



Empresa de Pesquisa Energética

Estudo de caso para a introdução de ônibus elétricos no município do Rio de Janeiro



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
MME

Ministério de Minas e Energia
Ministro
Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

Secretária Executiva
Marisete Fátima Dadald Pereira

**Secretário Adjunto de Planejamento e
Desenvolvimento Energético**
Hélio Neves Guerra

Secretário de Energia Elétrica
Rodrigo Limp Nascimento

**Secretário de Petróleo, Gás Natural e
Combustíveis Renováveis**
José Mauro Ferreira Coelho

**Secretária de Geologia, Mineração e
Transformação Mineral**
Alexandre Vidigal de Oliveira



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente
Thiago Vasconcellos Barral Ferreira
Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais
Giovani Vitoria Machado
Diretor de Estudos de Energia Elétrica
Erik Eduardo Rego
Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível
Heloísa Borges Esteves
Diretor de Gestão Corporativa
Angela Regina Livino de Carvalho

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede
Esplanada dos Ministérios Bloco "U" - Ministério de Minas e
Energia - Sala 744 - 7º andar – 70065-900 - Brasília – DF
Escritório Central
Praça Pio X, 54
20091-040 - Rio de Janeiro – RJ

Informe Técnico

Estudo de caso para a introdução de ônibus elétricos no município do Rio de Janeiro

Coordenação Geral
Giovani Vitoria Machado

Coordenação Executiva
Carla da Costa Lopes Achão

Coordenação Técnica
Glaucio Vinicius Ramalho Faria
Luciano Basto de Oliveira

Equipe Técnica
Flávio Raposo de Almeida
Natália Gonçalves de Moraes

IT-EPE-DEA-SEE-005/2020
Outubro de 2020

1. Considerações Gerais

As mudanças climáticas associadas às emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) constituem uma das principais questões globais a serem enfrentadas na atualidade. No âmbito das cidades, a deterioração da qualidade do ar é um dos vetores de maior relevância para a implementação de políticas e estímulos a tecnologias de baixa emissão de poluentes e impactos ambientais. O Brasil e, particularmente a EPE, tem despendido esforços para participar ativamente da solução destas questões.

A representatividade dos transportes no âmbito dos diversos países, tanto nos aspectos energéticos, econômicos, sociais e ambientais endereça a relevância da implementação de políticas neste setor que contribuam para o atingimento dos compromissos assumidos em acordos internacionais e nas diversas esferas dos governos nacionais. Neste contexto, a eletromobilidade tem se revelado como uma das políticas prioritárias no contexto de transição energética para se alcançar economias de baixo carbono e no desenvolvimento de cidades sustentáveis, tendo em vista, principalmente, sua característica de zero emissão de CO₂ nos veículos.

Os veículos leves têm sido o principal segmento no processo de eletromobilidade em função da sua participação no consumo de combustíveis fósseis na matriz energética global do setor de transportes¹. No entanto, a eletrificação do transporte público, concilia a vantagem de redução das emissões de CO₂, com a redução de poluentes locais que deterioram a qualidade do ar nas cidades e com os impactos econômico-sociais intrínsecos a este segmento.

Mesmo no Brasil, onde a matriz energética já é uma das mais limpas do mundo, a matriz elétrica é menos emissora que a de transportes e, portanto, a alternativa da tecnologia elétrica para o transporte público urbano deve ser cotejada como uma das opções para atender ao compromisso de redução de emissão de CO₂ assumido no Acordo de Paris e de implementação das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) no âmbito da Agenda 2030. Além disso, contribui para os objetivos constantes na Política Nacional de Mobilidade Urbana, tais como: reduzir as desigualdades e promover a inclusão social; proporcionar melhoria nas condições urbanas da população no que se refere à acessibilidade e à mobilidade; e promover o desenvolvimento sustentável com a mitigação dos custos ambientais e socioeconômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas nas cidades.

2. Objetivo

O presente informe tem como objetivo principal relatar estudo de caso sobre a inserção de ônibus elétrico à bateria na frota do serviço de transporte público do Rio de Janeiro realizado através de grupo de trabalho, para o qual a EPE foi convidada a participar, composto por técnicos da Prefeitura do Rio de Janeiro (CVL/SUBPAR²), SMTR³, Rioônibus, C40 Cities, ITDP (Instituto de Transporte e Desenvolvimento). A principal contribuição da EPE se deu no apoio à implementação da ferramenta de avaliação técnico-econômica para ônibus elétrico adaptada⁴ ao caso do Rio de Janeiro, pelo fato desta explicitar os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão para gestores e operadores sobre a mudança de ônibus à diesel para

¹ Considerando-se o modo de transporte rodoviário, os veículos leves representam cerca de 60% (24 milhões de barris por dia de petróleo equivalente) do consumo mundial de derivados de petróleo (Adam, S., et al, 2019).

² Subsecretaria de Planejamento e Acompanhamento de Resultados (SubPar) da Secretaria Municipal da Casa Civil (CVL).

³ Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro;

⁴ A EPE não desenvolveu a ferramenta especificamente para o grupo de trabalho citado, mas apoiou na sua implementação com parâmetros específicos do município do Rio de Janeiro, no intuito de demonstrar a funcionalidade e utilidade da ferramenta.

elétricos. Assim, os resultados aqui apresentados refletem o conjunto de parâmetros de entrada, fornecidos e validados pelos agentes integrantes do grupo de trabalho, a partir do uso da ferramenta desenvolvida pela EPE. Resultados distintos podem ser obtidos a partir da adoção de outros conjuntos de parâmetros e premissas.

