Gerenciamento Energético Otimizado de Ônibus Híbridos com Bateria e Células à Combustível

João Lucas Rodrigues * **Richard W. Salas** ** **Joel D. M. Trujillo** ***

* *Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 09210-580, (e-mail: lucas.joao@aluno.ufabc.edu.br).*
** *Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 09210-580, (e-mail: richard.wsalas@gmail.com)*
*** *Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 09210-580, (e-mail: joel.melo@ufabc.edu.br)*

Abstract: Hybrid buses have electric engines powered by more than one energy source, which can reduce polluting gas emissions as long as they use clean energy. In this type of bus, the energy management system (EMS) determines the best source for each operation. However, the implementation of hybrid electric buses in the public transport fleet has high costs involved; energy management strategies that improve energy use and that can have economically viable costs to increase their penetration in the transport sector become relevant. This work presents a mathematical model to help define the parameters of the EMS algorithms used in hybrid buses with batteries and fuel cells. This model allows you to optimize the energy management of the hybrid buses, minimizing energy consumption while the equipment's maximum current and voltage values are respected. The model is applied in the offline simulation of the energy management of a bus on the ABC metropolitan corridor that connects the San Mateus and Jabaquara terminals to connect the ABC region with the city of São Paulo. When there is only one energy source on the bus, and it is not necessary to have an EMS, it was found that the proposed model achieves a reduction in recharging cost of 11.44 % at the end of daily operation. Such savings can help enable greater penetration of hybrid buses in urban areas.

Resumo: Os ônibus híbridos têm motores elétricos que são alimentados por mais de uma fonte de energia, podendo reduzir as emissões de gases poluentes desde que utilizem fontes de energia limpa. Nesse tipo de ônibus, o sistema de gerenciamento de energia (EMS - Energy Management System) determina qual é a melhor fonte que deve ser utilizada em cada momento de operação. No entanto, a implementação de ônibus elétricos híbridos na frota de transporte público tem altos custos envolvidos, tornam-se relevantes estratégias de gestão de energia que melhorem o aproveitamento energético e que possam ter custos economicamente viáveis para aumentar sua penetração no setor de transporte. Este trabalho apresenta um modelo matemático para auxiliar na definição de parâmetros dos algoritmos de EMS que são utilizados em ônibus híbridos com bateria e células à combustível. Esse modelo permite otimizar o gerenciamento de energia do ônibus híbridos, minimizando o consumo de energia, enquanto os valores máximos de corrente e tensão dos equipamentos são respeitados. O modelo é aplicado na simulação offline do gerenciamento energético de um ônibus do corredor metropolitano ABC que conecta os terminais de San Mateus e Jabaquara para conectar a região do ABC com a cidade de São Paulo. No caso em que há uma fonte de energia no ônibus e não é necessário ter um EMS, verificou-se que o modelo proposto obtém uma redução no custo de recarga de 11,44 % no final da operação diária. Tal nível de economia pode ajudar a viabilizar a maior penetração de ônibus híbridos em zonas urbanas.

Keywords: Hybrid buses, Energy Management Systems, Optimization Model.

Palavras-chaves: Ônibus Híbrido, Gerenciamento de Energia, Modelo de Otimização.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação sobre as mudanças climáticas e sobre a dependência de combustíveis fósseis para suprimento da demanda energética são temas recorrentes nas discussões sobre o desenvolvimento sustentável no transporte urbano (Sun et al., 2022). Uma das soluções propostas para esse desenvolvimento são investimentos na substituição da frota de transporte público movido com fontes poluentes por ônibus elétricos híbridos (López-Ibarra et al., 2020).

Os ônibus elétricos movidos a bateria tem a dificuldade de ter altos valores de peso por causa do conjunto de pacotes das baterias, diminuindo a autonomia do ônibus e a quantidade de passageiros que podem ser transportados (Prasanthi et al., 2021). Assim, a hibridização desse tipo de ônibus pode diminuir a quantidade de pacotes de bateria, melhorando sua autonomia e diminuindo seu peso (Yu et al., 2016).

Em ônibus que utilizam mais de uma fonte enérgica, um sistema de gerenciamento de energia (EMS – *Energy Management System*) é utilizado para determinar a melhor fonte para atender a demanda do barramento de corrente contínua (DC) em cada momento de sua operação. Tal determinação é utilizando dados de condução e sensores instalados dentro do ônibus (Wang et al., 2022).

No entanto, a implementação de ônibus elétricos híbridos na frota de transporte público tem altos custos envolvidos, tornando-se relevantes estratégias de gestão de energia que melhorem o aproveitamento energético e que possam ter custos economicamente viáveis para aumentar a penetração desses ônibus no setor de transporte.

Este trabalho apresenta um modelo matemático que auxilie na definição dos melhores parâmetros dos algoritmos de EMS para o gerenciamento energético otimizado de ônibus elétricos híbridos movidos a bateria e célula à combustível de hidrogênio. A solução de tal modelo determina um programa de operação da bateria e da célula à hidrogênio que atenda a demanda do barramento DC durante o trajeto do ônibus, considerando os tempos de resposta de cada fonte e a potência demandada pelo ônibus. Na busca desse programa de operação se minimiza o custo de operação para o aproveitamento de cada fonte energética enquanto a autonomia do ônibus é mantida. Além disso, os limites máximos e mínimos de corrente e tensão da bateria e da célula à combustível são considerados, mantendo sua vida útil.

