

ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS DE COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICO EM UMA LINHA DE ÔNIBUS DO TRANSPORTE PÚBLICO DE PORTO ALEGRE

| ID 18826 |

1 Guilherme Augusto de Oliveira Rugeri, 2 Fabiano Perin Gasparin,

1Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: rugeriguilherme@gmail.com; 2Universidade

Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: fabiano.gasparin@ufrgs.br

Palavras-chave: mobilidade; transporte; sustentabilidade.

Resumo

Os cenários mundiais de preocupação ecológica e de sustentabilidade tem gerado inúmeras mudanças no uso de novas tecnologias nas áreas de energia. Preocupados com sua segurança energética, os países tem enfrentado um paradigma de manter o controle em termos energéticos e ao mesmo tempo combater a insustentabilidade ambiental. Dentro desse contexto, uma das maiores contestações é a frota de veículos automotores, responsável por cerca de 40% da emissão total de CO₂ do Brasil. Existem notórias evidências que a substituição das frotas de ônibus a combustão por ônibus puramente elétricos causam uma grande redução no impacto ambiental, com uma diferença de custo cada vez menor. No entanto, a incerteza com relação aos custos e incentivos, presentes e futuros, ainda faz com que os responsáveis pela eventual mudança sejam conservadores e mantenham o a operação baseada nos ônibus a diesel. Este estudo tem como objetivo analisar a melhor alternativa para uma linha de ônibus da cidade de Porto Alegre, comparando sua execução em um ônibus diesel com um equivalente puramente elétrico, para um período de 10 anos, partindo dos dias atuais. Será avaliado também a viabilidade da inclusão de um sistema fotovoltaico no sistema, para abatimento dos novos custos com energia, do ônibus puramente elétrico. Para isso, foi feito o levantamento da linha de ônibus D43 de Porto Alegre, sua rota, receita média de acordo com o número médio de passageiros e os custos envolvidos na execução da linha com cada um dos modelos propostos. Foi feita uma análise dos custos e receitas totais ao longo dos 10 anos propostos, que indicaram valores finais similares para os três modelos, nos parâmetros propostos, durante o período. Conclui-se, com este trabalho, que os resultados tendem a ser similares nos 10 primeiros anos após a ruptura do modelo atual, mas favoráveis ao ônibus elétricos no período posterior, uma vez que a infraestrutura já foi adequada. A inclusão do sistema fotovoltaico não apresentou maiores

receitas ao longo dos 10 anos, apresentando exclusivamente a vantagem de congelar o custo da energia elétrica. Cabe ressaltar também o maior tempo de retorno do ônibus elétrico, que faz com que normas vigentes de substituição de frota tornem-se impeditivas e precisem ser revistas.

Introdução

A qualidade de vida da população e sua sustentabilidade é assunto em alta nos dias atuais. Nesse contexto, um dos questionamentos mais recorrentes está na mobilidade urbana, onde o grande volume de pessoas e veículos envolvidos demanda estudos e planejamento, para um serviço efetivo e de qualidade. O grande número de cidadãos habitando grandes cidades, tornou o transporte público, responsável pelo deslocamento de expressiva parte dessa população, um fator relevante na política e desenvolvimento das metrópoles ao longo dos anos. No entanto, apesar de suprir as necessidades básicas, dúvidas tornaram-se recorrentes, principalmente em relação ao impacto ambiental causado pelo atual modelo de serviço - sabidamente gerador de gases poluentes e materiais particulados, emitidos pelo processo de combustão interna dos motores diesel. Segundo Leurent e Windish (2011), o uso dos veículos automotores como principal meio de transporte acarretou diversas consequências para as cidades: acidentes, poluição sonora, poluição do ar e emissões de gases de efeito estufa pelo consumo de combustíveis fósseis, cada vez mais escassos e custosos.

É possível perceber que os impactos negativos do transporte prejudicam o desenvolvimento sustentável, e estão diretamente associados à combustão interna dos motores. Uma das principais formas de amenizá-los é a mudança para motores movidos por uma energia mais limpa e menos poluente, como é o caso da eletricidade. Os veículos com tração elétrica, como alternativa aos de combustíveis fósseis, têm se expandido ao longo dos últimos anos, principalmente por apresentarem uma solução ecológica para o problema, reduzindo as emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos, como o material particulado e os óxidos de nitrogênio. Baseado, também, em outros projetos de mobilidade urbana com ônibus elétricos, será feita uma análise da mudança para uma linha de ônibus, contextualizada com a realidade local.

Porto Alegre, capital gaúcha, possui segundo dados do IBGE (2020), 1.488.252 habitantes, em um território de 495.390 km², com uma frota de automóveis de 608.095 carros, 5.156 ônibus e 2.340 micro-ônibus. A empresa responsável por regular e fiscalizar o transporte público da capital gaúcha é a EPTC - Empresa Pública de Transporte e Circulação, criada em 1998, atendendo a uma tendência mundial de municipalização da mobilidade urbana. Segundo dados da própria empresa (2021), o

transporte público da cidade é atendido por 429 lotações, 623 veículos escolares, 3.928 táxis e 1.704 ônibus.

Este trabalho tem como objetivo a análise de um ônibus atuante na linha D43, da cidade de Porto Alegre, avaliando a substituição de um veículo atual, à combustão, por um similar puramente elétrico. Serão examinados os custos de operação envolvidos, as implicações na rede e infraestrutura de transportes e a viabilidade desta implantação, considerando questões econômicas, ambientais e sociais. Será analisado, ainda, a necessidade de carregamento das baterias durante o itinerário, além do uso de um sistema fotovoltaico para atenuar os custos com energia e tornar a operação sustentável.

Porto Alegre é amplamente reconhecida como uma das capitais mais verdes do Brasil, por ser uma das cidades que possui mais parques e árvores por habitante, de acordo com dados do IBGE. As pesquisas do programa Qualionibus, que analisam a qualidade do transporte público do município, apontam que grande parcela da população do município depende de linhas de ônibus. A ausência de infraestrutura de metrô torna o sistema de transporte público diretamente dependente dos ônibus. O trânsito e o congestionamento, além de causarem cada vez mais poluição, geram insatisfação da população. Portanto, a justificativa deste trabalho é a melhoria das políticas de transporte público, da eficiência energética, ambiental e da qualidade de vida da população de Porto Alegre.