O informe é dividido em cinco partes: Compromissos internacionais, ressaltando a COP-21 e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS); Eletromobilidade no transporte público; Ferramenta de Avaliação técnico-econômica; Estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro; e a Conclusão.

3. Compromissos Internacionais

Mudanças climáticas e a COP-21

Durante a 21ª Conferência das Partes (COP-21) da UNFCCC, realizada em 2015, foi definido o novo acordo sobre mudança global do clima que ficou conhecido como Acordo de Paris, em que as nações se comprometem a manter as emissões globais médias de gases de efeito estufa (GEE) em níveis que contenham a elevação da temperatura média em até 2°C acima dos níveis pré-industriais, mas perseguindo esforços para limitar este aumento a até 1,5°C.

Em 2016, o Brasil ratificou o Acordo de Paris e, em setembro de 2016, a iNDC⁵ brasileira se converteu automaticamente na sua NDC⁶. O compromisso é de que em 2025 as emissões de GEE⁷ do país sejam 37% inferiores ao verificado em 2005 (MMA, 2020).

Para atingir o compromisso proposto, a NDC brasileira se baseia em caminhos flexíveis, ou seja, o alcance dos objetivos pode ocorrer de diversas formas, com diferentes contribuições dos setores da economia (Energia, Mudança de uso do solo e florestas, processos industriais, resíduos e agropecuária). Vale salientar que o setor de energia apresenta papel relevante neste contexto, representando cerca de 12% (316 MtCO₂-eq) das emissões de GEE em 2005 (ano base sobre o qual são calculadas as metas de mitigação de GEE no Brasil)⁸ (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2020).

A participação do setor de transportes no total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira (2018), por sua vez, totalizou 192,7 MtCO₂-eq, o que representa cerca de 46% do total de 416,1 MtCO₂-eq, segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019). Dentre as recomendações da NDC brasileira, está a promoção de medidas de eficiência energética, da melhoria na infraestrutura de transportes e do transporte público em áreas urbanas (MDIC, 2018).

Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) fazem parte da Agenda 2030, adotada na Assembleia Geral das Organizações das Nações Unidas - ONU, em setembro de 2015. Na ocasião, 193 Estados-membros da ONU aprovaram o documento denominado *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável* (IPEA, 2018). São 17 objetivos que

⁵Contribuição Pretendida Nacionalmente Determinada (iNDC, na sigla em inglês);

⁶Contribuição Nacionalmente Determinada (Nationally Determined Contribution). A NDC expressa a ambição brasileira diante do Acordo de Paris. O compromisso é voluntário a nível internacional, mas tem força de lei a nível nacional.

⁷A NDC do Brasil inclui os gases CO₂, CH₄, N₂O, perfluorcarbonos, hidrofluorcarbonos e SF₆.

⁸O Brasil assumiu metas de mitigação absoluta para o conjunto da economia que correspondem a reduções de 37% em 2025 e 43% em 2030 com base no nível de emissões em 2005 de 2,1 GtCO₂e (GWP-100; IPCC AR5) (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2020).

cobrem todas as atividades da sociedade, desde a erradicação da pobreza, acesso à água potável e saneamento, consumo e produção responsáveis, ações contra a mudança global do clima até promoção da paz e instituições eficazes. Cada um dos objetivos é detalhado em metas que no total somam 169. Do total das metas globais encaminhadas pela ONU, 167 foram consideradas pertinentes ao Brasil. Também se observa que foram criadas 8 novas metas, totalizando 175 metas nacionais (IPEA, 2018).

O Brasil assumiu o compromisso de implementar os ODS e, através da Secretaria de Governo Federal, criou a Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (Decreto nº 8.892, de 27 de outubro de 2016), com a finalidade de elaborar um plano de ação para implementação da Agenda 2030, promovendo a articulação com órgãos e entidades públicas das unidades federativas para a disseminação e a implementação dos ODS nos níveis estadual, distrital e municipal (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2019). Esta Comissão foi extinta com o advento do Decreto nº 9.759, de 11 de abril de 2019. Optou-se então, por um modelo de governança articulado em torno da Secretaria de Governo da Presidência da República (SEGOV-PR) através do Decreto nº 9.980, de 20 de agosto de 2019. A SEGOV-PR reafirmou seu compromisso com a Agenda 2030 e esclareceu que o tema integra um dos projetos prioritários do planejamento estratégico do governo federal (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2020)

Embora dentre os ODS nenhum seja destinado especificamente à mobilidade urbana, este tema aparece de forma transversal em alguns deles, contribuindo para o alcance de suas metas, como é o caso do ODS 7, que trata de assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos, o ODS 9 que refere-se à construção de infraestruturas resilientes, promoção da industrialização inclusiva e sustentável e o fomento à inovação e o ODS 11 que visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. O objetivo de tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos é descrito no ODS 13.

Em particular, dentre as metas do ODS 11, que trata das cidades sustentáveis, a serem alcançadas no horizonte de 2030 estão: proporcionar o acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis, sustentáveis e a preço acessível para todos, melhorando a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos; e reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.

Os indicadores das ODS são importantes para monitorar e desenhar políticas públicas, bem como para permitir, medir o progresso resultante da aplicação dessas políticas.

