quando a célula está em seu estado pleno de carga.

Eletrólito: Solvente orgânico líquido saturado por sais de lítio, cuja função exclusiva é atuar como o meio condutor para a difusão dos íons Li+ entre os polos.

Separador: Membrana polimérica ultrafina e porosa (geralmente constituída de polietileno ou polipropileno) posicionada entre o cátodo e o ânodo. Sua função é impedir o contato físico direto entre os eletrodos evitando o curto-circuito permitindo, contudo, a livre passagem dos íons através de seus poros microscópicos.

Figura 1. Componentes básicos da célula íon-lítio



Fonte: Livro Baterias de Lítio, Eng. Aldo Michelini.

3.2. Dinâmica eletroquímica de carga e descarga

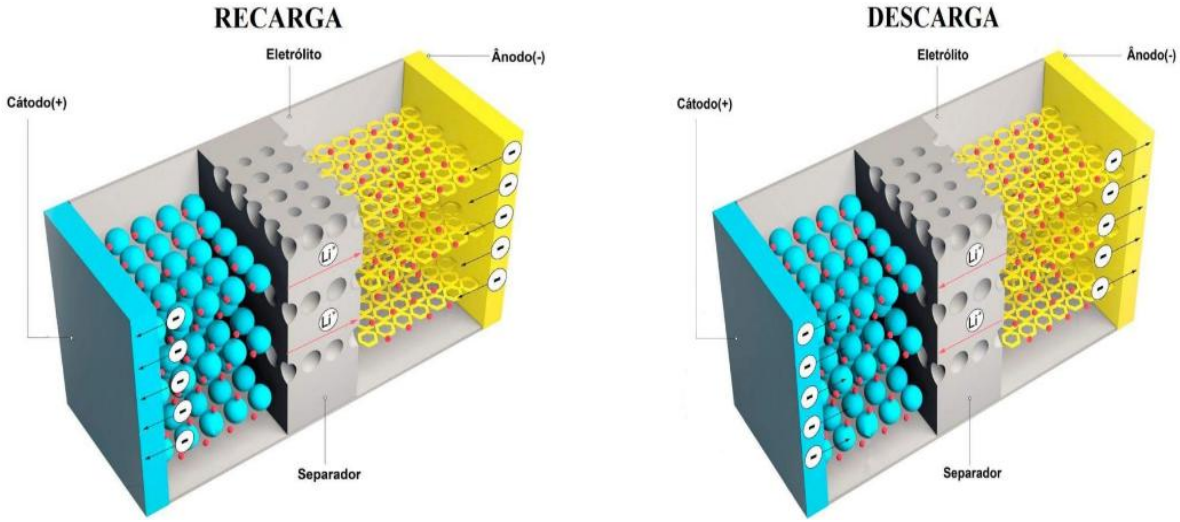
Processo de Carga: Sob a aplicação de uma diferença de potencial (ddp) externa, os íons de lítio são extraídos da matriz cristalina do cátodo (polo positivo), migram através do eletrólito e do separador, e intercalam-se nas camadas de grafite do ânodo (polo negativo).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Simultaneamente, os elétrons correspondentes circulam pelo circuito elétrico externo para equilibrar as cargas.

Processo de Descarga: O fluxo inverte-se de forma espontânea e termodinamicamente favorável. Os íons de lítio desintercalam-se do ânodo de grafite, retornando ao cátodo através do eletrólito, enquanto os elétrons realizam o trabalho elétrico ao alimentar o inversor e o motor elétrico de tração do veículo.

Figura 2. Ilustração do princípio de funcionamento carga/descarga das baterias íon-lítio



Fonte: Livro Baterias de Lítio, Eng. Aldo Michelini.

4. MECANISMOS E FATORES DE DEGRADAÇÃO DAS CÉLULAS

O envelhecimento e a consequente perda de capacidade das células de lítio ocorrem devido a reações secundárias parasitas de natureza irreversível que se desenvolvem em seu interior durante a operação mecânica e elétrica.

