

13

Projeto Ônibus Elétrico: A Unicamp como Laboratório Vivo para Estudos de Mobilidade Urbana

Madson Cortes de Almeida
Luis Fernando Ugarte Vega
Flávio Tonioli Mariotto
Ruben Hernan Ullon Alcivar
Luís Henrique Tenório Bandória
Henrique Cândido de Oliveira
Rafael Lino dos Santos
Carla Kazue Nakao Cavaliero

13.1 Introdução

Em função das crescentes preocupações com as mudanças climáticas e do consequente interesse no uso de fontes de energia renováveis, surge a alternativa de adotar veículos elétricos para atender às demandas do transporte público. Apesar dos benefícios, a conexão de veículos elétricos às redes de energia elétrica tem potencial para causar efeitos indesejáveis. Esses efeitos tendem a ser mais significativos sobre veículos elétricos de grande porte, como os ônibus elétricos usados no transporte público (MAHMOUD *et al.*, 2016).

No cenário brasileiro, aspectos importantes para a definição de políticas de estímulo aos veículos elétricos consideram algumas particularidades do país, como por exemplo, o perfil de geração de energia elétrica com maior participação de fontes renováveis, mistura compulsória de biodiesel ao óleo diesel, características dos grandes centros urbanos e a pequena importância do transporte público eletrificado nesses centros. Há poucos estudos nos quais essas particularidades são consideradas e, em virtude das potenciais vantagens dos ônibus elétricos, a avaliação precisa ser feita considerando não só as alternativas hoje existentes no Brasil e o atual contexto de geração de energia elétrica, mas também as opções de motorização futuras, as alternativas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e as alternativas de geração elétrica no futuro (especialmente a geração distribuída).

Diante deste contexto, este projeto busca, de forma inovadora, estudar os impactos técnicos, econômicos e ambientais da inserção de um ônibus elétrico na frota de ônibus circulares da Cidade Universitária Zeferino Vaz, transformando a universidade em um Laboratório Vivo para os estudos pretendidos.

13.1 Justificativa

Tendo em vista que o uso de veículos e ônibus elétricos será uma realidade nas cidades brasileiras nas próximas décadas, é de suma importância que os impactos causados pela conexão do ônibus elétrico na rede elétrica sejam bem conhecidos para que a adoção de ônibus elétricos em larga escala seja realizada de forma segura e confiável. Assim, este projeto busca estabelecer as bases tecnológicas para a implantação massiva de linhas de ônibus elétricos no transporte público das grandes cidades, fornecendo os conhecimentos necessários às concessionárias e segurança às empresas que optarem por esta tecnologia. Nesse contexto, o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento da operação e das recargas do ônibus elétricos viabiliza a criação de soluções para o gerenciamento inteligente de eletropostos e de recargas dos ônibus elétricos, viabilizando a criação de novos negócios.

13.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é, de forma inovadora, desenvolver um Laboratório Vivo de mobilidade elétrica no sistema de transporte público da Unicamp para investigação de impactos técnicos, econômicos e ambientais da inserção de ônibus elétricos em frotas de transporte urbano. Este projeto tem foco no monitoramento amplo e na conectividade em tempo real do eletroposto, dos ônibus elétrico e convencional e da rede de energia elétrica.

13.3 Atores e Governança do Projeto

A equipe de pesquisadores é composta pelo coordenador do projeto, o Prof. Madson Cortes de Almeida. Os professores consultores com experiência na realização de projetos de P&D da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação são: Prof. Walmir Freitas Filho, Prof. Luiz Carlos Pereira da Silva, Prof. Marcelo Gradella Villalva, Prof. José Tomaz Vieira Pereira, Prof. José Luiz Pereira Brittes, Prof. Daniel Dotta, Profa. Fernanda Caseño Trindade Arioli, Prof. Fabiano Fruet, Prof. Marcos Julio Rider Flores, e Prof. Maurício B. Camargo Salles. O projeto também conta com professores pesquisadores da Faculdade de Engenharia Mecânica, os quais são: Prof. Arnaldo César da Silva Walter, Prof^a. Carla Kazue Nakao Cavaliero, Prof. Joaquim Eugênio Abel Seabra, e Prof. Henrique Cândido de Oliveira; e a post-doutoranda Simone Pereira de Souza.

