

METODOLOGIA PARA DIMENSIONAMENTO DE VEÍCULO ELÉTRICO VISANDO A MOBILIDADE URBANA EM CAMPUS UNIVERSITÁRIO: UM ESTUDO DE CASO

Ivan Viero Sarturi
Curso de Engenharia Elétrica
Universidade Federal Santa Maria
Santa Maria, Brasil
ivanvsarturi@gmail.com

Geomar Machado Martins
Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
geomar@ufsm.br

Abstract— Neste trabalho apresenta-se uma metodologia prática de *retrofit* de veículos a diesel por veículos elétricos, em substituição aos complexos modelos que são o estado da arte do dimensionamento. Para isto, os dados elaborados do ciclo de condução real, são aplicados em um software de simulação dedicado à modelagem e análise de veículos, o FASTsim/NREL. Foram elaborados e aplicados ao software os modelos de dois veículos do tipo micro-ônibus. O primeiro modelo tratou do veículo a combustão existente e os resultados de sua simulação com o ciclo de condução real foram similares aos dados fornecidos pelo núcleo de transporte da instituição. Para a proposta de retrofit foi definido um veículo elétrico similar ao primeiro, em um chassi, *powertrain* e baterias, que está disponível para aquisição. Este modelo também foi aplicado ao ciclo de condução real, e em diferentes cenários de carga para se determinar a menor bateria de LiFePO₄ capaz de atender a demanda diária. Os resultados obtidos para o veículo elétrico mostraram uma promissora viabilidade técnica para a adoção desta tecnologia. A metodologia proposta pode ser aplicada em situações similares, quando o ciclo de condução é conhecido previamente, como na maioria das linhas de ônibus urbanos.

Keywords— Carro elétrico, bateria, autonomia, retrofit, mobilidade urbana.

I. INTRODUÇÃO

Mobilidade urbana é um grande desafio contemporâneo e, associada às instabilidades do mercado de combustíveis e às pressões socioambientais remetem para o emprego de energias renováveis [1]. Os campi universitários, inseridos neste contexto, apresentam peculiaridades e complexidades no deslocamento de seus usuários que devem ser consideradas para uma futura substituição da frota de veículos intracampus. As complexidades surgem do uso do seu espaço territorial para o trânsito normal de pedestres, a existência ou não de pistas multiusos para uso facilitado de trânsito de bicicletas, cadeirantes, patinetes, esportistas, além do micro-ônibus interno com itinerários que percorrem as suas diversas sub-unidades. O emprego de veículos a combustão promove, devido às condições severas de uso, um elevado gasto com

manutenção, combustíveis, emissão de poluentes e contribuem com a geração de ruídos acústicos.

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia prática de retrofit de veículos a diesel por veículos elétricos, em substituição aos complexos modelos que são o estado da arte do dimensionamento. Para isto, usa-se dados extraídos do ciclo de condução urbano real, em substituição ao ciclo padrão proposto na Norma NBR6601:2012, aplicados ao software de simulação computacional. Como resultado, obtém-se os principais subsistemas do veículo elétrico, como baterias, *powertrain* e chassis, calculados de forma expedita, com a vantagem de determinar-se a capacidade das baterias estritamente necessária para atender ao itinerário proposto, reduzindo-se o seu custo inicial. A metodologia pode ser empregada em situações similares, quando o ciclo de condução é conhecido previamente, como na maioria das linhas de ônibus urbanos.

Dentre um grupo de softwares dedicados à modelagem e análise de veículos discutidos em [2], optou-se pelo software FASTsim, do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), por possuir as características desejadas de: (a) fornecer uma abordagem simples e rápida para comparar *powertrains* e estimar o impacto das melhorias tecnológicas na eficiência de veículos leves e pesados; (b) analisar o desempenho, o custo e a eficiência da bateria; (c) ser de código aberto; (d) ser reconhecido por especialistas da área; e (e) ter sido validado para diversas simulações realizadas em veículos reais [3].

O método é aplicado em um estudo de caso, na substituição de um transporte intracampus baseado em um veículo do tipo micro-ônibus a diesel por um veículo elétrico com características similares. Considera-se o trajeto diário percorrido, condições de tráfego e carregamento aplicados a modelos de veículos do estudo de caso desenvolvidos especificamente para emprego no software FASTsim.