As contribuições deste trabalho são:

- Um modelo de otimização que permite encontrar os melhores parâmetros para serem utilizados no EMS de ônibus híbridos a bateria e célula à hidrogênio. Tal modelo pode auxiliar na minimização do custo de operação de cada fonte energética, atendendo as restrições operacionais e quilômetros que precisam ser rodados em cada dia de operação.
- Apresentação de um estudo de caso com a aplicação da proposta de otimização na operação de um ônibus urbano na região do ABC, São Paulo, Brasil, considerando os tempos de viagem e paradas realizadas. Os resultados deste estudo de caso podem auxiliar nas tomadas de decisão sobre investimentos nas frotas de ônibus urbanos para regiões metropolitánas.

⋆ Os autores agradecem à CAPES (Processo 88887.709682/2022-00, 88887.692379/2022-00, 88887.939062/2024-00) e ao CNPq (Projeto Universal n. 407244/2023-9, n. 408898/2021-6) pelo auxílio financeiro.

Este trabalho é dividido em 5 seções, sendo que a Seção 1 mostra os benefícios dos ônibus híbridos. A Seção 2 apresenta as metodologias disponívies na literatura especializada para a definição de parâmetros de algoritmos de EMS. A formulação matemática para a operação de ônibus híbrido e a proposta de gerenciamento energético é apresentado na Seção 3. Os resultados e discussão dos cenários de operação considerados no estudo de caso são apresentados na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 mostra as conclusões deste trabalho.

2. METODOLOGIAS PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS DO EMS

O trabalho descrito por Sun et al. (2022) apresentou um EMS que identifica padrões na condução do ônibus para otimizar a vida útil da bateria e a eficiência no consumo de combustível em ônibus híbridos movidos por células à combustível (FC) e baterias. Utilizando o princípio do mínimo de Pontryagin no controle ótimo dos sistemas do ônibus e um algoritmo DBSCAN para prever seu trajeto, uma significativa redução no consumo de hidrogênio é conseguida. Adicionalmente, tal trabalho apresenta análises comparativas com dados reais de condução para mostrar a melhora na vida útil das fontes energéticas.

Du et al. (2022), por sua vez, propuseram uma estratégia de gerenciamento energético baseada em programação dinâmica, focada na redução do consumo e no aumento da durabilidade das baterias e FC em veículos elétricos híbridos. A estratégia considerou variações na demanda do motor e os estados ligados e desligados da FC, minimizando a resposta sob condições desfavoráveis e prolongando a vida útil das fontes energéticas. Simulações demonstraram uma redução no consumo de hidrogênio em comparação com simulações sem a aplicação do EMS proposto.

No trabalho de Podder et al. (2021), diversas estratégias de gerenciamento de energia foram analisadas para veículos elétricos híbridos com várias fontes de energia, tais como ultracapacitor (UC), FC, e bateria. A análise técnica de cada fonte e suas condições operacionais buscou destacar os prós e contras de cada abordagem. Adicionalmente, apresentam-se comparações quanto ao desempenho, vida útil da bateria, eficiência energética, consumo de combustível, emissões e robustez.

Por outro lado, em Prasanthi et al. (2021) desenvolveram uma metodologia para dimensionar as fontes de energia de veículos híbridos integrando baterias, FC e UCs. O EMS foi elaborado com base nas resistências internas da bateria e do UC, assumindo uma potência constante fornecida pela FC, enquanto as baterias e UCs complementavam a demanda conforme avaliação do EMS. Comparações com a técnica DWT (*Discrete Wavelet Transformation*) demonstraram superioridade nos resultados obtidos pelo EMS desenvolvido.

Finalmente, em Yu et al. (2016) propuseram um EMS para ônibus híbridos com baterias e super capacitores, adapta-

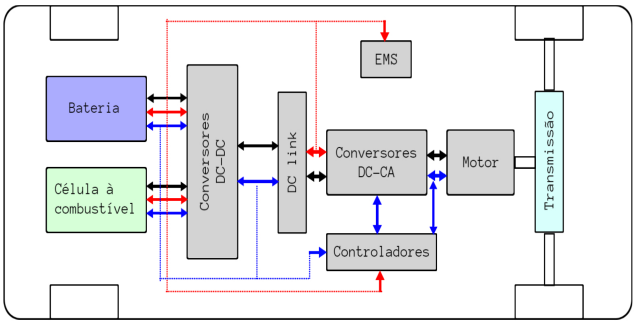

Figura 1. Topologia do ônibus híbrido estudado de acordo com Prasanthi et al. (2021)

dos à tecnologia de carregamento rápido, vislumbrando a otimização do consumo de energia e a degradação da bateria. Técnicas como lógica difusa (*fuzzy logic*), programação dinâmica (*dynamic programming*) e algoritmos genéticos (*genetic algorithm*) foram empregadas na formulação dos cenários, levando em consideração velocidade do ônibus, distância percorrida, e demanda de potência do motor. Os resultados mostraram ganhos significativos tanto na economia no consumo de energia quanto na extensão da vida útil da bateria.

Inspirado no estudo feito em Yu et al. (2016), este trabalho utiliza uma base de dados composta por informações de velocidade, distância percorrida e demanda de potência do motor para realizar simulações off-line de um ônibus que opera no corredor metropolitano ABC entre San Mateus e Jabaquara, conectando a região do ABC com São Paulo. Adicionalmente, similar ao estudo de Sun et al. (2022), este trabalho considera a otimização do gerenciamento de energia para operação do dia seguinte em um ônibus híbrido a FC e bateria, visando minimizar seu consumo de energia enquanto os valores máximos de corrente e tensão da sua bateria são atendidos.

3. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA ESTRATÉGIA DO GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PROPOSTO

3.1 Formulação Matemática

O princípio de locomoção de um ônibus se baseia na somatória de forças aplicadas no ônibus. A força da propulsão ou força de tração impulsiona o ônibus na velocidade desejada e deve superar as forças opostas, que é a soma da força de arrasto aerodinâmico, força de resistência ao rolamento e força gravitacional, como apresentado em Prasanthi et al. (2021).

A topologia mostrada na Figura 1 foi utilizada como base para desenvolvimento da formulação matemática deste trabalho. Assim, duas fontes energéticas são consideradas, sendo estas a bateria e a FC para a operação do ônibus híbrido. A seguir são apresentadas as formulações matemáticas para operação dessas fontes, seguindo a modelagem apresentada em Prasanthi et al. (2021).

A força de arrasto aerodinâmico é devido à resistência viscosa e é dada por:

$$Fa(t) = \frac{1}{2}\rho C_d A_f (v(t) + v_w(t))^2, \tag{1}$$

Sendo que C_d é o coeficiente de arrasto; ρ é a densidade do ar; A_f é a área da superfície frontal do veículo; $v_w(t)$ e $v(t)$ são a velocidade do vento e do veículo, respectivamente, e t representa o tempo.

Por outro lado, a partir da base histórica de operação do ônibus que contenha a distância percorrida a cada instante de tempo se pode determinar a velocidade, utilizando a seguinte expressão:

$$v(t) = \frac{s(t)}{t}, \tag{2}$$

Sendo que $s(t)$ é a distância percorrida no instante t

Por outro lado, a força de resistência ao rolamento é a resistência ao movimento do veículo, sendo determinada a partir de:

$$F_r(t) = mgC_r cos(\Theta(t)), \tag{3}$$

Em que m é a massa do veículo; g é a aceleração da gravidade $(9,81m/s2)$; $\Theta(t)$ é o ângulo de inclinação da estrada e C_r é o coeficiente de atrito de rolamento.

A força gravitacional $F_g(t)$ é expressa da seguinte forma:

$$F_g(t) = mgsin(\Theta(t)), \tag{4}$$

Na qual a força de tração $F_{tr}(t)$ é a soma das forças de arrasto aerodinâmico $F_a(t)$, de resistência ao rolamento $F_r(t)$, força gravitacional $F_g(t)$ e força de aceleração $F_{acc}(t)$, sendo definida por:

$$F_{tr}(t) = F_{acc} + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t), \tag{5}$$

Em que a força de aceleração $F_{acc}(t)$ e a potência de tração $P_{tr}(t)$ são expressas da seguinte forma:

$$F_{acc}(t) = m\frac{dv(t)}{dt}, \quad P_{tr}(t) = F_{tr}(t) \times v(t), \tag{6}$$

Dessa forma, é possível obter a potência elétrica demandada $P_{ele}(t)$ pelo motor e potência no barramento DC entregue pelo conversor da seguinte forma:

$$P_{ele}(t) = \frac{P_{tr}(t)}{\eta_m}, \quad P_{DC}(t) = \frac{P_{ele}(t)}{\eta_i}, \tag{7}$$

Sendo que η_m é a eficiência do motor e η_i é a eficiência do inversor.

Neste trabalho foi utilizado o Modelo de Thevenin de segunda ordem com dois pares de capacitores e resistores em paralelo, como mostrado na Figura 2, que é adotado de Prasanthi et al. (2021). O par R_{minb} e C_{minb} representa os efeitos transitórios de curto prazo, e o par R_{secb} e C_{secb} caracteriza os efeitos transitórios de longo prazo. No modelo matemático considerado, R_{0b} representa a

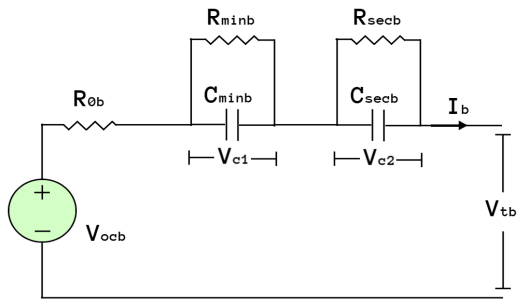

Figura 2. Modelo de segunda ordem da bateria de acordo com Prasanthi et al. (2021)

resistência em série efetiva e V_{ocb} é a tensão de circuito aberto da bateria.

Aplicando conceitos de circuitos elétricos, como o Teorema de Thévenin, a tensão de saída do terminal da bateria $V_{tb}(t)$ pode ser expressa da seguinte forma:

$$V_{tb}(t) = V_{ocb}(t) - I_b[R_{0b} + R_{secb}(1 - e^{\frac{-t}{R_{secb}C_{secb}}}) + R_{minb}(1 - e^{\frac{-t}{R_{minb}C_{minb}}})], \quad (8)$$

Sendo que I_b é a corrente da bateria, considerada como constante ao longo do trajeto; R_{0b} é a resistência em série efetiva; R_{minb} é a resistência que representa os efeitos transitórios de curto prazo; C_{minb} é a capacitância que representa os efeitos transitórios de curto prazo; R_{secb} é a resistência que representa os efeitos transitórios de longo prazo; C_{secb} é a capacitância que representa os efeitos transitórios de longo prazo; $V_{tb}(t)$ é a tensão de saída do terminal da bateria e V_{ocb} é a tensão de circuito aberto da bateria.