4. Eletromobilidade no transporte público

A eletrificação de ônibus urbanos parece ser uma tendência em cidades populosas do mundo, tais como: Cidade do México, Medellín, Barcelona e Paris. De acordo com estudo *Electric Buses in Cities* elaborado pela Bloomberg Finance, este processo ocorre através de uma combinação de políticas federais e locais, e redução potencial de custos e outros benefícios operacionais e industriais (BNEF, 2018). Neste contexto, mais de 20 cidades já assinaram o *C40 Fossil Fuel Free Streets Declaration*, comprometendo-se a adquirir apenas ônibus de emissão zero a partir de 2025 (C40, 2019). Nos cenários *New Policies*⁹ e *EV30@30*¹⁰ elaborados pela Agência Internacional de Energia (AIE), o número de ônibus elétricos alcança 1,5 milhão de unidades e

⁹O *New Policies Scenario* (NPS) é o cenário central do *World Energy Outlook* e incorpora as políticas e medidas que os governos ao redor do mundo já colocaram em prática, assim como os efeitos prováveis das políticas já anunciadas que estão expressas em metas e planos oficiais (IEA, 2018).

¹⁰O objetivo do cenário *EV30@30* corresponde ao *market share* global de 30% de veículos elétricos leves, ônibus e caminhões conjuntamente.

4,5 milhões de unidades até 2030, respectivamente, partindo de uma base de 370 mil ônibus elétricos nas ruas em 2017¹¹ (IEA, 2018).

No Brasil, os trólebus que circulavam na cidade de São Paulo marcaram o início da eletrificação do transporte urbano de passageiros na década de 1950. O sistema era operado pela estatal Companhia Municipal de Transportes Coletivos, a CMTC – atual SPTrans. No auge, a cidade de São Paulo chegou a ter 30 linhas de trólebus, com 552 veículos em 1998. Atualmente, ainda opera na capital paulista parte dessas linhas, na região central da cidade (AGÊNCIA BRASIL, 2019).

Já a eletrificação de ônibus à bateria ganhou destaque no município de São Paulo com a promulgação da Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018¹² que, além de metas de redução de GEE para 10 e 20 anos, estabelece metas de redução para poluentes locais aos operadores dos serviços de transporte coletivo por ônibus e também às empresas que prestam serviços de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos e Hospitalares¹³.

Esta nova lei foi fundamental para o processo de implementação do edital de licitação do Sistema de Transporte Coletivo Público de Passageiros na Cidade de São Paulo em 24 de abril de 2018. O edital prevê metas de redução de poluição pelos ônibus na cidade através da substituição de metade da frota em dez anos e de sua totalidade em vinte anos por veículos limpos (MDIC, 2018).

No entanto, o alto investimento inicial no ônibus elétrico à bateria e em sua infraestrutura de recarga constitui uma das principais barreiras para a inserção desta tecnologia em substituição ao ônibus a diesel convencional. Este fato insere-se em um contexto de discussão de um novo modelo de financiamento do custeio do transporte público coletivo que seja capaz de garantir a sua sustentabilidade, efetividade e aprovação pela sociedade.

Diante desta conjuntura, surgem discussões mais amplas que trazem novos elementos para o aumento da competitividade dos ônibus de baixa emissão. Em particular, no caso do ônibus elétrico à bateria, estas questões incluem: novas regras para a concessão do serviço de transporte coletivo público urbano; análises de projeto que contemplam custos operacionais ao longo da vida útil do veículo; novas opções de fontes de financiamento para viabilizar tecnologias de baixa emissão, e parcerias entre operadoras de ônibus e empresas de energia, possibilitando redução dos custos operacionais.

De toda forma, por se tratar de uma tecnologia relativamente nova, a inserção do ônibus elétrico à bateria na frota de ônibus municipais requer maior detalhamento, análise e disseminação de informações técnicas e operacionais, capazes de tornar mais robusto o embasamento de escolhas que sejam sustentáveis do ponto de vista ambiental, social e econômico tanto ao ente público, quanto ao setor privado.

5. Ferramenta de avaliação técnico-econômica

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) desenvolveu uma ferramenta de avaliação técnico-econômica de ônibus elétricos urbanos por meio do qual o usuário pode avaliar a viabilidade da adoção destes veículos em suas frotas municipais em substituição aos ônibus a diesel. A ferramenta permite aos governos locais (não apenas o do Rio de Janeiro) e à sociedade ampliar

¹¹A participação dos ônibus elétricos no total das vendas de ônibus é inferior a 15% no Cenário de Novas Políticas e 35% no cenário EV30@30 até 2030.

¹²LEI Nº 16.802, DE 17 DE JANEIRO DE 2018. Dá nova redação ao art. 50 da Lei nº 14.933/2009, que dispõe sobre o uso de fontes motorizadas de energia menos poluentes e menos geradoras de gases do efeito estufa na frota de transporte coletivo urbano do Município de São Paulo e dá outras providências (<https://bit.ly/2UcnlCi>).

¹³A Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009 (Lei de Mudanças Climáticas) determinava uma frota total de coletivos municipais com baixa emissão a partir de 2018, mas não foi cumprida.

seu conhecimento sobre a tecnologia dos ônibus elétricos, reduzindo assimetria de informação e aprofundando o debate sobre os benefícios e obstáculos para a adoção desta alternativa ao sistema de transporte público rodoviário.

