



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
FACULDADE DE ARQUITETURA, ENGENHARIA E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

BRENDA MONTES CARDOSO FARAH

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
ÔNIBUS ELÉTRICO EM CUIABÁ COM BASE EM DADOS E EXPERIÊNCIAS
SIMILARES EM OUTRAS CIDADES**

CUIABÁ – MT
OUTUBRO, 2023

BRENDA MONTES CARDOSO FARAH

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE
ÔNIBUS ELÉTRICO EM CUIABÁ COM BASE EM DADOS E EXPERIÊNCIAS
SIMILARES EM OUTRAS CIDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador:
Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo

CUIABÁ – MT
OUTUBRO, 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

F219a Farah, Brenda Montes Cardoso.

Análise da viabilidade técnica e econômica para implantação de ônibus elétrico em Cuiabá com base em dados e experiências similares em outras cidades [recurso eletrônico] / Brenda Montes Cardoso Farah. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 23 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Jakson Paulo Bonaldo.

TCC (graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. 1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Estudo de Viabilidade. 3. Indicadores Financeiros. 4. Ônibus Elétrico.. I. Bonaldo, Jakson Paulo, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

DESPACHO

Processo nº 23108.080514/2023-32

Interessado: Brenda Montes Cardoso Farah

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA MONOGRAFIA: ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICO EM CUIABÁ COM BASE EM DADOS E EXPERIÊNCIAS SIMILARES EM OUTRAS CIDADES.

ALUNO: BRENDA MONTES CARDOSO FARAH

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso, como requisito para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 19 de Outubro de 2023.

Nota: **10,00**.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. **Jakson Paulo Bonaldo - Orientador;**

Profa. Dra. **Camila dos Anjos Fantin;**

Prof. Dr. **Roberto Perillo Barbosa da Silva**



Documento assinado eletronicamente por **JAKSON PAULO BONALDO, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 20/10/2023, às 10:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROBERTO PERILLO BARBOSA DA SILVA**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 20/10/2023, às 16:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **CAMILA DOS ANJOS FANTIN**, **Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 23/10/2023, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6258439** e o código CRC **198EFD13**.

Referência: Processo nº 23108.080514/2023-32

SEI nº 6258439

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à memória do meu avô Manuel (Vô Mané) e do Oseias Dourado.

*“Hard things will happen to us. We will recover,
we will learn from it, we will grow more resilient
because of it. And as long as we are fortunate
enough to be breathing, we will breathe in,
breathe through, breathe deep, and breathe out.”*

- Taylor Swift

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe, Helem, meu alicerce, que ao longo da minha jornada esteve sempre ao meu lado, oferecendo apoio incondicional, constante incentivo e profunda compreensão. Sua dedicação em sempre proporcionar o melhor para mim, sem nunca permitir que me faltasse algo, é um tesouro inestimável em minha vida.

À minha família por serem pilares de apoio, incentivo e amor incondicional. Juntos, trilhamos este caminho até aqui, transformando cada reencontro em preciosos capítulos de nossas vidas. Em especial minha madrinha Kelem, vó Célia, tio Guilherme, tia Lídia, meus primos Dalton e Dante, tia Carla e meu pai Cristiano.

A minha orientadora do projeto de pesquisa, professora Camila, pela confiança depositada em mim. Agradeço pelos preciosos conselhos, pela paciência em cada surto diferente, e pela dedicação de continuar o trabalho mesmo afastada para cuidar da Helena e Romeu (que já não aguenta mais escutar a gente falando de BRT). Sua presença e apoio foram cruciais nesta etapa.

Ao meu orientador, professor Jakson, pela contribuição com os resultados alcançados, e por sua disposição em oferecer ajuda e orientação a todo momento.

Ao meu namorado, Matheus Rezende, que nunca hesitou em oferecer amor, apoio e incentivo. Agradeço por compartilhar comigo os momentos de ansiedade e estresse, por nunca me permitir desistir, mesmo nas noites em claro dedicadas a fazer o projeto funcionar. Cada ida ao cinema, sorveteria, feirinha, sebos e game nights se tornaram memórias inesquecíveis. E a seus pais, Cleuza e José pelo suporte e carinho.

As minhas besties, Júlya (Dorothea) e Marianna (a outra metade do meu neurônio), mesmo a quilômetros de distância vocês estiveram ao meu lado e compartilharam cada batalha, choro, vitória e alegria.

Aos amigos que encontrei ao longo do caminho na UFMT, em especial Gustavo e Igor, por chegarem até aqui comigo e nunca hesitarem em ajudar, obrigado por cada história vivida.

A minha colega de pesquisa, Amanda, pela parceria e pelas aventuras nos congressos.

Ao pessoal de Orizona, pelo amparo durante a pandemia, e por sempre torcerem por mim a cada conquista. E a minha nova família de Brasília, Riba e Andressa, por me acolherem e estarem ao meu lado.

Aos professores e técnicos do curso de Engenharia Elétrica da UFMT, por cada ensinamento, e a todos que acreditaram no meu potencial!

RESUMO

FARAH, B.M.C. **Análise da viabilidade técnica e econômica para implantação de ônibus elétrico em Cuiabá com base em dados e experiências similares em outras cidades.** 2023. 24f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

Diante das políticas de descarbonização, a eletrificação veicular assume protagonismo como uma alternativa mais sustentável em comparação aos veículos convencionais de combustão. A cidade de Cuiabá foi selecionada como uma das cidades sede da Copa do Mundo de 2014, desencadeando a construção incompleta do Veículo Leve sobre Trilhos (VLT). Subsequentemente veio a aprovação do projeto do Ônibus de Trânsito Rápido (em inglês, BRT – *Bus Rapid Transit*), o qual será movido à eletricidade e foi proposto pelo Governo Estadual do Mato Grosso. Este artigo se concentra na avaliação da viabilidade técnica e econômica da substituição de ônibus movidos a diesel por ônibus elétricos com baterias. Os resultados destacam uma transição promissora para os veículos elétricos, apesar dos desafios iniciais, como os custos de capital (CAPEX) elevados e a limitada adoção da tecnologia no país. A análise revela um custo total de propriedade (TCO) 19,17% menor em comparação com o modal a diesel, devido à redução das despesas operacionais (OPEX) a longo prazo. Os indicadores financeiros acerca do investimento apontaram uma substituição financeiramente viável, apresentando um *payback* de 7 anos. Além disso, a incorporação de energia fotovoltaica para recarga da frota revela-se uma estratégia pertinente e eficaz, promovendo a sustentabilidade e eficiência no transporte público.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Estudo de Viabilidade. Indicadores Financeiros. Ônibus Elétrico.

ABSTRACT

FARAH, B.M.C. Analysis of the technical and economic feasibility for implementing electric buses in Cuiabá based on similar data and experiences in other cities. 2023. 24f.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2023.

In the face of decarbonization policies, electric vehicle electrification takes center stage as a more sustainable alternative compared to conventional combustion vehicles. The city of Cuiabá was selected as one of the host cities for the 2014 FIFA World Cup, triggering the incomplete construction of the Light Rail Transit (LRT) system. Subsequently, approval was granted for the Electric Bus Rapid Transit (BRT) project by the State Government of Mato Grosso. This article focuses on the assessment of the technical and economic feasibility of replacing diesel-powered buses with battery electric buses. The results highlight a promising shift toward electric vehicles, despite initial challenges such as high capital costs (CAPEX) and limited technology adoption in the country. The analysis reveals a 19.17% lower total cost of ownership (TCO) compared to the diesel mode, due to long-term reduction in operational expenses (OPEX). Financial indicators related to the investment point to a financially viable replacement, with a payback period of 7 years. Furthermore, the incorporation of photovoltaic energy for fleet charging proves to be a relevant and effective strategy, promoting sustainability and efficiency in public transportation.