A potência da bateria $P_b(t)$ é relacionada com a tensão terminal da bateria $V_{tb}(t)$ e com a corrente I_b:

$$P_b(t) = V_{tb}(t)I_b, \quad (9)$$

Para garantir o aproveitamento adequado e vida útil da bateria, restrições operacionais foram aplicadas à potência, corrente, SoC e tensão. Tais restrições impõe que a tensão e potência devem estar dentro dos valores admitidos pela bateria e que o SoC mínimo da bateria seja superior a 20%. Foi considerado que a bateria entrará em operação para demandas que não puderem ser atendidas pela FC, a fim de minimizar desligamentos da célula, que atenderá a maior parte da demanda do motor e demandas pico serão atendidas pela bateria.

$$P_b^{min} \leq P_b(t) \leq P_b^{max}, \quad (10)$$

$$20\% \leq SoC_b(t) \leq SoC_b^{max}(t), \quad (11)$$

$$V_{tb}(t) \leq V_{tb}^{max}, \quad (12)$$

Para o modelo proposto de bateria, a tensão de circuito aberto V_{ocb}, a resistência em série R_{0b}, as resistências de efeitos transitórios de curto R_{minb} e longo prazo R_{secb} e capacitâncias de efeitos transitórios de curto C_{minb} e longo C_{secb} prazo são definidas da seguinte forma, conforme Prasanthi et al. (2021):

$$V_{ocb}(SoC_b) = 3,690 + 0,216SoC_b - 0,118SoC_b^2 + 0,320SoC_b^3 - 1,030e^{-35SoC_b}, \quad (13)$$

$$R_{0b}(SoC_b, T_b) = (0,0745 + 0,156e^{-24,370SoC_b})TRB(T_b), \quad (14)$$

$$R_{minb}(SoC_b, T_b) = (0,050 + 6,603e^{-155,200SoC_b})TRB(T_b), \quad (15)$$

$$C_{minb}(SoC_b, T_b) = (4475 + 6056e^{-27,120SoC_b})TCB(T_b), \quad (16)$$

$$R_{secb}(SoC_b, T_b) = (0,047 + 0,321e^{-21,140SoC_b})TRB(T_b), \quad (17)$$

$$C_{secb}(SoC_b, T_b) = (704 + 753e^{-13,510SoC_b})TCB(T_b), \quad (18)$$

Em que T_b é a temperatura da bateria em ºC, adotada como um valor fixo de 94 ºC. $TRB(T_b)$ e $TCB(T_b)$ são os fatores de variação de temperatura da resistência e da capacitância, respectivamente, e são definidos da seguinte forma Prasanthi et al. (2021):

$$TRB(T_b) = 2,183 - 0,078T_b + 0,001T_b^2, \quad (19)$$

$$TCB(T_b) = 0,967 + 0,015T_b, \quad (20)$$

Sendo:

$F_a(t)$	Força de arrasto aerodinâmico
$F_r(t)$	Força de resistência ao rolamento
$F_{acc}(t)$	Força de aceleração
$F_{tr}(t)$	Força de tração
$F_g(t)$	Força gravitacional
$P_{tr}(t)$	Potência de tração
P_{ele}(t)	Potência elétrica do motor
$P_{DC}(t)$	Potência DC entregue para o conversor
P_b^{max}	Potência máxima da bateria
P_b^{min}	Potência mínima da bateria
$P_b(t)$	Potência da bateria
$v_w(t)$	Velocidade do vento
v(t)	Velocidade do veículo
$V_{tb}(t)$	Tensão de saída do terminal da bateria
V_{ocb}(t)	Tensão de circuito aberto da bateria
V_{tb}^{max}	Tensão máxima da bateria
V_{tFC}^{max}	Tensão máxima da FC
I_b	Corrente da bateria

I_b^{max}	Corrente máxima da bateria
R_{0b}	Resistência em série efetiva
R_{minb}	Resistência que representa os efeitos transitórios de curto prazo
R_{secb}	Resistência que representa os efeitos transitórios de longo prazo
C_{minb}	Capacitância que representa os efeitos transitórios de curto prazo
C_{secb}	Capacitância que representa os efeitos transitórios de longo prazo
$SoC_b(t)$	Estado da carga (SoC) da bateria
$SoC_b^{max}(t)$	Valor máximo do SoC da bateria
$\Theta(t)$	Ângulo de inclinação da estrada
$s(t)$	Distância percorrida
t	Instante de tempo t
TRB	Fator de variação de temperatura da resistência
TCB	Fator de variação de temperatura da capacitância
T_b	Temperatura da bateria
ρ	Densidade do ar
C_d	Coeficiente de arrasto
A_f	Área de superfície frontal do veículo
m	Massa do veículo
g	Aceleração da gravidade
C_r	Coeficiente de atrito de rolamento
η_m/η_i	Eficiência do motor/inversor

3.2 Modelo de otimização matemática

Para a definição da função objetivo a ser minimizada e das restrições aplicáveis, foi considerado que para cada instante de operação o motor seria alimentado exclusivamente por uma bateria ou por uma FC, mas nunca por ambas as fontes de forma simultânea.

Como destacado em Du et al. (2022) e Podder et al. (2021), a consideração de uma única fonte de energia por vez simplifica tanto a modelagem quanto a análise. Adicionalmente, diferentes condições de condução ou cenários operacionais podem demandar o uso de uma fonte de energia em detrimento da outra. Por exemplo, as FCs tendem a apresentar maior eficiência em velocidades constantes e em períodos prolongados de condução, enquanto baterias costumam ser mais adequadas para altos picos de demanda. Embora a utilização conjunta de bateria e FC em um veículo possa potencialmente reunir os benefícios de ambas as tecnologias, é essencial compreender o desempenho e o impacto individuais de cada uma para projetar sistemas de energia híbridos que sejam tanto eficientes quanto eficazes.