4.1. Principais mecanismos de degradação

Crescimento da SEI (*Solid Electrolyte Interphase*): Nas etapas iniciais de formação da célula, desenvolve-se uma camada passivadora denominada SEI no ânodo de grafite, essencial para proteger o eletrodo contra reações contínuas com o eletrólito. No entanto, ao longo dos ciclos operacionais, essa camada expande-se continuamente. Esse fenômeno consome o estoque de lítio ativo e eleva progressivamente a resistência interna (*Rint)* da bateria.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Deposição de Lítio Metálico (*Lithium Plating*): Sob condições de taxas de carga elevadas ou baixas temperaturas, os íons de lítio enfrentam restrições cinéticas para se intercalarem rapidamente na estrutura do grafite. Consequentemente, acumulam-se na superfície do ânodo na forma de lítio metálico. Esse processo reduz a capacidade nominal e propicia o crescimento de estruturas dendríticas (dendritos), que podem perfurar o separador polimérico, originando curtos-circuitos internos severos.

Craqueamento Mecânico dos Eletrodos: A dinâmica de inserção e extração dos íons gera variações volumétricas cíclicas nos materiais dos eletrodos. Esse estresse mecânico induz microfissuras nas partículas de grafite ou nas matrizes do cátodo (Níquel, Manganês e Cobalto NMC / Fosfato de Ferro-Lítio LFP), resultando no isolamento elétrico de frações do material ativo.

Degradação do Cátodo: Reações de oxidação do eletrólito na interface do cátodo sob altas tensões operacionais podem desencadear a dissolução de metais transicionais (como o manganês ou cobalto), desestruturando a geometria cristalina que aloja o lítio.

4.2. Fatores de aceleração operacional

A cinética dos mecanismos de degradação é governada por quatro principais variáveis operacionais:

Temperaturas Extremas: Ambientes com temperaturas elevadas (> 40°C) aceleram exponencialmente as reações químicas parasitas e a degradação do eletrólito. Por outro lado, temperaturas sub-zero (< 0°C) reduzem a difusão iônica, exacerbando o fenômeno de Lítio Metálico (*Lithium Plating*).

Estado de Carga (SoC - *State of Charge*): A permanência em extremos de SoC acelera o desgaste. Condições de alto SoC (~100%) submetem a célula a potenciais elevados, induzindo a oxidação do cátodo. Inversamente, baixos níveis de SoC (~0%) podem instabilizar a camada SEI (*Solid Electrolyte Interphase*), exigindo sua reconstituição na recarga subsequente.

Taxas de Carga Elevadas (C-rate): Protocolos de recarga rápida ou ultrarrápida em corrente contínua (CC) impõem um fluxo mássico de íons em intervalos reduzidos. Esse regime induz um gradiente de concentração elevado no ânodo e acentuada dissipação térmica por efeito Joule, expressa pela Equação (1):

$$P = R \times I^2$$

Onde P representa a potência dissipada em forma de calor, R a resistência interna e I^2 a corrente elétrica aplicada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

5. SEGURANÇA TÉRMICA E O FENÔMENO DO *THERMAL RUNAWAY*

A estabilidade térmica configura-se como um dos critérios mais críticos na engenharia de pacotes de baterias para (VEs). O descontrole térmico (*thermal runaway*) caracteriza-se como um evento termodinâmico destrutivo e autorregenerativo, deflagrado quando a taxa de geração de calor interno da célula supera a capacidade de dissipação térmica do sistema de arrefecimento.

A progressão da degradação térmica em uma célula de íon-lítio segue tipicamente uma reação em cadeia correlacionada à elevação da temperatura:

80°C a 120°C: Inicia-se a decomposição térmica da camada passivadora SEI (*Solid Electrolyte Interphase*) no ânodo. O lítio altamente reativo entra em contato direto com o eletrólito orgânico, intensificando a natureza exotérmica do processo.

120°C a 140°C: Ocorre o ponto de fusão do separador polimérico. A perda da barreira física estabelece um curto-circuito interno massivo entre o cátodo e o ânodo.

140°C a 200°C: O material estrutural do cátodo (especialmente as químicas ricas em níquel) sofre decomposição química estrutural, liberando oxigênio livre (O2) no interior da célula hermética. Consolida-se, assim, a coexistência de combustível (eletrólito), comburente (O2) e energia de ativação (calor).

Acima de 200°C: Configura-se a ignição violenta com ejeção de gases tóxicos e inflamáveis, além da propagação térmica (*thermal propagation*) para as células adjacentes do pacote.