Keywords: Electric Bus. Feasibility Study. Financial Indicators. Photovoltaic Solar Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Linhas do BRT dispostas no mapa de Cuiabá	17
Figura 2 - Local para a garagem da frota de ônibus elétricos	17
Figura 3 - Processo de modelagem dos indicadores financeiros	18
Figura 4 - Resultado dos indicadores financeiros.....	20
Figura 5 - Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica na TIR	20
Figura 6 - Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica no VPL.....	20
Figura 7 - Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica no TCO	20
Figura 8 - Custo mensal do abastecimento da frota com diesel x energia elétrica.....	21
Figura 9 - Custo mensal da energia elétrica x horas de carregamento	21
Figura 10 - Resultado dos indicadores financeiros com aluguel de GD	22
Figura 11 - Economia mensal com UFV	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeção da demanda de passageiros mensais por subsistema.....	17
Tabela 2 - Dados adquiridos para a simulação no software da EPE	20
Tabela 3 - Dados dos ônibus adquiridos para a simulação no software da EPE	20
Tabela 4 - Custo do diesel e da energia elétrica de acordo com as premissas estabelecidas ...	20
Tabela 5 - Número de viagens por carregamento para cada linha do BRT	21
Tabela 6 - Comparação dos indicadores financeiros do cenário normal e com a inserção de GD	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
COP	Conferência das Partes
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GD	Geração Distribuída
HSP	Horas de Sol Pleno
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
SINFRA	Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística de Mato Grosso
TIR	Taxa Interna de Retorno
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
UC	Unidade Consumidora
UFV	Usina Fotovoltaica
VE	Veículo Elétrico
VLТ	Veículo Leve sobre Trilhos
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO	15
II. ESTUDO DE CASO.....	16
III. METODOLOGIAS EMPREGADAS	18
A. Metodologia da avaliação técnico-econômica para implantação de ônibus elétrico	18
B. Metodologia do cálculo da potência do sistema fotovoltaico	19
IV. RESULTADOS	19
A. Avaliação técnico-econômica da implantação do BRT	19
B. Avaliação da viabilidade da geração fotovoltaica como suprimento da energia elétrica do BRT	21
V. CONCLUSÃO	22

ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA IMPLANTAÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICO EM CUIABÁ COM BASE EM DADOS E EXPERIÊNCIAS SIMILARES EM OUTRAS CIDADES

Brenda M. C. Farah, Jakson P. Bonaldo

Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, FAET/Departamento de Engenharia Elétrica, Cuiabá - MT
brendafarah2001@gmail.com, jakson.bonaldo@ufmt.br

Resumo - Diante das políticas de descarbonização, a eletrificação veicular assume protagonismo como uma alternativa mais sustentável em comparação aos veículos convencionais de combustão. A cidade de Cuiabá foi selecionada como uma das cidades-sede da Copa do Mundo de 2014, desencadeando a construção incompleta do Veículo Leve sobre Trilhos (VLT). Subsequentemente veio a aprovação do projeto do Ônibus de Trânsito Rápido (em inglês, BRT – *Bus Rapid Transit*), o qual será movido à eletricidade e foi proposto pelo Governo Estadual do Mato Grosso. Este artigo se concentra na avaliação da viabilidade técnica e econômica da substituição de ônibus movidos a diesel por ônibus elétricos com baterias. Os resultados destacam uma transição promissora para os veículos elétricos, apesar dos desafios iniciais, como os custos de capital (CAPEX) elevados e a limitada adoção da tecnologia no país. A análise revela um custo total de propriedade (TCO) 19,17% menor em comparação com o modal a diesel, devido à redução das despesas operacionais (OPEX) a longo prazo. Os indicadores financeiros acerca do investimento apontaram uma substituição financeiramente viável, apresentando um payback de 7 anos. Além disso, a incorporação de energia fotovoltaica para recarga da frota revela-se uma estratégia pertinente e eficaz, promovendo a sustentabilidade e eficiência no transporte público.

Palavras-Chave – Energia Solar Fotovoltaica. Estudo de Viabilidade. Indicadores Financeiros. Ônibus Elétrico.

ANALYSIS OF THE TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY FOR IMPLEMENTING ELECTRIC BUSES IN CUIABÁ BASED ON SIMILAR DATA AND EXPERIENCES IN OTHER CITIES

Abstract - In the face of decarbonization policies, electric vehicle electrification takes center stage as a more sustainable alternative compared to conventional combustion vehicles. The city of Cuiabá was selected as one of the host cities for the 2014 FIFA World Cup, triggering the incomplete construction of the Light Rail Transit (LRT) system. Subsequently, approval was granted for the Electric Bus Rapid Transit (BRT) project by the State Government of Mato Grosso. This article focuses on the assessment of the technical and economic feasibility of replacing diesel-powered buses with battery electric buses. The results highlight a promising shift toward electric vehicles, despite initial challenges such as

high capital costs (CAPEX) and limited technology adoption in the country. The analysis reveals a 19.17% lower total cost of ownership (TCO) compared to the diesel mode, due to long-term reduction in operational expenses (OPEX). Financial indicators related to the investment point to a financially viable replacement, with a payback period of 7 years. Furthermore, the incorporation of photovoltaic energy for fleet charging proves to be a relevant and effective strategy, promoting sustainability and efficiency in public transportation.

Keywords – Electric Buses. Feasibility Study. Financial Indicators. Photovoltaic Energy.

I. INTRODUÇÃO

O setor de transportes desempenha um papel fundamental na economia global, abrangendo, tanto o transporte de mercadorias, quanto a locomoção de indivíduos. O Acordo de Paris (2015), ratificado por 195 países na 21ª Conferência das Partes (COP-21), incluindo o Brasil, estabelece o objetivo de alcançar a sustentabilidade sem prejudicar o progresso. Os países signatários se comprometeram a orientar suas decisões e avanços tecnológicos rumo à sustentabilidade, para que os resultados não tenham impactos negativos nas futuras gerações [1].

Na fase final da COP-26 (2021), um dos temas em destaque foi a promoção de meios de transportes mais sustentáveis. Conforme documentado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o setor exerce uma influência significativa, contribuindo com aproximadamente 25% das emissões globais de gases de efeito estufa, principalmente devido à sua dependência de combustíveis fósseis [2].

A questão ambiental está conduzindo a indústria automobilística por uma nova rota tecnológica, em resposta à crescente demanda por mobilidade sustentável, representada pelos veículos elétricos (VEs). Países desenvolvidos já estão implementando políticas públicas com metas rigorosas. A título de exemplo, a União Europeia aprovou um projeto de regulamentação que proibirá a venda de veículos e utilitários leves novos com motores a gasolina e diesel a partir de 2035 [3]. Adicionalmente, estabeleceu-se a meta de que até 2030 todos os ônibus urbanos sejam modelos de emissão zero, com motores movidos a eletricidade ou a hidrogênio [4].

No cenário atual, a busca por exemplos de transição energética não se limita mais a países desenvolvidos. Um caso notável é o Chile, que detém a maior frota de ônibus elétricos na América Latina, com um total de 2043 veículos [5]. O país tem aproveitado seus abundantes recursos naturais e, o governo chileno, em parceria com empresas de energia, como

a *Enel Green Power*, está alcançando resultados satisfatórios na descarbonização do setor automotivo [6].

No cenário do Brasil, o país se destaca internacionalmente devido à sua matriz elétrica, composta em sua maioria (83,64%) por fontes limpas e renováveis [7]. Isso torna a adoção de veículos elétricos uma opção mais atraente, dada a substancial redução das emissões de CO₂ durante o uso desses veículos. No entanto, é importante destacar que essa transição ainda está em seus estágios iniciais, devido à falta de subsídios significativos para os consumidores e à escassez de políticas públicas eficazes.

Entre as ações em vigor destaca-se o Rota 2030, um programa concebido pelo Governo Federal destinado ao fortalecimento do setor automobilístico nacional a longo prazo e incentivos fiscais. Seu propósito central é aprimorar a produção de veículos com menor impacto ambiental, promovendo ao mesmo tempo a competitividade da indústria nacional. O segundo ciclo do programa, previsto para entrar em vigor no segundo semestre de 2023, concentra-se na ampliação da fabricação de veículos eletrificados no país, abrangendo inclusive ônibus elétricos [8].

Outro benefício é encontrado no Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e é denominado de Finame, o qual reduz os incentivos fiscais para a aquisição de ônibus e caminhões a diesel, estimulando indiretamente a adoção de VEs [9]. A BYD, fabricante de chassis 100% elétricos, alcançou um marco significativo ao ser credenciado pelo BNDES, permitindo que seus chassis e baterias sejam adquiridos por meio de financiamento, contribuindo para uma competição mais justa no mercado de ônibus elétricos no Brasil [10].

