

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA WEB PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO ENERGÉTICO DO ÔNIBUS ELÉTRICO USANDO DADOS MEDIDOS

Palavras-Chave: MOBILIDADE ELÉTRICA, ÔNIBUS ELÉTRICO, DESEMPENHO ENERGÉTICO

Autores(as):

NATHÁLIA KAORI GONDO, FEEC - UNICAMP

Prof. Dr. MADSON CORTES DE ALMEIDA, DSEE - UNICAMP

INTRODUÇÃO

A crescente popularidade dos veículos elétricos (VEs) para transporte público e particular é uma tendência mundial, impulsionada por benefícios ambientais. Países como Reino Unido, França e Alemanha estão limitando a produção de veículos a combustíveis fósseis [1], [2]. No Brasil, espera-se que VEs e híbridos plug-in representem 11% do mercado de veículos leves até 2050, com eletrificação prevista em 72% das frotas [3], [4].

Em 2019, a UNICAMP, em parceria com a CPFL, iniciou um laboratório vivo para estudos em mobilidade elétrica, focando no monitoramento e conectividade em tempo real de ônibus elétricos, eletropostos e a rede de energia [5]. O objetivo é criar soluções para gerenciamento inteligente de recargas, reduzindo impactos na rede e evitando investimentos desnecessários. Estudos adicionais abordaram a gestão de transporte público, manutenção de vias, conforto dos usuários e monitoramento da poluição.

Apesar dos benefícios dos VEs, desafios como a disponibilidade de matérias-primas para baterias, tecnologia para autonomia e segurança, e custos de aquisição persistem. A eficiência energética e os custos operacionais dos ônibus elétricos variam devido à demanda do sistema de transporte, uso de ar-condicionado, relevo das rotas e comportamento do motorista [6]. Compreender o desempenho e consumo energético dos ônibus elétricos em diferentes condições é crucial para gestão eficaz das recargas e viabilidade financeira na transição para a mobilidade elétrica.

METODOLOGIA

O ônibus elétrico usado no projeto tem carroceria Marcopolo e chassis BYD D9W, modelo BYD-2912TZ-XY-A, com dois motores elétricos e baterias de fosfato de ferro-lítio ($LiFePO_4$) de 324 kWh, fornecendo uma tensão nominal de 537,6 V e carga nominal de 600 Ah [7]. O sistema de coleta de dados de consumo utiliza a interface OBDII para extrair informações das unidades controladoras via protocolo CAN SAE J1939 [8]. Isso permite a leitura de quilometragem, corrente, tensão e estado de carga (SoC) da bateria, embora o consumo de energia não esteja disponível diretamente no painel.

Para analisar a carga e descarga da bateria, os dados de tensão e corrente são usados para calcular a carga elétrica e a energia transferida. Os cálculos seguem o método de contagem de Coulomb ou integração de corrente [9], [10], integrando a corrente ao longo do tempo para obter a carga (Ah) e a potência elétrica para obter a energia (Wh):

$$\Delta Q = \int I_{bat} dt; \Delta E = \int P_{bat} dt; P_{bat} = I_{bat} \cdot V_{bat} \quad (4.1)$$

Devido à discretização das amostras de tensão e corrente, as integrais são calculadas pela regra do trapézio, aproximando a curva por um polinômio de ordem 1 [11]. Este método soma as integrais parciais correspondentes aos intervalos entre as medidas, aplicável tanto para valores positivos, consumo por padrão, quanto negativos de corrente, durante a regeneração.

Os processos físico-químicos na bateria resultam em perdas, impedindo a recuperação integral da carga elétrica e energia durante a descarga. Para atualizar o SoC durante os microciclos, o algoritmo de cálculo considera diferentes taxas de variação de carga, dependendo da direção da injeção ou retirada de carga. As perdas e ineficiências são levadas em conta, embora os algoritmos específicos utilizados sejam desconhecidos.

