



NOTA TÉCNICA

AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ÔNIBUS ELÉTRICO NO BRASIL

SETEMBRO DE 2020

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



■ Colaboradores

NOTA TÉCNICA EPE/DEA-DPG/SEE-SDB/001/2020

Coordenação Geral

Thiago Vasconcellos Barral Ferreira
Giovani Vitória Machado

Coordenação Executiva

Angela Oliveira da Costa
Carla da Costa Lopes Achão

Coordenação Técnica

Glaucio Vinicius Ramalho Faria
Luciano Basto Oliveira
Marcelo Castello Branco Cavalcanti
Patricia Feitosa Bonfim Stelling

Equipe Técnica

Bruno Rodamilans Lowe Stukart
Carlos Augusto Góes Pacheco
Daniel Silva Moro
Felipe Scanduzzi Valença de Castro
Flávio Alberto Figueiredo Rosa
Flávio Raposo de Almeida
Gabriel da Silva Azevedo Jorge
Gabriel Konzen
Gustavo Brandão Haydt de Souza
Gustavo Naciff de Andrade
Natália Gonçalves de Moraes

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



Ministro de Estado

Bento Costa Lima Leite de Albuquerque Junior

Secretária-Executiva

Marisete Fátima Dadald Pereira

Secretário Adjunto de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Hélvio Neves Guerra



Presidente

Thiago Vasconcelos Barral Ferreira

Diretor de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais

Giovani Vitória Machado

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

Erik Eduardo Rego

Diretor de Estudos do Petróleo, Gás e Biocombustíveis

Heloísa Borges Esteves

Diretor de Gestão Corporativa

Angela Regina Livino de Carvalho

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

■ Sumário

1. INTRODUÇÃO	5
2. MOTIVADORES INICIAIS	7
2.1. Iniciativas Internacionais	8
2.2. Iniciativas públicas no Brasil	10
2.3. Principais variáveis envolvidas	13
3. COMO FAZER A AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA?	16
3.1. Distância média percorrida	17
3.2. Custos de Aquisição (CAPEX).....	18
3.2.1. Custo de aquisição dos veículos.....	18
3.2.2. Custo de aquisição dos carregadores	18
3.3. Custos de Operação e Manutenção (OPEX)	19
3.3.1. Rendimento.....	20
3.3.2. Custo do óleo diesel.....	20
3.3.3. Custo da energia elétrica	20
3.3.4. Custo de Manutenção	23
3.4. Definição do fluxo de caixa.....	23
3.5. Indicadores financeiros de projeto.....	27
4. APLICAÇÃO DE ESTUDO DE CASO	29
4.1. Elaboração de cenários.....	29
4.2. Escolha dos parâmetros a partir das fontes de dados	29
4.2.1. Preço do diesel.....	30
4.2.2. Preço da energia elétrica	30
4.2.3. Preço de aquisição de ônibus a diesel	30
4.2.4. Preço de aquisição de ônibus elétrico	31
4.2.5. Custo de aquisição da infraestrutura de recarga.....	31
4.2.6. Rendimento do ônibus a diesel.....	32
4.2.7. Custo de manutenção do ônibus a diesel	32
4.2.8. Rendimento do ônibus elétrico.....	33
4.2.9. Custo de manutenção do ônibus elétrico	34
4.2.10. Custo de financiamento do ônibus elétrico	34
4.2.11. Valor de revenda de ônibus a diesel	35
4.2.12. Distância média percorrida.....	35
4.2.13. Valor de revenda de ônibus elétrico	36
5. RESULTADOS	36
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
APÊNDICE	45

■ Lista de Figuras

Figura 1 – Iniciativas em prol da eletrificação de ônibus no nível municipal.....	12
Figura 2 – Mapeamento de processo da modelagem.....	16
Figura 3 – Influência das distâncias médias percorridas no TCO em ônibus elétricos e a diesel	18
Figura 4 – Exercício de decomposição da tarifa das principais distribuidoras do subgrupo A4	22
Figura 5 – Fluxo de Caixa Convencional	27
Figura 6 – Procedimento de transformação dos fluxos de caixa	48

■ Lista de Tabelas

Tabela 1 – Políticas Federais para promoção da eletrificação veicular	11
Tabela 2 – Classificação das principais variáveis envolvidas na análise.....	13
Tabela 3 – Classificação de consumidores no Mercado Livre de Energia	21
Tabela 4 – Percentual de desconto concedido sobre a tarifa de energia na média tensão (%).....	22
Tabela 5 – Consumo específico de ônibus urbanos por tipos de testes	33
Tabela 6 – Dados operacionais de ônibus municipais em função do tamanho da população	36
Tabela 7 – Parâmetros e Resultados	37
Tabela 8 – Componentes e unidades de contabilização dos tipos de tarifas no subgrupo A4.....	45

1. INTRODUÇÃO

A eletrificação veicular vem sendo estimulada pelos governos de diversos países como uma solução para a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e de poluentes locais, inserida em um contexto de transição energética com enfoque na promoção de fontes renováveis de geração elétrica e implantação de redes inteligentes de energia (*smart grids*). Os veículos leves têm sido o principal segmento no processo de eletromobilidade, especialmente devido à sua representatividade no consumo de combustíveis fósseis na matriz energética global transportes.

Em 2019, os licenciamentos de veículos leves elétricos no mundo ultrapassaram 2 milhões de unidades (IEA, 2020), impulsionados por incentivos governamentais de diversas naturezas como políticas fiscais e creditícias, investimentos diretos, e subsídios para aquisição do automóvel elétrico. Os licenciamentos foram particularmente elevados em países como China, Japão, Noruega, Suécia, Países Baixos e Finlândia. Nestes países, a renda *per capita* é mais elevada do que a média mundial e, por meio de elevados investimentos e políticas de longa duração, há estímulos à penetração desta tecnologia. Como exceção, cita-se a China, que apresenta condições particulares nesse contexto, uma vez que, mesmo verificando uma renda *per capita* relativamente baixa da população, se destaca como o maior mercado mundial de veículos elétricos – 2,2% de participação destes modelos no total das vendas de veículos leves (IEA, 2018). Cumpre ressaltar que esse avanço deriva, em grande medida, de ações relacionadas à estratégia de redução da dependência energética, incentivo a alguns setores industriais chineses, aproveitamento de seus recursos minerais na fabricação de baterias, bem como da necessidade de diminuição das emissões de poluentes locais.

De modo geral, no entanto, o alto custo de aquisição dos veículos elétricos contribui para que as maiores participações nas vendas fiquem restritas a Noruega (39%), Suécia (6,3%), Países Baixos (2,7%) e Finlândia (2,6%).

No Brasil, uma das principais lideranças na produção e uso de biocombustíveis, com condições favoráveis e detentor de políticas de incentivo a estes combustíveis renováveis, a participação dos veículos *flexfuel* é superior a 80% no licenciamento de veículos leves. Neste contexto de uso extensivo de etanol, disponibilizado em todos os postos de revenda de combustíveis do país, e dadas as características de renda da população, altos valores de aquisição dos veículos elétricos e significativas restrições orçamentárias do Estado, a penetração de veículos elétricos na frota nacional é entendida como um movimento mais lento e gradual do que nos países citados.

No que tange aos veículos urbanos coletivos, objeto deste documento, as políticas de eletrificação nos diversos países, em geral, são mais restritas e incluem elevados subsídios, além da introdução de ônibus em frotas governamentais. Em março de 2015, mais de 20 cidades assinaram o *C40 Fossil Fuel Free Streets Declaration*, dentre elas Paris, Cidade do México, Medellín, Santiago e Barcelona, comprometendo-se a adquirir apenas ônibus de emissão zero a partir de 2025 (C40, 2019). Nos cenários *New Policies*¹ e *EV30@30*² elaborados pela Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA, na sigla em inglês), o número de ônibus elétricos parte de uma base de 370 mil unidades nas ruas em 2017, alcançando 1,5 milhão e 4,5 milhões de unidades até 2030, respectivamente, em cada um dos cenários (IEA, 2018).

No entanto, o investimento inicial superior do ônibus elétrico que utiliza bateria e de sua infraestrutura de recarga constitui uma das principais barreiras para a adoção desta alternativa em

¹ O *New Policies Scenario* (NPS) é o cenário do *World Energy Outlook* que incorpora os efeitos prováveis de políticas anunciadas e que estão expressas em metas e planos oficiais. Neste cenário, a participação dos ônibus elétricos no total das vendas globais de ônibus é inferior a 15% (IEA, 2018).

² No cenário *EV30@30*, a meta de penetração dos VEs (veículos leves, ônibus e caminhões) nas vendas é alcançada globalmente. (IEA, 2018).

substituição ao ônibus convencional, movido a diesel. Segundo a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), a renovação da frota de ônibus nos maiores municípios brasileiros é baseada na revenda dos veículos usados – atividade contabilizada como parte do negócio da operadora de transporte urbano e que gera impactos em custos e tarifas. Este fato representa dificuldades a serem consideradas nas análises de possíveis mudanças tecnológicas e de infraestrutura de abastecimento entre as regiões do país (NTU, 2018). Deve-se ponderar como se daria a revenda, tendo em vista que ônibus elétricos não poderiam ser utilizados em localidades que não dispusessem de uma mínima infraestrutura de recarga. Neste contexto, surgem discussões mais amplas, que têm potencial de agregar novos elementos capazes de modificar a análise acerca da competitividade de rotas tecnológicas alternativas. Em particular, no caso dos ônibus elétricos que utilizam bateria, estas questões incluem avaliar a mudança de regras para a concessão do serviço de transporte público urbano coletivo; análises de projeto que contemplam custos operacionais ao longo da vida útil do veículo; novas opções de fontes de financiamento para viabilizar tecnologias alternativas; e parcerias entre operadoras de ônibus e empresas de geração e distribuição de energia.

O principal objetivo deste estudo é avaliar a viabilidade técnico-econômica da substituição de ônibus urbanos movidos a diesel por modelos equivalentes elétricos, que utilizam bateria. Cabe ressaltar que a análise da alternativa de ônibus elétricos com bateria se deveu ao fato desta tecnologia proporcionar emissões locais nulas, o que tem se revelado fundamental para a melhoria da qualidade do ar em diversas áreas urbanas³, além de contribuir para a diversificação da matriz energética nacional.

Este estudo foi dividido em quatro capítulos. O Capítulo 2 apresenta os motivadores e os principais aspectos da discussão sobre a adoção de ônibus elétricos, destacando itens relativos à aquisição e à operação das alternativas tecnológicas. O Capítulo 3 aborda uma proposta de como avaliar as alternativas de motorização a diesel e elétrica nos ônibus e apresenta os diversos parâmetros que devem ser considerados nesta análise. Tal avaliação de viabilidade da substituição tecnológica baseia-se em modelagem *bottom-up*⁴ 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*, VPL⁵, além do custo total de propriedade (*Total Cost of Ownership* - TCO, na sigla em inglês).

No Capítulo 4, são discutidos os cenários a serem considerados e os valores adotados para cada um dos parâmetros citados no capítulo anterior. Por fim, no Capítulo 5 e nas Considerações Finais são apresentados os resultados e conclusões.

³ Dentre as tecnologias alternativas ao diesel consideradas de baixa emissão, pode-se citar os Motores a Combustão Interna (MCI) que utilizam a gás natural, etanol, diesel de cana ou biodiesel, além dos motores híbrido, elétrico *plug-in* ou puramente elétrico. Ademais, os motores que utilizam a célula combustível a hidrogênio ou etanol, também contam como tecnologias alternativas ao MCI movido a diesel.

⁴ Nos 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.

⁵ TIR: Taxa Interna de Retorno; *Payback*: tempo de retorno do investimento; VPL: Valor Presente Líquido.

2. MOTIVADORES INICIAIS

As mudanças climáticas globais e a deterioração da qualidade do ar nas grandes cidades estão entre os principais vetores para o processo mundial de eletrificação nos transportes. A Agência Internacional de Energia apontou que este setor permanece como um dos grandes responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa, que contribuem para as mudanças climáticas e responderam por 24% das emissões globais no uso de energia em 2016. No Brasil, o setor de transportes foi responsável por 46,3% do total das emissões da matriz energética brasileira em 2018 (416,1 MtCO₂-eq⁶), enquanto que o seu consumo de energia representou cerca de um terço do consumo total da economia brasileira (255,7 Mtep⁷ em 2018), segundo dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019).

Ressalta-se que em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (*Nationally Determined Contribution*⁸ - NDC na sigla em inglês), o Brasil se comprometeu com uma redução, em 2025, de suas emissões totais de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 (BRASIL, 2015). Além disso, o país apresentou uma contribuição indicativa subsequente de 43% de redução dos níveis de emissão de 2005, a ser atingida em 2030 (MDIC, 2018⁹). Destaca-se que a NDC do Brasil se aplica ao conjunto da economia e, portanto, baseia-se em caminhos flexíveis para atingir os objetivos de 2025 e 2030. Embora a NDC brasileira não estabeleça metas setoriais, fornece informações adicionais sobre medidas que podem ser adotadas para o atingimento das metas, entre as quais a expansão do uso dos biocombustíveis como estratégia para a descarbonização no setor de transportes. Também são incluídas recomendações para a promoção de medidas de eficiência energética, da melhoria na infraestrutura de transportes e do transporte público em áreas urbanas, o que compreende a opção da eletromobilidade.

Do ponto de vista local, a operação do transporte motorizado com base na queima de combustíveis fósseis é responsável pela emissão de diversos poluentes nocivos à saúde humana, com destaque para monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) (IPEA, 2011) (MMA, 2020). Segundo a *International Council on Clean Transportation* (ICCT), os dados da rede de monitoramento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) indicam que, em 2015, os padrões diários e anuais de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) foram ultrapassados em pelo menos dois terços dos dias para os poluentes MP₁₀, MP_{2,5} e O₃ (ozônio), trazendo prejuízos graves para a saúde dos cidadãos, que incluem doenças cardíacas, acidentes vasculares cerebrais, câncer de pulmão, asma e doenças pulmonares obstrutivas crônicas (MDIC 2018^b) (MMA, 2020). Por serem mais pesados que outros gases constituintes da atmosfera, o MP permanece concentrado nas imediações da via e causa degradação do ambiente à sua volta (IPEA, 2011).

A contribuição das emissões relativas aos ônibus urbanos é destacada no estudo publicado pelo ICCT (2017). De acordo com o documento, os ônibus urbanos com motor a combustão interna (MCI) de gerações mais antigas produzem um quarto das emissões de carbono negro⁹ do transporte rodoviário, apesar de constituírem apenas 1% da frota global de veículos rodoviários. As emissões de MP são especialmente importantes nos corredores de ônibus urbanos, onde há concentração destes veículos. Destaca-se que a substituição por veículos elétricos representa uma das alternativas para resolução do

⁶ MtCO₂-eq: milhões de toneladas métricas de emissões de Co₂ equivalente.

⁷ Mtep: milhões de toneladas equivalentes de petróleo.

⁸ O governo brasileiro assumiu o compromisso internacional de contribuir com a mitigação de GEE pela adesão ao Acordo de Paris, celebrado na 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), em dezembro de 2015.

⁹ O carbono negro é um componente ultrafino do MP, potente, de curta duração e com um impacto de aquecimento 900 a 3.200 vezes superior ao do dióxido de carbono, operando também como portador universal de toxinas nos pulmões e na corrente sanguínea, e contribuindo para mortes prematuras por poluição do ar (ICCT, 2017).

problema. Outras medidas como o sucateamento, proibição ou estabelecimento de limites para circulação de veículos mais antigos também podem contribuir para mitigação das emissões de MP.

O Brasil vem atuando em prol do maior conhecimento, desenvolvimento e implementações de tecnologias de baixa emissão para ônibus urbanos, através de avanços nas áreas de normatização e regulamentação, estratégias de políticas públicas, e novos modelos de negócio relacionados às tecnologias alternativas ao diesel, dentre elas, os biocombustíveis, o gás natural comprimido (GNC), os ônibus híbridos e os elétricos.

Como exemplos de políticas públicas que contribuem para a redução de emissões atmosféricas veiculares destaca-se o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) que, em novas fases (L7 e L8), implementará restrições severas às emissões por veículos pesados, a partir de 2023 (MMA, 2018). Ademais, outros programas também colaboram para a redução de emissões. O Programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística (MDIC, 2018^b), a partir do estabelecimento de requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos novos produzidos no Brasil ou a importação de veículos novos, incluirá metas de aumento de eficiência energética para esta categoria de veículos. Ademais, o mandatório de uso de percentuais de biodiesel no diesel fóssil, estabelecido pelo Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) também favorece a redução de emissões (EPE, 2005). Lançado em 2004, o programa teve como objetivo a implementação de forma sustentável, tanto técnica como economicamente, da produção e uso do biodiesel, com enfoque na inclusão social e no desenvolvimento regional. (EPE, 2016, 2020). Cabe ressaltar que EPE (2020) perpassa aspectos de emissões veiculares, abordando também as experiências internacionais, e aponta os desafios e oportunidades da utilização do diesel renovável para o abastecimento nacional.

No que tange aos ônibus elétricos, estes destacam-se por não gerarem emissões de escapamento e pelo potencial de reduções na emissão de CO₂ ao se considerar todo o seu ciclo de vida. Cabe avaliar a necessidade de expansão adicional da geração de energia elétrica para atendimento à demanda de veículos elétricos. Entretanto, ao contrário de muitos países, a geração é essencialmente renovável, tendo em vista o alto percentual de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira (EPE, 2019). É preciso também registrar que os ônibus a diesel têm se tornado cada vez mais eficientes e limpos, reduzindo a diferença entre ambas as motorizações.

A experiência internacional mostra que a atuação dos governos nas diversas instâncias (federal, estadual e municipal), seja através de políticas regulatórias para veículos e combustíveis limpos, promoção da infraestrutura de abastecimento e/ou recarga, e incentivos para o desenvolvimento e fabricação de alternativas tecnológicas no país e esclarecimentos à sociedade, é fator determinante. A seguir, são destacadas iniciativas internacionais e nacionais que vêm contribuindo para a eletrificação dos ônibus nas cidades.

2.1. Iniciativas Internacionais

Na disseminação da eletrificação de ônibus urbanos, as iniciativas internacionais envolvem os principais *stakeholders*, tais como fabricantes, prefeitos, operadores e bancos multilaterais, que desempenham papel relevante.

Neste sentido, iniciativas lideradas por entes governamentais, como a Declaração de Ônibus Limpos do *Cities Climate Leadership Group* (C40), têm papel relevante. Lançada em 2015 durante o Fórum dos Prefeitos da América Latina, em Buenos Aires, tem como um dos principais objetivos contribuir para o desenvolvimento de estratégias junto aos diversos *stakeholders*, que tornem esta tecnologia mais acessível. A Declaração foi assinada por 22 cidades que se comprometeram a adicionar a suas frotas atuais

mais de 40 mil ônibus com tecnologia limpa até 2020, o que corresponderia a uma frota total de cerca de 165 mil ônibus (C40, 2019).