Atualmente, o Brasil conta com 394 ônibus elétricos em operação [5], sendo a grande maioria deles encontrada na cidade de São Paulo. Desde outubro de 2022, São Paulo proibiu a inclusão de novos ônibus movidos à óleo diesel acima de 12 metros. Durante a COP-26, a cidade estabeleceu a ambiciosa meta de adicionar 2,6 mil ônibus elétricos até 2024, o que representaria 20% da sua frota total [11]. A capital paulista lidera em direção à eletromobilidade no transporte público, mas outras cidades, como Curitiba, Salvador e o Rio De Janeiro, também estão trilhando o mesmo caminho.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnico-econômica da aquisição de ônibus elétricos para o projeto de Ônibus de Trânsito Rápido (BRT, em inglês *Bus Rapid Transit*), a ser implantado entre as cidades de Cuiabá e Várzea Grande, no Estado do Mato Grosso, com previsão de conclusão até o final de 2024. Este trabalho visa realizar uma análise comparativa entre os ônibus elétricos e os veículos a diesel, utilizando informações disponíveis na literatura e coletadas no município, considerando experiências similares em outras cidades. E por último, pretende-se validar a possibilidade do uso de energia solar fotovoltaica para o carregamento da frota.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na seção II, é apresentado o estudo de caso relacionado ao BRT e a cidade de Cuiabá; na seção III, é detalhada a metodologia utilizada para a avaliação técnico-econômica para implantação de ônibus elétrico e a metodologia do cálculo da potência do sistema fotovoltaico; na seção IV, são expostos e

discutidos os resultados encontrados; na seção V, são apresentadas as considerações finais e trabalhos futuros.

II. ESTUDO DE CASO

O BRT é um sistema de transporte de passageiros que combina a qualidade do transporte ferroviário com a flexibilidade do sistema de ônibus convencional [12]. É amplamente reconhecido como uma solução eficaz e econômica para áreas urbanas em todo o mundo, independentemente de seu nível de desenvolvimento. Além de fornecer um meio eficiente de transporte de pessoas, o BRT desempenha um papel fundamental na transformação das cidades, ao criar uma rede funcional de corredores exclusivos que oferece um sistema de transporte coletivo de alta qualidade, atendendo às necessidades diárias de deslocamento da população. Isso contribui para a melhoria da qualidade de vida urbana e a promoção de ambientes urbanos mais saudáveis e eficazes [13].

O sistema conhecido como é hoje teve sua origem na cidade de Curitiba, na década de 70, e atualmente está presente em mais de 200 cidades em todo o mundo. Para ser considerado um sistema BRT, ele deve atender a critérios específicos. Isso inclui a existência de faixas, corredores ou vias exclusivas para evitar congestionamentos, estações fechadas com cobrança de passagem antes do embarque e plataformas no mesmo nível das portas dos ônibus, tornando o acesso mais fácil e rápido. Além disso, as rotas dos ônibus devem ser projetadas com o mínimo de interrupções, como cruzamentos ou semáforos. É comum que os ônibus BRT sejam articulados, ou seja, mais longos, para acomodar um maior número de passageiros e portas de embarque.

Esse sistema representa uma solução de transporte público de alta capacidade, especialmente indicada para cidades com mais de 250 mil habitantes [14]. Devido ao seu custo comparativamente mais baixo e à menor necessidade de reconfiguração urbana em comparação com outras alternativas, se registrou um aumento significativo nos investimentos em sistemas BRT nas cidades do Brasil e do mundo ao longo dos últimos 10 anos.

No Brasil, o BRT de Belo Horizonte recebeu uma classificação ouro de acordo com o Padrão de Qualidade BRT [15], servindo como referência para outras cidades e países que subsequentemente direcionaram investimentos para essa infraestrutura, com o objetivo de aprimorar a mobilidade e as condições de transporte para seus cidadãos.

O alto custo inicial dos ônibus elétricos a bateria e sua infraestrutura de recarga é uma barreira para sua adoção no transporte coletivo. Isso levanta questões sobre financiamento sustentável para o transporte público. Para tornar os ônibus de baixa emissão mais competitivos, discutem-se novas regras de concessão, análises de custos operacionais, opções de financiamento e parcerias com empresas de energia. A inserção dos ônibus elétricos requer análises detalhadas e informações técnicas para escolhas sustentáveis do ponto de vista ambiental, social e econômico [16].

No ano de 2012, o estado de Mato Grosso foi escolhido como sede da Copa do Mundo de 2014, com Cuiabá como cidade anfitriã, planejando implementar um Sistema de Veículo Leve sobre Trilhos (VLT) para melhorar a mobilidade urbana entre Cuiabá e Várzea Grande. No entanto, devido à

má gestão dos recursos, o projeto foi suspenso, deixando obras inacabadas na cidade.

Em resposta à cobrança da população, em 2018, o governo estadual propôs uma alternativa ao VLT. O novo projeto consiste em cerca de 56 quilômetros de faixas dedicadas ao BRT, movido à eletricidade, com cinco linhas principais, três terminais e 46 estações. Essa infraestrutura será integrada ao sistema de mobilidade das cidades de Cuiabá, Várzea Grande (VG) e áreas intermunicipais [17].

O sistema de transporte público atual da cidade é composto por 369 veículos movidos a diesel, sendo que 75% deles estão equipados com ar-condicionado, os quais atendem a um total de 210 mil usuários por dia [18]. Embora algumas avenidas disponham de faixas exclusivas para ônibus durante os horários de pico, o sistema convencional enfrenta desafios de desempenho, resultando em um serviço caracterizado por lentidão, falta de conforto e baixa confiabilidade. Esses problemas são frequentemente associados a atrasos e superlotação.

A Tabela I apresenta a projeção de demanda de passageiros mensais por subsistema para o sistema de transporte coletivo com a inserção do BRT, conforme estudos realizados pela Secretaria de Estado de Infraestrutura e Logística de Mato Grosso (SINFRA) [17].

TABELA I
Projeção da demanda de passageiros mensais por subsistema

Sistema	Passageiros mensais
BRT	1.206.688
Municipal de Cuiabá	2.535.046
Municipal de Várzea Grande	606.284
Intermunicipal	260.955
Total	4.608.973

Está prevista a implantação de dois corredores BRT, um com três linhas e o outro com duas, incluindo linhas expressas e paradoras. As cinco rotas planejadas são apresentadas na Figura 1 e descritas abaixo:

1. Terminal Várzea Grande – Terminal CPA;
2. Terminal Várzea Grande – Terminal Centro;
3. Terminal CPA – Terminal Goiabeiras;
4. Terminal Coxipó – Terminal Goiabeiras;
5. Terminal Coxipó – Terminal Porto.

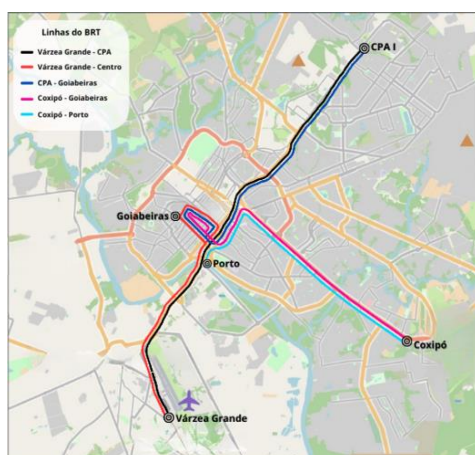


Fig. 1. Linhas do BRT dispostas no mapa de Cuiabá/VG.

O ônibus selecionado para análise, com base em sua experiência prévia em outros sistemas já implantados, é o modelo articulado D11A, desenvolvido pela empresa chinesa BYD para aplicações urbanas, especialmente para projetos de BRT. Este ônibus possui um comprimento de 23 metros e um chassi de piso alto. Ele é capaz de percorrer até 250 km com uma única carga de bateria e suporta um carregamento de 80 kW em corrente alternada, levando cerca de 6 horas para atingir sua carga máxima [19].