Em relação aos alunos envolvidos no projeto, a equipe é composta por sete doutorandos: Luis Fernando Ugarte Vega, Flávio Tonioli Mariotto, David A. Sarmiento, Thiago R. Fernandes, João Luis Jucá, Daniela Godoy Falco e Jorge Enrique Velandia. Também consta na equipe seis alunos de mestrado: Luís Henrique Tenório Bandória, Daniel F. Vieira, Rafael Lino dos Santos, Ruben Hernan Ullon Alcivar, Fransk Puma e Tatiane Costa. Por último, a equipe está composta por três alunos de iniciação científica: Lara F. Busato, Caio V. Castro e Vinícius Civali.

O projeto cota ainda com o suporte dos funcionários do Escritório Campus Sustentável da Unicamp e da Agência de Transportes da Unicamp (UNITRANSP).

13.4 Pilares do Projeto

O projeto prevê a implementação de um Laboratório Vivo no sistema de transporte público da Unicamp, a partir de três grandes pilares: (i) infraestrutura de monitoramento em tempo real do Eletroposto Energia Zero (EE0), (ii) dispositivos e sensores *IoT* de monitoramento dos ônibus (elétrico e convencionais) em tempo real e (iii) infraestrutura de monitoramento da rede elétrica do campus em tempo real. Esses pilares são ilustrados na Figura 13.1.

Todos os dados coletados nos ônibus, no eletroposto e na rede de energia elétrica são enviados em tempo real para o Centro de Operação do Campus (MiniCOS). Para a comunicação são usadas a rede *Wi-fi* do campus, uma rede LoRa e telefonia celular GPRS. Essas diferentes tecnologias são adotadas pois há medidores e sensores *IoT* estacionários na rede elétrica e no eletroposto e móveis nos ônibus circulares do campus.

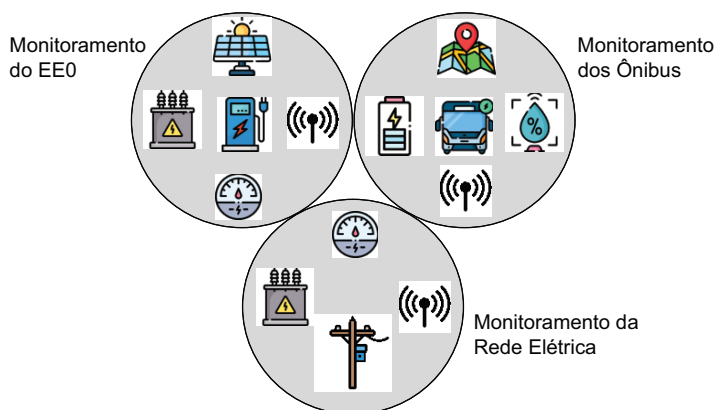


Figura 13.1 Pilares para o Laboratório Vivo de mobilidade elétrica

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com).

13.4.1 Descrição do Ônibus Elétrico

A Unicamp está implantando o Laboratório Vivo integrando a geração renovável, a mobilidade elétrica, a eficiência energética em edifícios,

o monitoramento e a gestão da demanda de energia. No contexto de mobilidade elétrica, este projeto adquiriu um ônibus elétrico modelo BYD D9W mostrado na Figura 13.2.

Este modelo de ônibus permite a realização de recargas com um ou dois conectores. A recarga com um conector demanda uma potência máxima de 40 kW e a recarga com dois conectores demanda a potência máxima de 80 kW. As principais características deste ônibus elétrico estão listadas na Tabela 13.1.



Figura 13.2 Ônibus elétrico modelo BYD D9W.

Fonte: Campus Sustentável – Unicamp.

Tabela 13.1 Principais características do ônibus BYD D9W

Característica	Ônibus BYD D9W
Autonomia	~250-300 km
Velocidade Máxima	60 km/h
Capacidade da Bateria	324 kWh
Tensão de Carregamento	380 VAC
Corrente Máxima	~126 A
Frequência de Carregamento	60Hz
Potência de Carregamento	40 kW (Um conector) 80 kW (Dois conectores)

13.4.2 Monitoramento do Eletroposto Energia Zero

O eletroposto para recarga do ônibus elétrico foi projetado com um transformador dedicado, com potência nominal de 112,5 kVA e tensão 11,9kV/380V, conectado diretamente à rede de média tensão. O carregador do eletroposto é o modelo EVA080KS/01 fabricado pela empresa BYD. A estação de recarga conta ainda com um sistema fotovoltaico e a rede elétrica principal, como é ilustrado na Figura 13.3.