6. O SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE BATERIA (BMS)

Para mitigar os riscos térmicos e otimizar a vida útil do sistema de armazenamento, utiliza-se o Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS - *Battery Management System*). Este dispositivo eletrônico embarcado monitora e controla as células para assegurar que operem estritamente dentro de sua Área de Operação Segura (SOA - *Safe Operating Area*).

As baterias de íons de lítio possuem uma alta densidade energética, o que as torna ideais para aplicações de mobilidade urbana e sistemas de armazenamento de grande porte. No entanto, essa mesma característica exige um controle rigoroso, pois desvios nas condições operacionais podem resultar em degradação acelerada ou em falhas catastróficas. É nesse cenário que o BMS atua como o núcleo de inteligência e proteção do ecossistema de baterias.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

6.1. Monitoramento em tempo real

O BMS realiza a aquisição contínua de três variáveis físicas fundamentais por meio de circuitos integrados especializados denominados *Analog Front-Ends* (AFEs). Esses componentes operam como a interface analógico-digital de alta fidelidade do sistema, convertendo os sinais elétricos capturados diretamente do banco de baterias em dados digitais prontos para serem processados pelo microcontrolador central. Este monitoramento ininterrupto é a base de dados necessária para garantir a segurança operacional e a correta aplicação dos algoritmos de controle do sistema.

Tensão (V): Monitorada individualmente por célula ou por arranjo paralelo para prevenir condições de sobrecarga (> 4,2 V) e sobredescarga (< 2,5 V). A precisão na leitura de tensão das células é um fator crítico, medida geralmente na ordem de milivolts (mV), pois pequenas variações na curva de descarga das químicas baseadas em lítio representam grandes mudanças no estado de carga. O monitoramento individualizado impede que uma única célula defeituosa ou desbalanceada sofra estresse elétrico isolado, o que comprometeria a integridade física de todo o módulo e reduziria prematuramente a vida útil do sistema de armazenamento.

Corrente (I): Mensurada na linha principal do barramento (*busbar*) por meio de sensores de efeito Hall ou *shunts* de alta precisão. A medição da corrente total que entra e sai do pacote de baterias cumpre um duplo propósito. Em nível de segurança, permite a detecção instantânea de picos de sobrecorrente causados por anomalias na demanda de carga ou por curtos-circuitos externos, possibilitando a abertura imediata dos contatores de proteção. Em nível de gerenciamento, a integração da corrente ao longo do tempo (técnica conhecida como *Coulomb Counting*) fornece o dado base para o cálculo dinâmico da capacidade remanescente da bateria.

Temperatura (T): Mapeada via sensores distribuídos estrategicamente pelo pacote para evitar gradientes térmicos severos. As células de íons de lítio são altamente sensíveis à temperatura, operando de forma ideal em uma faixa estreita entre 15°C e 35°C. O posicionamento estratégico dos sensores foca não apenas nas células centrais que tendem a concentrar maior calor devido à menor área de dissipação, mas também nas conexões dos barramentos, onde o mau contato pode gerar pontos quentes (*hotspots*). Controlar a uniformidade térmica impede que o envelhecimento das células ocorra de forma desigual dentro do mesmo invólucro.

6.2. Algoritmos de estimação de estado

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Devido à impossibilidade de medição direta interna dos estados da bateria por sensores físicos ordinários, o (BMS - Battery Management System) implementa modelos matemáticos baseados em algoritmos preditivos:

Estado de Carga (SoC - *State of Charge*): Estima a energia disponível em tempo real. O método computacional primário baseia-se na contagem de Coulomb (integração da corrente no tempo). Para mitigar erros cumulativos de deriva, aplicam-se algoritmos avançados, como o Filtro de Kalman, correlacionando os dados com a Tensão de Circuito Aberto (OCV - *Open Circuit Voltage*).

Estado de Saúde (SoH - *State of Health*): Quantifica o nível de degradação da bateria em relação ao seu estado nominal inicial. O cálculo baseia-se no monitoramento do incremento da resistência interna e na perda de capacidade de retenção de carga ao longo dos ciclos operacionais.

