

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Laís Cassanta Vidotto

Estudo de viabilidade econômica do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC: Ônibus elétrico associado a energia solar e armazenamento de energia com baterias de segunda vida

Florianópolis

2021

Laís Cassanta Vidotto

Estudo de viabilidade econômica do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC: Ônibus elétrico associado a energia solar e armazenamento de energia com baterias de segunda vida

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Rütther.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Vidotto, Laís

Estudo de viabilidade econômica do eBus do laboratório
Fotovoltaica UFSC: Ônibus elétrico associado a energia
solar e armazenamento de energia com baterias de segunda
vida / Laís Vidotto ; orientador, Ricardo Rüther, 2021.
74 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Ônibus elétrico.
3. Sistemas fotovoltaicos. 4. Armazenamento de energia em
baterias. 5. Viabilidade econômica. I. Rüther, Ricardo. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Laís Cassanta Vidotto

Estudo de viabilidade econômica do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC: Ônibus elétrico associado a energia solar e armazenamento de energia com baterias de segunda vida

Florianópolis, 1 de Novembro de 2021.

Prof. (a) Maria Elisa Magri, Dr.
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Ricardo Rüther, Phd
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng^a. Aline Kirsten Vidal de Oliveira, Doutoranda
Avaliadora,
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^ª. Carla Tognato de Oliveira, Doutoranda
Avaliadora,
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico à minha família, especialmente ao meu avô Nico Vidotto (*in memoriam*), grande exemplo de amor e dedicação que segue presente por todos os ensinamentos que levo para a vida.

AGRADECIMENTOS

A finalização deste trabalho encerra uma etapa muito importante da minha vida, e sou grata a todos que fizeram parte desta jornada.

Agradeço principalmente aos meus pais Sandra e Juarez Vidotto, pelo apoio incondicional, por serem meu porto seguro e servirem como inspiração para mim desde pequena. Obrigada por acreditarem nos meus sonhos e estarem sempre presentes. Agradeço ao meu irmão Bruno pela parceria, conselhos e por ser um enorme exemplo na minha vida.

Aos meus amigos que acompanharam o período de graduação e estiveram sempre presentes, obrigada por todos os momentos bons vividos nestes anos, e pelo apoio também nos momentos difíceis. Ao Rafael Nigri pelo carinho e por estar presente de forma excepcional durante a reta final da graduação.

À Kathlen Schneider, por todo o aprendizado que tive nos últimos meses e pela oportunidade de contribuir com projetos de impacto na área das energias renováveis. Agradeço de coração pela confiança e pelas conexões que me trouxeram até aqui.

Ao professor Ricardo Rüther, pela orientação e aprendizados ao longo destes últimos meses. Agradeço pela confiança e apoio na elaboração deste estudo e pela oportunidade de trabalhar junto à equipe do laboratório Fotovoltaica-UFSC.

À Aline Kirsten e Carla Tognato por aceitarem o convite para participar da banca avaliadora e contribuírem com este trabalho.

Por fim, agradeço enormemente pela oportunidade de estudar na UFSC, uma universidade pública com qualidade de ensino excepcional, na qual vivi anos incríveis. Levarei comigo para a vida os ensinamentos e amizades feitas ao longo da graduação, e serei eternamente grata.