A função objetivo deste modelo tem como propósito minimizar o custo de operação ($Custo$) associado a cada fonte de energia no instante de tempo t. As potências da bateria (P_t^{bat}) e da FC (P_t^{FC}) são utilizadas para suprir a demanda no barramento CC em kW. A variável binária γ_t determina qual fonte está alimentando o motor, onde $\gamma_t = 1$ indica que a FC está em operação, enquanto $\gamma_t = 0$ a operação da bateria. A função objetivo é expressa por:

$$\min Custo = C^{bat}(1-\gamma_t)P_t^{bat} + C^{FC}\gamma_t P_t^{FC} \tag{21}$$

Onde C^{bat} e C^{FC} denotam o custo de operação da bateria e da FC, em R$/kW, respectivamente.

As restrições (22) e (23) garantem que a potência fornecida pela bateria (P_t^{bat}) ou pela FC (P_t^{FC}) não exceda o nível de potência disponível no instante anterior $t-1$ na bateria (P_{t-1}^{barm}) ou na FC (P_{t-1}^{FCarm}).

$$(1-\gamma_t)P_t^{bat} - P_{t-1}^{barm} \leq 0, \tag{22}$$

$$\gamma_t P_t^{FC} - P_{t-1}^{FCarm} \leq 0, \tag{23}$$

Ainda, foi considerado que, quando a FC está operando, a potência e corrente não devem ultrapassar os valores máximos permitidos:

$$P_t^{FC} \leq P^{maxFC}, \quad I_t^{FCcar} \leq I^{maxFC}, \tag{24}$$

Sendo que a corrente da FC pode ser encontrada com:

$$P_t^{FC} - V^{FC} I_t^{FCcar} = 0, \tag{25}$$

Para o horizonte analisado, foi considerado que a FC opera em tensão constante. Por fim, pode-se mostrar a potência exigida P_t^{DC} em função do coeficiente γ como:

$$(1-\gamma_t)P_t^{bat} + \gamma_t P_t^{FC} = P_t^{DC}, \tag{26}$$

Sendo:

Variáveis:

$P_t^{bat/FC}$	Potência injetada pela bateria/FC para atendimento da demanda
P_t^{DC}	Potência DC injetada para o conversor
I_t^{FCcar}	Corrente da FC no instante t
γ_t	Variável binária que define a fonte ativa

Parâmetros:

I^{maxFC}	Corrente máxima da FC
V^{FC}	Tensão nominal da FC
P^{maxFC}	Potência máxima da FC
$C^{bat/FC}$	Custo para carregamento da bateria/FC

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho, considera-se que durante todo o percurso do dia seguinte, o ônibus utilizará seu corredor, sendo uma via exclusiva e dedicada à sua circulação no serviço de transporte público. Dessa forma, foi considerado que o ônibus não encontrou engarrafamentos durante o percurso. Os dados de distância percorrida a cada instante de tempo de um ônibus do corredor metropolitano da região do ABC em São Paulo, Brasil, foram utilizados como dados de entrada, incluindo as suas características técnicas. As especificações da bateria e da FC também foram consideradas como dados de entrada. Para a bateria, foi considerada uma tensão nominal de 400 V e uma capacidade de 36 kWh. Enquanto para a FC, foi considerada uma tensão nominal de 600 V e uma capacidade de 100 kWh. Tal corredor conecta os terminais de San Mateus e Jabaquara para conectar a região do ABC com a cidade de São Paulo. A partir dos dados de entrada foi realizado uma

simulação offline do gerenciamento energético, a fim de que se possa minimizar o custo de operação das fontes energéticas disponíveis no ônibus híbrido com bateria e FC. Embora a análise foi realizada para operação do dia seguinte, os resultados que serão apresentados nesta seção são para um trajeto de ida e volta entre os terminais do ônibus em análise. Esta forma de apresentar resultados foi escolhida, a fim de mostrar os custos de recarga que se teria ao final de cada trajeto, quando seja necessário.

A potência injetada pela célula à combustível, P_t^{FC}, e a potência injetada pela bateria, P_t^{bat}, são consideradas variáveis de decisão no processo de otimização. Adicionalmente, se considera a variável binária, γ_t, para caracterizar a operação de um tipo específico de fonte em cada instante de tempo. A implementação computacional do modelo matemática foi realizada com a linguagem de programação Python, no ambiente do Pyomo e utilizando o solver Couenne. O solver Couenne têm sido utilizado para resolver problemas de programação inteira mista não-linear e não-convexa em diversos problemas (Sadhu et al., 2022).

Adicionalmente, considerou-se que o custo de operação da bateria e FC para o fornecimento de potência no barramente DC do ônibus é de 17,95 R$/kW (ANEEL, 2024) e 22,12 R$/kW (EDP, 2021), respectivamente. Igualmente, levou-se em conta que no início de operação a bateria e FC se encontram com sua energia armazenada máxima.

4.1 Primeiro Cenário de Operação do Ônibus Híbrido

A Figura 3 mostra o resultado da função objetivo para cada instante de operação, considerando um trajeto de ida e volta no corredor urbano. Nessa figura, observa-se que o maior custo acontece nos primeiros instantes de operação, sendo utilizado a FC por causa da demanda do barramento DC. Analisando o uso das fontes durante o trajeto, identificou-se que a FC é a mais utilizada, apesar de ter um custo operacional maior que o da bateria. A frequência de uso da FC é por causa do dimensionamente da potência e energia da FC e a bateria. Em geral, as montadoras de ônibus procuram reduzir a quantidade de pacotes de bateria, a fim de atender as normas internacionais e diminuir o peso do ônibus, podendo transportar mais passageiros.