O ônibus elétrico articulado acaba sendo mais caro que o convencional devido ao seu tamanho e capacidade, para transportar um maior número de passageiros. Ele possui um comprimento maior e é dividido por seções conectadas por uma articulação, aumentando os custos de fabricação e montagem. Além de exigirem baterias maiores e mais potentes por conta do tamanho e peso maior, para percorrerem distâncias significativas, e o aumento da capacidade da bateria aumenta consequentemente o preço. No início do ano de 2023 ele custava em média R\$ 3.420.000,00 [19].

A escolha do método de recarga a ser especificado depende de vários fatores, como a capacidade da bateria, as características da rota, a capacidade de transporte de passageiros e o tamanho da frota de ônibus elétricos em operação. No cenário dos ônibus elétricos urbanos, três métodos de recarga são amplamente adotados [20]:

1. Tradicional *Plug-in*: Este método é considerado o mais econômico e é comumente utilizado para recarregar os ônibus durante a noite, nas garagens, fora dos horários de pico.
2. Pantográfica: Nesse caso, a conexão entre o ônibus e o carregador é geralmente realizada nos pontos de parada ao longo da rota ou nas estações terminais e possui uma potência mais elevada.
3. *Wireless* (Sem Fio): A recarga sem fio opera com potências superiores a 200 kW e permite que a recarga ocorra enquanto os passageiros embarcam no ponto de ônibus, embora seja menos comum pelo seu custo mais elevado.

Neste estudo, avaliou-se a recarga do tipo *plug-in*, que ocorre durante a noite. De acordo com a BYD, o custo da infraestrutura de recarga, é de R\$ 250.000,00 (US\$ 50.000,00).

No âmbito deste estudo de caso, a escolha do local para a nova garagem da frota de ônibus elétricos foi uma consideração de extrema importância. Optou-se pela antiga área do pátio do VLT, vista na Figura 2, situada ao lado do aeroporto e que permanece inacabada até os dias atuais. Esta localização estratégica serve como ponto final de duas rotas de grande relevância, além de estar relativamente próxima as outras linhas. Além disso, a área, com um total de aproximadamente 75.000 m², oferece amplo espaço para as operações de carregamento e manobras dos ônibus articulados, e já passou por adaptações durante a construção do VLT, incluindo a construção de um viaduto exclusivo para entrada e saída, garantindo a fluidez do tráfego. A escolha deste local como garagem representa uma decisão cuidadosamente ponderada em busca de otimização da operação da nova frota de ônibus elétricos.



Fig. 2. Local para a garagem da frota de ônibus elétricos.

III. METODOLOGIAS EMPREGADAS

A. Metodologia da avaliação técnico-econômica para implantação de ônibus elétrico

Para a análise de viabilidade deste estudo, é necessário utilizar métricas de avaliação econômico-financeira, uma vez que as decisões de investimento têm um impacto direto no desempenho futuro do projeto. Assim, a análise da substituição dos ônibus a diesel por veículos elétricos a bateria é conduzida por meio de indicadores financeiros, tais como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), a estimativa de *Payback* (tempo de retorno do investimento) e o Custo Total de Propriedade (TCO, em inglês *Total Cost of Ownership*).

O VPL avalia o potencial de lucro com base no investimento, trazendo todos os fluxos de caixa, tanto de entrada quanto de saída, ao presente para fins de comparação. A decisão se baseia na condição de que o VPL, representando a diferença entre o valor presente de todas as entradas e o valor presente de todas as saídas de caixas, seja maior que zero, indicando um investimento atrativo [21].

A TIR quantifica o retorno de um projeto de investimento como uma porcentagem. Ela é a taxa de desconto que tornaria o VPL igual a zero, indicando que as receitas se igualam as despesas, recuperando todos os recursos iniciais investidos. A TIR indica um investimento aceitável se for superior à taxa de retorno exigida, geralmente o custo de capital próprio [21].

O *Payback* é o período para recuperar o investimento inicial. Projetos com um período de retorno mais curto são preferíveis, pois reduzem o risco do capital investido. O *payback* é expresso em unidades de tempo, geralmente anos [21].

O TCO neste estudo abrange todas as despesas relacionadas à aquisição, operação e manutenção de um veículo e sua infraestrutura de abastecimento durante um período especificado. A análise desse indicador considera todos os custos ao longo do ciclo de vida útil de cada tecnologia e é dividida em dois componentes: os custos de capital (CAPEX, em inglês *Capital Expenditure*) e os custos operacionais (OPEX, em inglês *Operational Expenditure*) [22].

No cálculo do CAPEX, são considerados o investimento inicial relacionado à compra do veículo e os custos associados à infraestrutura de recarga. É importante evidenciar que, ao contrário dos veículos a diesel, nos quais a infraestrutura de abastecimento já está estabelecida e em operação, a implantação dos equipamentos de recarga para veículos elétricos demanda um investimento adicional além da aquisição dos próprios veículos [23].

Os custos do OPEX, são expressos em R\$/km e variam conforme a distância percorrida pelos veículos. Eles são determinados com base no desempenho dos ônibus (medido em km/L ou km/kWh, dependendo do tipo de motorização) e no preço da energia (R\$/L para diesel ou R\$/kWh para eletricidade). Esses custos são calculados anualmente com base na quilometragem anual percorrida (km/ano), resultando em custos totais em termos de R\$/ano [23].

Cidades como São Paulo limitam a vida útil de ônibus a diesel a 10 anos. Assim, a análise básica do TCO assume a mesma vida útil de 10 anos para ônibus elétricos, com a substituição da bateria coberta pela garantia do fabricante, sem

custos adicionais para as operadoras. Alguns fabricantes, como a BYD, oferecem garantias de bateria estendidas para toda a vida útil de 10 anos considerada na avaliação [22].

A Figura 3 representa o processo de modelagem para calcular o retorno por meio dos indicadores financeiros. O CAPEX é formado pelo custo de aquisição e pela infraestrutura de recarga, enquanto o custo de combustível, juntamente com o rendimento, compõe o custo de operação. O OPEX é a soma do custo de operação e do custo de manutenção. Ao trazer todos esses valores para o fluxo de caixa, incluindo lucros e despesas, calculamos o TIR, VPL, *Payback* e TCO.

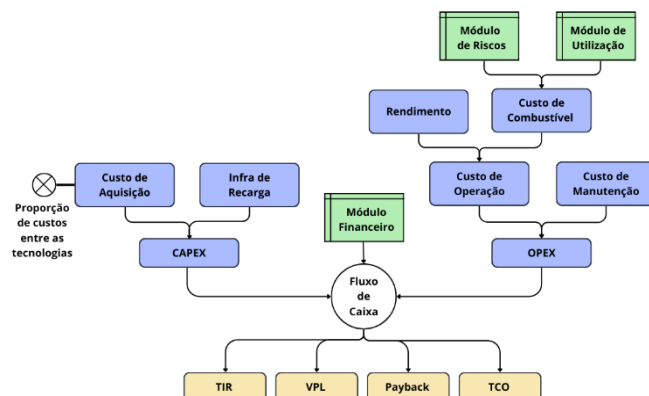


Fig. 3. Processo de modelagem dos indicadores financeiros.

A análise técnico-econômica é conduzida através da aplicação do Simulador de Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Os dados essenciais para a modelagem do problema são organizados em seis blocos, detalhados da seguinte forma [24]:

Bloco 1: Dados de utilização do sistema, incluindo a distância média percorrida (km/ano), o número de dias de operação por ano (dias/ano) e a quantidade de ônibus elétricos do projeto. Desta forma é calculado a distância diária média (km/dia).

Bloco 2: Preço do diesel (R\$/L).

Bloco 3: Preço da energia elétrica, que engloba a potência do carregador (kW), a duração da recarga (horas) e a tarifa elétrica (R\$/kWh).

Bloco 4: CAPEX, que inclui o custo de aquisição (R\$) e a infraestrutura de recarga (R\$) para ambos os modais. Assim é calculado um fator de custo relativo entre as tecnologias nesse bloco.

Bloco 5: OPEX, abrangendo o rendimento (km/L) (km/kWh) e o custo de manutenção (R\$/km). Os resultados incluem custo operacional (R\$/km) e o custo variável anual (R\$/ano). É possível optar pela escolha de aluguel de geração distribuída (GD), que concede um desconto de 10% quando selecionado.

Bloco 6: Financiamento, dividido em categorias para diesel e veículos elétricos. Os campos de preenchimento incluem o custo de capital próprio (%), o custo de financiamento (%), o percentual financiado (%), o custo ponderado de capital (%), o prazo de financiamento (anos) e o valor de revenda (%).