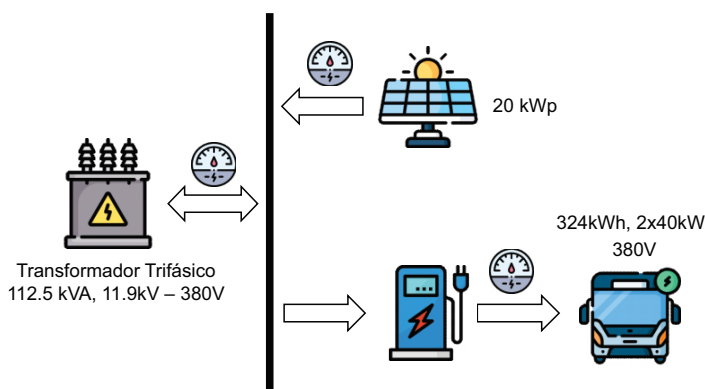


Figura 13.3 Estação de recarga considerando energia fotovoltaica para recarga do OE.

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com).

De acordo com as condições atuais de uso o sistema fotovoltaico do eletroposto é capaz de gerar até 50% da energia anual utilizada pelo ônibus elétrico. Nele são usados painéis solares fotovoltaicos de marca BYD do modelo painel P6D-36 Series-4BB. O restante da energia requerida pelo ônibus é gerado no sistema fotovoltaico de 330 kWp instalado no telhado do ginásio multidisciplinar da universidade. Este sistema fotovoltaico está instalado a menos de 200 metros de eletroposto no mesmo alimentador. Assim, é possível garantir que toda a energia consumida pelo ônibus elétrico durante o ano seja gerada no campus a partir de fontes limpas, dando origem ao conceito de Eletroposto de Energia Zero (EE0).

13.4.3 Monitoramento dos Ônibus Circulares

No Laboratório Vivo, o ônibus elétrico e os cinco ônibus convencionais (movidos a diesel) que circulam diariamente no campus são monitorados com uma ampla gama de sensores. Os sistemas de monitoramento foram desenvolvidos pelos pesquisadores do projeto em parceria com a empresa Time Energy (TE).

Os sistemas utilizados no ônibus elétrico são mostrados na Figura 13.4. Estes sistemas permitem monitorar variáveis como: aceleração, velocidade angular, temperatura, umidade, entre outras, a partir do sistema XDK da BOSCH (BOSCH, 2017). Os ônibus contam ainda com dispositivos denominados Bus Passenger Counter (BPC) para contagem de embarque/desembarque de passageiros; um leitor de informações do barramento CAN do ônibus elétrico para coleta de dados da condição de operação do ônibus elétrico – como a quilometragem e do modo de operação – bem como dos sistemas internos, tais como (i) bateria – estado de carga (SoC), tensão, corrente, temperatura –, (ii) motores – rotação e temperatura –, (iii) sistema de arrefecimento, (iv) sistemas de freios e (v) sistemas de acionamento das portas. O sistema de monitoramento dos ônibus conta ainda com um sistema global de navegação por satélite (Global Navigation Satellite System – GNSS). Todos os sistemas de monitoramento direcionam os dados coletados para o concentrador denominado *MMIoT*, que é capaz de armazenar e transmitir informações por meio das tecnologias 3G, *Wi-fi* e LoRa para serem armazenadas em um servidor.

A Figura 13.4 ilustra alguns dos dispositivos posicionados no ônibus. Além dessas soluções, existem outros sistemas de sensoria-mento desenvolvidos em projetos de mestrado, também trabalhados no âmbito desse projeto, como: (i) sistemas de contagem automático de passageiros por meio de sensores infravermelhos que permitem a detecção de pessoas; (ii) sistema detecção de rotas dos passageiros por meio do rastreamento de sinais *Wi-fi* de dispositivos móveis e (iii) leitor de informações do barramento CAN do ônibus. Todos os sistemas de monitoramento, exceto o leitor CAN, também estão instalados nos ônibus convencionais (a diesel).