Para fins de estudo, a variação de carga e energia é analisada considerando a carga nominal total do ônibus de 600 Ah e 324 kWh para energia. Quando a corrente é negativa aumenta-se o SoC atual em relação ao anterior. Quando a energia é consumida, o SoC diminui.

$$SoC_i = SoC_{i-1} - \frac{\Delta Q}{Q_{total}}; SoC_i = SoC_{i-1} - \frac{\Delta E}{E_{total}} \quad (4.2)$$

Através das equações, é possível encontrar a carga total dada pelo SoC da bateria considerando a variação de 1% de SoC, verificando se esses valores permanecem constantes em relação aos nominais da bateria. Analisar a carga total em relação ao SoC ajuda a identificar problemas na bateria quando os valores se afastam dos nominais.

O algoritmo de cálculo do SoC da bateria utiliza informações específicas para sua parametrização adequada. Uma análise detalhada da variação do SoC é dada sobre as perdas de carga ($Perda_{carga}$) durante o ciclo de uso da bateria. A carga consumida (con_i) é determinada pela relação entre as parcelas positivas (p_i) e negativas (n_i) da carga:

$$Carga_{con_i} = Carga_{p_i} + (1 - Perda_{carga}) \cdot Carga_{n_i} \quad (4.3)$$

Essa metodologia permite levar em conta as perdas na bateria para estimar a carga líquida fornecida ao *powertrain* do ônibus. Diversas curvas de carga consumida são geradas, e a melhor correspondência às condições reais de operação é determinada por meio de uma análise de dispersão dos resultados, focando na menor dispersão causada pelos microciclos de carga.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados recebidos pelo barramento CAN são discretizados, permitindo a obtenção de informações detalhadas sobre carga e energia elétrica a partir das variáveis de corrente e potência ao longo do tempo. Durante diferentes situações do ônibus, como movimento, parada e recarga, essas variáveis se comportam de maneira distinta. Quando o ônibus está parado, há um consumo mínimo de energia, limitado ao funcionamento básico do veículo. A análise da eficiência da bateria ao longo do tempo é complexa devido aos microciclos de carga e descarga durante o movimento do ônibus elétrico.

Para uma análise mais detalhada o estudo começa, por meio da Figura 2., com o SoC da bateria em 100% (i), um valor facilmente identificado e preciso no algoritmo do *Battery Management System* (BMS). Ao iniciar a operação, o consumo aumenta para impulsionar o *powertrain*, e os freios regenerativos entram em ação apenas quando o SoC atinge 95%. Durante a condução e recarga, fluxos de carga e energia entram e saem da bateria, intercalados por pequenos patamares de SoC constantes, correspondentes a períodos de inatividade entre viagens (ii). O SoC reduz durante o percurso (iii) e raramente cai abaixo de 20%, mantendo o valor mínimo em 63% (iv) neste caso, até que uma nova recarga (v) restaure o SoC a 100% (vi).

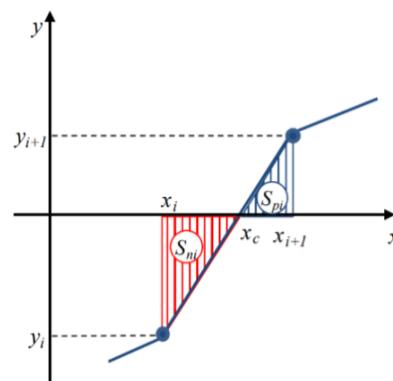


Figura 1: Ilustração gráfica do cálculo da integral pelo método do trapézio, representada pela área abaixo da curva formada pelas medições representadas pelos pontos (x_i, y_i) e (x_{i+1}, y_{i+1}) e transições de sinal no eixo y .

O mesmo pode ser feito para o SoE (*State of Energy*), considerando a variação de energia da bateria. No entanto, o SoE não é amplamente utilizado devido às perdas internas na bateria que dependem da magnitude da corrente elétrica, introduzindo imprecisões no cálculo, justificando assim um estudo mais aprofundado do SoC.

A estimativa do estado percentual da bateria foi realizada de quatro formas distintas: variação de carga constante (600 Ah), carga média mensal, energia constante (324 kWh) e energia média mensal variável. Os resultados mostraram valores satisfatórios em comparação com o SoC medido pelo ônibus. A curva mais precisa foi a da variação de carga conforme o SoC, enquanto as curvas baseadas em energia apresentaram maiores desvios, especialmente durante a recarga total. Saltos instantâneos no SoC medido durante a recarga, próximos a 100%, são comuns devido a discrepâncias entre a carga regenerada e consumida, atribuíveis a erros nos algoritmos ou perdas no processo de carga. Para corrigir isso, o algoritmo do ônibus ajusta o SoC para 100% quando atingida a carga total.

