



Fundação Universidade  
Federal do ABC Pró reitoria de pesquisa  
Av. dos Estados, 5001, Santa Terezinha, Santo André/SP, CEP 09210-580  
Bloco L, 3ºAndar, Fone (11) 3356-7617  
iniciacao@ufabc.edu.br

Projeto de Iniciação Científica submetido  
para avaliação no Edital: Edital 04/2022

**Título do projeto:** Análise de técnicas de otimização para a hibridização de ônibus elétricos.

**Palavras-chave do projeto:** Hibridização, otimização, Python.

**Área do conhecimento do projeto:** Conversão e Retificação da Energia Elétrica.

## Sumário

1 Resumo	2
2 Introdução e Justificativa	2
3 Objetivos	3
4 Metodologia	4
5 Viabilidade (Opcional)	5
6 Cronograma de atividades	6
Referências	8

## 1 Resumo

Antes da década de 2010, os ônibus urbanos da região do ABC contavam com sistemas de propulsão altamente poluentes. A fim de melhorar as condições do ar nas cidades do ABC, tais sistemas estão sendo substituídos por sistemas que utilizam recursos energéticos menos poluentes. Dentre as possíveis modificações, os ônibus elétricos movidos por baterias acompanhadas de células à combustível são uma solução interessante no que tange ao aproveitamento energético, tendo uma maior autonomia para longos trajetos e com tempos menores para o abastecimento do combustível. Assim, a célula combustível é considerada como uma excelente alternativa para utilização nos ônibus urbanos. Neste projeto de IC se desenvolverá um algoritmo de otimização para auxiliar na hibridização dos ônibus elétricos, analisando os principais indicadores de viabilidade econômica, mantendo o ciclo de vida útil das baterias e das células de combustível atendendo as necessidades de operação para cada tipo de ônibus urbano. Tal algoritmo será desenvolvido utilizando linguagem Python, por ser uma linguagem que pode ser integrada na maioria dos softwares utilizados na indústria automotiva.

## 2 Introdução e Justificativa

A frota de ônibus com sistemas de propulsão movidos por motores à combustão que utilizam combustíveis fósseis chegou a 5.927 mil veículos em 2020 somente no Grande ABC [1]. A fim de melhorar a qualidade do ar nas cidades da região do ABC, tais sistemas de propulsão estão sendo modificados, utilizando recursos energéticos menos poluentes [2].

Algumas propostas para melhorar a eficiência energética dos sistemas de propulsão estão sendo implementadas em diferentes países, como a utilização de sistemas de motorização exclusivamente elétricos. Em [3] se mostra como essa utilização gera alcances bem curtos, pois os veículos rapidamente acabam tendo que retornar para uma base para recarregar. Em contrapartida os ônibus híbridos possuem tanto baterias quanto células de combustível, tendo uma maior autonomia para longos trajetos e com tempos menores para o abastecimento do combustível [4]. Em [5] foi projetada uma estratégia de gerenciamento de energia online para um veículo elétrico híbrido de célula de combustível com 4 células e uma bateria para aumentar a economia de combustível, bem como a vida útil das pilhas de células de combustível.

Uma estratégia de gerenciamento de energia baseada em aprendizado de máquina para um ônibus elétrico híbrido foi proposta em [6], dando ênfase na segurança térmica e na degradação do sistema de bateria de íons de lítio a bordo, para tal foi aplicado um algoritmo de gradiente determinístico profundo. A análise da degradação das baterias de íons de lítio também foram objeto

de estudo de [7] e [8]. Em [7] um algoritmo baseado em programação dinâmica e regras de restrição foi aplicado para prever a degradação do desempenho das baterias, já um conjunto de dados disponibilizado pela NASA concomitantemente a técnicas de *deep learning* em [8] foram utilizados para estimar a vida útil restante das baterias de lítio.

Um estudo de caso real de um serviço de transporte regional de ônibus no nordeste da Itália foi realizado em [9], utilizando um modelo de programação linear inteiro misto para traçar um plano da localização ideal para o transporte urbano elétrico, a fim de atender de maneira otimizada as demandas pelo mesmo na região.

A integração de veículos híbridos na frota urbana leva a necessidade de se fazer análises para otimização de seu uso [10], [11], [12]. Em [10] se desenvolve um modelo de programação multi-objetivo em dois níveis para otimizar a programação de veículos e programação de carregamento da frota de ônibus mistos nas condições de operação de uma única garagem, o modelo é resolvido com um algoritmo heurístico integrado. Por outro lado, uma estratégia de gestão preditiva de energia com previsão do número de passageiros e otimização da emissão de gases de escape é apresentada em [11], na qual é realizada uma previsão integrada da velocidade do veículo e do número de passageiros baseada em *deep learning*, prevendo com precisão a demanda futura de energia. Em [12] se projetou uma abordagem de otimização baseada no princípio mínimo de *Pontryagin*, visando minimizar o custo total do consumo de energia e degradação da bateria.