Breve Histórico dos Veículos Elétricos

Segundo Baran e Lengley (2011), apesar de visto por muitos como um avanço tecnológico, os veículos elétricos não são novidade no mercado, sendo, no princípio dos veículos automotores, um forte candidato ao monopólio da produção. Segundo Guenther e Padilha (2016), o mercado de veículos elétricos em 1900 representava cerca de 28% do total comercializado. No início do século XX, três tecnologias estavam entre as principais concorrentes a dominar o mercado de automóveis: elétrica, vapor e combustão. De acordo com Baran e Lengley (2011), em 1903, a cidade de Nova Iorque possuía quatro mil automóveis registrados, sendo 53% a vapor, 27% a gasolina e 20% elétricos. Porém, a partir dos anos 30, os veículos elétricos entraram em forte queda, tornando-se preteridos do mercado, especialmente em razão do fenômeno do Fordismo, que barateou a produção dos veículos, da invenção da partida elétrica em 1912, que eliminou a partida a manivela, da descoberta de petróleo nos EUA e da demanda por veículos capazes de percorrer maiores distâncias sem abastecimento - para circular nas rodovias que interligavam as cidades.

A baixa autonomia era um dos fatores que, à época, representava um grande entrave para os veículos elétricos, se comparado aos de combustão interna. Segundo Baran e Lengley (2011) poucas

peças avariadas eram trocadas em locais de reparação improvisados, e as pessoas aventuravam-se pelas estradas do interior nos primórdios do automóvel, pois não havia infraestrutura elétrica nem gasolina à disposição. No entanto, com a maior facilidade em dispor e transportar combustíveis líquidos, os combustíveis fósseis logo foram difundidos e comercializados, até mesmo em pequenos estabelecimentos comerciais, e, como o veículo de combustão interna apresentava melhor autonomia, em relação à distância percorrida com um único abastecimento, este modelo viabilizou as viagens intermunicipais, à época. Além disso, segundo os autores, a manutenção dos primeiros automóveis a gasolina, dada sua simplicidade, era realizada até mesmo por profissionais especializados em conserto e manutenção de bicicletas.

Portanto, apesar de conhecidos, os veículos elétricos não conseguiram superar as limitações tecnológicas da época, e o período inicial do século XX definiu a forma de propulsão dos veículos automotores. Devido aos fatores citados, foi consenso estratégico e comercial que o meio energético utilizado seria o dos combustíveis fósseis, e a propulsão se daria através da combustão interna. Assim foi até a década de 70, quando, segundo o 1º Anuário Brasileiro de Mobilidade Elétrica (2020) as primeiras medidas efetivas para utilização dos veículos elétricos começam a ser tomadas, inicialmente nos países mais desenvolvidos, como Estados Unidos, Japão e países europeus. Segundo Stangueto e Silva (2015), na década de 70 surgem os primeiros estudos e preocupações dos impactos negativos dos veículos de combustão interna, com relação ao meio ambiente e a escassez dos combustíveis fósseis. Foi a partir de então, quando a opinião pública passou a abordar os problemas ambientais, que os automóveis elétricos voltaram a atrair atenção dos grandes fabricantes. Até a década de 80, apesar do crescente estudo e apreensão, os veículos elétricos não conseguiram chegar às linhas de produção e disputar com veículos à combustão, por ainda não apresentarem competitividade e políticas de incentivo ao seu uso.

No entanto, a partir da década de 90, inicia-se uma mudança de direção e medidas mais significativas começaram a surgir, como a implementação das primeiras normas de emissão zero, na Califórnia, e a exposição dos problemas dos combustíveis fósseis e a necessidade de redução e transição para fontes renováveis, através da Agenda 21. Em 1992, a União Europeia também corroborou para esse cenário de mudanças ao definir a política de transportes pela expressão: “uma estratégia para mobilidade sustentável”, onde a inclusão dos veículos elétricos era vista como uma das condições mais importantes do planejamento futuro.

Num contexto mais recente, é possível observar convergência política e social para um cenário automotor mais sustentável. Neste aspecto, os países desenvolvidos seguem na vanguarda: é citado por Buzatto et al. (2019), por exemplo, que Alemanha conta com metas para encerrar a produção de veículos de combustão interna até 2030, a França pretende acabar com a venda de veículos a gasolina ou diesel até 2040. Além disso, as medidas firmadas no Acordo de Paris, em 2016, norteiam as

direções globais de redução na emissão de gás carbônico (CO₂) a partir de 2020. É possível concluir, portanto, o fim do apogeu dos veículos de combustão interna e a crescente busca por soluções sustentáveis.

Ônibus Elétricos no Brasil

A utilização de veículos elétricos possui histórico no Brasil, com casos bem-sucedidos e outros não. Com relação aos veículos pesados, escopo deste estudo, já era possível observar há algum tempo o uso dos Trólebus - um conjunto no qual um ônibus é conectado por dois cabos à rede de energia elétrica acima dele que, por meio de contatos elétricos rolantes, transmitem energia elétrica, convertida em energia mecânica capaz de tracionar o veículo. O fato de receberem energia diretamente dos cabos superiores, que demarcavam as linhas, configurava vantagem aos trólebus, que tinham maior autonomia em relação aos bondes movidos sobre trilhos, podendo desviar obstáculos e encostar nos terminais para embarque/desembarque de passageiros. Os trólebus, totalmente elétricos, não possuíam baterias, conectando-se diretamente à rede de energia.

De acordo com Guenther e Padilha (2016), a implantação dos trólebus no Brasil iniciou-se em 1949, na cidade de São Paulo, sendo rapidamente replicada por outras cidades, como Rio de Janeiro, Porto Alegre, Belo Horizonte e Fortaleza nos anos subsequentes. Percebendo a boa aceitação e demanda do mercado, empresas brasileiras nacionalizaram a produção. No entanto, a partir dos anos 90, novos direcionamentos econômicos e políticos deixaram em segundo plano os trólebus, fazendo com que continuasse usual em raros municípios. Cabe ressaltar que, apesar da crescente implementação e estudos com ônibus puramente elétricos (VEBs), os trólebus retratam uma tecnologia consolidada e ainda representam a ampla maioria da frota de ônibus elétricos do Brasil.