As Figuras 4 e 5 ilustram a potência injetada pela bateria e pela FC para cada instante de tempo, respectivamente. A partir dessas figuras, observa-se que a FC tem uma maior frequência de uso, como explicado anteriormente. É importante mencionar que, em geral, em ônibus híbridos, não é recomendado que a FC seja ligada e desligada frequentemente. Tal recomendação é por causa do tempo de resposta da FC ser mais lento que da bateria para ligar e desligar.

Ao final da operação no trajeto em estudo, verificou-se que foram utilizados 7,92 kWh da capacidade da bateria e 28,34 kWh da capacidade da FC. Neste trabalho se considerou que as fontes energéticas são carregadas em sua base no terminal de origem ou destino da viagem, sendo que a bateria seria recarregada via estação de recarga, enquanto a FC seria recarregada via bomba de hidrogênio. Adicionalmente, para o valor de recarga da bateria, levou-se em conta as tarifas da ENEL SP para

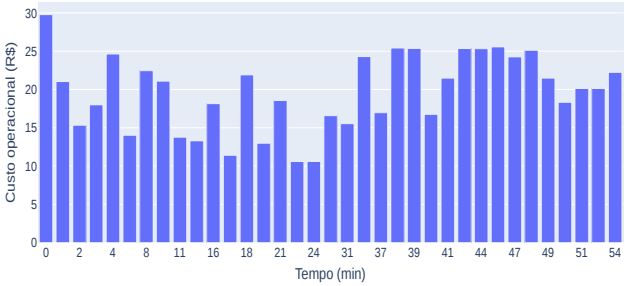

Figura 3. Valor da função objetivo no primeiro cenário.

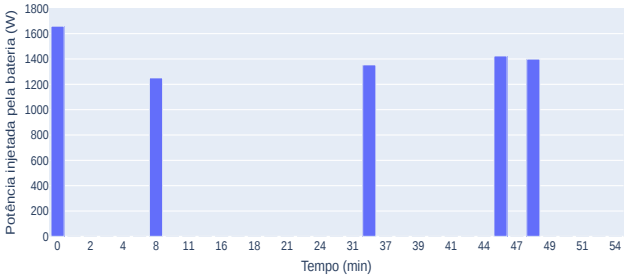

Figura 4. Potência injetada pela bateria no primeiro cenário.

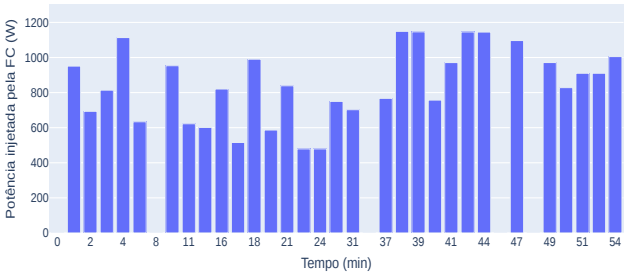

Figura 5. Potência injetada pela FC no primeiro cenário.

cobrança de energia (ANEEL, 2024). Dessa forma, o valor para recarregar foi de R$ 2,84 e R$ 28,11, para a bateria e FC, respectivamente, totalizando um valor de R$ 30,95.

Por outro lado, observou-se que a atual quantidade de baterias e capacidade do FC podem atender a demanda do barramento DC. Assim, para fins de comparação, foram consideradors modos de operação, em que apenas a bateria ou apenas a FC são as fontes que alimentam o barramento DC.

4.2 Operação do Ônibus só com bateria

Para esta operação a energia utilizada da bateria seria de 36,26 kWh, e o valor para recarga foi de R$ 12,99. Assim, o valor de recarga foi inferior ao valor quando se tem as duas fontes. No entanto, para manter a autonomia do ônibus no dia seria necessário incrementar mais baterias, resultando em um incremento do peso do ônibus. Além disso, o tempo de recarga da bateria também é ponto de atenção neste cenário, visto que, caso as baterias fossem totalmente recarregadas, seria necessário que o ônibus ficasse imóvel na estação de recarga por cerca de 5 horas.

4.3 Operação do Ônibus só com FC

Para este operação foi necessário que as velocidades sejam reduzidas em alguns momentos de operação. É importante mencionar que apesar da FC à hidrogênio poder ser reabastecida mais rápido do que a bateria e ser mais leve, seus custos de recarga são superiores. Assim, a energia utilizada da FC seria de 35,29 kWh e o valor de recarga seria R$ 35,01. Quando comparamos o custo do ônibus híbrido utilizando suas duas fontes com esta operação, a recarga do ônibus híbrido teria um redução de 11,44 %.

Para fins de comparação, a Tabela 1 mostra os valores de recarga para cada operação, mostrando os valores a ser pagos no dia e no mês. Foram considerados, para o dia, 12 horas de operação e, para o mês, 24 dias de operação. Os valores apresentados nessa tabela mostram que a operação com bateria teria um custo menor no mês 58% em relação ao valor da recarga com operação híbrida. No entanto, como foi mencionado anteriormente, o tempo de recarga em cada trajeto seria em torno a 5 horas, diferente da operação híbrida em que a recarga poderia ser realizada no final do dia. Essa diferença no momento de recarga é importante por causa da disponibilidade do ônibus para atender a meta de transporte de passageiros diários. Por outro lado, embora a demora em engarrafamentos em corredores urbanos sejam mínimas, com o intuito de analisar a variação dos custos de operação e valores de recarga, foram simulados cenários de operação considerando variações nas distâncias percorridas a cada instante de tempo. Tais variações podem ocorrer na operação do ônibus por causa de atrasos em cada ponto de parada do ônibus em função da quantidade de passageiros.