Outro projeto é o *Soot-free Bus Project* do *Climate and Clean Air Coalition* (CCAC), que tem como objetivo principal promover o aumento da participação de ônibus livres de fuligem¹⁰, zero emissão (e, principalmente elétrico) em 20 cidades no mundo. O projeto inclui não só o desenvolvimento de compromissos para adoção destas tecnologias, mas também suporte para tornar esses compromissos realidade (CCAC, 2019).

No âmbito dos governos, a eletrificação dos ônibus urbanos vem ocorrendo através de incentivos e subsídios em prol de tecnologias com baixa ou zero emissão de poluentes globais e locais.

Europa

Na Europa, a maioria dos ônibus elétricos em atividade é adquirido através de uma combinação de autofinanciamento e vários níveis de subsídios, incluindo subsídios da UE, nacionais, regionais ou municipais. Os incentivos podem cobrir grande parte do investimento inicial, com o restante vindo dos governos estaduais e locais e do próprio operador de ônibus (BNEF, 2018).

Com intuito de testar soluções de eletrificação na rede de ônibus urbanos através de projetos pilotos e facilitar a aceitação pelo mercado dos ônibus elétricos, a Comissão Europeia lançou o projeto ZeEUS (*Zero Emission Urban Bus System*) no âmbito do Veículo Verde Europeu e Cidades e Comunidades Inteligentes, em novembro de 2013, com vigência até março de 2018. O projeto com orçamento de cerca de 22 milhões de euros foi coordenado pela *Union Internationale des Transports Publics* (UITP) e contou com a participação de todas as potenciais partes interessadas: autoridades e operadores de transporte público, fabricantes de ônibus, fornecedores da indústria, fornecedores de energia, associações nacionais e internacionais, centros de pesquisa e consultorias (UITP, 2016).

De acordo com a UITP, a frota de ônibus elétricos urbanos em 10 cidades europeias passou de 12 unidades para 76 unidades (sendo 65 BEV e 11 PHEV) no período do projeto, somando a distância de 5,7 milhões de quilômetros viajados em modo puramente elétrico o que resultou numa economia de 2,2 milhões de litros de diesel e 3,3 milhões de toneladas de CO₂ evitados. Além disso, as demonstrações com ônibus elétricos realizadas em cidades europeias, proporcionou a avaliação e a factibilidade da implementação desta solução, além de prover informações que possibilitam a comparação do custo total de propriedade, requerimentos operacionais, limitações e oportunidades relacionadas a esta tecnologia (ZEEUS, 2018).

China

A China apresenta a maior frota de ônibus elétricos do mundo, alcançando cerca de 370 mil unidades no final de 2017 (IEA, 2018). O desenvolvimento deste mercado conta com amplo suporte governamental, que se iniciou há aproximadamente uma década. A China conta com algumas das cidades mais poluídas do mundo, o que começou a causar elevados custos de saúde. Além disso, uma das estratégias de longo prazo adotadas foi a de se tornar líder em novas tecnologias, com elevados investimentos em energias renováveis e eletromobilidade.

Os gastos do governo central para subsidiar a compra de veículos elétricos comerciais em 2015 totalizaram mais de RMB 46 bilhões, cerca de US\$ 8,4 bilhões. Os subsídios foram fornecidos diretamente pelo governo central aos fabricantes e complementados por subsídios regionais e municipais, que em muitos casos correspondiam aos subsídios do governo central (WANG et al., 2017 *apud* IEA, 2018). Em 2017, a política de subsídios foi atualizada e passou a ter como foco os operadores de ônibus elétricos. Estas mudanças foram implementadas em conjunto com cortes nos subsídios disponíveis para os operadores de ônibus convencionais (diesel).

¹⁰ Inclui tecnologias a diesel (avançada), gás natural, híbrido-elétrico, elétrico à bateria e também outras tecnologias livres de fuligem (C40, 2019).

A cidade chinesa de Shenzhen se destaca por ter transformado completamente sua frota de ônibus urbanos de 16.359 ônibus para modelos totalmente elétricos, em 2017. Nesta cidade e em outras, tais como Pequim e Tianjin, os subsídios possibilitaram que os preços de aquisição dos ônibus elétricos se equiparassem aos dos ônibus convencionais a diesel, o que permitiu reduzir o que, em geral, é visto como a principal barreira para a adoção de ônibus elétricos; o alto investimento inicial (IEA, 2018).

EUA 

A Administração Federal de Trânsito (FTA) do Departamento de Transportes dos EUA anunciou em maio de 2018 as seleções para o Programa *Low or No-Emission (Low-No) Bus Competitive Grant*. Através do Programa *Low-No*, operadores de trânsito de vários estados podem receber verbas destinadas à substituição dos ônibus de transporte público antigos por veículos movidos a bateria ou a célula de combustível, e incorpora outras inovações. As doações permitem que as agências adquiram ônibus e instalações de apoio e infraestrutura, como instalações de manutenção e equipamentos de recarga, incluindo novo carregamento "em rota" que prolonga a vida útil da bateria. Os subsídios também podem ser utilizados para formação técnica de suas forças de trabalho (FTA, 2019). Em junho de 2020, o FTA anunciou cerca de US\$ 130 milhões em aporte ao programa, totalizando o montante de US\$ 409 milhões desde que o projeto foi lançado (FTA, 2020).

2.2. Iniciativas públicas no Brasil

O Governo Federal vem atuando através de ações coordenadas ou executadas exclusivamente por entidades públicas, ou através de parcerias público-privadas em prol do desenvolvimento da eletromobilidade no Brasil. Tais ações não têm necessariamente foco na eletromobilidade em veículos pesados, mas promovem o desenvolvimento tecnológico da indústria nacional de eletrificação veicular, os projetos pilotos de integração destes veículos com a rede elétrica, a regulação necessária às atividades comerciais correlatas e o fortalecimento do setor empresarial deste nicho de mercado. Na Tabela 1 pode-se observar exemplos de políticas do governo federal tais como programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL, redes de inovação, parcerias público-privadas, dentre outros que promovem a eletrificação veicular.

Tabela 1 – Políticas Federais para promoção da eletrificação veicular

Nome	Início	Integrantes	Objetivos
Programa de P&D ANEEL (Projetos em Mobilidade Elétrica)	2008	ANEEL e concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica	Promover a cultura da inovação, criando equipamentos e aprimorando a prestação de serviços que contribuam para a segurança do fornecimento de energia elétrica e a modicidade tarifária. Diminuição do impacto ambiental do setor e da dependência tecnológica do país.
Programa de Mobilidade Elétrica Inteligente (Mob-i ONU)	2015	Itaipu Binacional, Aliança Renault-Nissan e CEiiA, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), ONU Mulheres.	Contribuir para a redução da emissão de gases poluentes e promover o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que utilizem recursos renováveis e reduzam emissões de GEE.
Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente (PROMOB-e)	2017	GIZ, MDIC, MME, ANEEL, ABDI e BNDES	O objetivo do projeto é que, em 2020, estejam criados os pré-requisitos para um uso amplo e efetivo de sistemas de propulsão eficientes em energia. Foco estratégico em veículos puramente elétricos a bateria (BEV) e híbridos plug-in (PHEV), bem como em frotas públicas e privadas e serviços de entrega urbana.
Rede de Inovação no Setor Elétrico (RISE) aplicada à Mobilidade Elétrica	2018	ANEEL e GIZ	Estimular pesquisas aplicadas alinhadas com o setor industrial, identificando desafios e oportunidades de desenvolvimento tecnológico e garantindo o equilíbrio entre os agentes e a sociedade.
Resolução Normativa ANEEL nº 819, de 19 de junho de 2018 - atividade de recarga de VEs	2018	ANEEL	Estabelecer os procedimentos e as condições para a realização de atividades de recarga de VEs.
Decreto nº 9.442, de 5 de julho de 2018	2018	MDIC	Alterar as alíquotas do IPI incidente sobre veículos equipados com motores híbridos e elétricos.
ANEEL - chamada de Projeto de P&D Estratégico "Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente".	2019	ANEEL	Desenvolvimento de modelos de negócio que contribuam, de maneira significativa, para a criação de massa crítica e base tecnológica para o desenvolvimento de produtos e serviços nacionais na área de Mobilidade Elétrica Eficiente, e que demonstrem sua viabilidade técnico-econômica em território nacional.

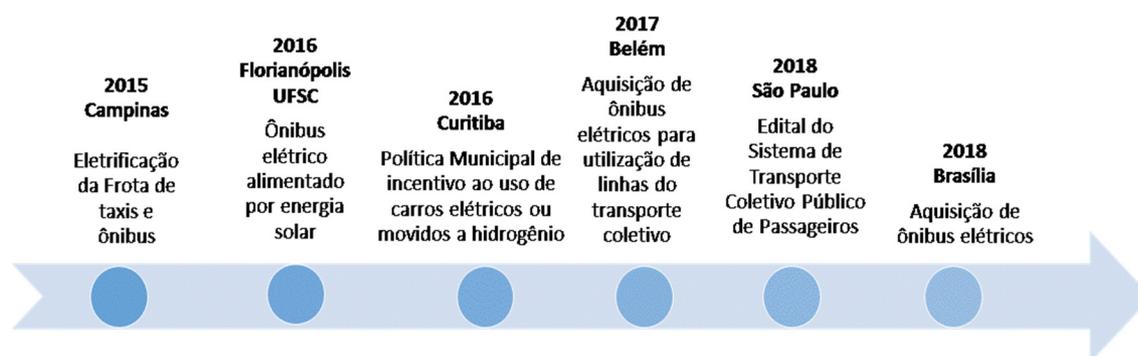
Fonte: Elaboração própria a partir de MDIC (2018^a).

A nível estadual também há exemplos de políticas que promovem a disseminação de veículos de propulsão elétrica. Dentre elas, pode-se citar a isenção ou alíquota diferenciada do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para veículos com motorização elétrica aplicada em vários estados brasileiros¹¹. Os critérios para isenção ou desconto variam em cada cidade, mas costumam estar relacionados ao valor de compra dos veículos. Em São Paulo, por exemplo, permanece a isenção do IPVA para este tipo de veículo, enquanto em São Bernardo do Campo há restituição de 25% (MDIC, 2018^a).

Em alguns governos locais, a adoção de ônibus elétricos tem sido viabilizada através de linhas de financiamento específicas, parcerias com o setor privado e diversas ações que promovam esta tecnologia nos editais de concessão do serviço de operação de transporte por ônibus e elaboração de novos modelos de negócios. Na Figura 1 pode-se observar exemplos de iniciativas municipais para a inserção da tecnologia elétrica em suas frotas de ônibus urbanos ao longo dos últimos anos.

¹¹ Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Sergipe, Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro e Mato Grosso do Sul.

Figura 1 – Iniciativas em prol da eletrificação de ônibus no nível municipal



Fonte: Elaboração própria com base em MDIC (2018^a).

Uma breve descrição de tais iniciativas é apresentada nos itens seguintes, a partir do estudo Sistematização de Iniciativas de Mobilidade Elétrica no Brasil do projeto Sistemas de Propulsão Eficiente (PROMOB-e) da GIZ em curso junto ao Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC) e publicado em novembro de 2018 (MDIC, 2018^a).

Campinas (SP)

Em setembro de 2015 teve início o projeto de Eletrificação da Frota da Cidade de Campinas, com a participação da Prefeitura de Campinas, BYD do Brasil, CPFL Energia, taxistas e empresas de transporte coletivo. O objetivo era testar a eletrificação da frota desta cidade e analisar os custos e benefícios desta tecnologia. O modelo de aquisição dos veículos foi o de *leasing*, em que a diferença do valor entre o veículo elétrico (VE) e o seu semelhante à combustão é financiada em 10 anos e paga com as economias de combustível e manutenção. A viabilização da iniciativa também contou com linhas de crédito, e inclusão de cotas mínimas nas licitações do serviço de transporte coletivo. Até março de 2017, três taxis elétricos (*e-taxis*) e onze ônibus elétricos (*e-buses*) circulavam na cidade.

Florianópolis (SC)

Em março de 2017, entrou em operação o ônibus elétrico alimentado por energia solar. O projeto tem o objetivo de testar o carregamento por geração distribuída fotovoltaica e replicar o modelo em outros lugares. O projeto financiado pelo MTIC contou com a participação da Fotovoltaica UFSC, Eletrabus, Marcopolo, Mercedes-Benz e WEG.

Curitiba (PR)

Através da Lei Municipal nº 14.826, de 25 de abril de 2016, a Câmara Municipal de Curitiba e a Prefeitura de Curitiba estabeleceram o incentivo ao uso de veículos movidos a eletricidade (puros ou híbridos) ou a hidrogênio através da desoneração tributária, vagas preferenciais de estacionamento e instalação de estações de recarga de VEs em locais públicos. No caso de veículos pesados, os benefícios são restritos a valores de nota fiscal inferiores a R\$ 500 mil.

Belém (PA)

Em agosto de 2017, 39 ônibus elétricos produzidos pela BYD *Energy* foram comprados pela Transini (operadora de ônibus deste município) com previsão de serem utilizados em três linhas tradicionais a partir de agosto de 2017. A iniciativa tinha o objetivo de proporcionar uma condição ambiental melhor para a cidade, mas até o momento não há informações disponíveis sobre a operação destes veículos.

São Paulo (SP)

O município de São Paulo promulgou a 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 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.

Brasília (DF)

Em 23 de julho de 2018, teve início a operação comercial do ônibus elétrico a bateria no transporte coletivo de Brasília (DF). O veículo¹⁴ foi adquirido pela Viação Piracicabana (concessionária do DF) e fabricado pela BYD, com carroceria Marcopolo. As baterias são recarregadas na garagem e a autonomia para o tipo de trajeto no DF fica em torno de 300 km (Diário do Transporte, 2018). A aquisição do ônibus ocorreu mediante edital que previa a renovação da frota.

Os exemplos apresentados acima, ilustram o gradativo avanço da aquisição de ônibus elétricos em diversas cidades brasileiras nos últimos anos, apesar de se tratar de um mercado ainda incipiente no país. Dentre as barreiras para maior inserção desta tecnologia nas frotas de ônibus, destaca-se o atual modelo dos processos de licitação e contratos de operadores de serviço de transportes urbano que frequentemente privilegiam o quesito de menor preço para a aquisição destes veículos. A eventual alternativa para contornar essa limitação passa pela consideração dos potenciais custos de operação e manutenção (O&M) inferiores para novas tecnologias. Esta abordagem permite avaliar a viabilidade técnico-econômica da substituição dos ônibus a diesel pelos ônibus elétricos ao considerar as principais variáveis envolvidas no problema, conforme apresentado no item a seguir.

2.3. Principais variáveis envolvidas

Em geral, a natureza das principais variáveis envolvidas na comparação entre as tecnologias de motorização se dividem entre os tipos de custo aplicados em cada alternativa, suas respectivas intensidades (energética) de uso e o nível de atividade aplicado a ambas, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação das principais variáveis envolvidas na análise

Custos Fixos	Custos Variáveis	Distância	Rendimento
Aquisição de veículos Aquisição de carregadores	Óleo diesel Energia elétrica Manutenção	Distância média viajada	Rendimento dos veículos

Fonte: Elaboração própria.

O princípio básico que orienta a avaliação de substituição entre as tecnologias de motorização é o ponto de equilíbrio financeiro, ou seja, o equilíbrio entre os custos fixos e variáveis avaliados de forma comparativa entre as alternativas. Mais especificamente, a viabilidade dos ônibus elétricos requer que a redução de custos variáveis em relação aos ônibus a diesel seja, pelo menos, equivalente ao acréscimo de custo fixo oriundo da aquisição dos veículos elétricos e de sua infraestrutura de recarga. Nota-se que, ao se tornar equivalente, o ponto de equilíbrio reflete uma posição de indiferença na escolha entre as alternativas, de modo que a viabilidade dos modelos elétricos deve, na verdade, superar este ponto e, inclusive, indicar em que medida a substituição é um projeto de investimento financeiramente vantajoso.

Custos fixos

¹² LEI 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 motrizes 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/2Ue7CPy>).

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

¹⁴ O veículo faz a linha 109 Circular- Rodoviária Plano Piloto/Memorial JK/ Rodoviária Plano Piloto/Esplanada dos Ministérios.

Os custos fixos envolvidos nos modelos de ônibus envolvem o custo de aquisição dos veículos e o custo de aquisição dos carregadores para os veículos elétricos. Os preços de aquisição dos ônibus urbanos podem variar em função de características como dimensão do veículo, presença de ar-condicionado e a capacidade de passageiros, por exemplo. Já nos modelos elétricos, a capacidade da bateria, a potência dos carregadores e a duração do processo de recarga também são fatores que podem influenciar no preço final do veículo. Em ambas as alternativas, fatores inerentes à negociação para a aquisição e operação dos veículos podem logicamente ocasionar eventuais reduções no preço unitário dos veículos e refletir custos fixos inferiores.

No geral, verifica-se que até o presente momento, os custos fixos associados aos ônibus elétricos são superiores aos seus equivalentes a diesel. O custo do sistema de baterias nestes veículos é uma das parcelas que mais contribui para os seus preços elevados e, embora as perspectivas da indústria automotiva indiquem trajetórias futuras de redução dos preços, os custos de aquisição são considerados uma barreira à adoção destes veículos.

Custos variáveis

Os custos variáveis envolvidos na utilização dos ônibus compreendem o custo de abastecimento dos veículos, seja eletricidade ou óleo diesel, e o custo de manutenção ao longo do seu período de utilização. O custo dos energéticos pode apresentar grande variabilidade entre operadores de transporte público, pois é oriundo de diferentes componentes de preços atuantes sobre a cadeia produtiva destes insumos, e das relações comerciais celebradas entre fornecedores de combustível ou eletricidade, e operadores de transporte.

O custo de manutenção dos veículos elétricos pode sofrer redução em função da sua menor quantidade de peças, quando comparado ao veículo a diesel. Os sistemas envolvidos na composição dos veículos elétricos são mais enxutos e estão sujeitos a condições de pressão e temperatura menos extremas do que em veículos motorizados via ciclos termodinâmicos.

No entanto, a troca de combustível – óleo diesel por eletricidade -, associada ao rendimento energético superior dos motores elétricos pode apresentar contribuição ainda maior para a redução dos custos variáveis, como se observa no estudo do ICCT (2019). Ou seja, nesses casos, a compensação dos custos fixos superiores das novas tecnologias se dá, em maior medida, pela natureza mais eficiente de sua operação.