Os indicativos de futuro apontam para um significativo crescimento dos ônibus puramente elétricos, com empresas já consolidadas no Brasil neste segmento. A empresa Eletra é responsável pela implantação de diversos ônibus elétricos funcionais em várias cidades do Brasil, principalmente no estado de São Paulo, além de projetos embrionários como o ônibus elétrico da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis. A empresa chinesa líder mundial do segmento, BYD, possui instalações nacionais e fabrica modelos de ônibus que circulam no país. Diversas empresas nacionais e internacionais prometem competitividade neste promissor cenário.

No século atual, destacam-se projetos de incentivo governamental como o Programa Ecofrota e o Programa Taxis Híbridos, em São Paulo. A cidade de Curitiba também apresenta um projeto para implantação de ônibus elétrico em sua frota. Diversos municípios do interior de São Paulo também têm adotado projetos pilotos e até mesmo parte da frota por veículos elétricos, como é o caso de

Ribeirão Preto e Campinas. Em Florianópolis, a UFSC implantou uma linha de ônibus totalmente elétrica interligando dois *campi* da universidade, através de um *retrofit* de ônibus elétrico, abastecido em terminais contendo sistemas fotovoltaicos.

Perspectivas: facilidades e dificuldades para implantação dos veículos elétricos no Brasil

Diversos são os tópicos a serem discutidos para implantação dos veículos elétricos no Brasil, sendo que alguns apresentam dificuldades e outros boas perspectivas para esse tipo de veículo. Em todos os casos, porém, a pressão por um maior cuidado ecológico e preservação ambiental é o fator propulsor das discussões. Segundo o Balanço Energético Nacional, o setor de transporte rodoviário é o que, individualmente, mais consome energia no Brasil, com 26,5% do total (EPE, 2012). Isso faz com que, de acordo com Castro e Ferreira (2013), o setor seja o principal responsável pela produção de gás carbônico (CO₂) no país, representando 40,9% do total gerado, com valores similares aos encontrados na União Europeia. De acordo com Stranguetto e Silva (2015), como a geração de CO₂ tem relação direta com a tecnologia automotiva empregada, as políticas ambientais que buscam reduzir este composto tem se mostrado primordiais no avanço de tecnologias mais limpas para o setor e, como alternativa para esse problema, destacam-se os veículos elétricos.

As dificuldades para a difusão dos veículos elétricos se dão por vários motivos. De acordo com Castro e Ferreira (2013), as tecnologias empregadas na indústria automotiva brasileira estão, historicamente, mais relacionadas à segurança energética do país do que à eficiência energética. Outro motivo representativo é o desincentivo tributário, pois, por serem em sua maioria importados (inclusive de países com acordos com o Brasil, que diminui a tributação), os veículos elétricos não possuem categoria específica na TIPI – Tabela de Imposto sobre Produtos Industrializados, o que faz com que muitas vezes sejam tributados na categoria máxima, refletindo um preço mais alto para o importador.

Tipos de Veículos Elétricos

O cenário atual da indústria e desenvolvimento mundial converge para três principais tipos de veículos elétricos fabricados e comercializados. São eles:

- Veículos Híbridos à gasolina (VEH): Os veículos híbridos possuem um motor elétrico auxiliar, acionado por um banco de baterias, além do motor principal, movido à combustão interna. Existem duas configurações para o sistema, em série ou em paralelo, onde o motor secundário pode, respectivamente, alimentar as baterias e/ou o motor elétrico ou trabalhar de forma conjunta. A vantagem desse sistema com relação aos modelos tradicionais a combustão é a significativa

economia de combustível. A desvantagem destaca-se no preço inicial, muitas vezes ainda não aceito pelos compradores.

- Veículos Híbridos de *plug in* (PHEV): Os veículos híbridos apresentam motor de combustão interna e um segundo sistema de propulsão elétrica. Este sistema secundário permite carregamento na tomada, e possui diferentes métodos de fornecimento de energia para o veículo, que vão desde o veículo sendo tracionado puramente pela combustão interna até uma propulsão totalmente oriunda do motor elétrico. Os veículos híbridos são mais eficientes energeticamente que os veículos tradicionais, porém inferiores no rendimento se comparados aos veículos puramente elétricos. São considerados, em resumo, uma alternativa intermediária entre os veículos de combustão interna e os puramente elétricos.

- Veículos elétricos a bateria (BEV): Escopo deste estudo, são veículos puramente elétricos, caracterizados por dependerem totalmente de carregamento elétrico externo e serem tracionados a partir da energia armazenada em um banco de baterias, contando, ainda, com um sistema de carregamento regenerativo das baterias em frenagens. Do ponto de vista energético, são os veículos mais eficientes e apresentam o menor custo por quilômetro rodado com energia. Possuem um grande banco de baterias, que resultam em perda de área útil de carga. Diferentes tipos de baterias podem ser utilizados, porém tem, em comum, o fato não conseguirem se comparar, em autonomia (em distância), aos veículos convencionais. Tal fato que é apontado em diversos estudos como um limitador de sua implantação, necessitando uma adequação da infraestrutura de transporte utilizada.

Baterias

O banco de baterias é um tópico fundamental para implantação dos ônibus elétricos, pois de acordo com estudos este representa entre 40 e 50% do valor total do veículo (C40/ISSRC, 2013). Embora os veículos elétricos possuam baterias de diversas composições, as baterias do ônibus em estudo são de íons de lítio, os principais modelos empregados para este fim. As baterias de lítio diferem das demais por não apresentarem reação de oxirredução. Como o lítio é um elemento pequeno e leve, as baterias à base de lítio apresentam maiores níveis de potência e energia por unidade de massa, com densidade energética na ordem de 100 a 150 Wh/l e energia específica em torno de 120Wh/kg. A energia específica dessas baterias é aproximadamente duas vezes maior em comparação à energia das baterias de níquel metal hidreto (NiMH) e quatro vezes maior em relação aos níveis da bateria de chumbo ácido (PbA). Cabe ressaltar que, segundo Castro e Ferreira (2013), mesmo os veículos elétricos já em comercialização utilizam baterias distintas umas das outras.