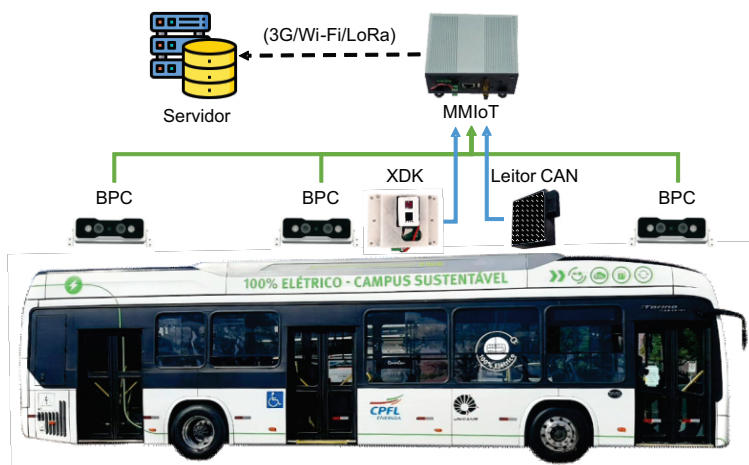


Figura 13.4 Sistemas instalados no ônibus elétrico.

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com).

13.4.4 Monitoramento da Rede Elétrica

A rede elétrica do campus de Barão Geraldo da Unicamp é atendida por cinco alimentadores de média tensão conectados a um transformador de 26 MVA / 11,9 kV. O Eletroposto Energia Zero está conectado ao alimentador BGE06. Este alimentador possui 45 transformadores de distribuição trifásicos com capacidade nominal variando entre 10 kVA e 1.000 kVA.

Todos os transformadores são monitorados com medidores digitais (modelo Neras fabricado pela Time Energy) conectados no lado de baixa tensão dos transformadores. Esses medidores enviam para o MiniCOs a cada minuto os valores das tensões, correntes, potências ativas e reativas nas três fases dos transformadores via rede *Wi-fi* do campus.

O alimentador BGE-06 da Unicamp é ilustrado na Figura 13.5 por meio da qual é possível observar a localização da subestação de energia do campus, a localização do eletroposto energia zero e o PV instalado no telhado do ginásio multidisciplinar. A topologia deste alimentador também pode ser vista na figura. O Comprimento total do alimentador é de aproximadamente 4,38 km.

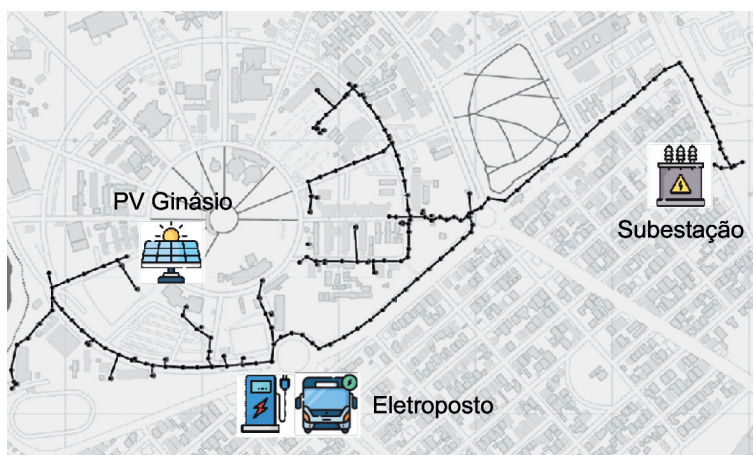


Figura 13.5 Alimentador BGE06 contendo o EE0 e o PV do Ginásio Multidisciplinar.

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com).

13.5 Exemplos de Estudos Realizados

Em função das diferentes naturezas das variáveis coletadas, é necessária uma infraestrutura de armazenamento. Para isso, na fase de estudos, foi usado um servidor de dados baseado em documentos do tipo JSON.