A sugestão de como avaliar a viabilidade da substituição tecnológica baseia-se em modelagem *bottom-up*¹⁴ paramétrica apoiada em dados apresentados pelos principais agentes atuantes nesta temática. Os resultados são apresentados por meio de indicadores financeiros de projetos, tais como a TIR, *Payback*, VPL¹⁵, além do custo total de propriedade¹⁶. (*Total Cost of Ownership* - TCO, na sigla em inglês), um dos indicadores que tem se revelado útil para a avaliação de alternativas de investimento com vida útil, custos fixos e variáveis distintos. A escolha da alternativa de ônibus elétricos à bateria se deveu ao fato desta tecnologia proporcionar emissões locais nulas¹⁷, o que tem se revelado fundamental para a melhoria da qualidade do ar em diversas áreas urbanas¹⁸ (EPE, 2020).

Metodologia de avaliação técnico-econômica

A metodologia da ferramenta foi baseada em uma modelagem *bottom-up*¹⁹ (ascendente) paramétrica e os resultados da análise verificados por indicadores financeiros de projeto como TIR, *Payback*, VPL e Custo Total de Propriedade ao longo da vida útil do projeto de investimento, que considera a substituição de um ônibus a diesel por um equivalente elétrico à bateria. A subdivisão metodológica buscou facilitar a interação com o usuário por meio de três módulos representados como perguntas, conforme pode ser visualizado na Figura 1 e detalhado a seguir.

Módulo de Utilização: Quanto se usa de transporte?

O nível de atividade de transporte público pode ser determinado informando a distância média anual praticada pelos ônibus urbanos no município em questão, juntamente com a quantidade de modelos elétricos planejados para a inclusão na frota.

Módulo de Preços: Quanto custa cada tecnologia?

As componentes *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX) fazem parte da resposta a esta pergunta. Os custos de aquisição dos ônibus diesel e elétrico²⁰, bem como o custo de infraestrutura de recarga das baterias dos ônibus elétricos são considerados custos fixos assumidos como CAPEX. Variáveis como rendimento dos ônibus a diesel (km/l) e dos ônibus elétricos (km/kWh), custo dos energéticos e custo de manutenção (especificado em R\$/km) são componentes do OPEX e constituem o custo variável anual (avaliados em R\$/ano) de cada uma das tecnologias de motorização. Precisamente no que se refere aos custos dos energéticos, as

¹⁴Nos modelos '*bottom-up*' ou ascendentes busca-se fazer uma descrição detalhada da estrutura tecnológica da conversão e do uso da energia, e os modelos paramétricos, também conhecidos como modelos contábeis, são aqueles nos quais as projeções energéticas são fortemente baseadas em especificações determinadas pelo próprio usuário.

¹⁵TIR: Taxa Interna de Retorno; *Payback*: tempo de retorno do investimento; VPL: Valor Presente Líquido.

¹⁶Custo total de propriedade, da sigla em inglês *Total Cost of Ownership* (TCO).

¹⁷ Considerando-se apenas as emissões relativas ao uso da energia na operação dos veículos (energia direta). Não se consideram emissões oriundas do processo de produção da bateria, por exemplo, e outros componentes utilizados na tecnologia relacionada. Portanto, a emissão local pode ser nula, mas não necessariamente a emissão global é nula, pois algum local estará (ou pode estar) emitindo mais na produção das baterias (energia indireta ou emissões associadas).

¹⁸Dentre as tecnologias alternativas ao diesel consideradas de baixa emissão, pode-se citar o Motor à Combustão Interna (MCI) a gás natural, o MCI a etanol, o MCI a biodiesel e o motor híbrido e elétrico puro. Cada uma destas apresenta vantagens e barreiras tecnológicas específicas a serem avaliadas.

¹⁹Nos modelos '*bottom-up*' ou ascendentes busca-se fazer uma descrição detalhada da estrutura tecnológica da conversão e do uso da energia, e os modelos paramétricos, também conhecidos como modelos contábeis, são aqueles nos quais as projeções energéticas são fortemente baseadas em especificações determinadas pelo próprio usuário.

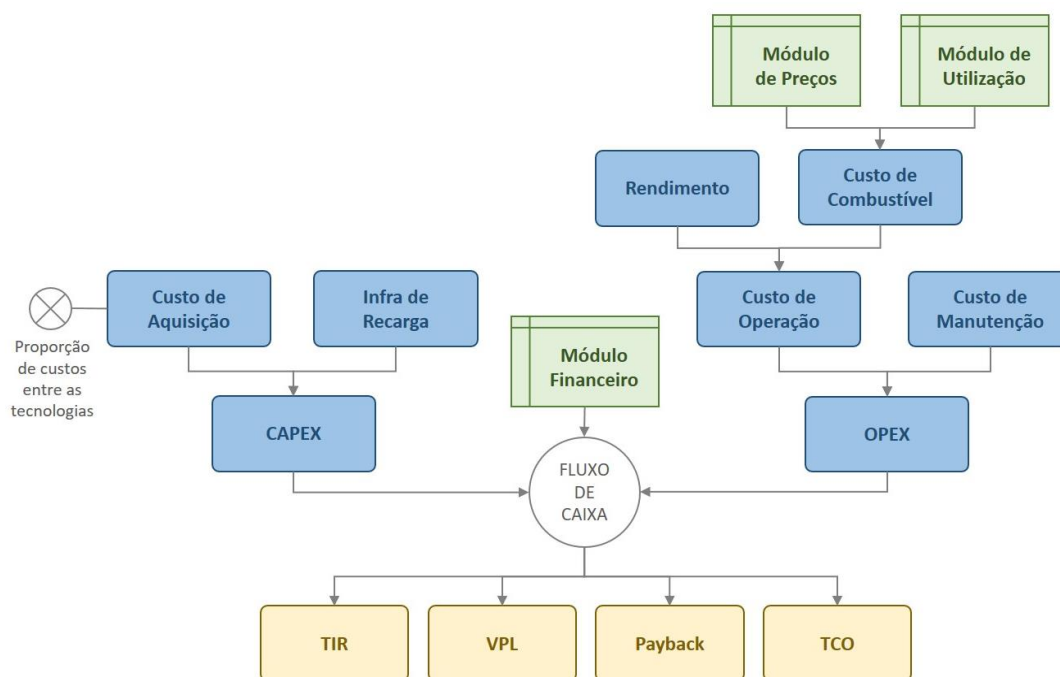
²⁰A proporção de custos entre as tecnologias é um fator multiplicador de custo que determina "quantas vezes" um ônibus elétrico é mais caro do que o seu equivalente convencional a diesel.