6.3. Balanceamento de células

Gradientes térmicos e tolerâncias de manufatura induzem desbalanços de carga entre as células ao longo do tempo. O (BMS - *Battery Management System*) atua na equalização do sistema por meio de dois métodos distintos:

Balanceamento Passivo: Método de menor custo de implementação, no qual resistores em paralelo são chaveados para dissipar o excesso de energia em forma de calor das células de maior tensão durante o término do processo de carga.

Balanceamento Ativo: Utiliza circuitos conversores baseados em elementos indutivos ou capacitivos para transferir eficientemente a energia das células com maior potencial para as de menor carga, minimizando as perdas térmicas do pacote.

7. ANÁLISE COMPARATIVA DE QUÍMICAS E DESEMPENHO TÉCNICO

A seleção tecnológica para a eletrificação veicular consolidou-se comercialmente em torno de duas principais variantes químicas de cátodo, cujas propriedades técnicas e operacionais estão sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3. Comparativo técnico-estrutural entre as químicas NMC (Níquel, Manganês, Cobalto) e LFP (Fosfato de Ferro-Lítio)

Parâmetro Técnico	Química NMC	Química LFP

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Densidade Energética Gravimétrica	250 a 300 Wh/kg	140 a 180 Wh/kg
Vida Útil Cíclica (até 80% SoH)	1.000 a 2.000 ciclos	3.000 a 5.000 ciclos
Estabilidade/Segurança Térmica	Moderada (Crítica > 150°C)	Elevada (Estável até ~270°C)
Sensibilidade a Alto SoC	Elevada	Baixa
Custo Relativo por kWh	Base Elevada	20% a 30% menor que NMC

Fonte: Elaboração própria (2026).

As características intrínsecas apresentadas definem a aplicação urbana de cada tecnologia:

Aplicações NMC (Níquel, Manganês, Cobalto): Preferencial para veículos de passageiros de longo alcance e alta performance, onde as restrições de espaço e peso exigem a maximização da densidade energética.

Aplicações LFP (Fosfato de Ferro-Lítio): Amplamente adotada em veículos de entrada e frotas de transporte público (ônibus urbanos). Embora o sistema demande maior volume físico, inovações como a arquitetura *Cell-to-Pack* (CTP) que elimina módulos intermediários fixando as células diretamente na estrutura do pack otimizaram a densidade volumétrica, tornando o LFP viável para autonomias urbanas competitivas (~400 km).

8. ANÁLISE ECONÔMICA E CUSTO TOTAL DE PROPRIEDADE (TCO)

A viabilidade econômica dos veículos elétricos (VEs) fundamenta-se na convergência entre o custo de aquisição inicial e o Custo Total de Propriedade (*Total Cost of Ownership* - TCO).

8.1 Panorama de custos e paridade de fabricação

O pacote de baterias representa o componente de maior relevância financeira, respondendo por cerca de 30% a 40% do valor total do veículo. A indústria adota o indicador econômico de dólares por quilowatt-hora (USD/kWh) como métrica padrão de evolução do setor.

Estudos econômicos estabelecem o limiar de 100 USD/kWh ao nível do pacote como o ponto de virada técnico para que os veículos elétricos (VEs) atinjam a paridade de custo de manufatura direta com os veículos com motor a combustão (ICE), prescindindo de subsídios estatais. De acordo com os levantamentos da *BloombergNEF* (BNEF), o preço médio ponderado global reduziu para 108 USD/kWh (com o mercado chinês operando na faixa de 84 USD/kWh

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em decorrência da integração vertical). Projeta-se a consolidação dessa paridade global de fabricação para o horizonte entre 2026 e 2027.

8.2. Estrutura de custos de motorização e *Total Cost of Ownership* (TCO)

A matriz de custos de fabricação evidencia naturezas distintas de engenharia:

Trem de Força (ICE - *Internal Combustion Engine*): Apresenta custo de motorização maduro e estável. A transmissão e o motor demandam processos de usinagem complexos e elevado número de partes móveis, contudo, baseiam-se em commodities de baixo custo (ferro e alumínio).

Trem de Força Elétrico: O motor síncrono/assíncrono e o inversor de tração apresentam simplicidade mecânica acentuada. O custo é deslocado substancialmente para a composição mineral das células (Li, Ni, Co, Fe, P), tornando o preço do veículo suscetível à volatilidade do mercado de commodities de mineração.