Distância média percorrida

A distância média percorrida pelos ônibus é um indicador de quanto se usa de transporte urbano rodoviário coletivo, ou seja, o tamanho médio dos trajetos realizados por estes veículos e a frequência com que eles ocorrem. Dentre as possíveis formas de se estimar a distância média percorrida por ônibus urbanos, uma alternativa é baseá-la no tamanho médio da população dos municípios. Em geral, quanto maior o número de pessoas em um município, maior tende a ser a demanda por deslocamento desta população. Ou seja, a distância média percorrida pode ser assumida como função da demografia local, em certa medida (ANTP, 2018).

A influência desta variável sobre a viabilidade técnico-econômica dos ônibus elétricos frente aos modelos a diesel pode ser bastante relevante. Frequentemente, nota-se que os custos variáveis totais que incidem sobre a operação dos ônibus elétricos apresentam valores inferiores aos custos variáveis incidentes na operação dos ônibus a diesel (ICCT, 2019). Em geral, quanto maior a quilometragem percorrida por esses veículos, maior a economia de custos variáveis gerada e, portanto, mais facilmente pode se dar a compensação dos custos fixos superiores inerentes aos modelos elétricos.

Rendimento dos veículos

O rendimento dos veículos pode ser representado em unidades usuais como quilômetro por litro (km/l) ou variantes equivalentes. Em geral, mantidas todas as outras condições constantes, os modelos elétricos apresentam menor consumo de energia do que os seus modelos equivalentes a diesel (ICCT, 2019). A grande contribuição para tal se deve à eficiência de conversão da eletricidade em força motriz superior à eficiência de conversão do óleo diesel ou outro tipo de combustível que utiliza um ciclo térmico.

No entanto, existem possibilidades de eficientização dos motores a diesel que permitem atingir maiores níveis de rendimento no uso destes veículos. À medida que ganhos de eficiência são alcançados, a substituição pelos elétricos se torna menos vantajosa, e o resultado desta contribuição pode ser verificada pela redução de uma parcela dos custos variáveis associados à operação dos ônibus a diesel. Ressalta-se que o rendimento verificado pelos veículos não se restringe à própria eficiência nominal do motor, mas é fruto de uma série de circunstâncias como o tipo de trajeto percorrido pelos veículos, o nível de congestionamento das cidades, a frequência de manutenção dos equipamentos, a forma de conduzi-lo, dentre outros.

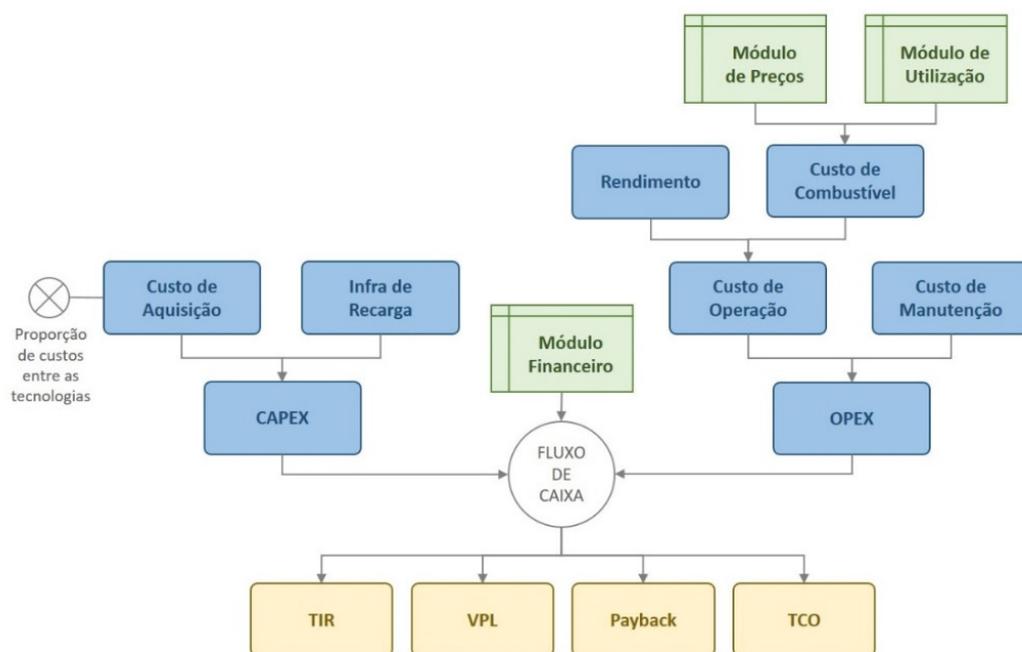
Portanto, no geral, frotas de transporte público urbano rodoviário que apresentam baixo rendimento de combustível dos ônibus são potenciais casos de sucesso para a competitividade dos ônibus elétricos. Por outro lado, operações com ônibus a diesel mais eficientes tendem a dificultar em algum grau a viabilidade da substituição pelos ônibus elétricos.

3. COMO FAZER A AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA?

Como proposta de avaliação técnico-econômica sugere-se a elaboração de uma modelagem *bottom-up* paramétrica, cujos resultados da análise são realizados por meio de indicadores financeiros de projeto, como TIR, *Payback*, VPL¹⁵ e custo total de propriedade ao longo da vida útil. Os parâmetros selecionados para a construção do modelo foram organizados, conforme disposto na Figura 2, com o propósito de representar:

- A estrutura contábil do uso de energia associada ao serviço energético representado pela distância média percorrida no transporte coletivo urbano de passageiros;
- A estimativa de redução de óleo diesel e emissões de poluentes globais (CO_{2-eq}) e locais (CO, MP e NO_x), a partir da quantidade e rendimento energético dos veículos adotados;
- Os preços de óleo diesel por Unidade Federativa (UF); e da eletricidade por distribuidora de energia e com base nas características relativas ao processo de recarga dos ônibus;
- A estrutura de custos de aquisição e operação de cada tecnologia de motorização; e a aferição do custo variável anual baseado no rendimento e custo dos energéticos;
- A proporção entre os custos de aquisição das alternativas tecnológicas envolvidas na análise – os ônibus elétricos e os ônibus a diesel;
- As alternativas de aquisição de energia elétrica, seja pelo mercado A4 de alta tensão, ou pela adoção de modalidade de aluguel de geração distribuída para redução da tarifa;
- A estrutura de financiamento dos ônibus baseada na composição do custo médio ponderado de capital, prazo de financiamento e valor residual de revenda dos ônibus;

Figura 2 – Mapeamento de processo da modelagem



Fonte: Elaboração própria

O procedimento de análise, portanto, pode ser realizado em três etapas. Na primeira etapa, define-se a distância média anual percorrida pelos ônibus e a quantidade de veículos a serem incorporados à

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

frota municipal. Em seguida, são definidos os custos relativos a cada tecnologia, compostos pelas despesas de capital (CAPEX)¹⁶ e pelas despesas operacionais (OPEX)¹⁷.

Na terceira etapa, a partir dos parâmetros informados previamente nas etapas anteriores, são calculados os principais indicadores financeiros do projeto de substituição das tecnologias: taxa interna de retorno (TIR), tempo de retorno do investimento (*payback*), valor presente líquido (VPL) e custo total de propriedade ao longo da vida útil (TCO)¹⁸. Estes indicadores permitem avaliar a viabilidade econômico-financeira da nova tecnologia como projeto de investimento.

Os pontos a seguir ao longo deste capítulo especificam os parâmetros utilizados na modelagem, suas fontes de dados e os valores de referência mais comumente veiculados na literatura técnica sobre o tema.

3.1. Distância média percorrida

A distância anual percorrida ao longo do período da vida operacional do ônibus apresenta impacto significativo na análise da viabilidade. Por um lado, a distância percorrida por dia por veículo impacta no dimensionamento da bateria do ônibus e, portanto, no seu custo, além do peso do veículo, o que afeta a sua eficiência energética. Por outro, quanto maior a distância percorrida por veículo, maior a vantagem econômica da tecnologia de menor custo operacional.

O estudo realizado pela *Bloomberg Finance L.M., Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂*, analisa o impacto da distância diária percorrida na economia dos ônibus elétricos a bateria em comparação com os ônibus a diesel, considerando quatro tipos de ônibus com configurações diferentes de recarga (Figura 3). De acordo com o estudo, em cidades maiores, os ônibus tendem a percorrer maiores distâncias (frequentemente acima de 300 km/dia) e, portanto, os operadores podem optar por baterias de maior porte (350 kWh por exemplo). Em cidades médias ou pequenas, com distâncias de 160 km/dia, ônibus com baterias de menor porte podem ser mais adequados.

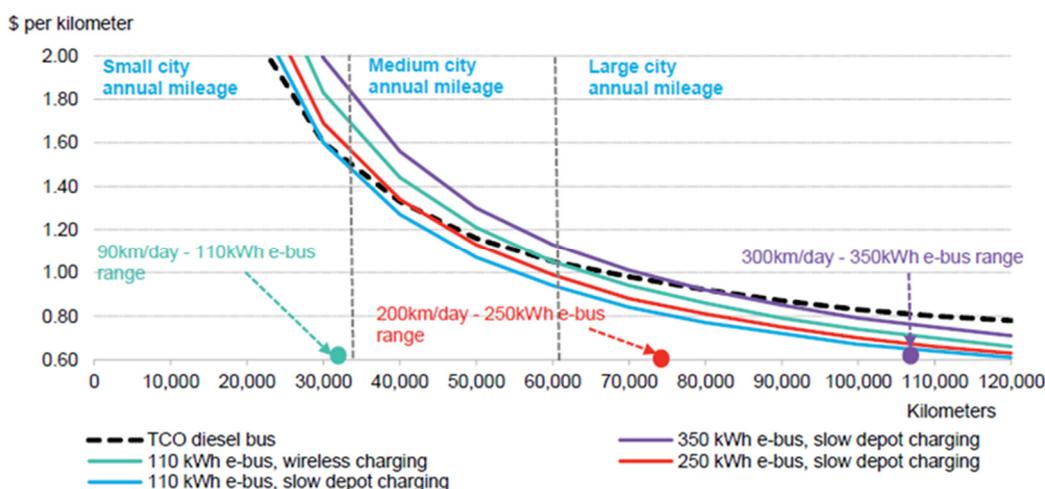
Segundo o estudo, para menores distâncias percorridas, o ônibus a diesel tem um custo total anual inferior ao custo dos ônibus elétricos. Isso é consequência do menor custo de aquisição dos ônibus. Em compensação, para distâncias maiores, os ônibus elétricos tornam-se uma alternativa interessante, conforme Figura 3.

¹⁶ *Capital Expenditure* ou CAPEX, na sigla em inglês.

¹⁷ *Operational Expenditure* ou OPEX, na sigla em inglês.

¹⁸ *Total Cost of Ownership* ou TCO, na sigla em inglês.

Figura 3 – Influência das distâncias médias percorridas no TCO em ônibus elétricos e a diesel



Fonte: BNEF (2018)¹⁹

3.2. Custos de Aquisição (CAPEX)

No cálculo do CAPEX, consideram-se o investimento inicial na aquisição do veículo e o custo da sua infraestrutura de recarga. Ressalta-se que a infraestrutura de abastecimento de veículos a diesel já se encontra em operação, enquanto a implantação dos equipamentos para a recarga elétrica dos veículos requer investimento adicional à sua aquisição.

3.2.1. Custo de aquisição dos veículos

Os preços de aquisição dos ônibus urbanos variam de acordo com algumas características como a dimensão do veículo, a presença ou não de ar-condicionado e a capacidade de transporte de passageiros. No caso dos ônibus elétricos, o seu preço pode variar inclusive com a capacidade de armazenamento da bateria²⁰, ou em função de parâmetros como potência dos carregadores e duração do processo de recarga. Alguns condicionantes não técnicos podem influenciar o preço unitário dos ônibus também, tais como o tamanho do lote de encomendas de veículos e o tipo de contrato celebrado com o operador de transporte. Por exemplo, no caso do *leasing*²¹ da bateria, os custos de manutenção e reparo ficam sob a responsabilidade da montadora e não do operador (BNEF, 2018). O *leasing*, apesar de reduzir o aporte inicial, aumenta os custos ao longo do tempo, podendo ser equiparado a um financiamento da bateria, um dos componentes mais caros do ônibus elétrico.

A comparação técnico-econômica entre ônibus a diesel e elétrico a bateria requer idealmente que os veículos sejam equivalentes ou proporcionem o mesmo desempenho e conforto. No entanto, as características da tecnologia de propulsão elétrica, principalmente no que se refere às questões de autonomia e abastecimento, podem não proporcionar o serviço equivalente à tecnologia a diesel em todos os tipos de rotas do sistema de trânsito.

3.2.2. Custo de aquisição dos carregadores

O tipo de processo de recarga a ser especificado depende em grande parte da capacidade de armazenamento da bateria, das características da rota (distâncias percorridas, topografia etc.), da capacidade de transporte de passageiros e do tamanho da frota de ônibus elétricos em operação (BNEF, 2018).

Há três tipos de carregamento mais comumente praticados por operadores de ônibus elétricos urbanos: recarga tradicional *plug-in*, recarga pantográfica e recarga *wireless* (sem fio). A recarga

¹⁹ Preço do diesel em \$0.66/litro (\$2.5/galão), preço da eletricidade em \$0.10/kWh, quilômetro anual viajado – variável. O tamanho da rota não corresponde sempre ao tamanho da cidade (BNEF, 2018).

²⁰ Avaliada em kWh.

²¹ O *leasing*, ou arrendamento mercantil, é uma operação com características legais próprias, em que o proprietário de um bem o arrenda a um terceiro, que terá a posse e poderá usufruir dele enquanto vigorar o contrato, com a opção de adquiri-lo ou não definitivamente no final (BRASIL, 2017).

tradicional *plug-in* é considerada a mais barata e também a mais comum para o carregamento realizado à noite em garagem, no horário fora de ponta²². Utilizando a recarga lenta (15-22kW), o ônibus pode ser carregado totalmente em até 10 horas, enquanto com a recarga rápida (22-50kW) ou acelerada²³ (50-120kW) a duração pode ser de 2 a 6 horas (BNEF, 2018).

No caso da recarga pantográfica, a conexão entre o ônibus e o carregador geralmente fica localizada nos pontos de parada dos ônibus ao longo do seu trajeto, ou nas estações terminais. A potência superior destes carregadores (150-300kW) permite que a bateria seja recarregada de forma mais rápida do que os carregadores *plug-in* mencionados anteriormente.

A recarga *wireless* utiliza potência superior a 200kW, permitindo que a recarga seja realizada no ponto de ônibus durante o embarque dos passageiros. No entanto, devido ao seu custo superior às outras alternativas, ainda é a menos utilizada (BNEF, 2018).

Os custos de cada tipo de recarga dependem não apenas das características da tecnologia a ser utilizada e da infraestrutura a ser providenciada, mas também dos tipos de contratos celebrados entre o operador da frota de ônibus e o fabricante do equipamento de recarga.

Vale ressaltar que, além do custo de infraestrutura dentro das garagens ou no ponto de ônibus, pode ser necessário o investimento, por parte das distribuidoras de energia, de novas subestações para atender à demanda por energia elétrica. Isso pode ser um problema grave para cidades menores, que frequentemente estão no limite da capacidade de suas subestações.

Ainda é necessário ressaltar que a maior parte desses equipamentos não são produzidos no Brasil, necessitando ser importados. Nesse caso, podem incidir tarifas sobre a importação, além de deixar os operadores submetidos ao risco cambial.

3.3. Custos de Operação e Manutenção (OPEX)

Os custos de operação e de manutenção compõem o OPEX e são ambos avaliados em R\$/km, ou seja, custos tipicamente variáveis que evoluem em função da distância percorrida pelos veículos. O custo operacional é determinado a partir do rendimento²⁴ dos ônibus, avaliado em km/l ou km/kWh; e do preço da energia, seja o óleo diesel (R\$/l) ou a eletricidade (R\$/kWh). A sua contabilização em base anual utiliza como fator a distância anual percorrida (km/ano)²⁵, o que permite resumir os custos variáveis incorridos na operação dos ônibus em R\$/ano.

Caso os custos de operação e manutenção dos ônibus elétricos venham a ser inferiores àqueles dos ônibus a diesel tal fato pode vir a conferir vantagem a esta tecnologia e compensar os seus custos fixos²⁶ geralmente superiores, principalmente quando avaliados pela abordagem do custo total de propriedade no ciclo de vida²⁷. Dentre alguns fatores presentes na possível compensação entre os custos fixos e variáveis dos ônibus elétricos, destaca-se a distância média anual percorrida, uma vez que a diferença entre o OPEX (anual) de ambas as tecnologias evolui proporcionalmente à intensidade²⁸ de uso dos ônibus. Os parâmetros que compõem o custo de operação e manutenção são detalhados a seguir.

²² Horário fora de ponta: Período definido pela distribuidora e aprovado pela ANEEL para toda sua área de concessão, considerando a curva de carga de seu sistema elétrico e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e feriados definidos por lei federal (ANEEL, 2019).

²³ Os termos “rápido” ou “acelerado” foram assumidos como tradução para os termos originais “fast” e “rapid”.

²⁴ Rendimento dos ônibus refere-se ao coeficiente de eficiência energética de um equipamento avaliado sob alguma condição de operação, o que em geral representa o seu consumo de combustível por distância percorrida, avaliado em km/l ou km/kWh a depender do tipo de motorização do veículo.

²⁵ Para maiores detalhes, ver 2.3

²⁶ Custos fixos referem-se precisamente aos custos de aquisição envolvidos na compra dos veículos e de equipamentos necessários à sua recarga, no caso dos veículos elétricos.

²⁷ Maiores informações sobre este tipo de análise presente no item 3.5 deste documento.

²⁸ Intensidade de uso dos ônibus refere-se à quilometragem percorrida por esses veículos, ou seja, o grau de intensidade ao qual são submetidos, avaliados nesta análise em km/ano.

3.3.1. Rendimento

O rendimento do ônibus pode variar significativamente em função de suas características (tamanho, peso, uso de ar-condicionado), de características da rota a ser percorrida (condições de tráfego, topografia) e do modo como é conduzido pelo motorista.

3.3.2. Custo do óleo diesel

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) disponibiliza as séries históricas do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis em abrangência nacional, regional, estadual e municipal.