Ônibus convencional x ônibus elétrico

O uso do modal ônibus para transporte coletivo em massa é um dos mais bem sucedidos projetos de transporte público a nível mundial. Encontra-se difundido em todos os lugares do mundo e possui vantagens como fácil implantação, flexibilidade de rota, alto índice de passageiros, baixo custo de infraestrutura para sua operação e mão de obra abundante. No entanto, os últimos anos tem sido marcados pela crescente concorrência dos ônibus elétricos, que prometem não onerar tanto os custos de implantação e infraestrutura, além de combater problemas notórios como excesso de ruído, geração de gases poluentes e material particulado.

Os ônibus puramente elétricos vêm sendo introduzidos nas grandes cidades, sendo caracterizados por funcionarem exclusivamente a partir da energia armazenada em seu banco de baterias, normalmente localizadas na parte traseira e no teto dos veículos. Nos projetos atuais, é possível perceber que a autonomia, entrave desses veículos outrora, já é considerado um problema solucionável. Dados obtidos de ônibus elétricos atuantes em São Paulo, por exemplo, apontam para veículos com autonomia de até 200 km. Dependendo do dimensionamento adotado, estes veículos podem ser carregados uma única vez, no período de repouso, ou possuir também cargas rápidas intermediárias, que podem reduzir o tamanho do banco de baterias. Entre as principais vantagens deste modal, destacam-se o ruído quase inexistente do motor, a emissão nula de gases poluentes durante a operação, maior torque em baixas velocidades quando comparado aos ônibus diesel e baixo custo de manutenção e abastecimento entre todos os modais de ônibus disponíveis no mercado. De acordo com Guenther e Padilha (2016), os motores elétricos apresentam eficiência na faixa de 90% ou mais, superando em muito a eficiência média dos motores a combustão, de cerca de 30%. Além da sua alta eficiência, têm uma vida útil muito maior que os outros motores, por apresentarem somente uma parte móvel - o rotor, ou seja, sua manutenção é menos frequente e envolve menos itens.

Impacto ambiental do transporte

A Resolução CONAMA n. 001, publicada no dia 23 de janeiro de 1986, define impacto ambiental como: *qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais.*

De acordo com Guenther e Padilha (2016), a matriz energética mundial sempre teve como base combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás. No entanto, desde o século passado, tornou-se um

problema evidente o gás carbônico (CO₂) gerado por tal prática. Segundo Guenther e Padilha (2016), em São Paulo, idosos com idade superior a 65 anos têm riscos de mortalidade elevados em até 13% para cada aumento de 100 mg/m³ de material particulado.

Mundialmente utilizada, a norma de controle e emissão de poluentes da União Europeia vem sendo base para guiar os requisitos que os veículos devem cumprir. Criada em 1988, iniciando com a Euro 0, a série de medidas limita o valor máximo de emissões de poluentes que o veículo pode atingir, contando com especificações e limites para veículos a diesel e gasolina. São controlados pela norma os óxidos de azoto, monóxido de carbono, a parte do combustível com queima incompleta na combustão e o material particulado, originado no escapamento do veículo. Desde sua criação, vigoraram os Euro 1,2,3,4,5 até o 6 criado em janeiro de 2014 que está em vigor nos dias atuais (sendo contados em números decimais para veículos leves e romanos para os pesados). Os requisitos exigidos tem evoluído ao longo do tempo e contam com as novas tecnologias para tornar o uso dos veículos a combustão cada vez menos agressivo. Entre as medidas que tornam possíveis a redução da poluição dos veículos, destacam-se a redução do consumo de combustível, que reduz as emissões de gases contaminantes e CO₂, e a aplicação de sistemas de tratamento de gás (FAP, catalisadores SCR) para controlar os contaminantes formados na combustão.

No Brasil, a norma regulamentadora, denominada Proconve, atualmente na fase 7, tem como base o padrão europeu, porém com um grande período de defasagem. A fase 7 da regulamentação brasileira exige apenas o requerido na Euro 5, tendo previsão de atualizar para o requerido na Euro 6 apenas em 2022 (A Euro 6 está em vigor na Europa desde 2014).

Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido a partir da delimitação do tema e de revisão de literatura dos aspectos abordados, através de artigos, dissertações e informações públicas e comerciais, a respeito dos ônibus e sua tecnologia de abastecimento. Posteriormente, foram levantados dados e informações públicas de Porto Alegre, da concessão de transporte público do município e das particularidades da linha de ônibus D43. Definiu-se, então, os elementos utilizados e os custos envolvidos. Foram aferidos cronograma, itinerário e tempo parado em terminais da linha em questão. Na sequência, foi definido um modelo de ônibus diesel atuante na linha como padrão, buscando no mercado modelos equivalentes, elétrico e convencional. Para a simulação do veículo elétrico, houve a definição do modelo, especificando suas particularidades, custos e, ainda, o dimensionamento e a alocação dos carregadores necessários, foi realizada a análise do tempo parado dos veículos nos terminais, da distância percorrida diariamente e do tempo em repouso.

Finalmente, foi dimensionado e orçado um sistema fotovoltaico, visando abater os novos custos com energia. Por fim, fez-se a verificação da viabilidade econômica das possibilidades levantadas, demonstrando as vantagens e desvantagens de cada modelo e seus resultados econômicos e ambientais, entre os anos 0 e 10. A Figura 1 apresenta um fluxograma que ilustra as etapas da metodologia aplicada no estudo.

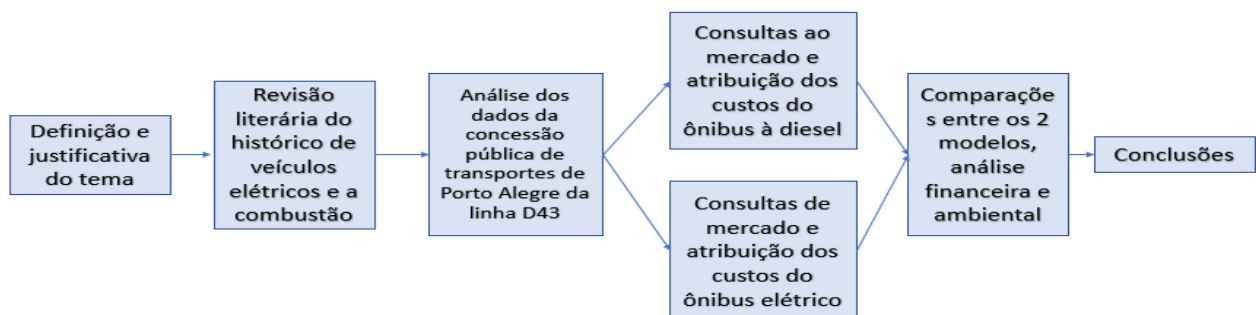


Figura 1: Fluxograma da metodologia empregada na análise. Fonte: autor (2021)