II. MICRO-ÔNIBUS ELÉTRICO

Com o mercado de veículos elétricos em crescente expansão e clara vantagem destes em comparação a sua datada contrapartida, veículos a combustão, é natural que se observem as mesmas vantagens ao se utilizar micro-ônibus elétricos. Acrescente-se ainda elevados torque e potência, não poluentes, podendo ser abastecidos em tomadas elétricas e não dependentes dos postos de combustíveis. Em contrapartida, um dos principais fatores determinantes do seu projeto esbarra no alto custo que determina a sua autonomia, que é especificação da bateria.

A autonomia de veículos elétricos ainda não é equivalente a de veículos a combustão, uma vez que a gasolina possui maior densidade energética do que a bateria de maior destaque já empregada no mercado, a de lítio-íon. Assim, a relação obtida entre a eficiência do motor e o armazenamento de energia será determinante para se avaliar a validade da aplicação do micro-ônibus elétrico.

III. ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O desafio na adoção massiva de veículos elétricos ocorre, principalmente, pela autonomia [4]. Em veículos elétricos, a autonomia é principalmente determinada pela capacidade de armazenamento de energia da(s) bateria(s).

Grandes progressos foram feitos com baterias de lítio-íon. Além da boa confiabilidade, possuem elevada capacidade de armazenamento de energia. Entretanto novamente deve-se fazer um balanceamento entre o custo introduzido por esta tecnologia e o resultado obtido. Por estarem entre as mais caras, não pode-se desprezar totalmente outras baterias, que apesar de não atingirem a mesma capacidade, possuem custos menores.

TABELA 1. COMPARATIVO ENTRE BATERIAS [3]

| | Chumbo-ácido | Lítio-íon |
|---|--------------|-----------|
| Energia específica (Wh/Kg) | 30-50 | 100-265 |
| Densidade de energia (Wh/L) | 50-80 | 250-730 |
| Custo médio por capacidade energética (USD/kWh) | 150-400 | 500-2500 |
| Expectativa de vida (ciclos) | 100-2000 | 400-1200 |
| Eficiência (%) | 70-80 | 85-98 |

O estudo feito por Emadi [5], e reproduzido na Tabela 1, serve para ilustrar o quão importante é a escolha correta da bateria. O custo empregado em um veículo que visa a mobilidade urbana é fator determinante. Assim, se por um lado o veículo pode se tornar viável economicamente empregando-se baterias do tipo chumbo-ácido, este pode ser tecnicamente inviável pela autonomia baixa. O contrário também é verdadeiro considerando a aplicação da bateria lítio-íon.

Considerando um ciclo diário, baterias de chumbo-ácido durariam um pouco mais de cinco anos enquanto as baterias de lítio-íon, cerca de três anos.

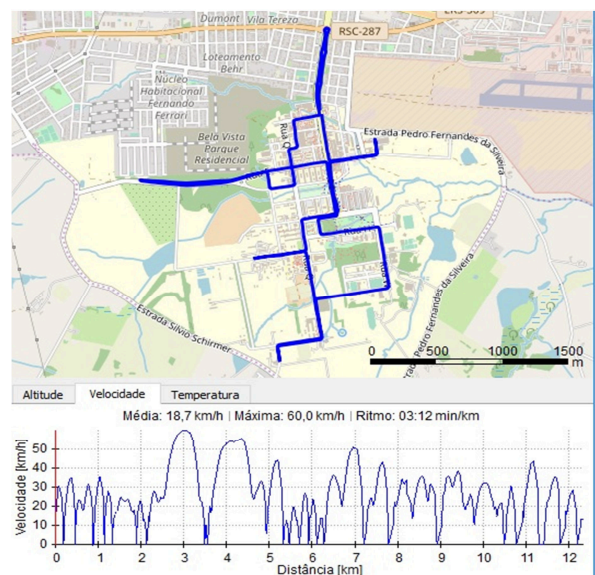
IV. PROPOSTA DE RETROFIT

Entre as possibilidades disponíveis para a substituição de veículos convencionais por novas tecnologias, pode-se optar por veículos híbridos, que agregam aos existentes um *powertrain* elétrico de apoio, ou a troca por veículos totalmente elétricos. Neste trabalho, propõe-se o *retrofit* de um veículo existente, um micro-ônibus, aproveitando-se a sua carroceria, bancos e demais acessórios, com a finalidade de reduzir os custos de investimento, incentivar o aprendizado tecnológico e o treinamento e capacitação de pessoal. Prioriza-se o investimento no chassis, *powertrain* e banco de baterias. A proposta de *retrofit* também almeja a sustentabilidade da cadeia de transportes ao evitar o descarte total de um veículo com a sua parcial reciclagem.