Ao final da análise neste caso, a carga total consumida foi de 361,19 Ah e a regenerada de 358,34 Ah, com os freios regenerativos responsáveis por 38,74% da carga regenerada (138,83 Ah). Isso resulta em uma carga adicional de 2,85 Ah devido a perdas no processo eletroquímico, com uma eficiência coulômbica média de 99,21% e uma perda de carga de 0,79%. Para o SoE, considerando o consumo líquido de energia e descontando a parcela regenerada, o valor líquido é de 138,83 kWh. Durante a recarga, foram adicionados 58,47 kWh, totalizando 202,56 kWh injetados na bateria. No balanço geral, houve uma injeção adicional de 5,26 kWh devido a perdas no processo eletroquímico, resultando em uma perda energética média de 2,60% durante o ciclo.

Determinar a quantidade de carga por percentual de SoC é crucial para uma estimativa precisa da capacidade da bateria. Utilizando a metodologia baseada na equação (4.2), somam-se as cargas para intervalos de 1% do SoC e divide-se por 1%, obtendo valores próximos a 600 Ah, a capacidade nominal da bateria. Desvios desses valores podem indicar problemas na bateria, operando fora da faixa nominal. A análise desconsidera falhas na obtenção de dados ou erros de amostragem, proporcionando uma estimativa mais precisa da carga consumida ou regenerada.

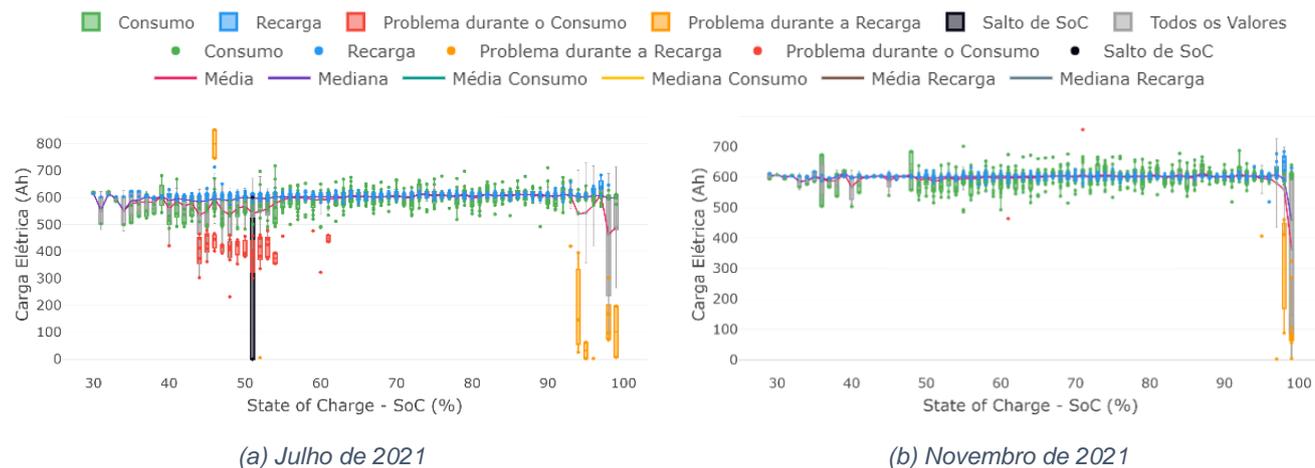


Figura 3: Análise detalhada dos meses que indicaram falha (exemplo em julho de 2021) e após o balanceamento da bateria (exemplo em novembro de 2021). Presença dos valores das cargas por SoC e as respectivas médias e medianas.