Segundo a ANP, há vários tipos de óleo diesel disponíveis no mercado nacional em função de suas diferentes aplicações. O óleo diesel S10 e S500 são aqueles de uso rodoviário para veículos automotivos, máquinas agrícolas, máquinas de construção e máquinas industriais. A Resolução ANP nº 50/2013 estabelece que o óleo diesel S10 é de comercialização obrigatória nos postos revendedores das regiões metropolitanas de Belém, Fortaleza e Recife. Além deles, as frotas cativas de ônibus urbanos municipais de algumas localidades²⁹ devem utilizar exclusivamente este combustível³⁰. Essa evolução da qualidade do diesel, incluindo a redução do teor de enxofre no diesel, é consequência das políticas ambientais adotadas pelo Conama e o Proconve, conforme especificado no capítulo 1.

A ANP disponibiliza também, por meio do Sistema de Levantamento de Preços (SLP), a síntese dos preços praticados no Brasil por Unidade Federativa (UF) em base mensal e semanal por tipo de combustível. No entanto, é necessário considerar que o preço do diesel comercializado pelas concessionárias de transporte público rodoviário municipal tende a se aproximar mais do preço das distribuidoras do que do preço ao consumidor final. Operadores de grandes frotas compram volumes maiores, recebendo um desconto no valor pago.

Ressalta-se que o preço final do diesel ao consumidor final é composto pelo preço de realização do refino, pela margem de distribuição, pela margem de revenda, e por tributos federais e estaduais (EPE, 2020^b). Uma parcela considerável do preço do diesel é devido ao Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). A alíquota do ICMS é determinada por cada Unidade Federativa, influenciando de forma significativa o preço pago por concessionárias de ônibus, podendo influenciar as tarifas pagas pelos usuários do serviço de transporte público, mas também a viabilidade econômica de fontes energéticas alternativas.

3.3.3. Custo da energia elétrica

Algumas possibilidades podem ser aplicadas ao suprimento de energia elétrica dos operadores de transporte público, em função das suas particularidades de consumo de eletricidade, o que depende da configuração da operação da frota de ônibus. Dentre as alternativas viáveis, os empreendedores podem recorrer aos mercados do Ambiente de Comercialização Livre (ACL), Ambiente de Comercialização Regulado (ACR) ou a projetos de geração distribuída (GD).

Ambiente de Contratação Livre (ACL)

Segundo a portaria nº 514/2018 do Ministério de Minas e Energia (MME), publicada no dia 28 de dezembro de 2018 no Diário Oficial da União, as exigências para a operacionalização no Mercado Livre de Energia foram reduzidas. Os consumidores com demanda superior a 2,5 MW poderão optar pela compra de energia elétrica convencional como consumidores livres, sendo que há redução já prevista deste patamar para 2 MW no ano de 2020 (BRASIL, 2018).

²⁹ As listas de municípios onde a comercialização de óleo diesel S10 é obrigatória, bem como onde as frotas cativas de ônibus urbanos devem utilizar exclusivamente o óleo diesel B S10, podem ser encontradas em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivados/155-combustiveis/1857-oleo-diesel>.

³⁰ Segundo ANP (2019a): O teor de enxofre é adotado e reconhecido mundialmente como indicador do tipo de óleo diesel e da boa qualidade do produto (quanto menor o teor de enxofre, melhor). A regulamentação da ANP vem incentivando ao longo dos anos a gradativa diminuição do teor de enxofre do óleo diesel em uso no país. Atualmente, para uso rodoviário, estão vigentes o diesel S10 e o diesel S500 - que recebe adição obrigatória de corante vermelho, para diferenciá-lo da versão menos poluente. O diesel S1800 só pode ser utilizado em atividades não rodoviárias, como mineração, ferrovias e termoelétricas.

Tabela 3 – Classificação de consumidores no Mercado Livre de Energia

Tipo de Consumidor	Potência	Observações
Especial	de 0,5 MW a 2,5 MW	NA
Livre	$\geq 2,5$ MW	A partir de Julho/2019
Livre	$\geq 2,0$ MW	A partir de Janeiro 2020

Fonte: Adaptado de BRASIL (2018).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) define o consumidor especial como aquele cuja demanda encontra-se na faixa entre 500 kW e 2,5 MW, e possui direito de adquirir energia de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) ou de fontes incentivadas especiais, tais como eólica, biomassa ou solar (CCEE, 2019).

Ambiente de Contratação Regulada (ACR)

Segundo ANEEL (2016), as modalidades tarifárias são um conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativas, considerando as seguintes modalidades:

- Azul: aplicada às unidades consumidoras do grupo A³¹, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia;
- Verde: modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência;
- Convencional Binômia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia. Esta modalidade será extinta a partir da revisão tarifária da distribuidora;
- Convencional Monômia: aplicada às unidades consumidoras do grupo B³², caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia; e
- Branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia.

Enquadramento tarifário

O custo da energia elétrica, avaliado em R\$/kWh, depende da distribuidora e do nível de tensão, o qual assume-se que será enquadrado no subgrupo A4³³, menor faixa do grupo de alta tensão, variando entre 2,3 kV e 25kV. A Figura 4 identifica os valores absolutos das tarifas de eletricidade e sua decomposição entre os fatores Impostos, Tarifa horária fora de ponta, parcela de energia e de demanda

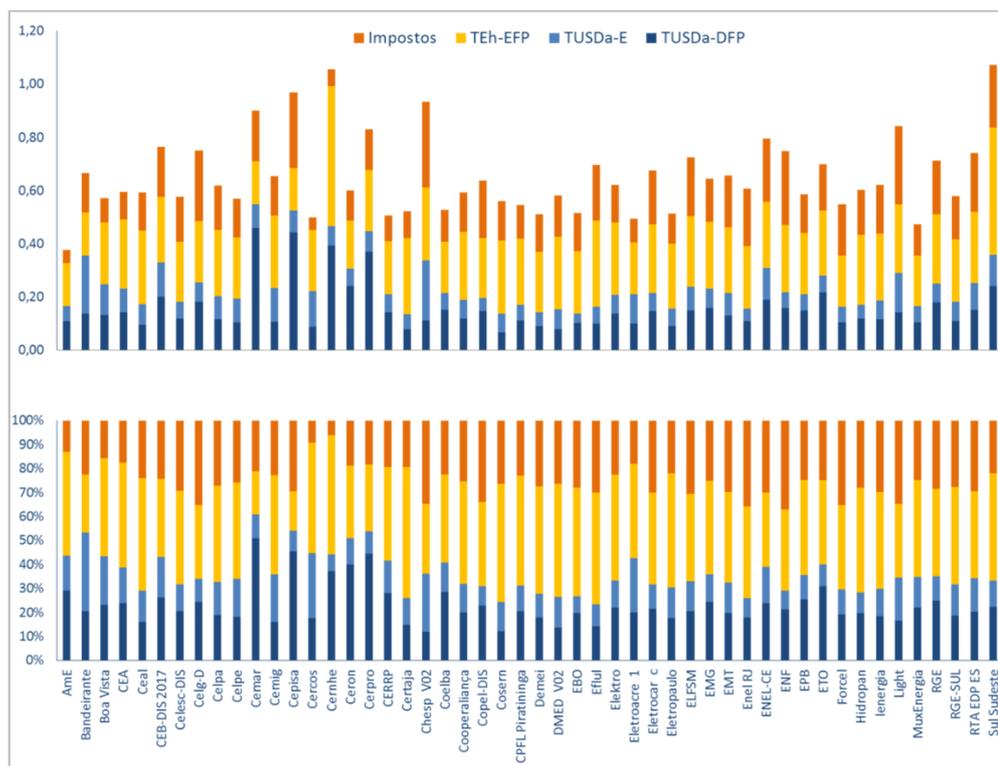
³¹ Grupo A: Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; b) subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV; c) subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69 kV; d) subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV; e) subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; e f) subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição (Resolução Normativa da ANEEL n. 414, de 9 de setembro de 2010 (Diário Oficial de 15 de set. 2010, seção 1, p. 115).

³² Grupo B: Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo B1 - residencial; b) subgrupo B2 - rural; c) subgrupo B3 - demais classes; e d) subgrupo B4 - iluminação pública (Resolução Normativa da ANEEL n. 414, de 9 de setembro de 2010 (Diário Oficial de 15 de set. 2010, seção 1, p. 115).

³³ A sugestão deste tipo de enquadramento é uma premissa geral que pode ser aplicada em função do nível de tensão presente em um conjunto de carregadores típicos para ônibus elétricos. No entanto, eventuais configurações distintas quanto ao uso ou instalação dos carregadores podem eventualmente se enquadrar em outros grupos/subgrupos tarifários.

fora de ponta da TUSD³⁴ para 55 das 99 distribuidoras³⁵ de energia presentes nos Relatórios SAS da Aneel no subgrupo A4.

Figura 4 – Exercício de decomposição da tarifa das principais distribuidoras do subgrupo A4



Fonte: Elaboração própria com base em dados de ANEEL (2019^b).

Geração Distribuída

Segundo o estudo estratégico *Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída – 2º Semestre de 2018* da consultoria Greener, o desconto médio aplicado ao mercado de média tensão (MT), avaliado segundo pesquisa com empresas que praticam o modelo de Locação de Sistemas ou Mini Usinas³⁶, foi de 8,5% (média aritmética) e 10,2% (média ponderada). A seguir, a Tabela 4 identifica os percentuais de empresas e os seus respectivos descontos médios aplicados na modalidade de locação.

Tabela 4 – Percentual de desconto concedido sobre a tarifa de energia na média tensão (%)³⁷

Percentual das empresas por valor de desconto médio (%)	Desconto (%)
14,3	0
14,3	1
14,3	5
14,3	10
14,3	15
28,6	20

Fonte: GREENER (2018)

³⁴ TUSD: Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

³⁵ Muito embora sejam relacionadas 55 das 99 distribuidoras, o total de energia transacionado por essas distribuidoras representa mais de 80% do volume de energia faturado no subgrupo A4.

³⁶ Modelo que atua sob a modalidade de consórcio, cooperativa ou autoconsumo remoto (Greener, 2018).

³⁷ Segundo nota de Greener (2018), as empresas que não trabalham neste modelo representam 0% de desconto.

A locação de geração distribuída pode constituir uma alternativa para a adoção de tarifas de energia inferiores ao mercado regulado ACR, o que por simplificação é assumido em 10% como fator redutor. As principais premissas adotadas para a adoção deste valor são as seguintes:

- A média ponderada dos descontos foi baseada nos dados da Tabela 4 e avaliada em 10,2%, e o seu valor foi assumido em 10% de forma simplificada;
- O mercado de Média Tensão explicitado em Greener (2018) inclui a faixa de tensão do mercado de Alta Tensão (AT) A4, o que permite associar tal desconto médio;
- Considerou-se que o desconto médio de 10% pode ser aplicado às tarifas das principais distribuidoras de energia elétrica atuantes no mercado de Alta Tensão A4;

Dentre as possibilidades previstas na regulação da ANEEL para o uso da geração distribuída no Brasil, considerou-se que a modalidade de locação permite reduzir barreiras e incertezas para o empreendedor de transporte público municipal, visto que sua atividade principal reside no setor de transporte e não em geração distribuída ou setor elétrico.

Adicionalmente, cogitou-se embasar a análise na eventual possibilidade de o empreendedor construir a infraestrutura de geração distribuída na própria garagem de ônibus, ou em sítio dentro da mesma área de concessão da distribuidora de energia elétrica, a fim de se beneficiar da modalidade *net-metering*, formalmente conhecida no Brasil como “sistema de compensação de energia elétrica”, prevista na Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012³⁸.

Todavia, assumiu-se que a responsabilidade de implementação de tais projetos pode constituir barreiras adicionais para os empreendedores adotarem novas tecnologias nas frotas de ônibus, em função de assimetrias de informação ou desconhecimento de características do segmento de infraestrutura de geração de energia elétrica distribuída. Devido a tais motivos considerados, a presença de GD como eventual alternativa de abastecimento dos ônibus elétricos restringiu-se à locação, ou popularmente denominada “Aluguel de GD”.

3.3.4. Custo de Manutenção

O custo de manutenção inclui a manutenção regular do veículo, pneus, partes, lubrificantes, dentre outros itens. Os veículos elétricos oferecem uma oportunidade de redução de custos de manutenção em virtude da natureza do motor, o qual é composto por um menor número de componentes do que um equivalente à combustão interna. Além disso, tanto as tecnologias de veículos híbridos elétricos e elétricos a bateria incluem sistemas de frenagem regenerativa, que reduzem o desgaste dos freios e, portanto, os seus custos de reparo (MDIC, 2018^b).

3.4. Definição do fluxo de caixa

O fluxo de caixa do projeto em estudo pode ser decomposto em saídas de caixa (custo de aquisição do ônibus e da infraestrutura de recarga, custo de operação e manutenção, e custo do financiamento) e entradas de caixa (valor residual de revenda do ônibus). O custo de operação e manutenção (O&M) é calculado conforme apresentado no item 3.3.4 e considerado constante ao longo de todo o período.

Considera-se que o empreendedor procederá à aquisição do ônibus através de um aporte à vista e o restante será financiado através de um Sistema de Amortização Constante (SAC). O sistema SAC consiste no pagamento de um empréstimo por meio de um conjunto de prestações em que as amortizações do saldo devedor são constantes ao longo de todo o contrato (CEF, 2019).

As parcelas do financiamento serão então compostas pelo valor constante da amortização anual somado de uma despesa financeira ao longo do ciclo de avaliação do projeto, arbitrado em 10 anos neste projeto.

³⁸ Sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa; (Redação dada pela REN ANEEL 687, de 24.11.2015.) O benefício principal do consumidor ao aderir ao sistema de compensação de energia seria usufruir de um custo de energia elétrica mais barato do que a da concessionária. Maiores detalhes em ANEEL (2012).

Percentual financiado

O desembolso inicial para a aquisição do ônibus ou da infraestrutura de recarga por parte do empreendedor³⁹ é o valor de entrada no fluxo de caixa, o valor remanescente, após esse desembolso inicial, é o percentual do projeto que é financiado por um agente financeiro. O item *Custo Médio Ponderado de Capital* (CMPC) aborda com maiores detalhes a composição de capital aplicada aos projetos de investimento. É necessário considerar que, caso a bateria seja adquirida por *leasing*, o desembolso inicial é nulo, no entanto o valor da bateria tem que ser considerado como um financiamento. E é preciso ponderar que o custo desse financiamento deve ser maior que o valor que seria pago por um empréstimo tomado com um organismo oficial, ou mesmo do que o CMPC.

Vida útil do ônibus

Ao final da vida útil do ônibus no projeto, o mesmo ainda pode ser revendido para outros mercados por um valor residual⁴⁰. O valor residual de revenda pode ser definido através de uma taxa de depreciação⁴¹ anual ou através da determinação de um valor que é um percentual do valor inicial do investimento, neste último caso há uma taxa de depreciação implícita e inerente à perda de valor do ativo ao longo do seu período de utilização.

Valor residual de revenda

O valor residual da revenda é então contabilizado como um fluxo de caixa positivo. No caso dos ônibus a diesel, após seu período de uso nas grandes cidades, é comum que ocorra a revenda pelo valor residual para mercados secundários. Este período é variável, e depende do contrato de concessão. Normalmente, estes contratos preveem idades máximas por ônibus ou, então, idades médias de frotas. Em estatística disponível no anuário da Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), a idade média dos ônibus urbanos a óleo diesel nas principais capitais brasileiras foi 4,9 anos entre os anos 1996 e 2017. Os valores variaram entre o mínimo de 3,9 anos em abril de 1997 e o máximo de 5,7 anos em outubro de 2002 (NTU, 2018).

Por simplificação, considerou-se neste estudo a vida útil dos ônibus a diesel em cidades grandes em cinco anos, o que facilita a comparação com os ônibus elétricos. No caso do ônibus a diesel, há dois ciclos de financiamento ao longo dos 10 anos de avaliação. No quinto ano do fluxo de caixa, substitui-se o veículo adquirido por um novo, o que é representado por uma saída de caixa no valor da aquisição, e por uma entrada de caixa referente ao valor da revenda. No décimo ano, há uma nova revenda, porém sem a compra de um novo veículo.

Estima-se que a vida útil de ônibus elétricos deva ser superior à vida útil dos com motorização a diesel. Isso é principalmente devido à menor presença de partes móveis. De acordo com o MDIC (2018^b), os veículos elétricos podem ter sua vida útil alongada por justificativa técnica, associada a maior durabilidade de veículos à tração elétrica. Além das questões técnicas, o alongamento da vida dos ônibus elétricos possibilita a ampliação da amortização do investimento inicial, o que melhora o fluxo de caixa, em especial devido ao maior custo fixo inicial dessa nova tecnologia.

Ao final da sua vida útil, considera-se que o ônibus elétrico é revendido por um valor residual (entrada positiva no fluxo de caixa). No caso da tecnologia elétrica, há maiores incertezas em relação ao valor residual do ônibus e às condições de revenda. Isso porque, a vida útil da bateria elétrica, sua performance operacional e as opções de descarte ainda não são plenamente conhecidas. Dentre as opções atualmente aplicadas para lidar com estes riscos, está o contrato de *leasing* de baterias ou a garantia estendida pelo fabricante. Assim, é possível transferir o risco do operador de ônibus para o

³⁹ Grupo concessionário ou permissionário de transporte público;

⁴⁰ Valor residual é um termo usado para definir o valor de um ativo que sofre depreciação (CFC, 2005).

⁴¹ No estudo do ICCT, utiliza-se a taxa de depreciação anual de 8% e casos de sensibilidade onde esta taxa chega a 15% ao ano, sendo o valor de revenda omitido do cálculo do custo total do ciclo de vida, ou seja, o valor da revenda é considerado zero (MDIC, 2018^b).

fabricante do ônibus ou da bateria (BNEF, 2018). No entanto, o contrato de *leasing* onera o custo de financiamento do projeto, reduzindo o dispêndio inicial, porém aumentando o dispêndio contínuo ao longo da vida útil. Utilizando como ilustração o caso da prefeitura de São Paulo, o Edital de Concorrência nº 001/2015-SMT_GAB explicita no artigo 3.35 que é vedada a prestação dos serviços com veículo ano/modelo cujo chassi seja superior a 10 anos. Além disso, a frota para prestação dos serviços deverá ter idade média de, no máximo, 5 anos. A frota com tração elétrica constitui uma exceção, já que sua idade máxima será de 15 anos e a ela não se aplica as regras referentes à idade média da frota (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2015).

Cabe observar que na análise do Custo Total de Propriedade feita pelo ICCT em MDIC (2018^b) considerou-se como base de comparação das tecnologias a vida útil de 10 anos, incluindo casos de sensibilidade para 12 e 15 anos para tecnologia elétrica à bateria. A vida útil de 10 anos coincide com o período de garantia da bateria ou de garantias estendidas praticadas por alguns fabricantes de ônibus elétricos (MDIC, 2018^b).

Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC)

Para determinar o custo para aquisição dos ônibus, utiliza-se a metodologia de cálculo do custo médio ponderado de capital (CMPC, ou WACC, na sigla em inglês). A composição da estrutura do custo de capital revela o quanto custa para a empresa financiar suas atividades, usando como recursos o capital próprio e o capital de terceiros. A taxa WACC é comumente utilizada para determinar o valor presente de fluxos de caixa futuros de uma empresa ou de um negócio específico.

Se a empresa tem um montante de capital próprio e de terceiros iguais a E e D, respectivamente, define-se o custo Médio Ponderado de Capital, ou em inglês, *Weighted Average Cost of Capital* (WACC) como:

$$WACC = r_e \left(\frac{E}{D + E} \right) + r_d \left(\frac{D}{D + E} \right) (1 - T)$$

Sendo:

r_e o custo de capital próprio;

r_d o custo de capital de terceiros;

E o montante de capital próprio (sócios) que financia a empresa;

D o montante de dívida (credores) que financia a empresa;

T a alíquota de impostos e contribuições sobre o lucro tributável da empresa.

Para o cálculo do WACC é necessário determinar a estrutura de capital, ou seja, as participações de capital próprio e de capital de terceiros no capital total investido por uma empresa. De um modo geral, a estrutura ótima de capital é definida como aquela estrutura que, dado o grau de risco envolvido no negócio e a existência de proteções fiscais para pagamentos de juros incidentes sobre dívida, apresenta participações de capital (próprio e de terceiros) que conduzem ao mínimo custo de capital, representando, assim, uma alocação de capital eficiente.

O custo de capital de terceiros (r_d) é a taxa de juros efetiva dos financiamentos da empresa, descontados os benefícios tributários do empréstimo (dedução da base de cálculo do Imposto de Renda e da Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido). No caso específico do financiamento de aquisição de ônibus no Brasil pode-se citar as seguintes linhas de financiamento e custo de capital:

- a) BNDES Finame - BK Aquisição e Comercialização: Financiamento para aquisição e comercialização de máquinas, equipamentos, sistemas industriais, bens de informática e automação, ônibus, caminhões e aeronaves executivas. Nas operações indiretas, a Taxa de juros é composta pelo Custo Financeiro, pela Taxa do BNDES e pela Taxa do Agente Financeiro. A Taxa de Longo Prazo (TLP), desde 1º de janeiro de 2018, é o principal custo financeiro dos financiamentos do BNDES (BNDES, 2019).

A TLP projetada para contratos assinados em março de 2019 e com base na expectativa de inflação acumulada para os próximos 12 meses, disponibilizada no Sistema Gerador de Séries do BCB, do dia da divulgação da taxa “pré” da TLP, é de 6,92% ao ano (BNDES, 2019).

A taxa do BNDES considerando o apoio à aquisição de ônibus e caminhões para grandes empresas é 2,25% ao ano. A taxa do agente financeiro é negociada entre a instituição e o cliente. O Financiamento do BNDES considera prazo de 10 anos, com carência de até 2 anos. Essa taxa do BNDES, apesar de acompanhar a taxa de juros referencial, é em média muito inferior às taxas de empréstimo de mercado.

- b) Fundo Clima - Subprograma Mobilidade Urbana: Fundo do BNDES constituído com objetivo de apoiar projetos que contribuam para reduzir a emissão de GEE e de poluentes locais no transporte coletivo urbano de passageiros e para a melhoria da mobilidade urbana localizados nas regiões metropolitanas. Dentre os tipos de empreendimentos que podem ser financiados, está: capacidade produtiva para a fabricação de ônibus elétricos, híbridos ou outros modelos com tração elétrica e material rodante para transporte urbano de passageiros sobre trilhos. A taxa de juros do Fundo Clima é composta do custo financeiro (3,0% ano), da taxa do BNDES⁴² (0,9% ou 1,4% ao ano) e taxa do agente financeiro (até 3,0% ao ano). Ressalta-se, no entanto, que este programa não está mais recebendo pedidos, pois seu prazo de vigência está expirado (BNDES, 2019).
- c) Refrota: É uma linha de crédito da Caixa Econômica Federal (CEF), que opera com recursos do FGTS e se destina a financiar a renovação ou ampliação das frotas de ônibus para empresas que detêm concessão ou permissão de serviços de transporte urbano. Com um total de recursos de R\$ 3 bilhões, o programa aplica taxas a partir de 9% a.a. acrescida da taxa referencial. Veículos Financiados: Micro-ônibus, Miniônibus, Midiônibus, Ônibus Básico, Ônibus Padron, Ônibus Articulado, Ônibus Biarticulado.

O custo de capital próprio da empresa (r_e) é a rentabilidade (em termos percentuais) que ela abre mão ao reinvestir seus recursos. A forma mais comum para o cálculo do custo de capital próprio é através do modelo CAPM (sigla em inglês para *Capital Asset Pricing Model*), amplamente empregado no cálculo do retorno esperado sobre ações de empresas negociadas em bolsa de valores. Apesar de desenvolvido com este intuito, o modelo também é utilizado para empresas de capital fechado. Para isso, buscam-se empresas de capital aberto similares à empresa analisada, e utilizam-se informações dessas empresas nos cálculos.

Por fim, o valor da alíquota de impostos e contribuições sobre o lucro tributável da empresa (T) usual para o Brasil é de 0,34 baseada na soma das alíquotas de CSLL⁴³ e IRPJ⁴⁴, uma vez que o custo da dívida pode ser considerado como custo ou despesa operacional para efeito de aferição da base de incidência do imposto de renda (MF, 2018).

⁴² Beneficiários com Receita Operacional Bruta de até R\$ 90 milhões: 0,9% ao ano; Beneficiários com Receita Operacional Bruta acima de R\$ 90 milhões: 1,4% ao ano.

⁴³ Contribuição Social sobre o Lucro Líquido. A alíquota da CSLL é de 9% (nove por cento) para as pessoas jurídicas em geral, e de 15% (quinze por cento), no caso das pessoas jurídicas consideradas instituições financeiras, de seguros privados e de capitalização.

⁴⁴ Imposto de Renda sobre Pessoa Jurídica. A alíquota do IRPJ é de 15% (quinze por cento) sobre o lucro apurado, com adicional de 10% sobre a parcela do lucro que exceder R\$ 20.000,00 / mês.

3.5. Indicadores financeiros de projeto

Como as decisões de investimento impactam o desempenho futuro das empresas, e como consequência, criam e/ou destroem valor, este estudo utiliza métricas de avaliação econômico-financeira de projetos de investimento para verificar a viabilidade do projeto de substituição dos ônibus a diesel por elétricos a bateria, são elas: VPL (Valor presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno), estimativa de *payback* (tempo de retorno do investimento) e TCO (*Total Cost of Ownership*, ou Custo Total de Propriedade na tradução para o português).

Taxa Interna de Retorno (TIR)

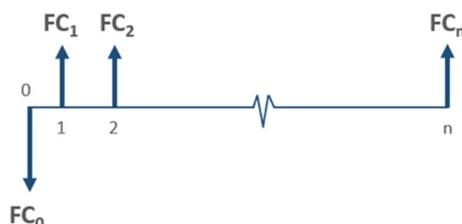
É a taxa de atratividade que torna a soma dos fluxos de caixa a valor presente igual a zero. Assim, quando a taxa de atratividade e a taxa interna de retorno forem iguais, a soma de todos os valores dos fluxos de caixa, no instante zero, será igual a zero, ou melhor, o VPL será zero. A TIR é uma métrica intrínseca ao projeto e não depende de mais nada, a não ser dos fluxos de caixa do projeto (LUCHESES, 2011).

Com base na regra da TIR, um investimento é aceito se a TIR for maior do que o retorno exigido, no caso o custo de capital próprio. Ou seja, aceitar o projeto se a TIR for superior ao custo de capital próprio e rejeitar caso a TIR seja inferior à mesma taxa.

Valor presente líquido (VPL)

O VPL é utilizado em finanças para planejamento de investimentos a longo prazo. O VPL é o somatório de todos os valores dos fluxos de caixa projetados no instante "0". Ou seja, se faz necessário trazer todos os valores dos fluxos de caixa até o instante "0", utilizando-se de uma determinada taxa de atratividade frente ao risco. À soma de todos os valores dos fluxos de caixa no mesmo instante de tempo, denomina-se de valor presente líquido (LUCHESES, 2011).

Figura 5 – Fluxo de Caixa Convencional



Fonte: Elaboração própria

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+k)^j}$$

Sendo:

VPL o Valor presente líquido;

FC_j o Fluxo Líquido de Caixa no instante j;

K a Taxa de desconto aplicável aos fluxos de caixa no período j;

N o número de períodos.

O VPL do projeto é o VPL incremental, ou seja, consiste na subtração do fluxo de caixa do financiamento do ônibus a diesel pelo fluxo de caixa do financiamento do ônibus elétrico trazido a valor presente pelo valor de custo médio ponderado de capital.

Usando o método VPL o projeto deve ser empreendido se o valor presente de todas as entradas de caixa menos o valor presente de todas as saídas de caixa (que iguala o valor presente líquido) for maior que zero. Se o VPL for igual a zero, o investimento é indiferente, pois o valor presente das entradas é igual ao valor presente das saídas de caixa; se o VPL for menor do que zero, significa que o investimento não é

economicamente atrativo, já que o valor presente das entradas de caixa é menor do que o valor presente das saídas de caixa (ROSS, 2002).

Estimativa de Payback (descontado)

O *payback* simples é obtido calculando-se o número de anos que decorrerão até os fluxos de caixa estimáveis igualem o montante do investimento inicial (BREALEY, 2008). Porém, por se tratar de um indicador frágil, adotou-se uma estimativa baseada em conceito semelhante⁴⁵.

No *payback* descontado (período de recuperação com desconto), os fluxos de caixa estimáveis são descontados antes do cálculo do período de recuperação. A favor destes critérios reside o fato de sua simplicidade de aplicação, porém, desconsideram os fluxos de caixa que ocorrem após o período-limite (BREALEY, 2008). Segundo ROSS (2002), o *payback* descontado tem as mesmas deficiências básicas do método do *payback* simples tradicional: exige em primeiro lugar a escolha arbitrária de um período de corte na análise, e depois ignora todos os fluxos de caixa que ocorrem a partir desta data. Embora o *payback* descontado pareça-se em algum grau com o VPL, trata-se apenas de uma combinação pobre entre o critério do *payback* e o VPL.

No entanto, o *payback* apresenta alguns problemas apontados por ROSS (2002) que podem ser limitantes. Visando contornar tais limitações a fim de fornecer um indicador de natureza semelhante, algumas adaptações foram realizadas para elaborar uma estimativa de *payback* descontado, as quais são descritas no Anexo II deste estudo.

Custo Total de Propriedade (Total Cost of Ownership - TCO)

O Custo Total de Propriedade ou TCO é definido como a soma dos custos para adquirir, operar e manter o veículo e sua infraestrutura de abastecimento durante determinado período. De acordo com a avaliação do ICCT realizada em MDCI (2018^b), a utilização do preço de aquisição do veículo como única métrica de avaliação desfavorece alternativas cujos preços de aquisição são superiores, tais como tecnologias híbridas ou elétrica a bateria, por exemplo.

A Agência Internacional de Energia em sua publicação *Global EV Outlook 2018* utiliza a metodologia do custo total de propriedade ou *Total Cost of Ownership* (TCO, na sigla em inglês) para indicar que os ônibus elétricos com pacote de bateria a um preço inferior a USD 260/kWh, utilizando recarga noturna e percorrendo em média 45.000 km/ano⁴⁶ são competitivos em regiões onde os níveis de taxaço de diesel são comparáveis aos da Europa (IEA, 2018).

No estudo da *Bloomberg Finance: Electric Buses in Cities*, a análise do TCO é utilizada para comparar as tecnologias de ônibus a diesel, gás natural e elétrico a bateria. De acordo com as hipóteses utilizadas, constatou-se que na maior parte das configurações de casos reais analisados, a tecnologia elétrica já oferece menor custo de propriedade do que as demais citadas, principalmente nos casos de longas distâncias (BNEF, 2018). Ressalta-se ainda que a redução prevista do custo das baterias deverá favorecer ainda mais a competitividade dos ônibus elétricos nos próximos anos.

A desvantagem do TCO é não considerar os valores dos fluxos no tempo. Essa métrica trata fluxos futuros e presentes com o mesmo peso, o que não ocorre na prática quando da tomada de decisão de um projeto. Ou seja, ao considerar apenas o TCO para determinar a viabilidade de um projeto, tomar um empréstimo não é vantajoso, já que os juros farão com que o TCO aumente. No entanto, se os juros forem menores do que o CMPC, o VPL aumentará se a empresa conseguir tomar um empréstimo e adiar dispêndios grandes de caixa. Para a análise a seguir, todos esses indicadores serão analisados, entretanto, o VPL incremental é o mais indicado para avaliação de projetos de acordo com a literatura financeira.

⁴⁵ Os principais problemas observados no método do *payback*, segundo ROSS (2002) podem ser observados no anexo deste estudo.

⁴⁶ Correspondendo a 9 horas de uso todo dia da semana com velocidade média de 19km/h (IEA, 2018).

4. APLICAÇÃO DE ESTUDO DE CASO

Para a elaboração dos estudos de caso, baseada na aplicação da proposta de metodologia de avaliação técnico-econômica apresentada no capítulo anterior, foi necessária a realização de três etapas: (i) Elaboração de diferentes cenários; (ii) Escolha dos parâmetros por meio do mapeamento de diversas fontes de dados; (iii) Análise de sensibilidade de variáveis relevantes.

4.1. Elaboração de cenários

A viabilidade econômico-financeira dos ônibus elétricos é influenciada pelo conjunto de fatores que iniciam na conjuntura e segue em função de um futuro incerto. Esta seção descreve três cenários que serão as bases para analisar o estudo de caso.

Cenário “Inércia”: A demanda de petróleo continua em elevação devido ao aumento da demanda energética de países emergentes, e seu preço retorna a patamares acima de US\$ 70 por barril, a opinião pública se mobiliza para as questões ambientais somente no longo prazo. Neste cenário, as tecnologias alternativas como ônibus híbridos e elétricos não têm incentivos governamentais e poucos investimentos são realizados pelas montadoras. No curto prazo, a falta de escala contribui para elevados custos de aquisição dos ônibus elétricos e de sua infraestrutura. Com o passar dos anos, estes veículos começam a participar de forma mais significativa no transporte coletivo das cidades. No longo prazo, a demanda mundial por petróleo continuará a crescer, mas a taxas cada vez menores, as tecnologias alternativas começam a se tornarem competitivas, sendo capazes de deslocar parte da demanda de combustíveis fósseis.

Cenário “Fossilizado”: A demanda crescente por petróleo exige a ampliação da exploração de recursos petrolíferos não convencionais, com incremento dos custos exploratórios e, conseqüentemente, aumento do preço do petróleo. No médio prazo, o significativo aumento da demanda mundial e a pouca mobilização da opinião pública mundial para questões ambientais promovem uma maior elevação do preço. Esse alcança valores superiores a US\$ 100 por barril, com conseqüente aumento do preço médio do diesel ao longo da década. A continuidade da tecnologia do ciclo Diesel reduz os custos de peças e acessórios. Neste cenário, há pouca mobilização pública para questões ambientais. Contudo, no longo prazo, os altos preços do diesel acabam por suscitar investimentos em tecnologias alternativas.

Cenário “Ambiental”: A conscientização em relação ao aquecimento global e a disseminação de políticas públicas favorecendo energias renováveis reduzem a demanda por petróleo no curto prazo. A ampliação da escala de produção de ônibus elétricos, induzida pela obrigatoriedade de compra por grandes cidades, reduz o custo de aquisição desses veículos. Ademais, o poder público também incentiva a eletrificação no transporte coletivo reduzindo tarifas sobre esses bens de capital, além de fornecer linhas de crédito subsidiadas. Por outro lado, a falta de investimentos na tecnologia diesel implica em redução do rendimento destes ônibus a combustão interna e no aumento do custo de manutenção desses veículos. No que tange ao preço do petróleo, as empresas petrolíferas direcionam esforços para a redução de custos, permitindo a vigência de patamar baixo dos preços do petróleo e do diesel (EPE, 2019).

4.2. Escolha dos parâmetros a partir das fontes de dados

A escolha dos parâmetros a serem adotados em cada um dos cenários é fundamental na medida em que pode modificar significativamente a atratividade econômico-financeira das tecnologias avaliadas (combustão interna a diesel e propulsão elétrica) e interferir significativamente na análise comparativa da viabilidade entre ambas.

A obtenção dos parâmetros a serem avaliados só é possível a partir da identificação de fontes de dados relevantes e confiáveis, que são, em geral, relatórios técnicos de associações e federações do setor de transporte, organizações não-governamentais, instituições do governo, ministérios, agências reguladoras e organizações privadas (fabricantes de ônibus, consultoria). O espectro de referências se deu dessa forma devido à diversidade de informações a serem consideradas na elaboração de um estudo de caso que compreende cerca de vinte e cinco variáveis. Ao longo das próximas subseções serão

apresentados os valores obtidos para as variáveis que compõem os custos mencionados anteriormente no Capítulo 2. Dada a multiplicidade de fontes de informação, serão discutidos os aspectos considerados na escolha de cada um dos parâmetros a serem adotados para a construção dos estudos de caso.

4.2.1. Preço do diesel

O preço do combustível é uma parcela relevante do custo operacional de ônibus a diesel, para fins de comparação com o custo do ônibus elétrico. Com o intuito de simular a operação que ocorre nas concessionárias de serviço público de transporte rodoviário de passageiros, adota-se um nível de preços que seja similar ao pago pelas mesmas. Neste sentido, a São Paulo Transporte S/A, por meio de seu relatório, apresenta os critérios adotados na formação das tarifas vigentes para a cidade de São Paulo, utilizando para isso, os preços médios praticados pelos distribuidores na cidade. Estes são disponibilizados pela ANP, havendo a aplicação de um desconto de 1,3% sobre estes preços (SPTrans, 2019). O valor pago pelas concessionárias pode variar de acordo com o volume de diesel comprado, a disponibilidade de tanques de armazenamento, a distância para a base de distribuição, entre outros. Assim, o estudo considera que o preço pago pelas concessionárias para o óleo diesel é o preço de distribuição nacional. Segundo a ANP, ao longo de 2019, o valor médio no Brasil foi de R\$ 3,26/l (ANP, 2020).