V. METODOLOGIA

Para o estudo de caso, utilizou-se um ciclocomputador de navegação com sistema GPS, barômetro e termômetro incorporados, para registrar o itinerário completo do micro-ônibus (figura 1). Determinou-se o número de paradas por viagem, usuários e viagens diárias. Verificou-se que cada viagem tem duração de cerca de trinta minutos, isto é, saída do local de partida e chegada no mesmo local. A distância percorrida é de 11,5 km, com ganho de 63 m de altitude, inclinação de 3%, e em um dia típico o veículo atinge uma velocidade média de 23,05 km/h e máxima de 56 km/h.

FIGURA 1. CICLO DO MICRO-ÔNIBUS INTERNO DO CAMPUS



Os dados importados foram simulados com auxílio do software FASTsim com objetivo de determinar a autonomia atingida pelo veículo elétrico e também comparar com os dados de consumo de combustível fornecidos pelo núcleo de transportes da instituição de ensino para o veículo existente.

Mediante entrevista, os motoristas do micro-ônibus afirmaram que nos horários de pico, às 7:30 h e às 13:00 horas, a lotação atinge 40 pessoas, sendo 22 passageiros sentados e 18 em pé. Por outro lado, fora dos horários de pico, o micro-ônibus opera com 15 passageiros, em média. Assim, considerou-se uma média diária de 20 passageiros, para os testes em ambos os veículos, elétrico e a combustão.

Os dados obtidos para o micro-ônibus existente foram de 2,25 metros de largura, 2,60 metros de altura e 7,5 metros de comprimento, com peso estimado de 5 toneladas e um motor a diesel de 204 cavalos. A capacidade do tanque de combustível atinge 122 litros de óleo diesel, que foram convertidos para 12,72 kWh, para entrada no software, com base na referência [6].

Para a proposta de *retrofit* foram considerados os dados padrões do *power train* e de chassi do modelo BYD D7M, apresentado na Tabela 2, por ser o único fabricado e vendido no Brasil, atualmente, para este porte de veículo [7].

TABELA 2. ESPECIFICAÇÕES CHASSI BYD D7M

| Especificações | Chassi BYD D7M |
|---|----------------|
| Potência | 244 cv |
| Energia das baterias LiFePO ₄ | 162 kWh |
| Potência das baterias LiFePO ₄ | 180 kW |
| Peso (total sem passageiros) | 5.590 kg |

O software FASTsim embarca diferentes ciclos de condução e possui diversos veículos reais pré-configurados para testes. Ele se divide em diferentes seções para análise do desempenho, observando não apenas a autonomia propriamente do veículo, mas se este atinge ou não as velocidades desejadas, e o consumo energético nos diferentes subsistemas, assim como as perdas por arrasto.

No software, a seção inicial “Vehicle” define-se as características físicas da carroceria: dimensões, área frontal, coeficiente de arrasto, massa, carga, entre outros. As configurações feitas nesta seção possuem grande impacto nas velocidades atingidas durante os testes. A exemplo cita-se o cálculo da potência para o vencimento do arrasto, P_{drag} [8]:

$$P_{drag} = 0,5 * airDensityKgPerM3 * dragCoef * frontalAreaM2 * (AVERAGE(+prevMpsAch, +cycMps)^3)/1000 \quad (1)$$

onde “airDensityKgPerM3” é a densidade do ar em kg/m³, “dragCoef” é o coeficiente de arrasto do veículo, “frontalAreaM2” é a área frontal do veículo em m², “prevMpsAch” é a velocidade em m/s obtido no segundo anterior e “cycMps” é a velocidade atual em m/s do veículo.

A definição de parâmetros de potência e de energia, do combustível, ocorre na seção “Fuel storage”. Estes parâmetros contribuem largamente para definição da autonomia e de

aceleração, principalmente quando utilizadas baterias que dispõe de baixa potência, ou energia máxima armazenada. A seção “Battery” possui a mesma proposta, apenas se remete a veículos elétrico e adiciona a variável “Round trip efficiency” que diz respeito as perdas internas da própria bateria.