Resultados

A linha de ônibus D43, também conhecida como universitária, é operada pela empresa Carris, na Bacia Pública do município de Porto Alegre. A linha que interliga o centro histórico da cidade à duas das principais universidades locais, sendo, portanto, uma das linhas da cidade, especialmente pelo grande número de estudantes que a utiliza. A linha tem atuação com frota normal de segunda a sexta-feira, e sábado, com frota reduzida. A linha opera em dois sentidos, conhecidos como bairro/centro e centro/bairro. No sentido bairro/centro, tem 14,87 km de extensão, contando com 21 paradas e tempo de deslocamento total, sem trânsito, de cerca de 31 minutos, enquanto no sentido centro/bairro sua extensão é de 16,01 km, com 22 pontos de parada e tempo de viagem, sem trânsito, de 36 minutos.



Figura 2: Itinerário da linha D43 em Porto Alegre. Fonte: adaptado de EPTC (2018)

A quantidade de ônibus que opera na linha é variável, de acordo com a demanda. No entanto, dados da época da concessão pública indicam 111 viagens por dia no sentido centro/bairro e 104 no sentido bairro/centro, além de 15 viagens em cada um dos sentidos aos sábados. Tais viagens transportam, em média, 7.583 passageiros por dia, de acordo com os dados da licitação.

Neste estudo foram utilizados os mesmos horários para os dois modelos, que são os horários oficiais da linha segundo a prefeitura de Porto Alegre. Admite-se que o veículo sai da garagem e começa a operar a partir das 6h15min, no sentido bairro-centro e, após chegar, retorna na linha no sentido centro-bairro. Os horários de saídas e partidas foram definidos, a partir da primeira viagem, como sendo a viagem imediatamente posterior ao fim da viagem executada, conforme a Tabela 1.

Nota-se, no cenário descrito, que o ônibus elétrico não teria autonomia para completar o ciclo diário sem uma recarga, tendo em vista que os cerca de 200 km de autonomia que possui (considerando o carregamento total, perfil altimétrico do percurso, carregamento médio e uso de ar condicionado) findariam por volta das 15h10min. No entanto, se contabilizado o período de espera do veículo entre viagens, é possível perceber que existem 3 horas e 18 minutos do veículo parado nos terminais do centro e do bairro, sendo 1h e 25min no terminal central e 1h e 53min no terminal do bairro, que poderiam ser utilizados para o carregamento.

Neste cenário, em princípio, seria viável o carregamento nos intervalos entre as viagens, quando o ônibus está parado no terminal do bairro, pois com o carregador adotado, uma carga de 1h

e 20 minutos seria suficiente para completar o percurso diário. Portanto, é prevista uma única estação de carregamento, com a maior capacidade de carga disponível no mercado atualmente – 150 kW.

Tabela 1: Horários das viagens da linha D43 utilizados para a análise proposta.

Destino	Hora saída	Hora cheg.	Distância	Tempo Desl	Desl S.t.	Tempo livre
BC	06:15:00	06:52:00	14.87	00:37:00	00:31:00	00:06:00
CB	06:52:00	07:35:00	16.01	00:43:00	00:36:00	00:07:00
BC	07:35:00	08:12:00	14.87	00:37:00	00:31:00	00:06:00
CB	08:12:00	09:05:00	16.01	00:53:00	00:36:00	00:17:00
BC	09:05:00	09:45:00	14.87	00:40:00	00:31:00	00:09:00
CB	09:45:00	10:45:00	16.01	01:00:00	00:36:00	00:24:00
BC	10:45:00	11:25:00	14.87	00:40:00	00:31:00	00:09:00
CB	11:25:00	12:10:00	16.01	00:45:00	00:36:00	00:09:00
BC	12:10:00	12:50:00	14.87	00:40:00	00:31:00	00:09:00
CB	12:50:00	13:50:00	16.01	01:00:00	00:36:00	00:24:00
BC	13:50:00	14:30:00	14.87	00:40:00	00:31:00	00:09:00
CB	14:30:00	15:10:00	16.01	00:40:00	00:36:00	00:04:00
BC	15:10:00	15:55:00	14.87	00:45:00	00:31:00	00:14:00
CB	15:55:00	16:31:00	16.01	00:36:00	00:36:00	00:00:00
BC	16:30:00	17:15:00	14.87	00:45:00	00:31:00	00:14:00
CB	17:15:00	17:51:00	16.01	00:36:00	00:36:00	00:00:00
BC	17:50:00	18:35:00	14.87	00:45:00	00:31:00	00:14:00
CB	18:34:00	19:10:00	16.01	00:36:00	00:36:00	00:00:00
BC	19:10:00	19:55:00	14.87	00:45:00	00:31:00	00:14:00
CB	19:54:00	20:30:00	16.01	00:36:00	00:36:00	00:00:00
BC	20:30:00	21:10:00	14.87	00:40:00	00:31:00	00:09:00
TOTAIS			323.67			03:18:00

Fonte: Adaptado de Prefeitura de Porto Alegre (2021)

Custos Envolvidos na Operação com Ônibus a Diesel

Conforme os dados da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, existem diversos tipos de veículos em atuação na linha D43. Para esta análise, optou-se pelo modelo Volvo B7R low entry, com ar condicionado, características de 78% dos veículos da linha. Segundo os dados públicos, o valor do veículo à época da licitação, em 2015, era de R\$ 479.000,00. Para obtermos valores atualizados, foi aplicado sobre esse valor o montante o IGPM acumulado durante o período, o que gerou o valor de R\$ 789.385,00, para o mesmo veículo novo, nos dias atuais.