Em [13], [14] foram realizadas revisões sobre diferentes técnicas de otimização, em [14] se faz uma revisão de técnicas programação linear, programação dinâmica, princípio mínimo de *Pontryagin*, algoritmo genético, otimização de enxame de partículas e otimização lógica baseada em regras de sistemas de gerenciamento de energia. A análise obtida demonstra o crescimento do desenvolvimento de algoritmos de otimização especializados para diferentes tipos de demanda.

Um algoritmo de programação linear foi implementado em [15], utilizando MATLAB/Simulink foi simulado e comparado com um algoritmo de controle de máquina de estado, apresentando um consumo de hidrogênio e custo, 39%, e 54,5% menores respectivamente, para um ciclo de direção urbana. Por outro lado, um algoritmo de programação dinâmica estocástica em um ciclo de condução em cadeia de Markov foi simulado por [16], o artigo focado em otimização de custos demonstrou uma economia em relação ao controlador não otimizado. Igualmente, em [17] se utilizou uma técnica de otimização dinâmica baseada em otimização multiobjetivo, o algoritmo foi aplicado em um ônibus urbano híbrido por três meses. Em [18] se propôs um algoritmo baseado no princípio mínimo de *Pontryagin*, a otimização concentrou-se na melhoria da potência e eficiência do sistema de propulsão, não levando em conta a degradação das baterias ao longo do tempo.

A partir dos trabalhos supracitados, observa-se que alguns estudos tenham sido apresentados na área de otimização de sistemas de gerenciamento de energia para veículos elétricos de célula de combustível. A maioria desses trabalhos se limita apenas à simulação. Neste projeto, se utilizará resultados de validações experimentais de casos de estudo para um melhor ajuste de parâmetros do modelo de otimização.

### 3 Objetivos

O principal objetivo é desenvolver um algoritmo de otimização que auxilie os tomadores de decisão na hibridização de ônibus elétricos, maximizando os indicadores de viabilidade econômica e autonomia dos ônibus. Dessa forma, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Analisar técnicas de otimização para a hibridização de ônibus elétricos;

- Revisar casos de estudo internacionais que tenham realizado a hibridização de ônibus;
- Identificar os principais indicadores econômicos utilizados na definição de investimento pela empresa do setor automotivo para analisar projetos de hibridização;
- Analisar a taxa de redução de emissões poluentes.

Adicionalmente, este projeto de pesquisa contribuirá a atingir os principais objetivos do programa PIBIC. Dentre estes objetivos, pode-se mencionar:

- despertar vocação científica e incentivar novos talentos entre estudantes de graduação;
- contribuir para a formação científica de recursos humanos que se dedicarão a qualquer atividade profissional;
- estimular uma maior articulação entre a graduação e pós-graduação;
- contribuir para a formação de recursos humanos para a pesquisa; e
- ampliar o acesso e a integração do estudante à cultura científica.

## 4 Metodologia

### 4.1 Técnicas a ser exploradas

O algoritmo a ser desenvolvido determinará a quantidade energética do sistema de célula a combustível, encontrando uma relação ótima entre a quantidade de células a combustível e as baterias. Adicionalmente, neste trabalho serão conduzidas avaliações econômicas e ambientais usando dados de entrada de projetos de movimentação de ônibus urbanos na região metropolitana de Santo André. As saídas do algoritmo desenvolvido serão traduzidas de maneira acessível por meio de uma interface, que facilitará a interpretação dos tomadores de decisão. Para encontrar a solução ótima, utilizaremos frameworks disponíveis em Python.

Neste trabalho para resolver o problema da relação ótima entre as células de combustível e as baterias será utilizado um modelo para otimização meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS). Como descrito em [19], métodos de busca local para otimização combinatória operam com uma série de modificações locais em uma solução inicial, aprimorando a função objetivo até encontrar uma solução ótima. A meta-heurística VNS explora sistematicamente a premissa da troca de vizinhança a fim de encontrar ótimos locais, VNS vem sendo utilizada na literatura para otimização nas mais amplas aplicações como para restaurar sistemas elétricos de distribuição [20], ou para diferentes problemas de alocação [21], [22].