Um modelo analítico simplificado, empregando a equação de Shepherd (2) associada à Lei de Peukert (3) permite descrever o comportamento eletroquímico da bateria, em função da tensão e corrente [11]:

$$V(t) = Voc - Rpol.I(t)(1/(1 - SOC(t)) - Rint.I(t) \quad (2)$$

$$Qbat(t) = I(t)k.t \quad (3)$$

Para as seções “Fuel converter” e “Motor” informa-se a potência do motor, sendo no primeiro caso, à combustão e no segundo, elétrico. Outras variáveis importantes no cálculo também são abordadas como eficiência e tempo para obter-se a potência total. No caso do motor a combustão é possível se admitir diferentes ciclos como Atkinson, Diesel ou convencional, que impactam na eficiência à medida que diferentes cargas se aplicam ao motor [9].

A figura 2 mostra a tela inicial exibida pelo software, onde se encontram as características aqui apresentadas e onde são feitas também as alterações em acordo com o que se deseja estudar do veículo.

FIGURA 2. TELA INICIAL DO PROGRAMA FASTSIM DEMONSTRANDO OS PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO



VI. SIMULAÇÃO

As simulações feitas neste trabalho utilizaram o software FASTsim, do NREL [10], que disponibiliza uma ferramenta para a inserção de novos ciclos de condução para avaliação, neste caso, a rota do micro-ônibus apresentada na seção V, e a “customização” do veículo objeto da simulação, possuindo como variáveis de entrada para o cálculo de autonomia:

largura, altura, comprimento, peso, tamanho da bateria e potência do motor.

Com as variáveis de entradas apresentadas na seção V e considerando inicialmente uma carga de 20 pessoas, o micro-ônibus a combustão resultou em 5,55 km/l de eficiência ou ainda 677,44 km de autonomia. Com carga máxima, de 40 pessoas, obteve-se 4,71 km/l de eficiência ou 575,03 km de autonomia e com carga reduzida de 5 pessoas, 6,38 km/l de eficiência ou 778,79 km de autonomia. Os resultados mostraram-se próximos daqueles fornecidos pelo núcleo de transportes da instituição.

Na simulação do veículo com propulsor elétrico, e com as variáveis de entrada propostas na Tabela 2, obteve-se na pior hipótese, para 40 passageiros uma autonomia de 222,55 km. Já, para um ciclo feito com 20 passageiros a autonomia foi de 254,02 km e para 5 passageiros, obteve-se 284,10 km de autonomia.

O software FASTsim interpreta que os pontos de parada do micro-ônibus possuem velocidade igual a 0 m/s, não exigindo potência do motor para mover o veículo. Neste cenário, o veículo é mantido ligado, com o consumo da bateria em torno de zero. Isto é ilustrado na figura 3, onde o consumo energético em parada de 26 segundos foi de apenas 0,002 kWh.

FIGURA 3. EXCERTO DO PROGRAMA FASTSIM DEMONSTRANDO O CONSUMO ENERGÉTICO REDUZIDO DURANTE PARADA DO MICRO-ÔNIBUS

| | | | | | | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Time (s) | 130 | 131 | 132 | 133 | 134 | 135 | 136 | 137 | 138 |
| Cycle Speed (m/s) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ESS kWh | 170.035716 | 170.035645 | 170.035575 | 170.035504 | 170.035434 | 170.035363 | 170.035293 | 170.035222 | 170.035152 |
| Time (s) | 139 | 140 | 141 | 142 | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 |
| Cycle Speed (m/s) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ESS kWh | 170.035081 | 170.035011 | 170.03494 | 170.03487 | 170.034799 | 170.034729 | 170.034658 | 170.034588 | 170.034517 |
| Time (s) | 148 | 149 | 150 | 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | |
| Cycle Speed (m/s) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| ESS kWh | 170.034447 | 170.034376 | 170.034306 | 170.034235 | 170.034165 | 170.034094 | 170.034024 | 170.033953 | |

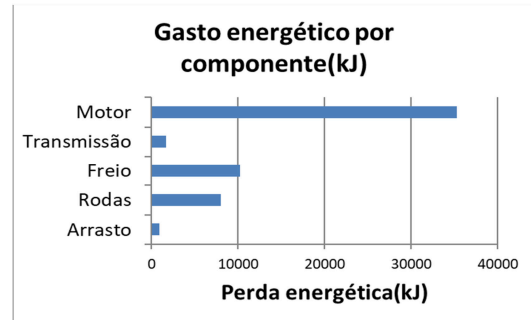
VII. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O ciclo de condução real, apresentado na figura 1, possui constantes paradas e elevada distância, exigindo do condutor do veículo o uso frequente do freio.