variáveis envolvidas são o preço²¹ do óleo diesel comercializado pela operadora de transporte público; a potência em kW do carregador de bateria; a duração em horas do processo de recarga; e a distribuidora²² de energia elétrica listada no subgrupo de tensão A4.

Módulo Financeiro: Como pagar por elas?

Os custos de aquisição dos ônibus podem ser financiados segundo uma estrutura de capital composta pelo empreendedor e por uma instituição financeira, a fim de reduzir a taxa de juros aplicada ao modelo de financiamento: *Weight Average Capital Cost* (WACC) ou Custo Ponderado Médio de Capital (CPMC). Tal modelo de financiamento utiliza variáveis como custo de capital próprio, custo de financiamento e percentual financiado do projeto de investimento. Adicionalmente, o prazo de financiamento dos ônibus fica limitado ao valor máximo da sua vida útil²³ e o valor de revenda é atribuído pelo usuário e expresso como valor percentual do custo de aquisição dos ônibus (EPE, 2020).

Figura 1 – Fluxograma da modelagem bottom-up presente na metodologia da ferramenta



Fonte: Elaboração própria.

6. Estudo de caso da cidade do Rio de Janeiro

A cidade do Rio de Janeiro já foi palco de momentos históricos na construção de caminhos mais sustentáveis para o planeta, a exemplo da reunião que ficou conhecida como Eco-92²⁴ ou Cúpula da Terra, realizada em junho de 1992 na cidade. Naquele momento os países reconheceram o conceito de desenvolvimento sustentável e começaram a moldar ações com o objetivo de proteger o meio ambiente. Desde então, estão sendo discutidas propostas para que o progresso

²¹Em caso de dúvida a ferramenta disponibiliza a título de comparação e consulta a evolução dos preços por Unidade Federativa (UF) atualizados para janeiro de 2019 pela inflação (IPCA).

²²A escolha da concessionária ou permissionária de energia elétrica influencia o valor da tarifa de eletricidade, bem como a sua decomposição de custos.

²³A vida útil dos ônibus foi assumida como cinco anos para os ônibus diesel e dez anos para os ônibus elétricos.

²⁴A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Cnumad) realizada em junho de 1992 na cidade do Rio de Janeiro.

se dê em harmonia com a natureza, garantindo a qualidade de vida para esta e as próximas gerações do planeta. A Rio+20 aconteceu em junho de 2012, marcando 20 anos da ECO-92, com a missão de renovar compromissos com o desenvolvimento sustentável em meio a urgências ambientais, sociais, econômicas e políticas que entravam a definição de metas para evitar degradação do meio ambiente.

No que diz respeito às mudanças climáticas, a Lei nº 5.248, de 2011 instituiu a Política Municipal sobre Mudança do Clima e Desenvolvimento Sustentável e dispôs sobre o estabelecimento de metas de redução de emissões antrópicas de GEE para a cidade. De acordo com a referida Lei, o planejamento do setor de transportes e de mobilidade urbana do Município do Rio de Janeiro deverá incorporar medidas de mitigação das emissões de GEE, dentre as quais, a substituição gradativa da utilização dos combustíveis fósseis por outros com baixo teor de carbono.

Em junho de 2019, no Diário Oficial do Município foram publicados três decretos com iniciativas que têm, entre outros objetivos, a redução da emissão de GEE, o monitoramento das consequências da mudança climática e o incentivo a práticas que beneficiem o meio ambiente. Os programas envolvem metas e diretrizes estabelecidas pelo Plano de Desenvolvimento Sustentável (PDS), alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Por meio do decreto nº 46.081/2019 (RIO DE JANEIRO, 2019) é declarada a adesão da Cidade do Rio de Janeiro na promoção de ruas verdes e saudáveis, o que compreende ações planejadas para cumprimento de prazos para reduzir emissões de GEE da frota de transporte público da cidade, dentre outras. O artigo 3º estabelece que “qualquer contrato de concessão/permissão para a delegação de serviço de transporte público coletivo de passageiros realizado por ônibus, a partir de 1º de janeiro de 2025, somente poderá ser celebrado sob a previsão contratual de utilização de ônibus de emissão zero”. O Decreto enfatiza que, considera-se como tecnologia zero emissões aquelas relativas às emissões do escapamento, que ocorre notadamente nos veículos com célula de combustível de hidrogênio ou elétricos com bateria (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2019).

Ainda de acordo com o Decreto de Ruas Verdes e Saudáveis, para dar efetividade ao compromisso de substituição dos ônibus a diesel por de ônibus elétrico na frota de ônibus da cidade, o Município do Rio de Janeiro deverá proceder à realização de estudos técnicos operacionais e de modelagem financeira, que possibilitem a elaboração de planejamento factível.