De acordo com os dados disponibilizados pela Prefeitura de Porto Alegre, percebe-se que os custos fixos, à época da licitação, representavam cerca de 75% dos custos totais do serviço público. Mantendo os percentuais de cada custo e atualizando os dados disponíveis pelo município, concluiu-se que os custos fixos em função do quilômetro rodado são de R\$ 7,12/km. Nesses custos, incluem-

se as despesas com ativos, depreciação de ativos, remuneração de ativos, despesas administrativas e seguros.

Custo Envolvido com a Operação do Veículo Elétrico

Segundo informações obtidas junto à empresa BYD, o custo do veículo elétrico do modelo D9W, compatível em características com o modelo a diesel adotado, é de R\$ 1.590.000,00 para chassi, ar condicionado e banco de baterias, além da estimativa de R\$ 320.000,00 de custo para a carroceria, totalizando R\$ 1.910.000,00.

Para simular o carregamento do ônibus elétrico, serão necessários pontos de carregamento na garagem da empresa, para carregamento no período noturno, e de um carregador de maior capacidade no terminal, tendo em vista que somente o carregamento noturno não é suficiente para atender a demanda diária.

Diante disso, foi realizada uma consulta ao mercado, cotando os valores dos carregadores para a garagem e terminal. Para a garagem foi considerado o carregador fornecido pela própria BYD com custo cotado em R\$ 65.000,00 e uma carga completa entre 4 e 5 horas. Para o terminal do bairro, adotado nesta simulação, foi considerado o tempo disponível para o carregamento diurno entre as viagens, como sendo de 1 hora e 53 minutos, tempo suficiente para carga (de 1 hora e 20 minutos) requerida para a conclusão do percurso. O modelo escolhido, para o carregador do terminal é o WEG WEMOB-S-150-E-H-1CS, com 150kW de potência e custo de R\$ 314.793,65.

Sistema Fotovoltaico

De acordo com os dados de consumo de energia elétrica média durante a operação (1,6 kWh/km rodado), é possível dimensionar um sistema fotovoltaico, que, conectado à rede elétrica, fosse capaz de fornecer a energia necessária para a operação em base anual. O sistema de compensação utilizado para este caso seria o de autoconsumo remoto, garantido pela norma regulamentadora RN 482 da ANEEL (2012).

Para tal, foi considerado a produtividade fotovoltaica anual típica, para Porto Alegre, de 1300 kWh/kWp, equivalente a uma produtividade diária média de 3,5616 kWh/kWp.

$$P_{nominal/km} = \frac{1,6 \text{ kWh}}{km} \times \frac{kWp}{3,5616 \text{ kWh}} = 0,449 \frac{kWp}{km} = 449 \frac{Wp}{km \text{ diário}}$$

Considerando, para este projeto, o uso de módulos fotovoltaicos com 340Wp, com área de 1,94 m² por módulo, podemos calcular o número de módulos em função da quilometragem percorrida diariamente.

$$\text{num_modulos}_{\text{por km diário}} = \frac{449 \text{ Wp}}{\text{km}} \times \frac{1}{340 \text{ Wp}} = 1,32 \frac{\text{módulos fotovoltaicos}}{\text{km rodado diariamente}}$$

Ou seja, nas condições do estudo, com uma quilometragem diária de 323,67 km, seriam necessários 428 módulos fotovoltaicos, demandando uma área de 829 m² para equivaler ao gasto energético do ônibus. Além disso, estimando o custo usual de R\$ 5,50 por Wp instalado nos sistemas fotovoltaicos, o valor total do sistema é de R\$ 825.000,00.

Cabe ressaltar que o dimensionamento deste sistema fotovoltaico visa abater totalmente os custos com o deslocamento do veículo elétrico, que por estar compensando a energia consumida, consegue fixar o custo energético, trazendo mais segurança para o projeto.

Custos variáveis

Custo do combustível

Segundo consulta ao site da Agência Nacional do Petróleo - ANP, foi possível encontrar o preço médio de R\$ 4,318 por litro de diesel S10, no município de Porto Alegre. No entanto, considerando o grande volume de combustível comprado pela empresa responsável pela linha, assumiremos o custo mínimo informado pela ANP, de R\$ 3,999 por litro.

Custo da energia elétrica

Em consulta à concessionária de energia local, dadas as potências envolvidas nos terminais de carregamento, a unidade consumidora seria do tipo A, de consumidores de média e alta tensão, classe 4, com tensão de fornecimento entre 13,8 e 25 kV. Neste caso, o custo da energia no horário fora de ponta é de R\$ 0,34222 por kilowatt hora (kWh), sem a incidência de impostos. O preço final, com a incidência de impostos, é calculado a partir da equação abaixo:

$$\text{Preço final (R\$)} = \frac{\left(\frac{\text{Preço homologado (R\$)}}{1 - \text{PIS}(\%) - \text{COFINS}(\%)} \right)}{1 - \text{ICMS}(\%)}$$

Portanto, calculou-se que o valor da energia consumida será de R\$ 0,5006/kWh.

Custos totais

Em face das ponderações acima, com as receitas e despesas descritas, o resumo dos custos é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Custos totais para a simulação realizada.

CUSTOS	ÔNIBUS DIESEL	ÔNIBUS ELÉTRICO	ÔNIBUS ELÉTRICO C/FV
VALOR DO ÔNIBUS	R\$ 789.385,00	R\$ 1.910.000,00	R\$ 1.910.000,00
CUSTOS COM COMBUSTÍVEL/ENERGIA/DIA	R\$ 606,98	R\$ 259,23	R\$ 0,00
MANUTENÇÃO E PEÇAS/DIA	R\$ 139,18	R\$ 97,10	R\$ 97,10
OUTROS CUSTOS	R\$ 2.304,53	R\$ 2.304,53	R\$ 2.304,53
CUSTO ANUAL POR ONIBUS	R\$ 954.407,38	R\$ 832.450,53	R\$ 751.350,38
VALOR RESIDUAL DO ONIBUS ANO 5	R\$ 473.636,00	R\$ 1.098.250,00	R\$ 1.098.250,00
VALOR RESIDUAL DO ONIBUS ANO 10	R\$ 157.877,00	R\$ 286.500,00	R\$ 286.500,00
CUSTOS CARREGADORES GARAGEM	R\$ 0,00	R\$ 65.000,00	R\$ 65.000,00
CUSTO CARREGADORES TERMINAL	R\$ 0,00	R\$ 314.793,00	R\$ 314.793,00
CUSTO SISTEMA FOTOVOLTAICO 150KW	R\$ 0,00	R\$ 825.000,00	R\$ 825.000,00

Fonte: autor (2021)

*valores calculados baseados em: valor do diesel R\$ 3,99/l; valor da energia elétrica R\$ 0,5006/kWh; ônibus trabalhando 323,67 km/dia; outros custos estimados em R\$7,12/km; custo de manutenção e peças de R\$ 0,30/km no ônibus elétrico (baseado em dados do estudo do c40) e R\$ 0,42/km no diesel (baseado em dados da EPTC); valor residual no décimo ano de 20% do valor do veículo, para o ônibus diesel e 30% do valor das baterias, para o ônibus elétrico.