Para entender os padrões de carga nos intervalos de SoC, foram calculadas médias e medianas mensais das cargas consolidadas ao longo de dezesseis meses de operação no campus, de abril de 2021 a julho de 2022. Durante a faixa de 40 a 95% do SoC, a carga permanece estável, enquanto fora desse intervalo observa-se uma oscilação. Durante a recarga, SoCs acima de 90% exibem dispersão

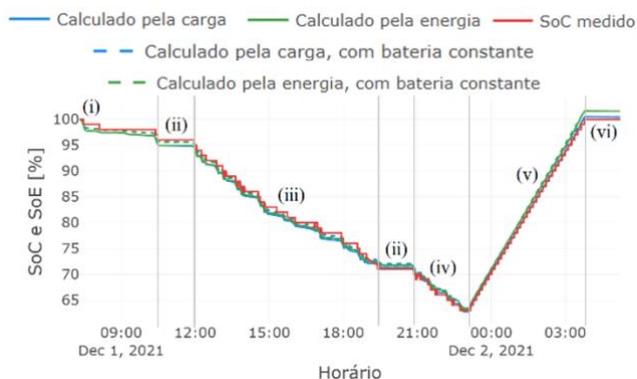


Figura 2: Estimativa do SoC a partir da variação da carga e energia da bateria em 8 de março de 2022.

considerável, com valores próximos de zero, dificultando a identificação de falhas. Em movimento, há maior dispersão nos valores de carga inferiores a 60%, enfraquecendo a correlação entre a variação do SoC e o consumo de carga.

Em outubro de 2021, houve um alerta em relação à saúde da bateria, resultando no procedimento de balanceamento de células para restabelecer o padrão desejado na capacidade de fornecimento de energia da bateria. Esta análise detalhada ajuda a identificar anomalias e tomar medidas corretivas oportunas.

Para analisar a evolução da bateria desde os meses anteriores ao agravamento do problema até os meses posteriores ao reparo, foi examinado o mês de novembro do mesmo ano. As análises de julho sugerem indícios de desgaste na bateria. Em SoCs intermediários baixos (entre 35% e 60%), há uma presença significativa de cargas abaixo da faixa esperada de 450 Ah, resultando em médias e medianas menos constantes durante o consumo. No entanto, para SoCs abaixo dessa faixa, não há uma queda abrupta de carga, como ocorre nos meses com problemas graves. Na Figura 3 (a), é notável um aumento de carga durante a recarga da bateria que, embora não indique uma falha real, pois ocorre durante a recarga no eletroposto, é um fator a ser considerado na análise.

Por outro lado, no mês comparativo de novembro (Figura 3 (b)), que sucede o reparo da bateria, há uma evidente diferença nas mesmas faixas de SoC. Apesar da presença de alguns valores menores de carga, a média e a mediana permanecem praticamente constantes em torno de 600 Ah. Isso destaca uma notável melhoria quando comparado com os meses anteriores, indicando uma recuperação na capacidade de fornecimento de energia da bateria após o reparo.

Além das informações sobre corrente, tensão e SoC do ônibus elétrico, o veículo também possui rastreamento por GPS, com dados de latitude, longitude e altitude coletados a cada segundo. A Figura 4 apresenta os valores de carga em relação às posições do ônibus, com pontos verdes indicando regeneração de energia e pontos vermelhos indicando consumo de energia. A figura mostra trajetos completos do ônibus pelo campus da UNICAMP em horários diferentes: um durante a manhã, com a bateria totalmente carregada, e outro à tarde, com o SoC em 64%.

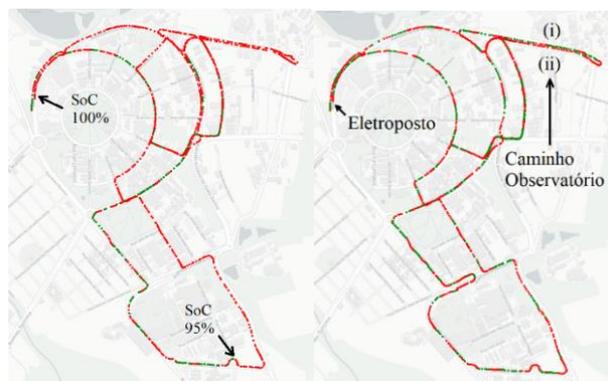


Figura 4: Comportamento da carga ao longo do trajeto no Campus. Projeção com dados obtidos via GPS. Dados coletados em 08 de março de 2022.