Implementação de ônibus elétricos no Rio de Janeiro

Em julho de 2019, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) foi convidada a participar de um grupo de trabalho composto por técnicos da Prefeitura do Rio de Janeiro (CVL/SUBPAR²⁵), SMTR²⁶, Rioônibus, C40 Cities, ITDP (Instituto de Transporte e Desenvolvimento) para tratar dos estudos e dados necessários para a introdução do ônibus elétrico na frota do serviço de transporte público. Este grupo de trabalho, específico para atuar sobre a cidade do Rio de Janeiro, foi denominado GT ZEBRA (*Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator*). O grupo foi constituído após a cidade ter estabelecido compromisso de implementar uma frota de ônibus zero emissões a partir de 2025, de acordo com o decreto nº 46.081/2019 citado acima.

No entanto, o escopo do ZEBRA está inserido no contexto dos compromissos internacionais e das metas locais descritos anteriormente. Trata-se do Projeto Acelerador de Implantação Rápida de Ônibus Zero Emissões que foi criado por duas organizações internacionais, a C40 Cities, uma rede de prefeitos comprometida com as metas do Acordo de Paris e o Conselho Internacional

²⁵Subsecretaria de Planejamento e Acompanhamento de Resultados (SubPar) da Secretaria Municipal da Casa Civil (CVL);

²⁶Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro;

de Transporte Limpo (ICCT), organização independente, sem fins lucrativos, que fornece pesquisas e análises técnicas aos reguladores ambientais, com vistas a melhorar o desempenho ambiental e a eficiência energética do transporte rodoviário, marítimo e aéreo.

A ferramenta de Avaliação técnico-econômica para ônibus elétrico desenvolvida pela EPE foi utilizada pelo GT ZEBRA pelo fato desta tornar explícitos os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão para gestores e operadores sobre a mudança de ônibus à diesel para elétricos. As análises realizadas com o uso da ferramenta consideraram, como premissa deliberada pelo GT, a aquisição de articulados elétricos para circular nos corredores do sistema BRT e de ônibus padrão elétrico para circular no sistema viário regular.

Para a realização dos cenários foram assumidas algumas hipóteses e identificadas algumas oportunidades relacionadas a seguir:

- Preço da energia: é possível buscar uma tarifa diferenciada através de mercado livre mesmo utilizando a concessionária atuante na cidade do Rio de Janeiro como distribuidora, como é o caso do MetrôRio e do sistema VLT Carioca. A tarifa aplicada pela concessionária carioca é a mais alta dentre as distribuidoras brasileiras (por contar com impostos equivalentes a R\$0,34/kWh), de acordo com exercício realizado na própria ferramenta para a tarifa de energia no subgrupo A4, adotado como hipótese para a recarga de ônibus elétricos em garagem;
- Condições de financiamento: o financiamento de ônibus elétricos pode ter condições mais favoráveis do que ônibus a diesel e outros projetos de mobilidade urbana, como pode ser observado em MDIC (2018). Admitiu-se com base no BNDES que o financiamento para ônibus elétricos tem juros menores (0,9% ao ano) BNDES (2020a) do que para projetos de mobilidade urbana (1,3% ao ano) BNDES (2020b). Considerou-se nas simulações: i) prazo de financiamento de 10 anos para o ônibus a diesel e 15 anos para o ônibus elétrico, ii) custo de capital próprio de 12,5%, iii) percentual financiado de 80% para o ônibus a diesel e 90% para o ônibus elétrico;
- Custo de aquisição: admitiu-se a premissa que o veículo elétrico articulado tem custo 2,5 vezes maior do que um a diesel. O veículo padrão tem custo 2 vezes maior do que o modelo a diesel. Com o estímulo à competitividade, por meio da instalação de novos fabricantes no Brasil; com a redução do preço de importação de baterias e outras peças e componentes; ou com a compra em maior volume, será possível negociar um desconto.

O custo de aquisição de ônibus elétrico depende, dentre outros fatores, da dimensão do veículo, a presença ou não de ar-condicionado, a capacidade de transporte de passageiros e a capacidade de armazenamento da bateria. Também podem influenciar o preço unitário dos ônibus, o tamanho do lote de encomendas de veículos e o tipo de contrato celebrado com o operador de transporte (BNEF, 2018).

A abordagem adotada pelo relatório *Sistematização de Iniciativas de Mobilidade Elétrica no Brasil* (MDIC, 2018) pressupõe que o preço dos ônibus elétricos disponíveis no Brasil possa ser auferido por meio de um fator de proporção em relação aos seus modelos equivalentes a diesel. De acordo com os dados do CARB, mencionados no referido relatório, a razão entre o preço de compra de um ônibus elétrico à bateria (carregado na garagem ou na rota) e o seu equivalente convencional a diesel é 1,75. Já no caso do ônibus articulado, esta razão tende a ser maior, dentre outros motivos, pela menor escala de produção destes veículos e pela capacidade da bateria.

O custo de aquisição da recarga também é considerado no cálculo do CAPEX da ferramenta. O custo adotado nas simulações foi de R\$ 20 mil, considerando-se um carregador para cada ônibus. Ressalta-se que a possibilidade de gestão da recarga nas garagens, considerando-se mais de um ônibus por carregador, deve alterar o custo total do CAPEX. Além disso, a potência dos

carregadores e a duração do processo de recarga também são fatores que podem influenciar o resultado dos custos fixos.