Uma vez que os dados são inseridos, a ferramenta realiza a simulação com todos os parâmetros especificados e fornece os

resultados dos indicadores financeiros relevantes para a análise de substituição das tecnologias.

Para finalizar, os custos de abastecimento são avaliados para ambos os tipos de combustíveis, a fim de comparar os gastos de uma frota elétrica e uma frota a diesel. O cálculo do custo mensal para o carregamento da frota leva em consideração a potência do carregador, o número de veículos, horas de carregamento, a tarifa da energia elétrica e a quantidade de dias rodados no mês, conforme demonstrado na Equação 1.

$$\begin{aligned} \text{Custo Mensal da Energia Elétrica [R\$]} &= \text{Potência do carregador [kW]} \times \text{Nº de veículos} \times \text{Horas de recarga [h]} \\ &\times \text{Tarifa elétrica [R\$/kWh]} \times \text{Dias no mês} \end{aligned} \quad (1)$$

Para o custo do abastecimento da frota convencional é utilizado o preço do diesel, a distância média percorrida por ônibus, o rendimento, o número de veículos e a quantidade de dias rodados no mês, conforme apresentado na Equação 2.

$$\begin{aligned} \text{Custo Mensal do Diesel [R\$]} &= \frac{\text{Preço do diesel [R\$/L]} \times \text{Nº de veículos} \times \text{Dias no mês}}{\text{Distância média diária [km]} \times \text{Rendimento [km/L]}} \end{aligned} \quad (2)$$

B. Metodologia do cálculo da potência do sistema fotovoltaico

A transição da frota de ônibus movidos a diesel para elétricos aumenta, significativamente, a demanda por energia elétrica no local. Portanto, é essencial explorar fontes sustentáveis para atender a essa demanda de forma eficaz e ecologicamente responsável.

Uma das abordagens para suprir a energia elétrica necessária aos ônibus elétricos é a utilização da geração solar fotovoltaica. Para avaliar a viabilidade do suprimento de energia elétrica consumida pelos ônibus elétricos, são realizados cálculos específicos conforme as equações 3 a 9 [25-28].

Inicialmente, calcula-se a irradiação direta solar diária média (DNI, em inglês *Direct Normal Irradiance*). Com base nessa informação, determina-se o número de horas de sol pleno (HSP) no local a ser instalado o sistema. As horas de sol pleno representam a quantidade diária de horas em que a irradiação solar em um determinado local atinge 1000 W/m², conforme definido pela Equação 3.

$$\text{HSP [h/dia]} = \frac{\text{DNI [kWh/m}^2\text{]}}{1 \text{ [kW/m}^2\text{]}} \quad (3)$$

O consumo diário total da frota em kWh é calculado multiplicando-se a potência do carregador (em kW) pelo número de horas de recarga e pela quantidade de carregadores disponíveis, representado pela Equação 4.

$$\text{Consumo Diário Total [kWh]} = \text{Potência do carregador [kW]} \times \text{Horas de recarga [h]} \times \text{Quantidade de carregadores} \quad (4)$$

Com base no consumo diário total, é calculada a potência necessária do sistema fotovoltaico (P_{sf}) em kWp, utilizando o rendimento (n) e o HSP, conforme Equação 5. A eficiência de uma placa solar, também chamada de rendimento, é uma métrica que representa a proporção entre a energia solar incidente sobre a placa e a eletricidade gerada por ela, expressa em forma de porcentagem.

$$P_{sf} [\text{kWp}] = \frac{\text{Consumo diário total [kWh]}}{n \times \text{HSP}} \quad (5)$$

O número de painéis (N_p) necessários para atender à potência desse sistema pode ser determinado dividindo a potência do sistema pela capacidade da placa fotovoltaica escolhida (P_{placa}) em Wp, conforme descrito na Equação 6.

$$N_p = \frac{P_{sf} [\text{Wp}]}{P_{placa} [\text{Wp}]} \quad (6)$$

Após calcular o número de painéis necessários, o próximo passo envolve determinar a área total (A_T) a ser destinada para a instalação dos painéis solares. Isso é feito multiplicando a área de cada placa (A_{placa}) escolhida pelo número total de painéis, conforme indicado na Equação 7.

$$A_T [\text{m}^2] = A_{placa} [\text{m}^2] \times N_p \quad (7)$$

Finalmente, para determinar a produção diária do sistema (P_{DS}) em kWh, levando em consideração a possibilidade de carregamento parcial da frota, é necessário multiplicar a potência do sistema pelo HSP e pelo rendimento, como ilustrado na Equação 8.

$$P_{DS} [\text{kWh}] = \frac{N_p \times P_{placa} \times \text{HSP} \times n}{1000} \quad (8)$$

A potência da usina fotovoltaica (UFV), em kW, é determinada pela divisão da produção diária do sistema pelo número de horas de sol pleno, conforme expresso na Equação 9.

$$P_{UFV} [\text{kW}] = \frac{P_{DS} [\text{kWh}]}{\text{HSP [h]}} \quad (9)$$

Na seção IV, apresentam-se os resultados obtidos a partir dos cálculos apresentados nesta seção.

IV. RESULTADOS

A. Avaliação técnico-econômica da implantação do BRT

Os dados utilizados na simulação no software da EPE foram obtidos por meio de pesquisas relacionadas a experiências similares em outras cidades e contato direto com empresas locais [17,19,23,29-38]. Destaca-se que a coleta de dados ocorreu ao longo de um período abrangente, compreendido entre setembro de 2022 e abril de 2023.

A Tabela II apresenta os principais dados relacionados à utilização do sistema, preços de combustível e financiamento, enquanto a Tabela III fornece informações detalhadas sobre os ônibus utilizados como objetos de estudo. A tarifa da energia elétrica leva em consideração a modalidade tarifária horária azul fora de ponta do subgrupo A4, que se trata do grupo de alta tensão de 13,8 kV, com os impostos PIS, COFINS e ICMS referentes a outubro de 2022.

TABELA II

Dados adquiridos para a simulação no software da EPE

Dados	Diesel	Elétrico
Distância Média Anual [km/ano]	73.649	73.649
Dias de Operação [dias/ano]	365	365
Quantidade Ônibus Elétricos	-	50
Preço do diesel [R\$/L]	5,76	-
Tarifa da Energia Elétrica [R\$/kWh]	-	0,490497
Custo Capital Próprio [%]	12,5	12,5
Custo Financiamento [%]	6,8	6,8
Percentual Financiado [%]	100	100
Custo Ponderado de Capital [%]	4,49	4,49
Prazo Financiamento [anos]	5	8
Valor de Revenda [%]	60	36

TABELA III

Dados dos ônibus adquiridos para a simulação no software da EPE

Dados	Volvo 21m	BYD D11A 23m
Custo de Aquisição [R\$]	1.800.000,00	3.420.000,00
Infraestrutura de Recarga [R\$]	-	250.000,00
Potência do Carregados [kW]	-	80
Duração da Recarga [h]	-	6
Rendimento [km/L] [km/kWh]	1,213	0,4844
Custo de Manutenção [R\$/km]	0,98	0,61

A simulação resulta nos indicadores financeiros apresentados na Figura 4.

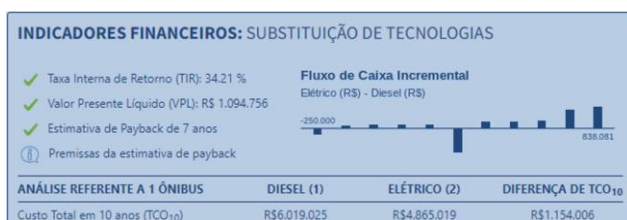


Fig. 4. Resultado dos indicadores financeiros.

O custo da infraestrutura de recarga é a primeira despesa considerada no fluxo de caixa, devido à não inclusão no financiamento. Os resultados indicam um VPL positivo de R\$ 1.094.756,00 e uma TIR de 34,21%, demonstrando a viabilidade e validade do investimento, além de apresentar uma estimativa de *payback* de 7 anos. É importante ressaltar que esses valores se aplicam a um único ônibus. Neste cenário, o TCO de um ônibus elétrico articulado é 19,17% menor do que o TCO de um ônibus a diesel articulado ao longo de 10 anos.