Para avaliar este cenário, observa-se, na figura 4, o gasto energético, obtido em simulação, para cada um dos componentes do micro-ônibus a combustão com 20 passageiros.

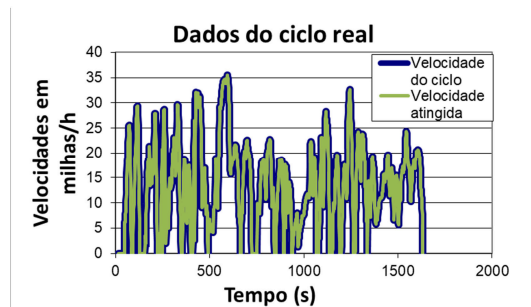
Neste caso, as perdas energéticas são predominantemente influenciadas pela ineficiência do motor a combustão. Porém, deve-se considerar a importância das perdas por frenagem, que são causadas pelas exigências específicas do próprio ciclo e/ou pela forma de condução do veículo.

FIGURA 4. COMPARATIVO DO GASTO ENERGÉTICO ENTRE COMPONENTES DE UM MICRO-ÔNIBUS A COMBUSTÃO COM 20 PASSAGEIROS PARA O CICLO DE CONDUÇÃO REAL



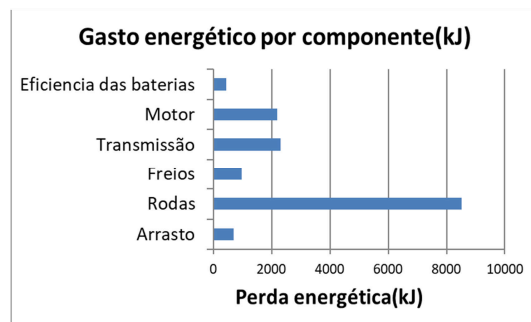
Como há intensas e rápidas alterações na velocidade, resultando em acelerações e frenagens em curtos intervalos de tempo, conforme visto na figura 5, além de submeter o motor a baixas eficiências, ocorre um intenso uso do freio.

FIGURA 5. GRÁFICO DE VELOCIDADES ATINGIDAS PELO MICRO-ÔNIBUS A COMBUSTÃO COM 20 PASSAGEIROS PARA O CICLO DE CONDUÇÃO REAL



Esta situação não é encontrada no veículo elétrico, quando submetido às condições de uso similares.

FIGURA 6. COMPARATIVO DO GASTO ENERGÉTICO ENTRE COMPONENTES DE UM MICRO-ÔNIBUS ELÉTRICO COM 20 PASSAGEIROS PARA O CICLO DE CONDUÇÃO REAL



Observa-se, na figura 6, que o gasto energético nos freios foi consideravelmente reduzido, pois apesar do ciclo de condução ser idêntico ao aplicado para o veículo a combustão, boa parcela da energia é recuperada através de frenagem regenerativa. Não ocorreu variação na perda energética nas rodas, porém, uma significativa redução na perda energética do

componente motor, exaltando a eficiência do motor elétrico frente ao motor a combustão.

No estudo de caso, ocorre uma viagem de 11,5 km a cada 30 minutos, totalizando 10 viagens por turno, com um intervalo de uma hora entre manhã e tarde. Assim, a autonomia das baterias deverá atender 230 km diários. Para determinar a menor capacidade de carga capaz de suprir esta demanda diária, novas simulações foram realizadas. Considerando os cenários de 5, 20 e 40 passageiros, obtiveram-se as baterias de 110, 127 e 149 kWh, respectivamente. Adotando-se uma margem de segurança de 20%, na pior hipótese de lotação, determina-se a bateria de 180 kWh. Esta margem de segurança encontra-se alinhada com os conceitos de ansiedade causados pela impressão de baixa autonomia, comum em veículos elétricos [4].