4.2.2. Preço da energia elétrica

O preço da eletricidade, por sua vez, é um insumo importante para o cálculo do custo operacional de ônibus elétricos. Neste caso, por se tratar de um serviço concedido, o valor cobrado ou tarifa possui diferenciações ou especificidades em função da demanda, além da variação horosazonal. Conforme explicado anteriormente, a tarifa adotada nesta Nota Técnica é a promocional, obtida fora do horário de pico. Deste modo, parte-se do princípio de que os resultados consideram que os ônibus terão suas baterias recarregadas durante a madrugada, nas garagens. Nesta situação, as empresas são beneficiadas por tarifas de energia elétrica mais módicas. Também é possível que os ônibus sejam carregados ao longo do percurso, em especial nas paradas de ônibus, por meio de carregadores rápidos, durante 30 a 60 segundos. Nesse caso, seria necessário considerar uma tarifa distinta, potencialmente mais elevada.

Para o cálculo do custo da eletricidade de um ônibus elétrico, considera-se a utilização de baterias com potência de 200kWh, carregadas à noite, ao longo de quatro horas, por meio de um carregador de potência de 50 kW (ICCT, 2019). O custo adotado nas simulações foi o de 0,54 R\$/kWh, estimativa da tarifa praticada pela distribuidora Eletropaulo, aferida por meio de exercício de tarifas do mercado de energia A4 a partir de dados de ANEEL (2019^b).

4.2.3. Preço de aquisição de ônibus a diesel

O custo unitário de aquisição do ônibus a diesel varia significativamente, podendo depender do tamanho do lote a ser adquirido na compra, das condições comerciais oferecidas pelo vendedor, do contexto econômico e mercadológico da época da compra, além do porte do ônibus e da presença de adicionais, como ar condicionado, suspensão hidráulica, câmbio automático, computador de bordo, entre outros.

Com a entrada no mercado de modelos básicos dos ônibus elétricos normalmente dotados de itens como ar-condicionado, câmbio automático e computador de bordo, decidiu-se utilizar, neste estudo, os preços de compra de ônibus Padron em condições equivalentes para comparação. Os ônibus Padron são ônibus com 14 metros de comprimento, capacidade mínima de 80 passageiros e peso bruto total (PBT) de 16 toneladas (ANTP, 2017). Cabe ressaltar que atualmente, os ônibus mais vendidos no Brasil são os veículos básicos sem ar-condicionado, com comprimento e PBT similares, mas com menor capacidade total de passageiros. Embora as vendas de Padron tenham aumentado significativamente em grandes regiões metropolitanas, como Rio de Janeiro e São Paulo, mesmo nessas cidades a maior parte das compras de ônibus tem sido de versões básicas.

Assim, adotou-se o custo de um ônibus Padron novo com ar-condicionado. Dentre os valores encontrados, destaca-se o valor de R\$ 554 mil para a cidade de São Paulo (SP, 2019), obtido a partir do preço do Padron LE sem ar-condicionado de R\$ 509 mil, acrescido de R\$ 45 mil para instalação do ar-condicionado. Cabe citar que tal valor foi apresentado como referência para a estimativa das tarifas

vigentes a partir de 1º de janeiro de 2020 (SP, 2019). Outra fonte de informação, a BHTrans, que opera em Belo Horizonte, indicou que o preço de um veículo Padron, com motorização Euro V, suspensão pneumática e com ar-condicionado foi de R\$ 420mil em junho de 2018 (BHTrans, 2019). Dada a maior contemporaneidade do valor para a cidade de São Paulo, neste estudo, adotou-se o valor de R\$550 mil.

4.2.4. Preço de aquisição de ônibus elétrico

No Brasil, a produção de ônibus elétricos ainda conta com poucos agentes. Segundo o relatório do Greenpeace *Dossiê Ônibus Limpo*, o modelo exclusivamente elétrico da empresa brasileira Eletra (E-bus) custa cerca de R\$ 820 mil. No entanto, o financiamento das baterias por meio de *leasing* permite a redução do valor inicial do investimento em até 60%. De acordo com o mesmo estudo, a marca chinesa BYD oferece ao mercado brasileiro o modelo elétrico à bateria K9 ao custo inicial de R\$ 1 milhão. Esse valor também pode ser menor caso as baterias sejam alugadas por meio de financiamento direto junto ao fabricante. Nesta modalidade, as baterias são devolvidas ao fornecedor ao final da vida útil do veículo, o que permite abater 60% do valor inicial do investimento, igualando-o ao valor de um ônibus do tipo Padron LE convencional, cujo custo é de aproximadamente R\$ 400 mil (GREENPEACE, 2016).

A abordagem adotada por MDIC (2018^b), 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. Esta prática é semelhante àquela realizada pelo *California Air Resources Board* (CARB) em apoio ao desenvolvimento do Regulamento Inovador de Trânsito. De acordo com os dados do CARB, a razão entre o preço de compra de um ônibus elétrico a bateria (carregado na garagem ou na rota) e o seu equivalente convencional a diesel é 1,75. Portanto, um ônibus a diesel Padron P7, cujo custo de aquisição gira em torno de R\$ 600 mil, seria equivalente a um elétrico de R\$ 1,05 milhão.

Devido à natureza relativamente nova do produto, e dada sua baixa difusão no Brasil, é difícil encontrar estimativas do custo de aquisição de ônibus elétricos para uso em municipalidades brasileiras. Na formulação das tarifas vigentes a partir de 1º de janeiro de 2020 em São Paulo, o custo de aquisição do ônibus elétrico corresponde a R\$ 718 mil (SP, 2019). No entanto, esse valor representa o montante pago pelo ônibus elétrico sem a bateria, que neste caso, são alugadas, compondo o custo operacional. Para comparação, o presente estudo considera o valor do veículo dotado de bateria.

Recentemente, documento elaborado pela ICCT destaca que o ônibus elétrico com a bateria apresenta um custo 75% superior ao de um ônibus a diesel (MDIC, 2018^b), o que, no presente caso, corresponderia ao montante de R\$ 960 mil. Para esta análise comparativa, adota-se, como referência para a aquisição de ônibus elétricos, o valor de R\$ 950 mil, podendo ser flexibilizado para valores menores, a depender do cenário.

4.2.5. Custo de aquisição da infraestrutura de recarga

De modo comparativo, dada a infraestrutura de abastecimento de diesel existente, considera-se somente o custo de instalação da infraestrutura de carga para os ônibus elétricos. Em MDIC (2018^b) foram apresentados os valores estimados pela BYD em 2018, da ordem de R\$ 160 mil. No mesmo documento, compara-se esse dado com o publicado pelo *California Air Resource Board* (CARB), de US\$ 50 mil. Considerando que estes equipamentos ainda não são fabricados no Brasil, no presente estudo, utilizou-se o custo de R\$ 250 mil como referência, sabendo que, dependendo do câmbio⁴⁷, esse valor pode ser substancialmente alterado.

Cabe ressaltar que, neste estudo, não se considera a possível necessidade de instalação de novas subestações para aumento de carga da garagem, caso um número grande de ônibus elétricos tenha que ser abastecido simultaneamente, portanto o custo sistêmico está potencialmente subdimensionado.

⁴⁷ Considerou-se a taxa de câmbio de R\$5,00/US\$.

4.2.6. Rendimento do ônibus a diesel

Assim como o custo de aquisição dos ônibus, o rendimento (em km/l) varia significativamente dependendo do tamanho, das condições de uso, da lotação e consequentemente da carga tracionada, das condições das estradas, dos relevos, da presença de implementos e adicionais.

No Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, publicado pelo Ministério de Meio Ambiente (MMA) em 2014, o valor médio do rendimento dos ônibus urbanos do ciclo diesel apresentado é 2,3 km/l, enquanto para ônibus rodoviários este valor sobe para 3,0 km/l.

Segundo Fetranspor (2020), o rendimento médio da frota de ônibus da metrópole do Rio de Janeiro em 2019 foi de 2,56 km/l. No entanto, a frota do Rio de Janeiro é composta por BRTs, que, embora percorram menos quilômetros por litro, são mais eficientes quanto ao consumo de combustível (litros) gasto por passageiro-quilômetro, já que transportam maior quantidade de passageiros. Neste sentido e considerando a adoção, para efeito de comparação, de um ônibus convencional estilo Padron, não é possível utilizar o rendimento médio da frota.

Na cidade de São Paulo (SP, 2019), a estimativa de desempenho para um ônibus do tipo Padron com ar condicionado foi da ordem de 1,58 km/l, muito abaixo do rendimento médio da frota de coletivos da cidade, podendo ser explicado pela maior capacidade do ônibus tipo Padron, ou pela presença do ar condicionado.

Conforme estudo realizado pela Secretaria de Transportes da cidade de Belo Horizonte (BH, 2019^b), ônibus com ar-condicionado consomem 33% mais combustível por km. Ainda nesta cidade, calcula-se que o rendimento de ônibus refrigerados seja similar ao de São Paulo, com valor médio de 1,93 km/l (BH, 2019). Em estudo realizado em Curitiba, um ônibus a diesel tipo Padron com ar-condicionado consome 1,86 km/l (PREFEITURA DE CURITIBA, 2015).

Por fim, entre as fontes citadas, escolheu-se como referência o rendimento do ônibus observado em Belo Horizonte, de 1,93 km/l, dado que o valor para a cidade de São Paulo não foi obtido em condições de operação reais e a estimativa de desempenho do ônibus em Curitiba ser de data anterior a 2019.

4.2.7. Custo de manutenção do ônibus a diesel

No que tange ao gasto com peças e acessórios, o custo de manutenção é normalmente medido em reais por quilômetros percorridos. Segundo SP (2019), o consumo de um modelo tipo Padron sem ar-condicionado é de R\$ 0,55/km. A partir de premissas definidas pela ANTP⁴⁸ em seu Manual de Custos dos Serviços de Transporte Público por Ônibus, este custo de manutenção pode ser, em média, R\$ 0,48/km. Segundo BH (2019), para ônibus básicos e Padron com ar-condicionado, o valor é de R\$ 0,49/km.

No custo de manutenção estão incluídos todos os custos necessários para a correta manutenção e consequente operação de um ônibus a diesel, como peças e acessórios, lubrificantes, pneus e consumo de agente redutor líquido automotivo (ARLA 32). Este último é utilizado nos sistemas de pós-tratamento de gases de escapamento produzidos por motores a diesel e tem como objetivo reduzir as emissões de óxidos de nitrogênio resultantes da queima do combustível fóssil. O custo por quilômetro com ARLA depende do consumo⁴⁹ e do preço de aquisição deste reagente. A Secretaria de Transportes da cidade de Belo Horizonte BH (2019) estima que o gasto com o agente redutor líquido automotivo seja de R\$ 0,02/km.

O gasto com lubrificantes também pode ser mensurado por quilômetro rodado, com as estimativas passando de R\$ 0,02/km em SP (2019), para R\$ 0,05/km em RJ (2012) e R\$ 0,07/km em BH (2019). Novamente, essas estimativas dependem do preço do lubrificante. A partir de premissas definidas pela

⁴⁸ A orçamentação do custo de manutenção foi acumulada de 0 a 546.000 Km, considerando-se um percurso médio anual por um ônibus básico em torno de 78.000 Km, além de ser adotada uma vida útil de sete anos (ANTP, 2017).

⁴⁹ Quanto ao consumo, ANTP calcula que o consumo de ARLA seja de 3 a 5 % do consumo de diesel (ANTP, 2017).

ANTP⁵⁰ em seu Manual Custos dos Serviços de Transporte Público por Ônibus, este custo é da ordem de R\$ 0,06/km.

Somando todos esses componentes, pode-se chegar a um custo de manutenção referencial de R\$ 0,54/km, podendo chegar a R\$ 0,64/km, a depender da localidade e condições de aquisição dos produtos.

Adicionalmente, os ônibus a diesel também têm um custo de meia vida útil, o que consiste na revisão geral do motor e na troca de componentes gastos. Considerando um ônibus Padrão com vida útil de dez anos, com cinco anos em média, o ônibus necessitaria de um gasto não operacional para se manter operante. Segundo MDIC (2018^b), esse custo corresponde a 10% do valor de um novo ônibus.

4.2.8. Rendimento do ônibus elétrico

Por se tratar de uma tecnologia nova e em evolução, dados de operações reais sobre o rendimento de ônibus elétricos (em km/kWh) nas condições de temperatura e uso brasileiras são limitados. Em testes realizados com alguns ônibus em Curitiba, obteve-se a média de 0,77 km/kWh (PREFEITURA DE CURITIBA, 2015). Em outros testes realizados na cidade de São Paulo, estimou-se um rendimento médio de 0,65 km/kWh (SPTrans, 2018). Em Salvador (BA), testes na linha 1001 – Aeroporto - Praça da Sé registraram rendimento de 0,9 km/kWh (GREENPEACE, 2016).

Para fins de comparação, a Tabela 5 apresenta o consumo específico de ônibus a diesel e elétricos de acordo com diferentes fabricantes, modelos e capacidades de transporte de passageiros em diferentes ciclos de condução nos EUA.

Tabela 5 – Consumo específico de ônibus urbanos por tipos de testes

Tipo de motor	Fabricante	Modelo	Capacidade de passageiros	Consumo de energia (kWh/km)		
				COM ⁵¹	ART	CDB
Diesel	NABI	416.15	72	3,31	5,71	6,26
	Daimler	Orion VII	80	3,30	5,71	6,06
	New Flyer	XD40	81	2,85	5,22	5,94
	NABI	40 LFW	72	3,31	6,03	5,95
	Eldorado	Arrivo	60	3,01	5,74	6,94
Bateria Elétrica	Proterra	BE-35	65	0,86	1,29	1,06
	Proterra	BE-35	61	0,83	1,39	1,014
	BYD	K9	49	0,89	1,58	1,24
	Proterra	BE40	79	0,88	1,31	0,97
	New Flyer	XE40	76	0,93	1,42	1,09

Nota: utilizou-se o PCI de 923 BTU/scf e 128,488 BTU/gal para CNG e diesel, respectivamente (AFDC, 2019).

Fonte: ICCT (2017)

As montadoras prometem rendimentos acima de 1 km/kWh, mesmo em condições de esforço severas em trechos com muitos aclives e declives. Ônibus novos das empresas chinesas foram anunciados com rendimentos de 1,25 km/kWh devido, em tese, ao menor peso, ao freio regenerativo e à aceleração controlada eletronicamente (GOMES, 2020).

Para o presente estudo, utilizou-se a variação entre o valor 0,65 km/kWh, utilizado como referência, e 1,25 km/kWh, a depender do cenário adotado.

⁵⁰ A ANTP estima que o consumo de lubrificantes esteja entre 0,0240 l/km e 0,0290 l/km, para um veículo que percorreu a distância de 150 mil km (ANTP, 2017).

⁵¹ Os ciclos de condução utilizados para a determinação dos diferentes consumos de energia relatados foram “commuter” (COM), “heavy-duty urban dynamometer driving schedule” (UDDS), “arterial” (ART), “Orange County Transit Authority bus cycle” (OCTA), “central business district” (CBD), and “Manhattan bus cycle” (MAN).

4.2.9. Custo de manutenção do ônibus elétrico

Assim como para ônibus a diesel, o custo de manutenção do ônibus elétrico contempla os gastos, a aquisição e troca de peças e acessórios e os referentes ao consumo do óleo lubrificante. Além desses, ainda pode-se incluir o custo com infraestrutura de recarga e o gasto com aluguel/ *leasing* de baterias, caso a empresa não a compre juntamente com a carroceria e o motor.

Um ônibus elétrico a bateria apresenta custo de manutenção 24% inferior a um modelo diesel P7, independentemente de a recarga ser realizada no ponto de abastecimento ou ao longo da rota⁵² (MDIC, 2018^b). Testes operacionais realizados na cidade de Salvador (BA), identificaram que o valor de manutenção de ônibus elétricos pode ser até 25% menor, se comparados aos similares a diesel. De acordo com o fabricante de tais veículos, a redução se deve à composição do motor por apenas três grandes componentes que necessitam de manutenção periódica⁵³. Veículos com motor diesel, por sua vez, possuem dezenas de peças com necessidade de manutenção periódica (GREENPEACE, 2016). TEOH *et al*, (2018) também demonstra que os custos de peças e acessórios de ônibus elétricos devem ser menores que de suas contrapartes a diesel, em virtude da menor presença de peças móveis (*moving parts*), e da não ocorrência de combustão interna dentro do motor, que sofre desgaste mais rapidamente.

Aplicando o desconto de 24% ao custo de peças e componentes dos veículos a diesel, estimamos valores entre R\$ 0,37/km e R\$ 0,42/km.

Embora detenham motores com menor número de partes móveis, ônibus elétricos ainda necessitam de lubrificantes, apesar do menor gasto, devido à presença de menos peças móveis. Segundo SP (2019), o gasto com lubrificantes para uso dos ônibus elétricos de sua frota está estimado em R\$ 0,012/km.

Além do custo de manutenção do ônibus, é importante também considerar o da infraestrutura de recarga. Segundo SP (2019), o custo de manutenção da infraestrutura de recarga é de R\$ 0,20/km. O documento não especifica que serviços estão incluídos nesse custo, mas imagina-se que esse custo deva diminuir consideravelmente quando da instalação de muitos carregadores elétricos em uma mesma garagem. Por isso, variamos esse valor entre R\$ 0,05/km e R\$ 0,20/km nos nossos cenários.

Assim, para o presente estudo, utilizou-se valores entre R\$ 0,59/km, e R\$ 0,63/km para o custo de manutenção dos veículos elétricos.

Os ônibus elétricos também têm um custo de meia vida útil. Conforme dito acima, o desgaste de peças não é tão grande, e menos componentes do motor precisam ser trocados ao longo da vida média do ônibus. Porém, atualmente, a vida útil da bateria ainda não tem a mesma equivalência à do motor a combustão interna. Neste sentido, o MDIC (2018^b) indicou para a versão elétrica um custo de vida média útil 60% inferior ao de um veículo novo.

Além disso, caso o custo de aquisição do ônibus fosse estimado sem o valor da bateria, para sua operacionalização, seria necessário incluir o valor do *leasing* da bateria. Segundo SP (2019), o custo do aluguel da bateria de um ônibus elétrico é de R\$ 1,53/km. Esse maior custo operacional, no entanto, seria compensado pelo menor valor de aquisição do ônibus, além da redução do gasto com manutenção. Para o presente estudo, considerou-se a compra do ônibus elétrico com a bateria.