O cálculo do Total *Cost of Ownership* (TCO) avalia o ciclo de vida econômico do veículo (comumente mensurado em horizontes de 5 anos ou 100.000 km). Nesse escopo, o VE demonstra vantagens competitivas estruturadas em dois pilares:

1. Custo de Rodagem: Decorrente da eficiência energética superior do motor elétrico (> 90%) em comparação com o motor de combustão interna (20% - 30%). O custo por quilômetro rodado a partir de energia elétrica residencial ou comercial é significativamente inferior ao custo equivalente por hidrocarbonetos (gasolina/diesel), garantindo rápido retorno de investimento (*payback*) para frotas comerciais e motoristas de alta quilometragem.

2. Manutenção Reduzida: A ausência de sistemas de exaustão, catalisadores, correias dentadas, velas de ignição, óleo lubrificante e filtros reduz o custo de manutenção programada em patamares de 40% a 50% em relação aos modelos ICE. Adicionalmente, a frenagem regenerativa atua atenuando o desgaste severo dos componentes do sistema de freio mecânico por atrito.

9. IMPACTOS DA ELETRIFICAÇÃO NA MATRIZ URBANA E NA REDE ELÉTRICA

A massificação dos veículos elétricos (VEs) reformula a dinâmica das cidades contemporâneas a partir de três eixos fundamentais de transporte: a micromobilidade (soluções de *last-mile*), a logística comercial urbana (frotas de distribuição de emissão zero) e a eletrificação do transporte coletivo — ônibus urbanos baseados em tecnologia (LFP - Lítio Ferro Fosfato) devido à estabilidade cíclica.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

9.1. Desafios da Infraestrutura de Recarga e Concessionárias

A desconcentração do abastecimento exige o desenvolvimento de novas arquiteturas de infraestrutura urbana:

Zonas de Alta Densidade Habitacional: Em regiões metropolitanas com predominância de habitações verticais desprovidas de infraestrutura elétrica individualizada em garagens, a estratégia caminha para a implementação de hubs públicos de recarga noturna de baixa potência e carregadores integrados à rede de iluminação pública.

Estações de Carga Rápida em Corrente Contínua (*Hubs CC*): Demandam potências elevadas de operação. A ativação simultânea de múltiplos carregadores rápidos introduz picos de demanda críticos na rede de distribuição local, equivalentes à carga de setores residenciais inteiros, demandando investimentos em reforço de subestações e alimentadores.

9.2. A tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G)

A integração de frotas de (VEs) conectados à rede elétrica viabiliza a aplicação do conceito de redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*) por meio da tecnologia (V2G - *Vehicle-to-Grid*). Nesse modelo, as baterias automotivas operam como um sistema de armazenamento de energia distribuído de grande escala:

Modo Absorção: Durante intervalos de baixa demanda e elevada geração de fontes renováveis intermitentes (como energia solar fotovoltaica no período diurno), os veículos absorvem o excedente de potência a tarifas reduzidas.

Modo Injeção (V2G): Nos horários de pico de consumo da rede urbana (geralmente no intervalo crepuscular), o fluxo energético pode ser revertido. O sistema drena uma fração controlada da energia armazenada nas baterias dos veículos conectados para prover suporte de estabilidade à rede de distribuição, estruturando um modelo de remuneração financeira ao proprietário do ativo.

9.3. Desafios de segurança e engenharia civil

A introdução de vetores de alta densidade energética no tecido urbano acarreta riscos específicos de segurança pública. O combate a incêndios originados por *thermal runaway* em estruturas confinadas (como garagens subterrâneas e túneis) impõe severas restrições às equipes de resposta a emergências, visto que a reação libera oxigênio internamente, impedindo o abafamento convencional por supressão de oxigênio atmosférico.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esse panorama exige o desenvolvimento de novos protocolos de combate (como técnicas de imersão total em água) e induz a engenharia civil e a arquitetura a revisarem os códigos de edificação, visando implementar sistemas de exaustão forçada e barreiras de isolamento contra incêndio mais robustas em projetos residenciais e comerciais eletrificados.