Resultados financeiros

Alocando os custos apresentados na Tabela 2, ao longo dos 10 anos propostos por este estudo, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 3, de receitas e despesas totais e acumuladas do período. A Figura 3 apresenta a evolução financeira ao longo do tempo para os três cenários.

Tabela 3: Receitas e despesas acumuladas dos anos 0 a 10.

ANO	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RECEITA DIESEL		R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.823.790,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.823.790,07
DESPESA DIESEL	R\$ 789.385,00	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 1.743.792,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38	R\$ 954.407,38
TOTAL DIESEL	-R\$ 789.385,00	-R\$ 393.638,31	R\$ 2.108,37	R\$ 397.855,06	R\$ 793.601,75	R\$ 873.599,44	R\$ 1.269.346,12	R\$ 1.665.092,81	R\$ 2.060.839,50	R\$ 2.456.586,18	R\$ 3.325.968,87
RECEITA ELÉTRICO		R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.636.654,07
DESPESA ELÉTRICO	R\$ 2.289.793,00	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53	R\$ 832.450,53
TOTAL ELÉTRICO	-R\$ 2.289.793,00	-R\$ 1.772.089,46	-R\$ 1.254.385,93	-R\$ 736.682,39	-R\$ 218.978,85	R\$ 298.724,69	R\$ 816.428,22	R\$ 1.334.131,76	R\$ 1.851.835,30	R\$ 2.369.538,83	R\$ 3.173.742,37
RECEITA ELÉTRICO C/FV		R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.350.154,07	R\$ 1.636.654,07
DESPESA ELETR C/FV	R\$ 3.114.793,00	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38	R\$ 751.350,38
TOTAL ELÉTRICO C/FV	-R\$ 3.114.793,00	-R\$ 2.515.989,32	-R\$ 1.917.185,63	-R\$ 1.318.381,95	-R\$ 719.578,26	-R\$ 120.774,58	R\$ 478.029,11	R\$ 1.076.832,79	R\$ 1.675.636,48	R\$ 2.274.440,16	R\$ 3.159.743,85

Fonte: autor (2021)

*receita calculada com a média dos passageiros usuários da linha D43, multiplicada pelo ticket médio pago por passageiro, de acordo com dados da licitação pública de Porto Alegre.

A figura 3 demonstra, através de um gráfico, os dados coletados na tabela 3:

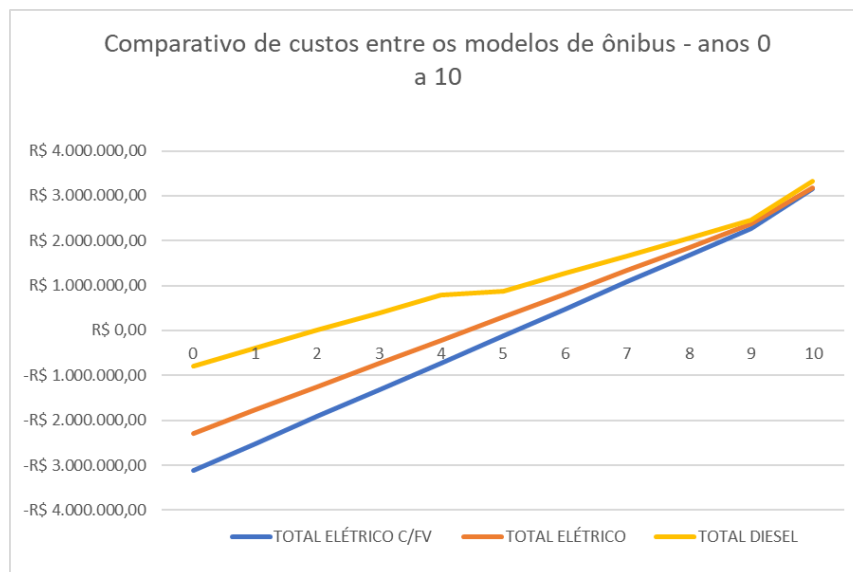


Figura 3: Valores acumulados dos anos 0 a 10, para os modelos simulados. Fonte: autor (2021)

Análise Qualitativa da Viabilidade

É possível perceber nos dados apresentados, que os resultados finais das três simulações diferem pouco entre si, apresentando menos de 5% de diferença nos resultados finais, o que, dada a variabilidade do cenário, pode ser considerado igual.

No entanto, alguns aspectos devem ser ressaltados: primeiramente, que o estudo não levou em consideração a inflação e os reajustes que venham a ocorrer durante o período estipulado. Porém, dos três sistemas, o que apresenta maior segurança econômica é o modelo elétrico com uso de sistema fotovoltaico, pois o valor gasto na mobilidade do veículo fica estático, não sujeito às variações de custo dos combustíveis e da energia elétrica, que usualmente apresentam reajustes superiores à inflação.

Cabe ressaltar, ainda, que o uso de um sistema fotovoltaico para reduzir o consumo de energia não precisa, necessariamente, abater todo o gasto energético do veículo. Em casos de incapacidade técnica, por falta de área disponível, excesso de sombreamento ou orçamento limitado, é possível utilizar de um sistema reduzido, que teria custo inicial inferior e atenuaria, parcialmente, o consumo de energia do modal.

O uso de ônibus elétrico e do sistema fotovoltaico, embora apresentem receitas acumuladas similares nos primeiros 10 anos, mostram-se mais favoráveis para os anos posteriores, pois a infraestrutura instalada – de carregadores e módulos fotovoltaicos, possuem vida útil superior a 10 anos - 15 anos para os carregadores e inversores e entre 20 e 25 anos para os módulos, de acordo

com fabricantes. Estando a infraestrutura executada, as benfeitorias poderão ser utilizadas no período subsequente, sem custo residual.