Os custos operacionais analisados desempenham um papel fundamental na simulação. Gastos com diesel e energia elétrica são essenciais para as empresas de transporte público, uma vez que variações nesses custos podem afetar substancialmente as receitas, tarifas e a decisão de adotar

ônibus elétricos. Para fins de comparação e análise dos indicadores, são propostas hipóteses de aumento de 5%, 10% e 15% nos preços do diesel e da energia elétrica, conforme apresentado na Tabela IV.

TABELA IV

Custo do diesel e da energia elétrica de acordo com as premissas estabelecidas

Hipóteses	Preço do diesel [R\$/L]	Preço da tarifa de energia elétrica [R\$/kWh]
Atual	5,760	0,490497
5%	6,048	0,515021
10%	6,336	0,539546
15%	6,624	0,564071

A simulação é conduzida repetidamente para cada um dos casos das hipóteses propostas, e os resultados que demonstram o impacto das variações nos preços dos combustíveis podem ser observados nas Figuras 5, 6 e 7.

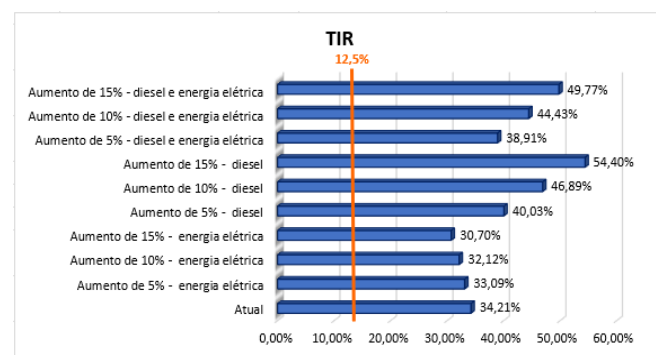


Fig. 5. Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica na TIR.

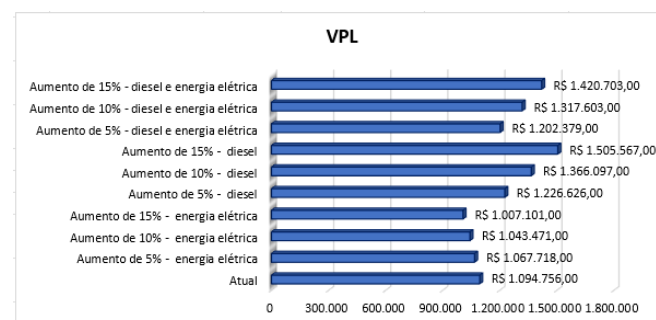


Fig. 6. Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica no VPL.

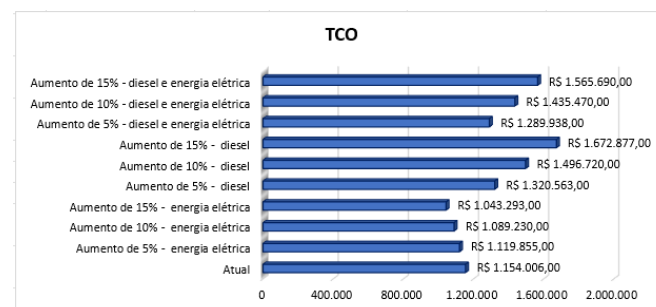


Fig. 7. Impacto do aumento do preço do diesel e da energia elétrica no TCO.

É evidente que o aumento no preço do diesel favorece o investimento em ônibus elétricos em todas as situações analisadas, mesmo quando há um aumento tarifário equivalente, em termos percentuais, ao aumento do preço do diesel. Por outro lado, o aumento no custo da energia elétrica afeta negativamente o investimento, somente na eventualidade de não ocorrer um aumento proporcional do diesel.

Portanto, mantendo o preço do diesel constante, identifica-se que o limite crítico para a tarifa de energia elétrica, tornando o investimento financeiramente inviável, é de R\$/kWh 1,065. Nesse ponto, a TIR se iguala à taxa de custo de capital próprio de 12,5%, que representa a expectativa de retorno do investimento.

De acordo com a SINFRÁ, na cidade de Cuiabá, uma frota de 286 ônibus convencionais realiza 6.334 viagens por dia, resultando em uma média de 22 viagens por ônibus diariamente [17]. Para avaliar a capacidade dos ônibus elétricos em atender a essa demanda ou a necessidade de recarregar a bateria para concluir as viagens, é apresentado na Tabela V o cálculo da quantidade de viagens que uma única carga de bateria suporta em cada rota.

TABELA V

Número de viagens por carregamento para cada linha do BRT

Linha	Extensão (Km)	Nº de viagens/Carregamento
VÁRZEA GRANDE – CPA	10,6	24
VÁRZEA GRANDE - CENTRO	15,0	17
CPA - GOIABEIRAS	11,1	23
COXIPÓ - PORTO	11,0	23
COXIPÓ - GOIABEIRAS	9,8	25

Os resultados indicam que, na maioria das linhas (80%), os ônibus elétricos conseguem atender o número de viagens diárias sem a necessidade de recarga, exceto na linha de maior extensão (15 km), onde uma recarga ao longo do dia seria necessária para alcançar a média de viagens diárias.

O gasto mensal com energia elétrica para o abastecimento da frota, conforme descrito na Equação 1, totaliza R\$ 353.157,84. Em contrapartida, o custo mensal de abastecimento para uma frota equivalente de ônibus a diesel, calculado pela Equação 2, atinge R\$ 1.438.812,86, retratado na Figura 8. O valor do kW para demanda contratada fora de ponta é de R\$ 36,90657, como os 50 carregadores de 80 kW serão utilizados ao mesmo tempo, é necessária a contratação de uma demanda de 4 MW, totalizando um custo fixo de R\$ 147.626,28 mensal. Isso resulta em uma economia mensal de R\$ 938.028,74 com a substituição das tecnologias.

CUSTO MENSAL DE ABASTECIMENTO DA FROTA

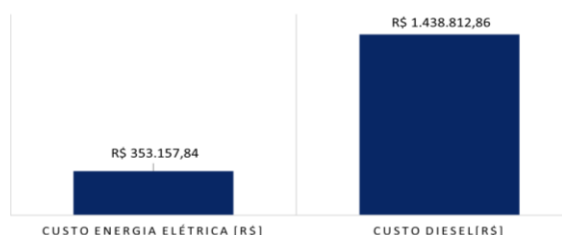


Fig. 8. Custo mensal do abastecimento da frota com diesel x energia elétrica.

O resultado apresentado na Figura 8 corresponde ao custo mensal de abastecimento para uma frota de ônibus elétricos que recebe apenas uma recarga por dia. No entanto, na Figura 9, é projetado o custo mensal para os 50 ônibus, considerando diferentes cenários de recarga, como uma recarga completa de 6 horas mais uma recarga de 1 hora ao longo do dia, em seguida mais duas horas, e assim por diante, para avaliar a viabilidade além do cenário de uma única recarga.

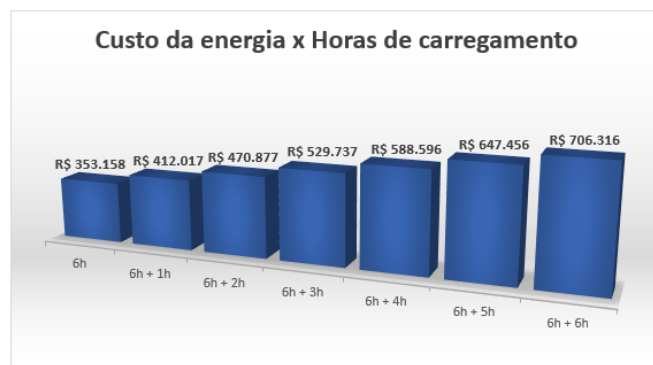


Fig. 9. Custo mensal da energia elétrica x horas de carregamento.

Dessa forma, observa-se que o custo aumenta com a extensão das horas de carregamento ao longo do dia. No entanto, em nenhum momento isso inviabiliza o investimento, uma vez que o custo do abastecimento a diesel é de R\$ 1.438.812,86. Mesmo no cenário mais extremo (6h + 6h), ainda há uma economia mensal de R\$ 584.870,90. Portanto, recargas durante horários fora de pico podem ser realizadas conforme necessário, sem comprometer a viabilidade ou a lucratividade do sistema.