A função objetivo (O) a fim de se obter a relação ótima entre baterias e células de combustível conforme demonstrado na Equação (1) foi proposta em [25]. Assim, a função objetivo inclui o custo de investimento, o custo de operação, o custo de degradação da bateria, bem como a influência do peso. Na Tabela 1 se apresenta a nomenclatura de cada termo da Equação (1)

$$O = \lambda_1 [(n_{pb} \times n_{sb} \times c_b) + \psi \times c_{fc}] + \lambda_2 [(n_{pb} \times n_{sb} \times w_b) + \psi \times w_{fc}] + \lambda_3 \left( \frac{dQ_b(t)}{dt} \right) + \lambda_4 \left( \mu_{fc} \left[ \int_{t_1}^{t_2} P_{fc} dt \times \varepsilon \right] + \mu_b \int_{t_1}^{t_2} P_b dt \right) \quad (1)$$

Tabela 1 - Parâmetros

Parâmetros	Símbolo	Unidade
Células de bateria conectadas em paralelo	$(n_{pb})$	-
Células de bateria conectadas em série	$(n_{sb})$	-
Custo da bateria	$(c_b)$	R\$
Peso da bateria	$(w_b)$	kg
Degradação da bateria	$(Q_b)$	Ah
Custo inicial da célula de combustível	$(c_{fc})$	R\$
Peso da célula de combustível (incluindo o tanque e a massa de $H_2$ )	$(w_{fc})$	kg
Custo de $H_2$	$(\mu_{fc})$	R\$ / kg
Preço da eletricidade	$(\mu_b)$	R\$ / kWh
Demanda de energia da célula de combustível para viajar	$(\int_{t_1}^{t_2} P_{fc} dt)$	kW
Terminal da bateria enquanto ela está sendo descarregada	$(\int_{t_1}^{t_2} P_b dt)$	kW
Fator de peso correlacionado ao custo	$(\lambda_1)$	-
Fator de peso correlacionado com a massa	$(\lambda_2)$	-
Fator de peso correlacionado com a deterioração da bateria	$(\lambda_3)$	-
Fator de peso correlacionado ao custo de operação	$(\lambda_4)$	-

## 4.2 Ferramentas Computacionais

As ferramentas computacionais a ser utilizadas nesta pesquisa serão bibliotecas da linguagem de programação Python, ferramentas essas que permitem a manipulação e otimização do algoritmo fruto dessa pesquisa. Entre as bibliotecas Python para otimização serão utilizadas a SciPy [23] e a Pyomo [24]. A Scipy [23] é uma biblioteca de rotinas numéricas para Python que fornece blocos de construção de algoritmos para modelagem e solução de problemas, incluindo algoritmos para otimização que serão utilizados nesta pesquisa. Adicionalmente a Pyomo [24] é uma ferramenta para modelagem matemática que suporta a formulação e análise de modelos matemáticos para aplicações complexas de otimização.

## 5 Viabilidade (Opcional)

O projeto a ser desenvolvido faz parte de pesquisas que estão sendo desenvolvidas pelo orientador. O aluno irá colaborar com alunos de pós-graduação e com o grupo de pesquisadores que se encontram desenvolvendo projetos na área em questão. O projeto de pesquisa em questão não necessita de aprovação da comissão de ética em pesquisa (CEP) ou da comissão de ética no uso de animais (CEUA).

A pesquisa será realizada na Universidade Federal do ABC campus de Santo André. Na pesquisa se utilizam softwares livres como Python, o qual está instalado nos computadores nesse laboratório.

## 6 Cronograma de atividades

## Etapa 1

Etapa 1.a. Revisão literária sobre otimização de sistemas híbridos célula de combustível/bateria

Etapa 1.b. Revisão literária sobre modelagem preditiva, simulação, otimização, algoritmos de *machine learning* em Python

### Etapa 1.c. Planejamento de indicadores, simulações e dados a serem adquiridos

## Etapa 2

## Etapa 2.a. Aquisição e tratamento dos dados

### Etapa 2.b. Análise Exploratória e validação dos dados

### Etapa 2.c. Construção dos modelos de otimização

### Etapa 3

### Etapa 3.a. Avaliação e otimização dos modelos

### Etapa 3.b. Testes, validações e discussão dos resultados

### Etapa 3.c. Testes e redação de documentos técnicos

Tabela 2 – cronograma de atividades previstas

[illegible]