Na modalidade elétrica, cabe ressaltar que os carregadores considerados poderiam ser compartilhados, tendo em vista que a carga suficiente para a demanda diária seria de cerca de 4 horas na garagem em 1 hora e 20 minutos no terminal. Com uma programação adequada e horários de carregamento diferentes, estes carregadores poderiam atender outras linhas de ônibus, diluindo, com isso, o custo da infraestrutura.

Ganhos ambientais

No estudo realizado por Maluf Filho (2013), foram analisados dados da frota de São Paulo com relação à poluição, onde foram separados os tipos de veículos e analisados. No caso dos ônibus urbanos a diesel, o estudo aponta emissões totais de 2.170 t/ano para o monóxido de carbono (CO); 440 t/ano para os gases hidrocarbonetos (HC); 10.840 t/ano para óxidos de nitrogênio (Nox); 300 t/ano para material particulado (MP) e 10 t/ano para óxidos de enxofre (SOx), por veículo.

De acordo com os estudos do C40/ISSRC (2013), foi estimado ganhos ambientais com o uso dos veículos elétricos. Percentualmente, estudos de campo demonstram grande redução na emissão de poluentes pela adoção do ônibus elétrico. Testes realizados em Santiago, no Chile, dados do C40 e IRSCC apontam uma redução entre 73 e 81% com relação ao veículo diesel, dependendo do tipo de bateria adotada. Cabe ressaltar que estes dados são provenientes da análise do tanque à roda, não levando em consideração a emissão de poluentes dos processos produtivos de cada elemento.

Portanto, é possível aferir que a substituição de um ônibus a diesel por um puramente elétrico pode evitar a emissão de até 1801t/ano de CO; 365 t/ano de HC; 8997 t/ano de Nox e 8,3 t/ano de SOx, durante o período de operação dos mesmos.

Comentários finais

Este trabalho demonstra aspectos relevantes para a reconsideração da mobilidade elétrica como uma tecnologia viável ao transporte público. A análise econômica ilustra a atual competitividade entre as três tecnologias utilizadas. O modelo elétrico, no que tange o aspecto econômico, apresenta-se superior após 10 anos de uso. Para o período posterior a análise deste estudo, é esperado um cenário cada vez mais favorável ao uso dos veículos elétricos, pois o investimento na infraestrutura já foi realizado e os preços dos veículos elétricos tendem a diminuir. Cabe ressaltar, no entanto, a necessidade de política e regulamentações específicas para esse tipo de veículo, pois para o projeto tornar-se viável é necessário um período de uso superior a idade média dos ônibus atuantes em Porto Alegre. No que concerne ao aspecto ambiental, entretanto, a

diminuição da emissão de gases nocivos e material particulado apresenta evidente e imediata melhora, sendo um fator relevante para o incremento da qualidade do ar das grandes metrópoles e qualidade de vida dos seus cidadãos.

Os desafios para trabalhos futuros ainda se mantêm, principalmente com relação à qualidade da informação disponível acerca dos veículos elétricos e sua performance técnica e econômica.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e a UFRGS, através do PPGE3M, pelo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

1º Anuário Brasileiro de Mobilidade Energética, Plataforma Nacional da Mobilidade elétrica. Disponível em < <https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>> Acesso em 31/05/2021

Balanço Energético Nacional, Empresa de Pesquisa Energética, Disponível em < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-131/topico-102/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%202012.pdf>> Acesso em 31/05/2021.

BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. 2011. Veículos elétricos: História e perspectivas no Brasil. BNDES Setorial, v. 33, p. 207–224.

Buzatto, H. Gortz, M. Oliveira, L. Locatelli, S. Kakinohana, E. Catapan. 2019. Transporte público elétrico em Curitiba: é possível. ANTP-Revista dos transportes públicos v. 153 p. 8 -24.

CASTRO, B. H. R. DE; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. DA. 2013. Baterias automotivas : panorama da indústria no Brasil , as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. BNDES Setorial, v. 37, p. 443–396.

CASTRO, B. H. R. DE; FERREIRA, T. T. 2010. Veículos elétricos : aspectos básicos , perspectivas e oportunidades. BNDES Setorial 32, p. 267–310.

C40/ISSRC. 2013: Low carbon technologies can transform Latin America's bus fleets. Lessons from the C40 – CCI Hybrid & Eletrical. Disponível em < <https://publications.iadb.org/publications/english/document/Low-Carbon-Technologies-Can-Transform-Latin-America-Bus-Fleets.pdf> > Acesso em 31/05/2021.

EPTC, Linhas e horários de ônibus. Disponível em < https://www2.portoalegre.rs.gov.br/epc/default.php?p_secao=158> Acesso em 31/05/2021

Guenther e Padilha. 2016. ESTUDO DE VIABILIDADE PARA SUBSTITUIÇÃO DE VEÍCULOS A COMBUSTÃO POR VEÍCULOS DE TRACÇÃO ELÉTRICA EM UMA LINHA DE ÔNIBUS DE CURITIBA.

IBGE, Panorama de Porto Alegre. Disponível em < <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>>. Acesso em 31/05/2021.

Leurent, F., Windisch, E. 2011. Triggering the development of electric mobility: a review of public policies. Eur. Transp. Res. Rev. 3, 221–235.

Maluf Filho, Adalberto Felício. 2013. Avaliação do ciclo de vida de diferentes tecnologias de ônibus: Eficiência energética e emissões de poluentes em operação real. Disponível em < <http://files-server.antp.org.br/5dotSystem/download/dcmDocument/2013/10/07/5B72F3AA-0DC5-468E-A6F7-17474BBD1FB8.pdf>> Acesso em 31/05/2021

Pesquisa de Satisfação Qualionibus Porto Alegre 2019. Disponível em < http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/eptc/usu_doc/eptc_pesquisa_qualionibus_2019.pdf> Acesso em 31/05/2021

Stangueto, K. e Silva, E..Análise do suprimento de frota de veículos elétricos por usina solar fotovoltaica de 1MWp. ANTP- Revista dos transportes públicos v. 141 p. 109-124, 2015.