Na viagem matinal, observa-se que grande parte do percurso não apresenta regeneração da bateria. Isso ocorre porque, com SoCs muito elevados, a bateria não pode receber cargas adicionais para preservação, evitando a regeneração de energia. Quando o SoC cai abaixo de 95%, os freios regenerativos começam a atuar. A influência dos freios regenerativos é evidente durante as frenagens, principalmente em descidas, como na descida do observatório (i), onde há maior presença de microciclos de carga. Na subida, há basicamente apenas a presença de descarga (ii).

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam a importância de um algoritmo capaz de calcular as cargas consumidas e regeneradas durante o percurso do ônibus elétrico no Campus da UNICAMP. Os estudos visaram criar algoritmos precisos para calcular a carga regenerada e consumida, determinando o SoC e comparando esses cálculos com os dados fornecidos pelo barramento CAN do ônibus. Isso permitiu monitorar o funcionamento dos freios regenerativos durante as frenagens e identificar momentos em que a regeneração de energia é mais frequente.

Com essas informações, foi possível desenvolver algoritmos para a prevenção de problemas na bateria e realizar comparações entre períodos em que a bateria estava saudável e períodos em que apresentava sintomas de anomalias. A análise detalhada dos dados permitiu identificar padrões de anomalias no comportamento da bateria, facilitando a detecção precoce de sinais de desgaste ou

falhas. Essa detecção precoce possibilitou intervenções preventivas antes que problemas mais sérios se desenvolvessem, aumentando a confiabilidade da operação e a vida útil da bateria.

A comparação constante entre os cálculos do SoC e os dados medidos do barramento CAN ajudou a refinar os algoritmos, tornando-os mais precisos e confiáveis. Isso contribuiu para uma melhor gestão da energia e maior eficiência operacional do ônibus elétrico. Observou-se que a implementação de procedimentos de balanceamento de células e outras medidas corretivas resultou em melhorias significativas no desempenho da bateria após os reparos.

Em resumo, o desenvolvimento e a implementação de algoritmos para calcular e monitorar as cargas consumidas e regeneradas não apenas melhoraram a eficiência do ônibus elétrico, mas também aumentaram a confiabilidade e a vida útil da bateria. Estes avanços são essenciais para a viabilidade e sustentabilidade a longo prazo dos sistemas de transporte elétrico.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Wu, Z. Yang, B. Lin, H. Liu, R. Wang, B. Zhou, and J. Hao, **“Energy consumption and CO2 emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China,”** *Energy Policy*, vol. 48, pp. 537–550, 2012.
- [2] J. H. Langbroek, J. P. Franklin, and Y. O. Susilo, **“The effect of policy incentives on electric vehicle adoption,”** *Energy Policy*, vol. 94, pp. 94–103, 2016.
- [3] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Recursos Energéticos Distribuídos 2050 - NT-PR-008/2018. Brasília: ANEEL, 2018.
- [5] F. Sehar, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, **“Demand management to mitigate impacts of plug-in electric vehicle fast charge in buildings with renewables,”** *Energy*, vol. 120, pp. 642–651, 2017.
- [6] Z. Wang, G. Feng, D. Zhen, F. Gu, and A. Ball, **“A review on online state of charge and state of health estimation for lithium-ion batteries in electric vehicles,”** *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5141–5161, 2021.
- [7] BYD, Manual do Proprietário - Chassi do BYD D9W 20.410, 2017.
- [8] M. Stepper, **“J1939 High Speed Serial Communications, The Next Generation Network for Heavy Duty Vehicles,”** *SAE Technical Paper*, 09 01 1993.
- [9] E. Aslan e Y. Yasa, **“A Review on The Battery State of Charge Estimation Methods For Electric Vehicle Battery Management Systems,”** em *2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 2019.
- [10] F. Pei, K. Zhao, Y. Luo e X. Huang, **“Battery Variable Current-discharge Resistance Characteristics and State of Charge Estimation of Electric Vehicle,”** em *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006.
- [11] C. A. Thompson, **“A study of numerical integration techniques for use in the companion circuit method of transient circuit analysis,”** *ECE Technical Reports*, p. 297, 1992