As análises e estudos produzidos com os dados coletados foram realizados utilizando uma versão minimamente modificada da metodologia *Knowledge Discovery Databases* (KDD), ilustrada na Figura 13.6. Neste processo os dados selecionados são filtrados, pré-processados, transformados e usados na produção de conhecimento. A partir dessa lógica, podem ser geados, por exemplo, indicadores relacionados à qualidade da energia elétrica, indicadores econômicos, indicadores da qualidade dos serviços de transporte e indicadores da qualidade das vias, etc. A seguir são apresentados, para efeito ilustrativo, resultados de estudos realizados.



Figura 13.6 Metodologia KDD modificada.

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com) com base em FAYYAD *et al.*, 1996.

13.5.1 Indicadores Obtidos com Dados do Barramento CAN

O módulo leitor do barramento CAN permite coletar um conjunto abrangente de dados em tempo real durante a movimentação do ônibus e durante as recargas, possibilitando diversos tipos de análise, tais como: avaliação de desempenho da bateria do ônibus usando medições de tensões, corrente e o estado de carga (State of Charge – SoC); (ii) monitoramento de consumo em tempo real; (iii) análise de consumo médio em função dos trajetos percorridos, dos motoristas, da temperatura ambiente, da demanda de passageiros e das condição de uso do ar condicionado.

13.5.2 Indicadores Econômicos

Os ônibus elétricos consistem em uma alternativa do transporte público para reduzir os impactos ambientais dos combustíveis fósseis e aumentar a eficiência energética. Seus custos operacionais são mais baratos em comparação com os ônibus a diesel, mas o investimento inicial de aquisição ainda o torna pouco competitivo. Dependendo das rotas as quais os ônibus elétricos são submetidos, podem alcançar uma maior eficiência energética e obter melhores retornos financeiros quando comparados a ônibus similares a diesel (MARIOTTO *et al.*, 2020). Desta forma, por meio de modelos de simulações, diversas propostas de rotas podem ser analisadas considerando informações coletadas por sistemas GNSS, do barramento CAN e do consumo de energia medido no eletroposto. Os modelos, que utilizam dados de GNSS também podem ser usados para avaliar o consumo de ônibus a

diesel operando nas mesmas condições, obtendo-se uma análise comparativa e identificando as rotas em que os ônibus elétricos são ainda mais competitivos.

13.5.2 Indicadores de Qualidade do Sistema de Transporte

A partir dos dados coletados pelos diferentes sensores e dispositivos *IoT* instalados nos ônibus é possível calcular indicadores de diversas naturezas que são úteis para o gerenciamento do transporte. Por exemplo, para a validação do conforto dos passageiros nos ônibus do sistema, foram calculados indicadores de conforto térmico, acústico, inercial e de lotação. A Figura 13.7 traz valores de um indicador de conforto térmico dos passageiros durante uma viagem de um ônibus convencional.

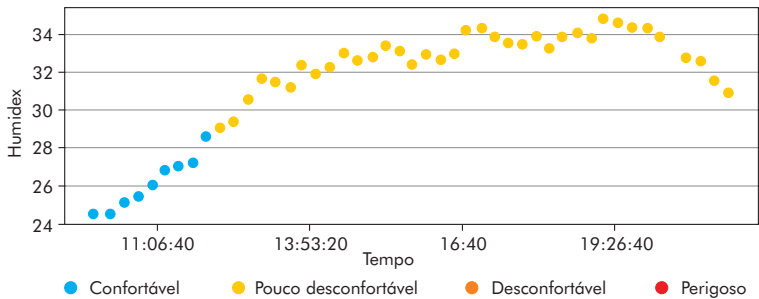


Figura 13.7 Cálculo do indicador Humidex durante uma viagem.

Fonte: Elaboração própria com base em FAYYAD *et al.*, 1996.

13.6 Estudo de Impactos Ambientais

Se por um lado a adoção dos ônibus elétricos na mobilidade coletiva permite a mitigação das emissões reguladas dos veículos automotores (por exemplo, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, hidrocarbonetos e material particulado) e das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas ao seu uso. Por outro lado, caso a demanda adicional de energia elétrica seja atendida a partir de fontes não renováveis, os

benefícios comparativos serão reduzidos. Assim, fica claro a necessidade de uma avaliação mais ampla, considerando não apenas o uso do ônibus elétrico, mas também o contexto do perfil da geração de eletricidade, a operação de recarga das baterias (horário, frequência, duração, etc.), os potenciais riscos de contaminação do solo e corpos d'água – em função da produção e do descarte das baterias – entre outros aspectos (FALCO, 2017).