10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A consolidação da mobilidade elétrica urbana e a consequente transição energética nas metrópoles contemporâneas dependem, de forma direta e intrínseca, da maturidade técnica, econômica e dos índices de segurança associados aos sistemas de armazenamento por íon-lítio. Conforme evidenciado ao longo deste estudo, o panorama tecnológico atual não se apoia em uma solução única, mas sim no equilíbrio estratégico entre diferentes químicas de células. Enquanto a variante NMC se consolida como o vetor ideal para aplicações que demandam alta densidade energética e autonomia estendida em veículos de passageiros, a química LFP afirma-se como a escolha predominante para frotas de transporte público e logística urbana comercial, impulsionada por sua notável estabilidade térmica, segurança operacional e expressiva vida útil cíclica.

Sob a perspectiva econômica, a análise do Custo Total de Propriedade (TCO) demonstra que, apesar do custo de aquisição inicial dos veículos elétricos ainda ser fortemente impactado pelo preço das células e pela volatilidade do mercado global de *commodities* minerais, a paridade de fabricação direta frente aos modelos equipados com motor de combustão interna (ICE) caminha para uma consolidação irreversível. As drásticas reduções de custos operacionais — da ordem de 40% a 50% nas despesas de manutenção programada e o baixo custo por quilômetro rodado devido à elevada eficiência dos trens de força elétricos garantem um retorno financeiro acelerado e atrativo, sobretudo para frotas de alta rodagem e sistemas de transporte coletivo.

No âmbito da infraestrutura urbana e da engenharia civil, os impactos da eletrificação revelam-se multifacetados, demandando um planejamento sistêmico por parte de concessionárias e órgãos públicos. Se, por um lado, a expansão de estações de recarga rápida (*Hubs CC*) impõe desafios severos à rede de distribuição local devido aos picos de demanda energética induzidos, por outro lado, a viabilização de redes inteligentes (*smart grids*) integradas à tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) transforma o passivo de uma frota conectada em um ativo de armazenamento distribuído de grande escala, capaz de injetar energia e estabilizar a matriz elétrica nos horários de maior consumo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Paralelamente, a introdução de vetores de alta densidade energética no tecido urbano exige uma imediata reformulação nos protocolos de segurança pública e nos códigos de edificação predial. O risco inerente ao fenômeno do descontrole térmico (*thermal runaway*) em ambientes confinados força a engenharia e a arquitetura a conceberem novos sistemas de exaustão, barreiras de isolamento corta-fogo e infraestruturas hidráulicas para combate a incêndios por técnicas de imersão, mitigando riscos severos à integridade das estruturas urbanas.

Em suma, conclui-se que o sucesso e a sustentabilidade da mobilidade elétrica não se limitam à substituição do combustível fóssil pela eletricidade, mas repousam no aprimoramento contínuo dos algoritmos preditivos dos sistemas eletrônicos de gerenciamento (BMS) para estender a vida útil das células, na mitigação ativa dos mecanismos de degradação eletroquímica e no desenvolvimento de políticas públicas voltadas à reciclagem e ao reuso de baterias em segunda vida. Somente através da convergência integrada entre a engenharia de materiais, o planejamento de infraestrutura de recarga inteligente e marcos regulatórios robustos será possível converter o potencial tecnológico das baterias de íon-lítio em uma matriz de transporte urbano verdadeiramente descarbonizada, eficiente e segura para as futuras gerações.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE). Evolução das vendas de veículos eletrificados no Brasil (2015-2025). São Paulo: ABVE, 2026. Disponível em: https://abve.org.br/. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global EV Outlook 2026: catching up with the electric mobility transition. Paris: IEA, 2026. Disponível em: https://www.iea.org. Acesso em: 10 abr. 2026.

JIANG, Jiuchun; ZHANG, Caiping. Fundamentals and Applications of Lithium-ion Batteries in Electric Drive Vehicles. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.

MICHELINI, Aldo. Baterias de Lítio. São Paulo: STA Eletrônica, [20--]. Disponível em: https://www.sta-eletronica.com.br/resources/downloads/ebookbateriasdelitio.pdf. Acesso em: 02 fev. 2026.

PLETT, Gregory L. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Boston: Artech House, 2015.

YOSHIO, Masaki; BRODD, Ralph J.; KOZAWA, Akiya. Lithium-Ion Batteries: Science and Technologies. New York: Springer, 2009.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.