B. Avaliação da viabilidade da geração fotovoltaica como suprimento da energia elétrica do BRT

Para prosseguir com a análise dos resultados obtidos deste cenário, destaca-se que é realizada a validação da energia fotovoltaica para atender a demanda, considerando o carregamento simultâneo dos 50 ônibus elétricos articulados, com apenas uma carga diária.

Através do *software Sundata* [28] é obtido o DNI, o que resulta em uma irradiação solar de 5,13 h/dia de HSP, conforme a Equação 3. Com base nos dados previamente mencionados, o consumo diário total de energia totaliza 24.000 kWh. Com um rendimento médio de 75%, a potência do sistema fotovoltaico resultante é de 6.237 kWp, calculada a partir da Equação 5. Portanto, com base na potência do painel Titan RDM120-8-600BMDG de 600 Wp, é calculado que são necessários 10.395 painéis, utilizando a Equação 6. Para suprir 100% de energia da frota é calculada a área total ocupada pelos painéis, considerando que a área da placa é de 2,83m², conforme Equação 7, a área total requerida é de aproximadamente 30.000 m².

A potência total da UFV, calculada conforme Equação 9, totaliza 4,68 MW para atender ao carregamento completo da frota. Entretanto, é importante destacar que as recentes alterações nas regulamentações de Micro e Mini Geração Distribuída, de acordo com o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei 14.300/22) Art. 1º inciso XIII, estabelecem

um limite máximo de potência de 3 MW para fontes não despacháveis, conforme regulamentação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), anteriormente definido em 5 MW [39]. A energia solar fotovoltaica é considerada uma fonte intermitente, o que significa que sua geração não pode ser controlada. Portanto, de acordo com essas regulamentações, torna-se inviável atender ao carregamento completo da frota simultaneamente por meio da energia fotovoltaica.

Para cumprir com a resolução que limita a potência máxima instalada em 3 MW, é recalculada a produção diária da UFV utilizando a Equação 9, resultando em um total de 15.390 kWh. Com esses novos parâmetros, o sistema fotovoltaico passa a ter uma potência de 4.000 kWp, o que implica a necessidade de 6.667 painéis solares, os quais ocupam uma área total de aproximadamente 19.000 m².

Através da ferramenta de medição do Google Maps, é determinado que a área atualmente coberta por telhados possui cerca de 13.000 m², acarretando a necessidade de uma ampliação de 6.000 m² para acomodar os painéis solares, o que não deve ser problema, dada a extensão total do pátio.

Os resultados demonstram que o sistema de energia solar proporciona o suprimento de 64,12% da energia total consumida pela frota de 50 ônibus elétricos. Nesse sentido, de acordo com as diretrizes da ANEEL, a fonte renovável permite o carregamento parcial da frota. Portanto, a implementação da energia solar fotovoltaica como parte do sistema de carregamento demonstra um papel significativo para a redução da demanda energética, mas requer complementos para atender completamente a frota.

Escolhendo a opção de aluguel de GD no software da EPE, é obtido os seguintes indicadores financeiros para este cenário, ilustrados na Figura 10.



Fig. 10. Resultado dos indicadores financeiros com aluguel de GD.

A utilização de energia limpa torna o investimento nessa tecnologia mais atrativo. Comparando com o cenário de resultados em A, os indicadores mostram um aumento evidente favorecendo o investimento, conforme detalhado na Tabela VI.

TABELA VI
Comparação dos indicadores financeiros do cenário normal e com a inserção de GD

Indicador Financeiro	Cenário Normal	Com inserção de GD
TIR [%]	34,21	36,73
VPL [R\$]	1.094.756,00	1.153.801,00
Payback [anos]	7	7
Diferença de TCO [%]	19,17	20,41

Para incorporar a instalação das placas fotovoltaicas no abastecimento da frota, seu custo deve ser incluído no CAPEX dos ônibus elétricos. Essa instalação, devido ao seu alto custo, representa um valor negativo no fluxo de caixa inicial da projeção econômica. Através de uma cotação em uma empresa local de Cuiabá, o custo total para a implementação desse projeto foi estimado em R\$ 11.330.306,70. A projeção do *payback* dessa tecnologia considera apenas a economia gerada pela energia solar, uma vez que os outros 35,88% restantes serão fornecidos pela concessionária, como demonstrado na Figura 11.

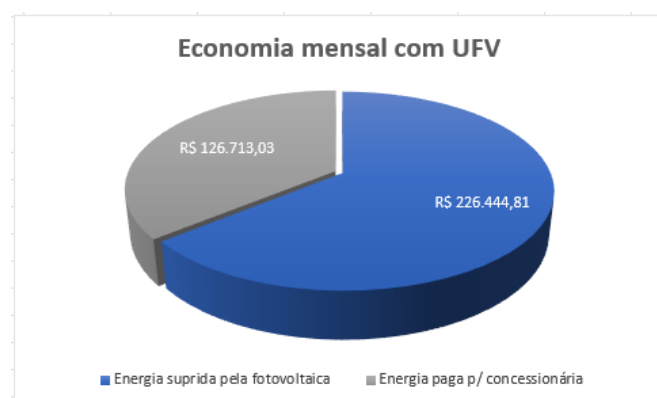


Fig. 11. Economia mensal com UFV.

O cálculo do tempo que o investimento começa a gerar lucro é obtido dividindo o custo do investimento pela economia mensal gerada pela fotovoltaica, resultando em um *payback* de 4,2 anos. Essa métrica é favorável, uma vez que indica que o sistema começaria a gerar lucro em menos da metade do período de estudo de 10 anos.

É importante enfatizar que a presença de fontes de geração nos centros de consumo pode provocar problemas nas redes elétricas, incluindo o fluxo reverso, que é quando a corrente flui na direção oposta à operação normal do sistema. Isso pode resultar em sobrecarga, desequilíbrio de tensão, desempenho inadequado dos dispositivos de proteção e até interrupções no fornecimento, prejudicando tanto as distribuidoras quanto os consumidores.

A ANEEL estabeleceu critérios para aprovação de novas conexões de micro e minigeração, de acordo com a Resolução Normativa ANEEL nº 1.000/2021 [39]. Antes as distribuidoras eram obrigadas a aprovar todas as solicitações de conexão de geração distribuída, incluindo sistemas de energia solar. No entanto, com essa nova resolução, as distribuidoras devem identificar situações de inversão de fluxo de potência e apresentar alternativas viáveis para resolvê-las.

Para uma análise completa, é essencial conduzir um estudo detalhado sobre o impacto da GD na rede local, visto que depende-se de diversos fatores, incluindo a capacidade de potência fotovoltaica gerada, as características de consumo das Unidades Consumidoras (UCs), as propriedades físicas da infraestrutura de distribuição e o nível de carregamento do transformador.

V. CONCLUSÃO

No contexto atual de desafios ambientais e redução de emissão de gases, a transição para ônibus elétricos representa

uma mudança fundamental no cenário do transporte público. Este artigo foi conduzido com foco específico na realidade de Cuiabá e examinou de forma abrangente os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da adoção do BRT elétrico como uma alternativa sustentável para a cidade.

Os resultados dos indicadores financeiros revelaram que a transição para ônibus elétricos pode ser uma decisão financeiramente vantajosa a longo prazo. O VPL mostrou que essa mudança apresenta um potencial de lucro, indicando que o investimento inicial pode ser recuperado e superado ao longo do tempo. A TIR indicou que o projeto possui uma taxa de retorno atraente, superando as taxas de custo de capital próprio. O período de *payback* demonstrou que as operadoras do transporte público podem começar a colher benefícios financeiros em um horizonte de tempo relativamente curto. Ademais, os resultados do TCO indicaram que, apesar do custo de aquisição inicial elevado, os custos operacionais e de manutenção mais baixos ao longo do tempo compensam o investimento. Portanto, a eletrificação da frota de ônibus para Cuiabá não apenas traz benefícios ambientais, como também é uma escolha economicamente vantajosa.