Essa análise está sendo realizada no projeto a partir do uso da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (VELANDIA VARGAS, 2016), considerando desde a extração de matérias-primas até o uso e a disposição final (“do berço ao túmulo”), tanto dos ônibus convencionais e elétricos quanto das fontes de energia, como se verifica no exemplo da Figura 13.8. Os efeitos de uma maior demanda de energia elétrica, da exploração de recursos naturais para a produção de baterias, da alteração da oferta de diesel e biodiesel diante da penetração dos ônibus elétricos, do incremento da geração distribuída, etc. serão avaliados no horizonte de 2035 e no contexto da cidade de São Paulo.

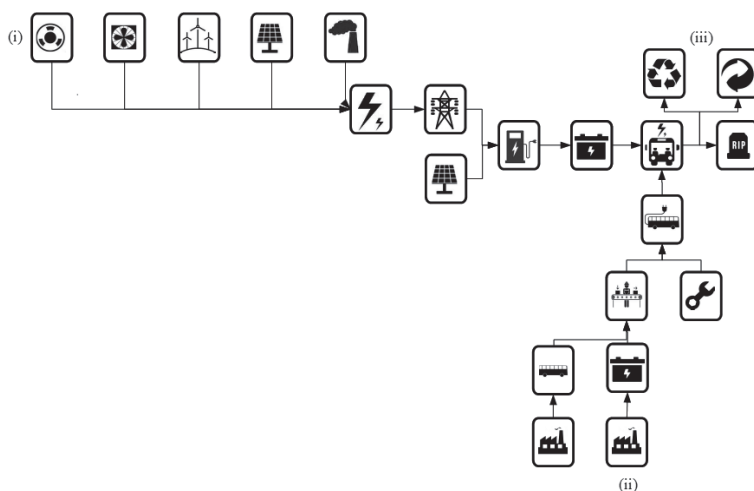


Figura 13.8 Análise berço ao túmulo da mobilidade.

Fonte: Elaboração própria (Ícones desenhados por Freepik em www.flaticon.com) com base em Cavaliero *et al.* (2019).

Para que os resultados reflitam da melhor forma possível as condições de operação real dos ônibus com motorização à combustão e elétrica, optou-se pelo monitoramento on-board das emissões de gases poluentes e de dióxido de carbono (CO₂) de um ônibus convencional operando o serviço de transporte coletivo interno da Cidade Universitária Zeferino Vaz em Barão Geraldo/Campinas – SP. O monitoramento será realizado com equipamento para medição das emissões de material particulado com equipamento da empresa (AVL, 2019), referência no desenvolvimento de sistemas de propulsão e de monitoramento das emissões da motorização à combustão. Os resultados da medição *on-board* (dados primários) serão analisados e servirão de referência para a estimativa de emissões em condições ambientais distintas das verificadas durante o monitoramento, sendo incorporados na avaliação de desempenho ambiental dos ônibus convencionais do projeto.

O projeto também prevê a avaliação dos impactos socioeconômicos e ambientais da inserção de uma frota de ônibus elétrico para substituir totalmente os ônibus convencionais no contexto brasileiro em 2035. Para promover esse “choque”, mudanças relevantes e distintas poderão ocorrer em alguns setores da economia brasileira, como nos setores de extração e refino de petróleo (com a alteração da demanda de diesel), de extração de gás natural (para geração de energia elétrica), de produção de biocombustíveis (com a redução da demanda de biodiesel), etc. (WALTER *et al.*, 2016). Variações em parâmetros como oferta de combustíveis líquidos, desemprego, renda e consumo das famílias, etc. decorrentes do “choque” provocado na economia brasileira serão obtidos a partir do Modelo de Equilíbrio Geral (FOCHEZATTO, 2003). O Modelo será também usado no cenário tendencial, no qual o crescimento da frota de ônibus elétricos seguirá a tendência estimada em função do atual contexto de desenvolvimento tecnológico, das características de produção dos insumos, da energia (eletricidade e combustível) e dos ônibus.