De acordo com o fabricante, o tempo para recarga completa da bateria é de cerca de três horas, em uma rede de energia elétrica de 380V. Assim, um recarregamento de uma hora tornaria mais ampla a autonomia desejada apenas para o turno da tarde. Porém, não foi possível determinar a quantidade de energia acumulada neste intervalo, pois o processo de carregamento das baterias de lítio não deve ser considerado linear, necessitando um estudo mais detalhado.

Conclui-se que o micro-ônibus elétrico proposto para o *retrofit* possui uma adequada margem de autonomia, uma vez que não irá trafegar frequentemente com lotação máxima e que poderá ser recarregado no intervalo entre turnos.

VIII. CONCLUSÃO

Neste artigo apresentou-se uma metodologia para o dimensionamento dos principais subsistemas de um veículo elétrico para uso coletivo, baseada na demanda de um ciclo de condução real determinado previamente e empregando um software de simulação dedicado à modelagem e análise de veículos, o FASTsim do NREL.

Foram elaborados e aplicados ao software os modelos de dois veículos do tipo micro-ônibus. O primeiro modelo tratou do veículo a combustão existente e os resultados de sua simulação com o ciclo de condução real foram similares aos dados fornecidos pelo núcleo de transporte da instituição. Para a proposta de *retrofit* foi definido um veículo elétrico similar ao primeiro, em um chassi, powertrain e baterias que está disponível para aquisição. Este modelo também foi aplicado ao ciclo de condução real, e em diferentes cenários de carga para se determinar a menor bateria de LiFePO₄ capaz de atender a

demanda diária. Os resultados obtidos para o veículo elétrico mostraram-se promissores na viabilidade técnica para a adoção desta tecnologia.

Um estudo de viabilidade econômica considerando o reaproveitamento de uma carroceria existente e a otimização da capacidade mínima de armazenamento das baterias possibilitando a redução dos investimentos iniciais está em andamento e será proposto em trabalho futuro.

IX. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à equipe do Núcleo de Transporte da Pró-Reitoria de Infraestrutura da Universidade Federal de Santa Maria por toda a colaboração prestada.

X. REFERÊNCIAS

- [1] Pupo, Alexandre Silveira. Análise de Possibilidades para a Introdução de Veículos Elétricos no Tráfego Urbano da Cidade de São Paulo: Uma Abordagem por Meio da Análise Morfológica. *Future Studies Research Journal São Paulo*, v.4, n.2, pp. 03-20, Jul./Dez. 2012.
- [2] Khizir Mahmud, Graham E. Town. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks. *Applied Energy* 172 (2016) 337–359.
- [3] Gonder, Jeffrey, Aaron Brooker, Eric Wood, and Matthew Moniot. Year Future Automotive Systems Technology Simulator (FASTSim) Validation Report. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5400-71168.
- [4] BAEK, Donkyu; HONG, Joonki; CHANG, Naehyuck. Minimum-energy driving speed profiles for low-speed electric vehicles. 2016 21st Asia And South Pacific Design Automation Conference (asp-dac), [s.l.], p.1-2, jan. 2016. IEEE.
- [5] Emadi, Ali. *Advanced Electric Drive Vehicles*, Boca Raton, FL: 2015.
- [6] Differences Between Diesel and Petrol. Disponível em: <<https://www.acea.be/news/article/differences-between-diesel-and-petrol>>. Acesso em: 31 julho 2019.
- [7] BYD. Chassi de Ônibus D7M. BYD. Disponível em: <http://www.byd.ind.br/wp-content/uploads/2018/10/0618bc_52d2b4ea8ef543e48412720f9b28e5f7.pdf>. Acesso em: 13 agosto 2019.
- [8] Brooker, A., Gonder, J., Wang, L., Wood, E. et al., "FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance," SAE Technical Paper 2015-01-0973, 2015, doi:10.4271/2015-01-0973.
- [9] Lorf, C. F. Optimum Battery Capacity for Electric Vehicles with Particular Focus on Battery Degradation. Doctor Thesis. Imperial College of London, 2014. Disponível em: www.ehcar.net/library/these/these015.pdf. Acesso em 13 de agosto de 2019.
- [10] FASTSim: Future Automotive Systems Technology Simulator. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/transportation/fastsim.html>>. Acesso em: 12 julho 2019.