## Referências

- [1] Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, "Emissões veiculares no Estado de São Paulo," CETESB (2022), <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2022/03/Relatorio-Emissoes-Veiculares-2020.pdf>
- [2] Jeffry, L., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M., & Show, P. L. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 301, 121017
- [3] Giuliano, G., Dessouky, M., Dexter, S., Fang, J., Hu, S., Steimetz, S., ... & Fulton, L. (2020). Developing Markets for Zero Emission Vehicles in Short Haul Goods Movement.
- [4] Sagaria, S., Neto, R. C., & Baptista, P. (2021). Assessing the performance of vehicles powered by battery, fuel cell and ultra-capacitor: Application to light-duty vehicles and buses. *Energy Conversion and Management*, 229, 113767.
- [5] Fernandez, A. M., Kandidayeni, M., Boulon, L., & Chaoui, H. (2019). An adaptive state machine based energy management strategy for a multi-stack fuel cell hybrid electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(1), 220-234.
- [6] Wu, J., Wei, Z., Liu, K., Quan, Z., & Li, Y. (2020). Battery-involved energy management for hybrid electric bus based on expert-assistance deep deterministic policy gradient algorithm. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(11), 12786-12796.
- [7] Hu, X., Zou, C., Tang, X., Liu, T., & Hu, L. (2019). Cost-optimal energy management of hybrid electric vehicles using fuel cell/battery health-aware predictive control. *IEEE transactions on power electronics*, 35(1), 382-392.
- [8] Ren, L., Zhao, L., Hong, S., Zhao, S., Wang, H., & Zhang, L. (2018). Remaining useful life prediction for lithium-ion battery: A deep learning approach. *IEEE Access*, 6, 50587-50598.
- [9] Chinese, D., Pinamonti, P., & Mauro, C. (2021). A spatially explicit optimization model for the selection of sustainable transport technologies at regional bus companies. *Optimization and Engineering*, 22(3), 1921-1954.
- [10] Zhou, G. J., Xie, D. F., Zhao, X. M., & Lu, C. (2020). Collaborative optimization of vehicle and charging scheduling for a bus fleet mixed with electric and traditional buses. *IEEE Access*, 8, 8056-8072.
- [11] Li, M., Yan, M., He, H., & Peng, J. (2021). Data-driven predictive energy management and emission optimization for hybrid electric buses considering speed and passengers prediction. *Journal of Cleaner Production*, 304, 127139.
- [12] Zhang, S., Hu, X., Xie, S., Song, Z., Hu, L., & Hou, C. (2019). Adaptively coordinated optimization of battery aging and energy management in plug-in hybrid electric buses. *Applied Energy*, 256, 113891.
- [13] Lü, X., Wu, Y., Lian, J., Zhang, Y., Chen, C., Wang, P., & Meng, L. (2020). Energy management of hybrid electric vehicles: A review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 205, 112474.
- [14] Sulaiman, N., Hannan, M. A., Mohamed, A., Ker, P. J., Majlan, E. H., & Daud, W. W. (2018). Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations. *Applied energy*, 228, 2061-2079.
- [15] Fares, D., Chedid, R., Karaki, S., Jabr, R., Panik, F., Gabele, H., & Huang, Y. (2014). Optimal power allocation for a FCHV based on linear programming and PID controller. *International journal of hydrogen energy*, 39(36), 21724-21738.
- [16] Fletcher, T., Thring, R., & Watkinson, M. (2016). An Energy Management Strategy to

concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle. *international journal of hydrogen energy*, 41(46), 21503-21515.

[17] Hu, Z., Li, J., Xu, L., Song, Z., Fang, C., Ouyang, M., ... & Kou, G. (2016). Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles. *Energy Conversion and Management*, 129, 108-121.

[18] Ettihir, K., Boulon, L., & Agbossou, K. (2016). Optimization-based energy management strategy for a fuel cell/battery hybrid power system. *Applied Energy*, 163, 142-153.

[19] Possagnolo, L. H. F. M. (2015). Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável.

[20] Puerta, G. F., Souza, E. S., & Romero, R. (2019). Um modelo matemático para restauração em sistemas elétricos de distribuição radiais com características de um sistema real. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA* (Vol. 1, No. 1).

[21] Aguiar, M. O., da Silva, G. F., Mauri, G. R., da Silva, E. F., de Mendonca, A. R., Silva, J. P. M., ... & Figueiredo, E. O. (2020). Metaheuristics applied for storage yards allocation in an Amazonian sustainable forest management area. *Journal of Environmental Management*, 271, 110926.

[22] Grbić, M., Kartelj, A., Janković, S., Matic, D., & Filipović, V. (2019). Variable Neighborhood Search for Partitioning Sparse Biological Networks into the Maximum Edge-Weighted  $k$ -plexes. *IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics*, 17(5), 1822-1831.

[23] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & Van Mulbregt, P. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*, 17(3), 261-272.

[24] Bynum, M. L., Hackebeil, G. A., Hart, W. E., Laird, C. D., Nicholson, B. L., Siirola, J. D., & Woodruff, D. L. (2021). *Pyomo-optimization modeling in python* (Vol. 67). Springer.

[25] Prasanthi, A., Shareef, H., Asna, M., Ibrahim, A. A., & Errouissi, R. (2021). Optimization of hybrid energy systems and adaptive energy management for hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 243, 114357.