Tabela 1. Valores de Recarga em Função das Fontes Energéticas Utilizadas.

	Dia	Mês
Operação Híbrida	R$ 371,40	R$ 8.913,60
Operação com FC	R$ 420,12	R$ 10.082,88
Operação com Bateria	R$ 155,88	R$ 3.741,12

4.4 Cenários de Operação do Ônibus Híbrido considerando Variações nas Distâncias Percorridas

Nesta seção se mostraram mais dois cenários de operação para o ônibus híbrido, considerando variações na distância percorrida em cada instante de tempo na condução do ônibus, decorrentes de atrasos ou rápidos embarques e desembarques de passageiros. Assim, a velocidade do veículo é modificada durante todo o trajeto e, consequentemente, a demanda no barramento DC é alterada.

No segundo cenário, foram considerados atrasos nos processos de embarque de passageiros. Sendo assim, o ônibus terá velocidades maiores, a fim de garantir que o veículo alcance o destino no horário que foi programado pela empresa de transporte. Considerando maiores velocidades, os resultados do custo operacional, potência injetada pela bateria e pela FC são apresentados nas Figuras 6, 7 e 8, respectivamente. Pode-se observar que para velocidades maiores, a bateria passa a ser a fonte mais utilizada por causa da demanda que pode ser fornecida por esta fonte. Além disso, devido a o incremento da demanda do barramento DC, o custo operacional foi incrementado em 10 R$

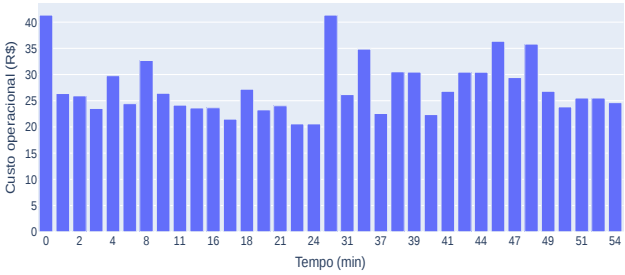

Figura 6. Valor da função objetivo no segundo cenário

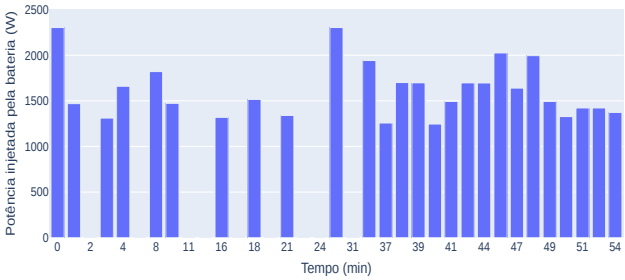

Figura 7. Potência injetada pela bateria no segundo cenário.

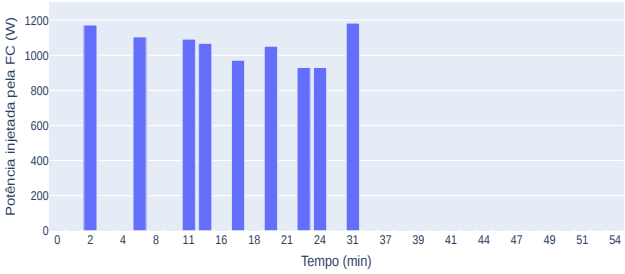

Figura 8. Potência injetada pela FC no segundo cenário.

nos primeiros instantes do trajeto. Ao final da operação deste cenário, foi verificado que foram utilizados 46,89 kWh da capacidade da bateria e 10,63 kWh da capacidade da FC. O valor para recarregar foi de R$ 16,80 e R$ 10,54, para a bateria e FC, respectivamente, totalizando um valor de R$ 27,34.

Para o terceiro cenário, considerou-se processos de embarque de passageiros mais rápidos. Sendo assim, o ônibus poderá ter velocidades menores, visto que possui mais tempo para chegar ao destino final. Assim, neste cenário, os resultados para o custo operacional, potência injetada pela bateria e pela FC são apresentados nas Figuras 9, 10 e 11, respectivamente. A FC passa a ser a fonte mais utilizada, a fim de evitar sua saída e entrada em outros instantes de tempo. Embora se comece a operação utilizando uma fonte mais cara, por causa de uma diminuição da demanda do barramento DC, neste cenário se tem uma diminuição de 5 R$ no custo operacional em comparação ao resultado apresentado na Seção 4.1. Ao final da operação deste cenário, foi verificado que foram utilizados 3,07 kWh da capacidade da bateria e 24,86 kWh da capacidade da FC. O valor para recarregar foi de R$ 1,10 e R$ 24,66, para a bateria e FC, respectivamente, totalizando um valor de R$ 25,76.

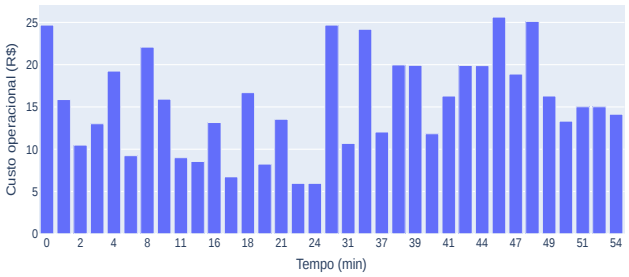

Figura 9. Valor da função objetivo no terceiro cenário.