Além disso, a integração de um sistema fotovoltaico na infraestrutura de recarga apresenta uma perspectiva adicional de economia, reduzindo os custos de energia elétrica associados a essa frota, contribuindo ainda mais para a viabilidade do projeto, mesmo não suprimindo 100% da energia consumida.

Melhorar e renovar a frota de ônibus, incentivando o uso de veículos elétricos leva à melhoria da qualidade do ar, reduz a poluição sonora, torna o transporte público mais moderno e confortável, atrai a população e alinha o futuro da mobilidade da cidade à tendência crescente no Brasil e no resto do mundo.

Trabalhos futuros poderão abordar o cálculo da tarifa dos usuários do BRT, a viabilidade de expandir a frota de ônibus elétricos para atender a uma porcentagem maior da demanda do transporte público da cidade, assim como realizar um estudo mais abrangente sobre os efeitos da GD na rede elétrica no local.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a FAPEMAT pelo financiamento deste projeto (FAPEMAT.0000428/2022).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ministério da Ciência, Tecnologia Inovações e Comunicações, Governo Federal. *Acordo de Paris*. 2017. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf.
- [2] Nações Unidas Brasil. *COP26 discute setor de transportes e propostas para texto final*. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/158058-cop26-discute-setor-de-transportes-e-propostas-para-texto-final>.
- [3] News European Parliament. *Fit for 55: Zero CO2 emissions for new cars and vans in 2035*. 2023. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20230210IPR74715/fit-for-55-zero-co2-emissions-for-new-cars-and-vans-in-2035>.
- [4] ICCT (International Council on Clean Transportation). *Europe's electric truck market surges, while electric buses power ahead*. 2023. Disponível em: <https://theicct.org/europes-electric-truck-market-surges-aug23/#:~:text=To%20bring%20that%20technology%20to,be%20zero-emissions%20in%202030>.
- [5] E-Bus Radar. *Buses eléctricos em América Latina*. 2023. Disponível em: <https://www.ebusradar.org/es/>.
- [6] Martins, M. L. de O., & Sessa, C. B. *Mapeamento de Iniciativas e Direcionamentos para a Difusão da Mobilidade Elétrica: Os Casos Chileno e Brasileiro*. 2023. Disponível em: https://doity.com.br/media/doity/submissoes/artigo-0305cb2636e4023b8cebc8c4ce226b99656bbaea-segundo_arquivo.pdf.
- [7] MME (Ministério de Minas e Energia). *Primeiro semestre de 2023 tem crescimento de 5,1 GW na matriz elétrica brasileira*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/primeiro-semester-de-2023-tem-crescimento-de-5-1-gw-na-matriz-eletrica-brasileira>.
- [8] Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Rota 2030 - Mobilidade e Logística*. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>.
- [9] BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social). *BNDES divulga novas políticas operacionais e condições de financiamento*. 2017. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-divulga-novas-politicas-operacionais>.
- [10] BYD. *A BYD oferece assessoria total e sem custo no seu credenciamento Finame*. 2023. Disponível em: <https://www.bydenergia.com/finame.html>.
- [11] Diário do Transporte. *Frota de ônibus elétricos prevista para São Paulo movimentar maior parte da produção de fábrica de São Bernardo do Campo (SP)*. 2023. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2023/06/07/video-frota-de-onibus-eletricos-prevista-para-sao-paulo-movimentar-maior-parte-da-producao-de-fabrica-de-sao-bernardo-do-campo-sp/>.
- [12] Levinson, H.; S. Zimmerman; J. Clinger; S. Rutherford; R. L. Smith; J. Cracknell e R. Soberman (2003) *Bus Rapid Transit, Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit*. Transit Cooperative Research Program: Report 90, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- [13] Wright, L. e W. Hook (2007) *Bus Rapid Transit Planning Guide* (3ª ed.). Institute for Transport and Development Policy, New York, NY, USA.
- [14] NTU (Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos). *Anuário 2022-2023*. 2023. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638272765778419772.pdf>.
- [15] ITDP (Institute for Transformation & Development Policy). *Avaliação BRT MOVE Cristiano Machado*. 2016.

- Disponível em: <https://itdpbrasil.org/brt-cristianomachado/>.
- [16]IT-EPE-DEA. Estudo de caso para a introdução de ônibus elétricos no município do Rio de Janeiro. 2020.
- [17]SINFRA. Estudos Operacionais e Econômicos de Eixo Estrutural de Transporte Coletivo Cuiabá e Várzea Grande. 2020.
- [18]Prefeitura de Cuiabá. *Avenidas em Cuiabá receberão faixas exclusivas de ônibus, o que garantirá fluidez e rapidez ao transporte público*. 2023. Disponível em: <https://www.cuiaba.mt.gov.br/mobilidade-urbana/avenidas-em-cuiaba-receberao-faixas-exclusivas-de-onibus-o-que-garantira-fluidez-e-rapidez-ao-transporte-publico/30600>
- [19]BYD. *The BYD D11A*. 2020. Disponível em: http://www.byd.ind.br/2020/wp-content/uploads/2020/12/BYD-D11A-v.-7.0-2020_web.pdf.
- [20]BNEF (Bloomberg Finance L.P.). *Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2*. 2018. Disponível em: <https://shre.ink/nTRg>.
- [21]Diniz Júnior, O. G., & Torres, I. A. *As contribuições do valor presente líquido, da taxa interna de retorno, do payback e do fluxo de caixa descontado para avaliação e análise de um projeto de investimento em cenário hipotético*. UNOPAR Científica. Ciências Gerenciais, 3(1). 2013. <https://doi.org/10.5102/un.gti.v3i1.2277>
- [22]SLOWIK, P. et al. *Avaliação internacional de políticas públicas para eletromobilidade em frotas urbanas. ministério da indústria*. Comércio Exterior e Serviços, Brasília, DF. 2018.
- [23]EPE, A. O. d. C. et al. *Avaliação técnico-econômica de Ônibus elétrico no brasil*, nota técnica. 2020.
- [24]EPE. *Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico*. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/simulador-para-avaliacao-de-viabilidade-de-onibus-eletrico>.
- [25]XAVIER, N. F. et al. *Dimensionamento de potência de geração fotovoltaica visando consumidores do grupo a*. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.
- [26]FERREIRA, A. F.; ROSA, G. P. *Geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos para consumidores comerciais de pequeno porte*. Revista Eletrônica TECCEN, v. 12, n. 2, p. 83–93, 2019.
- [27]MATOS, Júlia Ribeiro. *Estudo de viabilidade econômica para utilização de ônibus elétrico no transporte público da Cidade de Porto Alegre - RS*. UFRGS/ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.
- [28]CRESESB, C. de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. B. *Potencial Solar - SunData v 3.0*. 2018. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/sundata/>.
- [29]Prefeitura de Cuiabá. *ARSEC (Agência Municipal de Regulação dos Serviços Públicos Delegados de Cuiabá)*. Disponível em: <https://www.arsec.cuiaba.mt.gov.br>.
- [30]ANEEL. *Processos Tarifários*. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/calendario-de-atividades/processos-tarifarios>.
- [31]ENERGISA. 2022. Disponível em: <https://www.energisa.com.br>.
- [32]SANTILIO, Fabricio Parra. *Material de Aula de Medidas Elétricas*.
- [33]CAIXA ECONÔMICA FEDERAL/FGTS. *Manual de fomento do programa Pró-transporte*. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/wp-content/uploads/2020/06/MFOM_PRO_TRANSPORTE_VERSAO_3_21.pdf.
- [34]CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. *Pró-transporte*. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/infraestrutura-saneamento-mobilidade/pro-transporte/Paginas/default.aspx>.
- [35]IBGE. *IPCA - Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplio.html?=&t=series-historicas>.
- [36]E. Barassa y otros, *Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono, Documentos de Projetos (LC/TS.2022/9)*, Santiago, Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2022.
- [37]GONÇALVES, Daniel Neves Schmitz. *Comparativo de consumo de combustível entre ônibus equipados com aparelhos de ar condicionado e ônibus convencionais*. 2016. COPPE/UFRJ. Disponível em: http://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/rel_fin_al_rend_ener_03_03_16.pdf.
- [38]ANTP (Associação Nacional de Transportes Públicos). Disponível em: <http://www.antp.org.br>.
- [39]ANEEL. *Resolução Normativa ANEEL Nº 1000*. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>.