Ao final, a análise comparativa entre o cenário tendencial e de “choque” permitirá estimar a dimensão dos efeitos socioeconômicos diretos e indiretos da motorização elétrica dos ônibus. Além disso, a

partir da abordagem consequencial da ACV, serão também estimados os potenciais impactos ambientais da substituição da frota de ônibus convencional no contexto nacional e regional. Todos esses resultados auxiliarão à proposição de políticas públicas de incentivo à motorização elétrica dos ônibus no transporte coletivo de passageiros no Brasil e na cidade de São Paulo.

13.5 Conclusões

O aumento do uso de veículos elétricos para fins de transporte particular e público é uma tendência mundial. Admitida a premissa de que o uso de veículos e ônibus elétricos será um fato nas cidades brasileiras nas próximas décadas, este projeto pode dar forma às bases tecnológicas e de conhecimentos necessários para se inserir o uso intenso de ônibus elétricos no transporte público em grandes cidades. Assim, todos os produtos e resultados obtidos com a execução deste projeto possuem elevado potencial de aplicação, bem como de criação de novos negócios.

A execução deste projeto permitirá que a Unicamp estude de forma realista uma alternativa ambientalmente sustentável para o transporte interno na Cidade Universitária Zeferino Vaz, alavanque o desenvolvimento dos seus laboratórios vivos, forme mão de obra especializada em um tema de altíssima relevância para o país, transfira conhecimentos para sociedade e catalise o processo de conscientização sobre a necessidade de preservação do meio ambiente.

Referências

BOSCH. *Cross Domain Development Kit XDK, Bosch Connected Devices and Solutions GmbH*. 2017. Disponível em: https://www.bosch-connectivity.com/media/downloads/xdk/xdk_node_110_combined_datasheet.pdf. Acessado em: 29 mai. 2021.

CAVALIERO, C. K. N. et al. Etapa 24: Definição dos cenários “baseline” e do “choque”. Relatório de Pesquisa. Projeto de P&D PA3043 - Laboratório Vivo de Mobilidade Elétrica para Transporte Coletivo na UNICAMP: Integração de Eletroposto Sustentável, Monitoramento Amplo e Conectividade em Tempo Real. 2019. 28p.

FAYYAD, U. M. et al. Knowledge discovery and data mining: Towards a unifying framework. *KDD*, v. 96, p. 82-88, 1996.

LEOU, R-C. et al. Stochastic analysis of electric transportation charging impacts on power quality of distribution systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 12, n. 11, p. 2725-2734, 2018.

MAHMOUD, M. et al. Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 62, p. 673-684, 2016.

MARIOTTO, F. T. et al. Assessment of diesel and electric buses under different routes features A case study at the Living Lab of the University of Campinas. Proceedings of ECOS 2020, 33rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Osaka, Japão, 15 jul 2020, Segunda versão online. 2020. p. 2048-2059. ISBN 9781713814061.

UGARTE, L. F. et al. Living Lab for Electric Mobility in the Public Transportation System of the University of Campinas. In: 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America, 2019, September). IEEE.

AVL. AVL M.O.V.E PM PEMS - Portable soot and particulate (PM) measurement device. 2019. Disponível em: [https://www.avl.com/documents/10138/885965/AVL+M.O.V.E+PM+PEMS+Portable+soot+and+particulate+\(PM\)+measurement+device](https://www.avl.com/documents/10138/885965/AVL+M.O.V.E+PM+PEMS+Portable+soot+and+particulate+(PM)+measurement+device). Acessado em: 01 fev. 2019.

FALCO, D. G. *Avaliação do desempenho ambiental do transporte coletivo urbano no estado de São Paulo: uma abordagem de ciclo de vida do ônibus a Diesel e elétrico a bateria*. 174p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2017.

FOCHEZATTO, A. Construção de um modelo de equilíbrio geral computável regional: aplicação ao Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2003. Disponível em: http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_0944.pdf. Acessado em: 01 mar. 2019.

VELANDIA VARGAS, J. H. *Análise da competitividade ambiental de veículos elétricos no Brasil no cenário atual e futuro*. 131p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2016.

WALTER, A. C. S. et al. *Avaliação de ciclo de vida de veículos elétricos nas condições brasileiras: relatório parcial – etapa 7*. Projeto de P&D PA0060. Campinas, 2016.