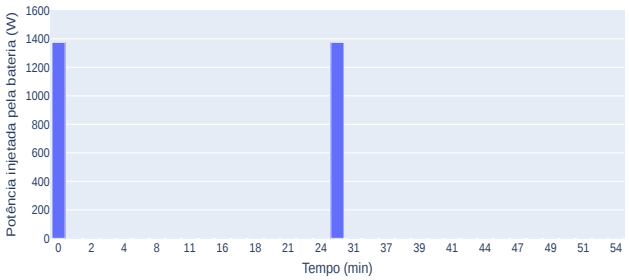

Figura 10. Potência injetada pela bateria no terceiro cenário.

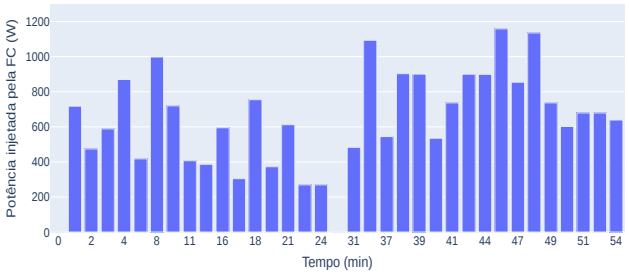

Figura 11. Potência injetada pela FC no terceiro cenário.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um modelo matemático que auxilie na definição dos melhores parâmetros dos algoritmos de EMS para o gerenciamento energético otimizado de ônibus híbridos movidos a bateria e célula à combustível de hidrogênio.

O modelo proposto foi aplicado em cenários de operação de um ônibus no corredor urbano que opera na região metropolitana do ABC. Os resultados da aplicação mostram que o modelo proposto permite encontrar uma redução na recarga da operação híbrida em 11,44% em comparação a quando só se tem a FC operando e não seja necessário um EMS. Adicionalmente, foram elaborados cenários de operação para exemplificar como o modelo pode auxiliar a mostrar os ganhos econômicos de implementação de um EMS que possa considerar o modelo de otimização proposto.

Dessa forma, com base nos resultados apresentados neste trabalho, observou-se que o modelo proposto pode definir os programas de utilização das baterias e FC em ônibus híbrido, respeitando as restrições operacionais, reduzindo custos de recarga, custo operacional e mantendo sua autonomia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do ABC (UFABC) pelo apoio durante a execução da pesquisa. Adicionalmente, este trabalho contou com os seguintes auxílios financeiros: da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, Processos 88887.709682/2022-00, 88887.692379/2022-00, 88887.939062/2024-00; Projeto Universal nº407244/2023-9, 408898/2021-6; e INCT-INERGE.

REFERÊNCIAS

ANEEL (2024). Base de dados das tarifas das distribuidoras de energia elétrica. Disponível em: `https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas`. Acesso em: 28 de abril de 2024.

Du, C., Huang, S., Jiang, Y., Wu, D., and Li, Y. (2022). Optimization of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles based on dynamic programming. *Energies*, 15(12), 4325. doi:10.3390/en15124325.

EDP (2021). Desenvolvimento de roadmap e projeto piloto de h2 no complexo termelétrico do pecém. Disponível em: `https://brasil.edp.com/pt-br/pd-pecem-h2v`. Acesso em: 28 de abril de 2024.

López-Ibarra, J.A., Goitia-Zabaleta, N., Herrera, V.I., Gazta ñaga, H., and Camblong, H. (2020). Battery aging conscious intelligent energy management strategy and sensitivity analysis of the critical factors for plug-in hybrid electric buses. *eTransportation*, 5, 100061. doi: 10.1016/j.etran.2020.100061.

Podder, A.K., Chakraborty, O., Islam, S., Manoj Kumar, N., and Alhelou, H.H. (2021). Control strategies of different hybrid energy storage systems for electric vehicles applications. *IEEE Access*, 9, 51865–51895. doi: 10.1109/access.2021.3069593.

Prasanthi, A., Shareef, H., Asna, M., Asrul Ibrahim, A., and Errouissi, R. (2021). Optimization of hybrid energy systems and adaptive energy management for hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 243, 114357. doi:10.1016/j.enconman.2021.114357.

Sadhu, K., Haghshenas, K., Rouhani, M., and Aiello, M. (2022). Optimal joint operation of coupled transportation and power distribution urban networks. *Energy Informatics*, 5(1). doi:10.1186/s42162-022-00249-w.

Sun, X., Zhou, Y., Zhang, X., Huang, L., and Lian, J. (2022). Real-time optimal ems of adaptive charge sustenance for fuel cell hybrid buses based on driving characteristics recognition. *Energy Conversion and Management*, 254, 115192. doi:10.1016/j.enconman.2021.115192.

Wang, Z., Wei, H., Xiao, G., and Zhang, Y. (2022). Real-time energy management strategy for a plug-in hybrid electric bus considering the battery degradation. *Energy Conversion and Management*, 268, 116053. doi:10.1016/j.enconman.2022.116053.

Yu, H., Tarsitano, D., Hu, X., and Cheli, F. (2016). Real time energy management strategy for a fast charging electric urban bus powered by hybrid energy storage system. *Energy*, 112, 322–331. doi:10.1016/j.energy.2016.06.084.