4.2.10. Custo de financiamento do ônibus elétrico

Na década passada, o BNDES estabeleceu um programa com condições especiais para ônibus “limpos”, permitindo o financiamento de um percentual maior do bem a taxas de juros reduzidas, em relação à taxa referencial de certificados de depósitos bancários (CDI). Com o advento da crise de 2014, parte destas condições foram descontinuadas. Atualmente, o financiamento do ônibus pelo BNDES (2019)

⁵² Para estimar os custos de manutenção das tecnologias de acionamento elétrico consideradas nesta análise, o MDIC (2018^b) utilizou a relação entre os custos de manutenção por quilômetro para as tecnologias de barramento elétrico e o custo de manutenção de um ônibus diesel da base de dados CARB; essa relação foi então aplicada aos custos de manutenção da linha de base estimados para um ônibus diesel P7 em cada tipo de ônibus na frota de São Paulo.

⁵³ Em testes realizados na Linha 1001 – Aeroporto-Praça da Sé, em Salvador (BA) –, verificou-se que o valor de manutenção do modelo K9 foi de R\$ 0,20/km, enquanto os ônibus a diesel que rodavam na mesma linha apresentavam um custo de manutenção de R\$ 0,30/km.

é de 50% a 80% do valor do veículo, ao longo de 5 anos. As taxas variam de 9,17% a 12% ao ano, cuja variação foi adotada nesse estudo.

4.2.11. Valor de revenda de ônibus a diesel

O valor de revenda de um ônibus a diesel é importante aspecto considerado na estrutura financeira/fluxo de caixa de operações com este veículo, na medida em que cada município tem regras específicas para manutenção da idade média de sua frota. Por isso, apesar do estabelecimento da vida útil média de um ônibus Padron urbano ser de 10 anos (SP, 2019; BH, 2019; MDIC, 2018^b; MPRJ, 2020), os coletivos de metrópoles e cidades grandes são revendidos para cidades menores e para localidades antes do término deste período. Nestes locais, os ônibus apresentam uso menos intensivo do que o transporte de passageiros em uma grande cidade. Exemplificando, em Belo Horizonte, o contrato de concessão do transporte rodoviário de passageiros urbano prevê uma idade média da frota entre 4 e 6 anos (BH, 2019) e, em São Paulo, máxima de 5 anos (SP, 2019). De modo geral, as grandes capitais procuram manter sua frota com idade média próxima de 5 anos. Apresenta-se como exceção a cidade do Rio de Janeiro, onde a idade máxima da frota aumentou de 8 para 9 anos, segundo o Ministério Público do Rio de Janeiro (MPRJ, 2020).

A partir da análise da distribuição por faixa etária da frota da Região Metropolitana de São Paulo é possível notar que 60% das frotas tem entre 0 e 6 anos, podendo-se concluir que a maior parte das vendas de ônibus ocorre depois de 6 anos de uso (SP, 2019). Contudo, o valor de revenda varia significativamente, não somente a depender da idade do veículo, mas também com a condição do ônibus. Vale notar que, para fins contábeis, é frequente o uso do método de Cole⁵⁴, em que a depreciação é maior no início da vida útil e que se atenua ao longo do tempo. Na cidade de Belo Horizonte, adota-se o valor residual de 10% (BH, 2019). Esse método, embora muito usado para cálculos contábeis, não representa o valor efetivamente recebido pelo ônibus quando de sua revenda.

Segundo MDIC (2018^b), os ônibus sofrem depreciação em uma taxa média de 8% ao ano. Sendo assim, caso se considerasse sua revenda com 5 anos de idade, ao final deste período seu valor de revenda seria de aproximadamente 66%, valor utilizado para o presente estudo. Cumpre observar que a premissa de revenda com 5 anos de uso limita a competitividade da opção a diesel, não se verificando no atual modelo de negócio das concessionárias.

4.2.12. Distância média percorrida

No Brasil, o Sistema de Informação da Mobilidade Urbana publicado pela Associação Nacional de Transporte Público (ANTP), em maio de 2018 (ANTP, 2018), apresenta estimativas de dados operacionais para os sistemas de ônibus urbanos, com a agregação por porte de município. Segundo o levantamento, municípios cuja faixa de população é superior a 1 milhão de habitantes apresentam distância anual média percorrida de 79,5 mil km. Já municípios com população entre 100 e 250 mil habitantes apresentam valor de 72,7 mil km, conforme Tabela 6. Para o estudo, adotou-se 79,5 mil quilômetros por ano em todos os cenários.

⁵⁴ A ANTP em seu Manual Custos dos Serviços de Transporte Público por Ônibus estima, no caso de um ônibus padrão, utilizando método de Cole para cálculo da depreciação, valores de referência para vida útil e valor residual, de 8 anos e 10%. Para a versão Padron, indica, para uma vida útil de 10 anos, 10% de valor de revenda. (ANTP, 2017)

Tabela 6 – Dados operacionais de ônibus municipais em função do tamanho da população

Faixa de população (Habitantes)	Passageiros transportados (Milhões/ano)	Quilometragem em serviço (10⁶ km/ano)	Frota (Unidades)	Distância média anual (km/ano)
Mais de 1 milhão	7.038	3.599	4.5284	79.476
De 500 mil a 1 milhão	1.775	808	10.125	79.802
De 250 a 500 mil	1.701	869	11.655	74.560
De 100 a 250 mil	1.705	907	12.475	72.705
De 60 a 100 mil	944	587	7.986	73.504
Total	13.163	6.770	87.525	77.349

Fonte: ANTP (2018)

4.2.13. Valor de revenda de ônibus elétrico

A estimativa do valor de revenda de ônibus elétricos traz consigo ainda mais incertezas do que as associadas ao ônibus a diesel. Um primeiro aspecto é a amplitude de adoção da tecnologia. Neste sentido, considera-se a introdução de ônibus elétricos primeiramente em grandes cidades, em que as concessionárias detêm vulto financeiro suficiente para a compra de ônibus elétricos de alto valor e para investimento em terminais de recarga. O mesmo não pode ser dito de cidades médias e pequenas. Adotando essa premissa, dificilmente cidades menores que os grandes centros irão adquirir ônibus elétricos, especialmente pela sua incapacidade de investir na infraestrutura requerida. Além disso, quando da sua revenda, as baterias usadas provavelmente estarão com autonomia reduzida e possível necessidade de substituição. Neste caso, isto pode acarretar gasto com novas baterias, o que não está considerado no presente estudo.

Segundo MDIC (2018^b), a depreciação dos ônibus elétricos também é de 8% ao ano, em média. No entanto, dadas as características dos motores elétricos e demais componentes deste veículo, a vida útil da carroceria, excluindo a bateria, é mais longa. Sendo assim, cidades poderão manter em suas frotas o mesmo ônibus por 10 a 15 anos, o que significa valores de revenda inferiores aos adotados para os ônibus a diesel, revendidos com 6 a 10 anos. Associando a informação da carroceria com o da incerteza quanto à bateria, o presente estudo considera o preço de revenda de ônibus elétricos como um valor residual, podendo variar de 0 a 20% do valor de aquisição.

5. RESULTADOS

A Tabela 7 resume todos os parâmetros utilizados para cada cenário e mostra os resultados dos indicadores financeiros (TIR, VPL e *Payback*), sendo possível realizar uma análise de sensibilidade. Valores de VPL incremental positivo indicam a potencial viabilidade da alternativa de eletrificação da frota. O Custo Total de Propriedade (TCO) incremental positivo sinaliza que a adoção do ônibus elétrico é potencialmente vantajosa, pelo total de custos incorridos ser superior para um ônibus a diesel. Vale lembrar que o TCO não traz os números a valor presente, significando que fluxos, tanto atual quanto futuro, têm o mesmo peso, o que reduz a vantagem de financiamentos mais longos.

Tabela 7 – Parâmetros e Resultados

Parâmetro	Ambiental	Fossilizado	Inércia	Valores escolhidos para a análise de sensibilidade de variáveis pré-selecionadas:					
				Diesel	Custo Ônibus	Rend. Diesel	Rend. Elétrico	Infraestrutura	Incentivo
DADOS DE UTILIZAÇÃO									
Padrão de Cidade	[>1 milhão]	[>1 milhão]	[>1 milhão]						
PREÇO DO DIESEL									
Preço do Diesel (R\$/l)	1,93	4,50	3,26	→ 4,50					
PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA									
Preço da Eletricidade (R\$/kWh)	0,54	0,54	0,54						
Potência Requerida (kW)	50	50	50						
Recarga Diária (h)	4	4	4						
Distribuidora (lista)	Eletropaulo	Eletropaulo	Eletropaulo						
CAPEX – DIESEL									
Custo de Aquisição (R\$)	420.000	550.000	550.000		→ 650.000				
Infraestrutura de Recarga (R\$)	-	-	-						
CAPEX – ELÉTRICO									
Custo de Aquisição (R\$)	1.000.000	1.000.000	950.000						→ 850.000
Infraestrutura de Recarga (R\$)	200.000	300.000	250.000					→ 150.000	
OPEX – DIESEL									
Rendimento (km/l)	1,58	1,93	1,93			→ 2,56			
Custo de Manutenção (R\$/km)	0,64	0,64	0,54						
OPEX – ELÉTRICO									
Rendimento (km/kWh)	1,25	0,65	0,65				→ 1,25		
Opção de GD (binário)	Não	Não	Não						
Custo de Manutenção (R\$/km)	0,44	0,63	0,63						
FINANCIAMENTO – DIESEL									
Custo de Capital Próprio (%)	12,5%	12,5%	12,5%						
Custo de Financiamento (%)	12,0%	9,0%	9,0%						→ 12,0%
Percentual Financiado (%)	50%	50%	50%						
Prazo de Financiamento (anos)	5	5	5						
Valor de Revenda (%)	10%	66%	66%						→ 39%
FINANCIAMENTO – ELÉTRICO									
Custo de Capital Próprio (%)	12,5%	12,5%	12,5%						
Custo de Financiamento (%)	7,5%	9,0%	9,0%						→ 7,5%
Percentual Financiado (%)	100%	50%	50%						→ 100%
Prazo de Financiamento (anos)	10	5	5						→ 10
Valor de Revenda (%)	20%	0%	5%						→ 20%
INDICADORES FINANCEIROS									
ΔValor Presente Líquido (R\$)	178.233	-17.267	-273.385	51.263	-176.834	-483.429	-71.887	-173.385	155.850
ΔTCO (TCO _{diesel} – TCO _{elétrico}) (R\$)	7.068	450	-40.662	470.115	61.838	-371.129	276.360	59.338	63.838

Fonte: Elaboração própria

A análise dos resultados mostra que, em determinadas condições, o ônibus elétrico pode ser viável economicamente. Porém, a escolha dos parâmetros pode modificar significativamente a sua atratividade econômico-financeira. Ademais, incentivos e garantias governamentais podem promover a ampla adoção desta tecnologia veicular no médio prazo.

Entre os diversos aspectos que contribuem para a substituição de ônibus a diesel por elétricos, cabe enumerar variáveis como preço do diesel ou da tarifa de eletricidade, e parâmetros como o rendimento do ônibus a diesel e de sua versão elétrica, na medida em que estes modificam significativamente a análise comparativa da viabilidade entre ambas as tecnologias veiculares.

Pela análise do VPL pode-se perceber que a vantagem do ônibus a diesel frente ao similar elétrico ainda é considerável, exceto no cenário ambiental em que o governo promove essa tecnologia, além do caso em que já existem consideráveis incentivos à tecnologia, como na condição em que o preço do diesel chega ao patamar de R\$ 4,5/l. Um incentivo tributário, eliminando o imposto sobre ônibus elétricos, e reduzindo seu preço de aquisição, aliado a algum crédito para a compra desse tipo de veículo, tornam a compra por concessionárias atrativa, tudo o mais constante. Neste sentido, a compra de uma frota considerável pode viabilizar um mercado de veículos usados, e conseqüentemente, o aumento do valor de revenda.

No entanto, mesmo com incentivos governamentais, o ônibus a diesel pode voltar a ser mais atrativo economicamente, caso haja declínio do preço do diesel. Ademais, políticas públicas neste sentido implicam elevado dispêndio orçamentário. É essencial confrontar externalidades positivas associadas à redução de emissões e dos custos da saúde pública a outras. Os resultados de políticas de incentivo à adoção de ônibus elétricos também precisam ser comparados com as externalidades positivas de outros investimentos, como a ampliação de modos de transporte metro-ferroviários, que também reduzem emissões além de trazerem outros benefícios às cidades. Conforme comentado anteriormente, os valores apresentados acima não levam em conta os custos de meia vida dos ônibus, que são significativamente maiores para ônibus elétricos, devido à necessária troca de baterias usadas. Não se avalia também a questão da disposição final destes componentes, que pode representar importante externalidade negativa ao meio ambiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo analisou o estado da arte da tecnologia de ônibus elétricos, e analisou a competitividade dessa tecnologia frente a tecnologia atualmente dominante. A emissão de poluentes locais e globais advindos da queima de combustíveis fósseis pelos ônibus urbanos tem motivado a substituição dos ônibus a diesel por equivalentes com tecnologia zero emissão no escapamento. Este estudo, em particular, analisou a viabilidade comparativa da adoção de tecnologia elétrica à bateria em ônibus. O maior custo de aquisição da opção elétrica, no entanto, configura-se atualmente como uma das principais barreiras para a inserção desta tecnologia nas frotas de coletivos urbanos em várias cidades do mundo.

A metodologia do custo total de propriedade ao longo da vida útil dos ônibus tem sido utilizada em diversos países com intuito de ressaltar a vantagem potencial da tecnologia elétrica em relação à tecnologia tradicional e fundamentar novos modelos de negócio e a modernização de contratos de licitação de serviços de transporte coletivo urbano. A substituição de ônibus urbanos a diesel por modelos equivalentes elétricos a bateria pode ser viável e favorável financeiramente quando a diferença entre os custos operacionais compensa o custo de aquisição superior do ônibus elétrico ao longo de sua vida útil.

Neste estudo, observou-se a importância da definição dos parâmetros diante dos cenários para analisar a viabilidade do investimento em ônibus elétricos por concessionárias sem a necessidade de subsídios e/ou incentivos governamentais adicionais. Ônibus elétricos podem se tornar competitivos, porém, hoje, a viabilidade financeira da troca de tecnologia por concessionários requer tanto uma contínua melhora da tecnologia, quanto incentivos governamentais. Cabe ponderar que, mesmo que avanços em P&D ocorram para os ônibus elétricos, é provável que o mesmo ocorra na rota tecnológica do diesel, ainda que em intensidades diferentes, compreendendo tanto o quesito de rendimento energético, como também o de emissões.

Incentivos governamentais, fiscais e creditícios podem tornar a compra de ônibus elétricos mais atrativa que a de ônibus a combustão interna. No entanto, para avaliação de uso de recursos públicos é preciso quantificar o custo da ampla adoção de ônibus elétricos e seus respectivos benefícios ambientais. Também é importante avaliar o estímulo a outras tecnologias (célula combustível, etanol, diesel de cana ou híbridos) ou mesmo a outros modos de transporte (metro ferroviário/aquaviário), que também têm potencial de reduzir emissões.

Na abordagem das variáveis envolvidas na modelagem, foram observadas limitações no que se refere às fontes de dados. De fato, muito embora existam relatórios técnicos sobre a temática dos ônibus elétricos, a maior riqueza das informações refere-se ainda a casos de outros países. As iniciativas pontuais de implementação deste tipo de tecnologia nas cidades brasileiras ainda são restritas e não permitem o acesso a grande variedade de parâmetros como aqueles que são empregados em análises *bottom-up* paramétricas, o que restringe as possibilidades de exploração das variáveis da análise. Adicionalmente, algumas hipóteses simplificadoras limitaram as comparações entre as rotas tecnológicas, em especial a revenda com 5 anos de uso da opção a diesel, que não se verifica no atual modelo de negócio das concessionárias.

O estudo indica a viabilidade do investimento no cenário Ambiental, assim como no caso de uma elevação significativa do preço do diesel, ou de vultosos incentivos governamentais, não sendo interessante economicamente nos demais. Deve-se ressaltar que o uso da tecnologia incumbente apresenta vantagens econômicas, além de menos incertezas, o que prejudica a adoção da nova tecnologia elétrica, mesmo em cenários de viabilidade financeira aparente pela comparação do VPL.

Em análises futuras, sugere-se abordar impactos da adoção de novas rotas tecnológicas de motorização sobre a cadeia produtiva do setor automotivo. Além disso, recomenda-se avaliar os efeitos da aplicação de políticas de comando e controle para implementar tecnologias veiculares alternativas e os reflexos nas tarifas do transporte coletivo urbano, a partir do atual modelo de negócios. Tais reflexos

também podem ser avaliados à luz do potencial impacto nas opções de mobilidade da população. Dessa forma, além de analisar o setor de transportes de forma mais integrada, o estudo agrega mais informações sobre as esferas econômica, social e ambiental, condicionantes de uma avaliação de sustentabilidade de quaisquer projetos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFDC (2019). *U.S. Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy. Alternative Fuels Data Center.* Disponível em <<https://bit.ly/2OaVaj7>>. Acesso em maio de 2019.

ANEEL (2010). Agência Nacional de Energia Elétrica. Estrutura Tarifária para o Serviço de Distribuição de Energia Elétrica. Sumário Executivo (Ótica do Consumidor). Disponível em: <<https://bit.ly/2wu842U>>. Acesso em janeiro de 2019.

ANEEL (2012). Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <<https://bit.ly/2OmltBz>>. Acesso em julho de 2020.

ANEEL (2016). Agência Nacional de Energia Elétrica. Modalidades tarifárias. Disponível em: <<https://bit.ly/2U1OfxW>>. Acesso em março de 2019.

ANEEL (2018). Agência Nacional de Energia Elétrica. Regulação dos Serviços de Distribuição. Disponível em: <<https://bit.ly/2Zd9QCs>>. Acesso em fevereiro de 2019.

ANEEL (2019^a). Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatórios de Consumo e Receita de Distribuição. Disponível em: <<https://bit.ly/2EHXvxm>>. Acesso em janeiro de 2019.

ANEEL (2019^b). Agência Nacional de Energia Elétrica. Postos Tarifários. Disponível em: <<https://bit.ly/2ZeF3oW>>. Acesso em março de 2019.

ANP (2019^a). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP): Óleo Diesel. Disponível em: <<https://bit.ly/2Xjtv1F>>. Acesso em janeiro de 2019.

ANP (2019^b). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP): Série histórica do levantamento de preços e de margens de comercialização de combustíveis. Disponível em: <<https://bit.ly/2laRc9H>>. Acesso em janeiro de 2019.

ANP (2019^c). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP): Sistema de Levantamento de Preços. Disponível em: <<https://bit.ly/2QAColt>>. Acesso em maio de 2019.

ANP (2020). Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Preços. Levantamento de Preços e de Margens de Comercialização de Combustíveis. Disponível em: <<https://bit.ly/2WCH0eY>>. Acesso em março de 2020.

ANTP (2017). Custo dos serviços de transporte público por ônibus. Método de Cálculo. Agosto de 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2ORiYsD>>. Acesso em abril de 2019.