Estudos de caso: cenários avaliados

O resumo dos cenários simulados como exercício realizado pelo GT ZEBRA na ferramenta de avaliação de ônibus elétricos pode ser visualizado na tabela a seguir. Os dados de entrada utilizados nas simulações foram fornecidos pelos agentes integrantes do grupo de trabalho, não sendo de responsabilidade da EPE.

Tabela 1 – Resumo dos cenários simulados

Descrição dos cenários			Detalhes da aquisição	Custo de Financiamento	Custo de Eletricidade	TIR (%)
Cenário 1	1A	1A.1	Aquisição pelo operador	10% a.a.	R\$ 0,46/kWh	14,04 (viável)
		1A.2	Aquisição pelo operador	10% a.a.	R\$ 0,67/kWh	9,48 (inviável)
	1B	1B.1	Aquisição pelo operador	9,0% a.a.	R\$ 0,46/kWh	19,17 (viável)
		1B.2	Aquisição pelo operador	9,0% a.a.	R\$ 0,67/kWh	13,54 (viável)
		1B.3	Aquisição pelo operador	9,0% a.a.	R\$ 0,71/kWh	12,60 (viável)
		1B.4	Aquisição pelo operador	9,0% a.a.	R\$ 0,73/kWh	12,13 (viável)
Cenário 2			Município oferece benefício fiscal ao operador	Não foi modelado	Não foi modelado	Não foi modelado
Cenário 3			Município adquire o ônibus elétrico e as empresas de ônibus assumem a operação, ressarcindo o município	Não foi modelado	Não foi modelado	Não foi modelado
Cenário 4	4.1	Cenário inicial Vida útil dos ônibus elétricos de 15 anos e dos ônibus a diesel de 10 anos	10% a.a. (diesel) 10% a.a. (elétrico)	R\$ 0,99/kWh	11,07 (inviável)	
	4.2	Cenário Simulação Vida útil dos ônibus elétricos de 15 anos e dos ônibus a diesel de 10 anos	10% a.a. (diesel) 9% a.a. (elétrico)	R\$ 0,71/kWh	78,23 (viável)	
	4.3	Cenário Simulação Vida útil dos ônibus elétricos de 15 anos e dos ônibus a diesel de 10 anos	10% a.a. (diesel) 9% a.a. (elétrico)	R\$ 0,99/kWh	18,64 (viável)	

Fonte: Elaboração própria a partir de deliberações do GT ZEBRA.

7. Conclusão

Atualmente, há diversas opções de tecnologias veiculares e de energéticos alternativos ao diesel os quais são considerados de baixa emissão de CO₂ equivalente, tais como a eletricidade e o biogás. Estas opções devem ser analisadas no âmbito das particularidades de cada município, tais como: disponibilidade do combustível, infraestrutura existente e topologia de rotas urbanas. Em particular, a eletromobilidade tem se revelado como uma das políticas prioritárias dentro da conjuntura de transição energética para economias de baixo carbono e no desenvolvimento de cidades sustentáveis no mundo, tendo em vista, principalmente sua característica de zero emissão de poluentes. No âmbito das grandes cidades em particular, a deterioração da qualidade do ar é um dos vetores de maior relevância para a implementação de políticas e estímulos a tecnologias de baixa emissão de poluentes e impactos ambientais.

A eletrificação do transporte público concilia a vantagem de redução das emissões de CO₂, com a redução de poluentes locais que deterioram a qualidade do ar nas cidades com os impactos sociais intrínsecos a este segmento, os quais não estão presentes no segmento de veículos leves. No Brasil, a alternativa da tecnologia elétrica para o transporte público urbano está em linha com o compromisso de redução de emissão de CO₂ assumido no Acordo de Paris e de

implementação das metas dos ODS no âmbito da Agenda 2030. Além disso, contribui para os objetivos constantes na Política Nacional de Mobilidade Urbana.

No caso da cidade do Rio de Janeiro, a tecnologia de ônibus elétrico à bateria está em consonância com os decretos assinados em junho de 2019, que têm, entre outros objetivos, a redução da emissão de GEE, o monitoramento das consequências da mudança climática e o incentivo às práticas que beneficiem o meio ambiente. Em especial no Decreto nº 46.081/2019 fica declarada a adesão da Cidade do Rio de Janeiro à promoção de ruas verdes e saudáveis, o que compreende ações planejadas para cumprimento de prazos para reduzir emissões de GEE da frota de transporte público da cidade, dentre outras.

Neste contexto, a ferramenta de avaliação técnico-econômica para ônibus elétrico elaborada pela EPE foi utilizada pelo GT ZEBRA pelo fato desta tornar explícitos os diferentes fatores que influenciam a tomada de decisão para gestores e operadores sobre a mudança de ônibus a diesel para elétrico. O grupo foi constituído após a cidade ter estabelecido compromisso de implementar uma frota de ônibus zero emissões a partir de 2025, de acordo com o Decreto nº 46.081/2019 citado acima.

No estudo de caso para inserção de ônibus elétrico na cidade do Rio de Janeiro, foram consideradas as análises de aquisição de articulados elétricos para circular nos corredores do sistema BRT e de ônibus padrão elétrico para circular no sistema viário regular. Através da ferramenta de avaliação técnico-econômica para ônibus elétrico foram identificadas algumas oportunidades no que diz respeito às variáveis: preço da energia (possibilidade de tarifa diferenciada através de mercado livre), condições de financiamento (juros favoráveis pelo fato de se tratar de mobilidade elétrica) e custo de aquisição (através de descontos de escala de compras, por exemplo).

Foram elaborados 4 cenários, a partir de dados fornecidos pelos agentes integrantes do GT ZEBRA:

- 1) A aquisição do ônibus elétrico articulado pelo operador, com diferentes custos de energia e custos de financiamento;
- 2) O município oferece subsídio fiscal ao operador;
- 3) O município adquire o ônibus elétrico articulado e as empresas assumem a operação, amortizando gradualmente os custos assumidos pelo Município; e
- 4) A simulação de ônibus elétrico padrão em linhas convencionais.

Dentre os resultados e observações obtidas a partir deste estudo de caso, observa-se que:

- a) Considerando-se as modelagens realizadas, as variáveis mais sensíveis são o custo da energia elétrica e o custo de financiamento;
- b) Dado uma tarifa de energia elétrica alta no mercado cativo, pode ser válida a prospecção no mercado livre para aquisição de energia;
- c) Considerando-se ônibus articulado nas linhas BRT, a mudança de ônibus a diesel para ônibus elétrico só se viabiliza com menores custos de financiamento (até 9%) e com eletricidade mais barata (até R\$0,71/kWh); e
- d) Ônibus padrão em linhas convencionais: a mudança é viável mesmo com a tarifa de eletricidade vigente, desde que viabilizado custo de financiamento de até 9%.

Por fim, além dos resultados econômico-financeiros obtidos neste estudo de caso, através da ferramenta de avaliação técnico-econômica para ônibus elétrico, foi possível fomentar novas discussões a respeito de custos de aquisição de energia, modelos de negócio, tecnologias e infraestruturas envolvendo os respectivos agendes de mercado. Esse processo possibilita a disseminação de informações na sociedade que podem resultar em novas simulações e decisões

mais bem fundamentadas e robustas sobre a introdução desta tecnologia de motorização na frota de ônibus urbanos das cidades brasileiras.

Os parâmetros locais considerados neste estudo de caso foram fornecidos e validados pelos integrantes do GT ZEBRA. Outros resultados podem ser obtidos a partir de diferentes parâmetros apresentados para esta ou outra localidade. O objetivo da EPE nesta publicação foi demonstrar a aplicabilidade da ferramenta de avaliação técnico-econômica de ônibus elétricos urbanos em estudos sobre o tema em questão.

8. Referências Bibliográficas

Adam, S., Ahmed, A. Z., Anvita, A., Bassam, F., Mohammed, A., Rubal, D.: *An overview of key evolutions in the light-duty vehicle sector and their impact on oil demand*. Energy Transitions (2019). Disponível em: <https://bit.ly/3jkDbUF>. Acesso em agosto de 2020.

AGÊNCIA BRASIL (2019). Exposição mostra história de ônibus elétricos na cidade de São Paulo. Publicado em 01/06/2019. Disponível em: <https://bit.ly/31B6xbj>. Acesso em agosto de 2020.

BNDES (2020a). BNDES Finem - Meio Ambiente - Ônibus elétricos, híbridos ou com tração elétrica e máquinas/equipamentos com maiores índices de eficiência energética e/ou redução de emissão de gases de efeito estufa. Disponível em: <https://bit.ly/2EKERaY>. Acesso em agosto de 2020.

BNDES (2020b). BNDES Finem - Mobilidade Urbana. Disponível em: <https://bit.ly/2QteXev>. Acesso em agosto de 2020.

BNEF (2018). *Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂*. Bloomberg Finance L.P. Março, 2018. C40 Cities (2019). *Fossil Fuel Free Streets Declaration*. Disponível em: <https://bit.ly/2x0j4FG>. Acesso em abril de 2019.

EPE (2019). Balanço Energético Nacional. Disponível em: <https://bit.ly/34DJUF9>. Acesso em abril de 2020.

EPE (2020). Empresa de Pesquisa Energética. Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico. Disponível em: <https://bit.ly/3aYbzkZ>. Acesso em janeiro de 2020.

IEA (2018). *International Energy Agency. Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification*. Disponível em: www.iea.org. Acesso em fevereiro de 2019.

IPEA (2018). ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3lrDyUg>. Acesso em janeiro de 2020.

MDIC (2018). Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Sistematização de Iniciativas de Mobilidade Elétrica no Brasil. Disponível em: <https://bit.ly/2DgbMRk>. Acessado em janeiro de 2020.

MMA (2020). Contribuição Nacionalmente Determinada. Disponível em: <https://bit.ly/2FUOzbt>. Acessado em agosto de 2020.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL (2019). Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. ONU Brasil. Disponível em: <https://bit.ly/376ILWP>. Acessado em novembro de 2019.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO (2019). Decreto nº 46.081 de 11 de Junho de 2019. Declara a adesão da Cidade do Rio de Janeiro em promover ruas verdes e saudáveis, com ações planejadas para cumprimento de prazos para reduzir emissões de gases de efeito estufa (GEE) da frota de transporte público do Município do Rio de Janeiro, e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2019.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2020). Governança Nacional para os ODS. Secretaria de Governo da Presidência da República Disponível em: <https://bit.ly/2Qyojpo>. Acessado em agosto de 2020.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL (2020). Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das nações unidas sobre mudança do clima. Disponível em: <https://bit.ly/3lxEUf>. Acessado em agosto de 2020.

A EPE se exime de quaisquer responsabilidades sobre uso indevido, decisões ou deliberações tomadas com base no uso da ferramenta ou nas informações contidas neste informe.