ANTP (2018). Relatório geral 2016. Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transporte Público – Simob/ANTP. Disponível em <<https://bit.ly/2VJDGM2>>. Acesso em março de 2019.

BHTrans. (2019). Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte (BHTrans). Disponível em: <<https://bit.ly/3jqbCKw>>. Acesso em abril de 2019.

BNEF (2018). *Bloomberg Finance L.M. Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO₂.* Disponível em <<https://bit.ly/325cmi9>>. Acesso em março de 2018.

BNDES (2019). Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Fundo Clima - Subprograma Mobilidade Urbana. Disponível em: <<https://bit.ly/2HIG0nj>>. Acesso em abril de 2019.

BRASIL (2015). Governo do Brasil – Ministério das Relações Exteriores. Disponível em: <<https://bit.ly/3eiqxCS>>. Acesso em maio de 2020.

BRASIL (2017). Governo do Brasil - Portal Oficial do Governo federal brasileiro. Disponível em: <<https://bit.ly/32cx9A6>>. Acesso em março de 2019.

BRASIL (2018). Diário Oficial da União (DOU) de 28 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2VOWV7M>>. Acesso em janeiro de 2019.

BREALEY, R; MYERS, S; ALLEN, F. (2008). Princípios de finanças corporativas, 8. ed., São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

CCAC (2019). *Climate & Clean Air Coalition. Soot-free urban bus: Supporting cities to transition from diesel to soot-free engine technologies.* Disponível em: <<https://bit.ly/2JRK2qX>>. Acesso em maio de 2019.

C40 Cities (2015). *C40 Clean Bus Declaration urges cities and manufacturers to adopt innovative clean bus Technologies.* Disponível em: <<https://bit.ly/2wus6tV>>. Acesso em abril de 2019.

C40 Cities (2019). *Fossil Fuel Free Streets Declaration.* Disponível em: <<https://bit.ly/2x0j4FG>>. Acesso em abril de 2019.

CCEE (2019). Câmara de Comercialização de Energia Elétrica: *Quais são os tipos de comunhão e quando devo fazer?* Disponível em: <https://bit.ly/2RZiYun>. Acesso em janeiro de 2019.

CEF (2019). O que devo saber para contratar meu o financiamento imobiliário? Disponível em: <<https://bit.ly/2In1S4r>>. Acesso em março de 2019.

CFC (2005). Conselho Federal de Contabilidade: Resolução CONSELHO FEDERAL DE CONTABILIDADE nº 1.027 de 15 de abril de 2005. Disponível em: <<https://bit.ly/2GqdPUY>>. Acesso em abril de 2005.

DIÁRIO DO TRANSPORTE (2018). DF inicia operação comercial com ônibus elétrico da Viação Piracicabana. Disponível em: <<https://bit.ly/2W4MuvZ>>. Acesso em abril de 2018.

EPE (2005). Potencial de Redução de Emissões de CO₂ em Projetos de Produção e Uso de biocombustíveis. Disponível em: <<https://bit.ly/2BWPoPm>>. Acesso em março de 2020.

EPE (2019). Balanço Energético Nacional 2019: Ano-base 2018. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://bit.ly/2E7r3Hv>>. Acesso em maio de 2020.

EPE (2020). NT Combustíveis renováveis para uso em motores do ciclo Diesel. Disponível em: <<https://bit.ly/3gMgcAD>>. Acesso em maio de 2020.

FTA (2019). U.S. Department of Transportation. *Federal Transit Administration: U.S. Department of Transportation Announces \$55 Million in Grants to Transit Agencies to Deploy Clean Buses.* Disponível em: <<https://bit.ly/2cNaDSq>>. Acesso em abril de 2019.

FTA (2020). U.S. Department of Transportation. *Federal Transit Administration: U.S. Department of Transportation Announces \$130 Million in Grants for Nationwide Projects to Expand Advanced, Efficient Bus Technologies.* Disponível em: <<https://bit.ly/3jONHk2>>. Acesso em julho de 2020.

GOMES (2020). Apresentação de Ediltron Temporal Gomes da Sunwin, realizada durante o Taller Virtual Buses Cero Emisiones em 25 de março de 2020.

GREENPEACE (2016). Dossiê ônibus limpo. Benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo. Disponível em: <<https://bit.ly/2Wchzkl>>. Acesso em abril de 2019.

ICCT (2017). *International Council on Clean Transportation: Financing the transition to sootfree urban bus fleets in 20 megacities.* Washington, DC USA. 2017. International Council on Clean Transportation. Disponível em: <<https://bit.ly/32rRtwf>>. Acesso em abril de 2019.

ICCT (2019). *International Council on Clean Transportation.* Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo. Tim Dallmann. Disponível em: <<https://bit.ly/31ofSTV>>. Acesso em junho de 2020.

IEA (2020) *International Energy Agency. Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive? Technology report,* Junho 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/3aLXR54>>. Acesso em junho de 2020.

IEA (2018). *International Energy Agency. Global EV Outlook 2018. Towards cross-modal electrification.* Disponível em: <<https://bit.ly/3fj3U2x>>. Acesso em fevereiro de 2019.

IPEA (2011). Texto para Discussão 1606 - Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros. Disponível em: <<https://bit.ly/2ZXEgd1>>. Acesso em maio de 2020.

IPEADATA (2019). Inflação IPCA (mensal). IBGE/SNIPC. Disponível em: <<https://bit.ly/2JYbzmu>>. Acesso em fevereiro de 2019.

LUCHESES, G. (2011) Estudo de caso acerca da utilização de métricas de gestão baseada em valor na análise da viabilidade econômico-financeira de projetos de investimento. Fundação Getúlio Vargas. Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<https://bit.ly/3l35Mj3>>. Acesso em abril de 2019.

MDIC (2018^a). Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Sistematização de Iniciativas de Mobilidade Elétrica no Brasil. Disponível em: <<https://bit.ly/2DgbMRk>>. Acesso em abril de 2019.

MDIC (2018^b). Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas. Disponível em: <<https://bit.ly/2VS8MIC>>. Acesso em novembro de 2018.

MDIC (2018^a). Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2ZgabvV>>. Acesso em maio de 2020.

MF (2018). Ministério da Fazenda. Metodologia de cálculo do WACC. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/2HuymYW>>. Acesso em maio de 2019.

MMA (2014). Ministério do Meio Ambiente: Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários, 2013 (Ano base 2012). Publicado em janeiro de 2014. Disponível em: <<https://bit.ly/2Yikhpu>>. Acesso em abril de 2019.

MMA (2018). Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018: Disponível em: <<https://bit.ly/2C1qA8V>>.

MMA (2020). Ministério do Meio Ambiente: Cidades sustentáveis/Qualidade do ar/Poluentes atmosféricos. Disponível em:<<https://bit.ly/38MrBhd>>.

NTU (2018). Associação nacional das empresas de transportes urbanos: Anuário NTU: 2017-2018 / Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. - Brasília: NTU, 2018. Disponível em: <<https://bit.ly/326hQr2>>. Acesso em abril de 2019.

PREFEITURA DE SÃO PAULO (2015). Concorrência nº 001/2015 – EDITAL - SMT-GAB. Disponível em: <<https://bit.ly/3j1A1Ff>>. Acesso em maio de 2020.

PREFEITURA DE CURITIBA (2015). URBS – URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S.A. Avaliação Comparativa de Novas Tecnologias para Operação no Transporte Coletivo de Curitiba. Disponível em: <<https://bit.ly/3l3GG3F>>. Acesso em maio de 2020.

PROCEL (2011). Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Manual de Tarifação da Energia Elétrica. Disponível em: <<https://bit.ly/2ao1Msp>>. Acesso em março de 2019.

SPTTrans. (2018). Relatório da Administração 2018. SPTTrans. <<https://bit.ly/2CQueTd>>. Acesso em abril de 2019.

SPTTrans (2019). Valores das Tarifas Vigentes a partir de 01/01/2020. Disponível em: <<https://bit.ly/327ishU>>. Acesso em março de 2020.

SOLARVOLT (2019^a). Horários de ponta de algumas distribuidoras. Disponível em: <<https://bit.ly/2DgMQJz>>. Acesso em janeiro de 2019.

SOLARVOLT (2019^b). Tudo sobre os horários de ponta no consumo de energia. Disponível em: <<https://bit.ly/2DgMQJz>>. Acesso em fevereiro de 2019.

TEOH, L.E., KHOO, H.L.; GOH, S.Y; CHONG, L. M., 2018. *Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia.* International Journal of Transportation Science and Technology 7 (1), 10-25.

UITP (2016). *The International Association of Public Transport: ZeEUS. eBus Report. An overview of electric buses in Europe. ZeEUS project, 2016.* Disponível em: <<https://bit.ly/2Zkp9vd>>. Acesso em abril de 2019.

ZEEUS (2018). *ZeEUS Final Event*. Bruxelas. Disponível em: <<https://bit.ly/3aMTCWI>>. Acesso em julho de 2020.

ZEEUS (2019). *Zero Emission Urban Bus System*. Disponível em: <<https://bit.ly/310xTW3>>. Acesso em abril de 2019.

Tarifa de energia elétrica

As tarifas de energia neste subgrupo são classificadas em tarifa horo-sazonal azul, horo-sazonal verde ou convencional (PROCEL, 2011). Cada uma delas possui sua decomposição própria baseada em parcelas de energia, demanda e tarifa de uso do sistema de distribuição – TUSD, e uso em horário de ponta ou fora de ponta do sistema de distribuição. A Tabela 8 a seguir resume as principais características e unidades de contabilização das parcelas dos diferentes tipos de tarifas.

Tabela 8 – Componentes e unidades de contabilização dos tipos de tarifas no subgrupo A4

Tipo de Tarifa A4	Parcela	Componente	Unidade de contabilização
Tarifa Azul	TUSD-Azul (parcela da TUSD)	TUSDa (DP)	R\$ / (kW x Mês)
		TUSDa (DFP)	R\$ / (kW x Mês)
		TUSDa (E)	R\$ / (MWh x Dia)
	TE-Horaria (parcela da energia)	Teh (EP)	R\$ / (MWh x Dia)
		Teh (EFP)	R\$ / (MWh x Dia)
Tarifa Verde	TUSD-Verde (parcela da TUSD)	TUSDv (D)	R\$ / (kW x Mês)
		TUSDv (EP)	R\$ / (MWh x Dia)
		TUSDv (EFP)	R\$ / (MWh x Dia)
	TE-Horária (parcela da energia)	Teh (EP)	R\$ / (MWh x Dia)
		Teh (EFP)	R\$ / (MWh x Dia)
Tarifa Convencional	TUSD-Convencional-A (parcela da TUSD)	TUSDca (D)	R\$ / (kW x Mês)
		TUSDca (E)	R\$ / (MWh x Dia)
	TE-Convencional (parcela da energia)	TEc (E)	R\$ / (MWh x Dia)

Fonte: Adaptado de ANEEL (2010)

Simplificadamente, a tarifa de energia elétrica é calculada pela razão entre a soma dos valores das suas componentes e o total de energia consumida ao longo de um ano, conforme a equação abaixo:

$$\text{Tarifa} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right) = \frac{\text{Soma dos Custos das componentes (R\$)}}{\text{Total de Energia ao ano (kWh)}}$$

A componente de custo anual da TUSD referente à demanda de energia fora do horário de ponta, identificada pela sigla TUSDa-DFP, é calculada da seguinte forma:

$$\text{TUSDa – DFP(R\$)} = \text{TUSD – DFP} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{kW} \times \text{Mês}} \right) \times \text{Potência (kW)} \times 12 \text{ meses}$$

A componente de custo anual da TUSD referente ao consumo de energia, identificada pela sigla TUSDa-E, é calculada da seguinte forma:

$$TUSDa - E(R\$) = TUSD - E \left(\frac{R\$}{MWh \times Dia} \right) \times Energia (MWh) \times 365 \text{ dias}$$

A componente de custo anual da Tarifa Horária de Energia referente ao consumo de energia fora do horário de ponta, identificada pela sigla TEh-EFP, é calculada da seguinte forma:

$$TEh - EFP(R\$) = TEh - EFP \left(\frac{R\$}{MWh \times Dia} \right) \times Energia (MWh) \times 365 \text{ dias}$$

Os valores de TUSDa-DFP, TUSDa-E e TEh-EFP associados a cada distribuidora são informados pela ANEEL. Conforme pode se notar nas equações acima, as premissas para o cálculo da tarifa anual, avaliada em R\$/kWh, assumiram que a operação ocorre por 12 meses e 365 dias ao longo do ano.

A partir de tais informações é possível identificar a composição de custos da tarifa de energia A4-Azul. A alíquota de impostos aplicada a cada uma das distribuidoras foi obtida por meio dos Relatórios SAS da ANEEL (ANEEL, 2019^a) que identifica a razão entre os valores das tarifas com e sem impostos. Os fatores obtidos foram aplicados à tarifa identificada, o que permitiu identificar a tarifa completa com impostos, bem com a sua parcela aplicada ao preço final ao consumidor.

Assumindo-se que a recarga da frota de ônibus seja majoritariamente realizada fora do horário de ponta das distribuidoras, nota-se que os valores apurados em R\$/kWh para as tarifas Azul ou Verde são idênticos, enquanto os valores da tarifa Convencional são superiores. Ambas as tarifas horo-sazonal Azul e Verde apresentam componentes relativas ao consumo de energia elétrica e à demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia.

Adicionalmente, outra diferenciação entre elas reside no cálculo da componente da TUSD na tarifa. No caso da tarifa Azul, a parcela de TUSD possui uma decomposição de uso de demanda diferenciada em função do horário de ponta ou fora de ponta, e uma parcela de energia que apresenta valores constantes indiferentes ao seu horário de uso. No caso da tarifa Verde, a TUSD é decomposta em função da demanda de energia requisitada ao sistema, independente do seu horário de uso, e da energia diferenciada em função do horário de uso – ponta ou fora de ponta.

Estimativa de *payback*

O *payback* simples é obtido calculando-se o número de anos que decorrerão até os fluxos de caixa estimáveis igualarem o montante do investimento inicial (BREALEY, 2008), porém, por se tratar de um indicador frágil, adotou-se uma estimativa baseada em conceito semelhante. Segundo ROSS (2002), os principais problemas do método do *payback* são:

- **Problema nº 1:** distribuição dos fluxos de caixa dentro do período de *payback*
Um dos problemas é ignorar a distribuição dos fluxos de caixa dentro do período de *payback*, o que demonstra que o *payback* é um método inferior ao VPL, pois este considera todos os fluxos de caixa do projeto corretamente.
- **Problema nº 2:** pagamentos após o período de *payback*
O método do *payback* ignora todos os fluxos de caixa que ocorrem após o momento de recuperação do investimento, ou seja, força os administradores a adotar uma orientação artificial de curto prazo que pode conduzir a decisões que não sejam as melhores.
- **Problema nº 3:** padrão arbitrário de período de *payback*
A definição do período de avaliação do *payback* é arbitrária e não possui diretriz para a sua definição. No caso específico desta análise, a escolha do período de avaliação do *payback* é de 10 anos, período definido com vida útil do ônibus elétricos.

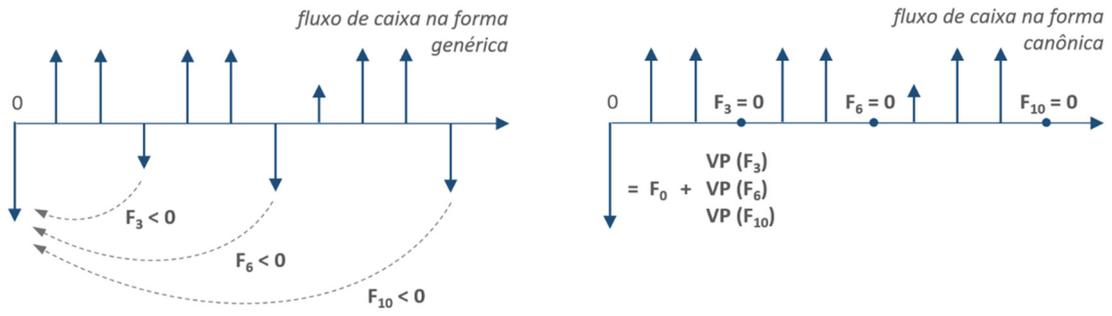
No *payback* descontado (período de recuperação com desconto), os fluxos de caixa estimáveis são descontados antes do cálculo do período de recuperação. A favor destes critérios reside o fato de sua simplicidade de aplicação, porém, desconsideram os fluxos de caixa que ocorrem após o período-limite (BREALEY, 2008). Segundo ROSS (2002), o *payback* descontado tem as mesmas deficiências básicas do método do *payback* simples tradicional: exige em primeiro lugar a escolha arbitrária de um período de corte na análise, e depois ignora todos os fluxos de caixa que ocorrem a partir desta data. Embora o *payback* descontado pareça-se em algum grau com o VPL, trata-se apenas de uma combinação pobre entre o critério do *payback* e o VPL.

Visando contornar tais limitações a fim de fornecer um indicador de natureza semelhante, algumas adaptações foram realizadas para elaborar uma estimativa de *payback* descontado, as quais residiram basicamente nas seguintes premissas:

- 1) Os fluxos de caixa são colocados em sua forma canônica, o que significa todas as saídas de caixa no momento zero e as entradas de caixa nos momentos seguintes;
- 2) Os custos ou saídas de caixa são trazidos a valor presente ao momento zero ($t = 0$);
- 3) Os custos ou saídas de caixa são substituídos pelo valor zero nos seus períodos originais;
- 4) Caso a soma dos valores presentes dos fluxos negativos e positivos seja < 0 , o *payback* é considerado inviável por ocorrer acima de 10 anos, ou seja, após a vida útil do projeto;
- 5) Caso esta soma seja > 0 , o *payback* é determinado pelo momento em que as receitas equilibram os custos (atribuídos de forma concentrada em $t = 0$);

A Figura 6 a seguir identifica o procedimento de adequação à forma canônica (padrão) de um fluxo genérico que apresenta alterações de sinal nos fluxos de caixa ao longo dos períodos. Os valores dos fluxos dos momentos $t = 3$ (F_3), $t = 6$ (F_6) e $t = 10$ (F_{10}) são trazidos a valor presente (VP) e posicionados no momento $t = 0$. Este procedimento dá origem a um fluxo inicial que passa a ser constituído do fluxo de caixa original (F_0) acrescido dos valores presentes de F_3 , F_6 e F_{10} , ou seja, VP (F_3), VP (F_6) e VP (F_{10}), conforme ilustrado à direita na Figura 6.

Figura 6 – Procedimento de transformação dos fluxos de caixa



Fonte: Elaboração Própria