RESUMO

As ações antrópicas impactaram de forma relevante no aquecimento global ao longo do último século, tendo o setor de transportes como um dos principais contribuintes. Neste contexto cidades ao redor do mundo, inclusive cidades brasileiras, estão investindo em sistemas de mobilidade elétrica. Desde 2017 o eBus 100% elétrico do laboratório Fotovoltaica UFSC opera em Florianópolis, o qual fornece um serviço para a comunidade e serve como base para estudos acadêmicos. O eBus também está associado a geração de energia fotovoltaica e um sistema de armazenamento de energia com baterias (BESS) de segunda vida está em fase de implantação. Quando o projeto foi proposto, o eBus custou aproximadamente 3 vezes a mais do que um ônibus a diesel convencional, porém, os custos de operação e manutenção desta tecnologia se mostraram consideravelmente menores. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica de um ônibus elétrico associado a energia solar e com um BESS em relação à um ônibus a diesel, considerando o contexto do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC. Para o desenvolvimento do trabalho foi estudado o sistema existente no laboratório, assim como o desempenho de seus componentes, e definidas premissas e condições de contorno. A partir de dados coletados do sistema do eBus e de outros obtidos através de pesquisa bibliográfica foram levantados e calculados custos atuais equivalentes ao sistema do eBus e de um ônibus a diesel e, posteriormente, calculados indicadores financeiros – Valor presente líquido (VPL), Taxa interna de retorno (TIR) e Payback descontado. Foram definidos cenários para a análise de viabilidade econômica: cenários com e sem BESS e cenários com as duas tecnologias de ônibus com vida útil de 10 anos e outros considerando 5 anos para ônibus a diesel e 10 anos para ônibus elétrico. Além disso, para cada cenário foram utilizadas 3 taxas mínimas de atratividade, 5,5%, 7% e 10%. Os resultados principais da análise estão dispostos em uma matriz, e se mostraram atrativos no geral. Em todos os cenários o VPL resultante foi positivo, a TIR é maior do que a Taxa mínima de atratividade (TMA) e o Payback descontado é menor do que o tempo de análise de projeto (10 anos). O melhor resultado foi o do cenário sem BESS com tempo de vida útil diferente para as tecnologias e para a TMA de 5,5%, com um VPL positivo de R\$ 776.936,30, uma TIR de 19,56%, e um payback descontado 4 anos e 11 meses. Por fim, foi realizada uma análise de sensibilidade, para avaliar a variação nos indicadores ao alterar aspectos chave como o custo inicial do ônibus elétrico, o preço do diesel e o preço do BESS, sendo este escolhido uma vez que na análise inicial foi considerado um sistema com baterias novas e não de segunda vida. Os resultados da análise de sensibilidade evidenciaram que o sistema de ônibus elétrico associado a energia solar é viável economicamente e, no melhor cenário, que considera o custo inicial dos veículos sendo o mesmo e sem o BESS, o tempo de retorno do investimento é de pouco mais de 2 anos com uma TIR de 58,53%. De forma geral, o BESS não representou um investimento interessante nestas condições de contorno estabelecidas, pois mesmo considerando a redução no custo inicial do sistema este não resultou em melhoras significativas nos indicadores comparado aos outros cenários.

Palavras-chave: Ônibus elétrico. Sistemas fotovoltaicos. Armazenamento de energia em baterias. Viabilidade econômica.

ABSTRACT

Human actions have caused a considerable impact on global warming over the last century, and the transport sector is of the main contributors. In this context, cities around the world, including Brazilian cities, are investing in electric mobility systems. The eBus, a 100% electric bus from the laboratory Fotovoltaica UFSC, operates in Florianópolis, provides a transportation service to the community and serves as a basis for academic studies. The eBus is also associated with photovoltaic energy generation and a second-life battery energy storage system (BESS) is currently being implemented. In 2017 the eBus cost approximately 3x more than a conventional diesel bus, however, the operation and maintenance costs of this technology proved to be considerably lower. Thus, the objective of this work is to evaluate the economic viability of an electric bus associated with solar energy and a BESS compared to a diesel bus, considering Fotovoltaica UFSC's eBus context. In order to develop this study, the existing system in the laboratory was studied, as well as the performance of its components, and then were defined assumptions and boundary conditions. Based on data collected from the eBus current system and other data obtained through desk research, current costs equivalent to the eBus system and a diesel bus were defined, and then, financial indicators were calculated – NPV, IRR and payback period. Scenarios were defined for the economic feasibility analysis: scenarios with and without BESS and scenarios with the two bus technologies with a useful life of 10 years and others considering 5 years for diesel buses and 10 years for electric buses. In addition, for each scenario, 3 discount rates were used, 5.5%, 7% and 10%. The main results of the analysis are arranged in a matrix, and, in general, they proved the investment in the project would be attractive. In all scenarios the investment's payback period is under the 10 year project duration, the resulting NPV was positive and the IRR is greater than the discount rate. The best result was the from the scenario without the BESS, considering different lifetime for the vehicles and with the discount rate of 5.5%, with a positive NPV of R\$776,936.30, an IRR of 19.56%, and a payback period of 4 years and 11 months. Finally, a sensitivity analysis was performed to assess how different key aspects' variation influences the economic indicators. The analyzed aspects were the initial cost of the electric bus compared to a diesel bus, the diesel price and the price of BESS, this last was chosen since in the initial analysis it was considered a system with new batteries and not second life batteries. The results of the sensitivity analysis showed that the electric bus system associated with solar energy is economically viable and, in the best scenario, which considers the initial cost of the electric vehicle being the same as the diesel one and without BESS, the payback period is a little over 2 years with an IRR of 58.53%. In general, BESS did not represent an interesting investment in the current boundary conditions, as even considering the reduction in the initial cost of the system, this did not result in significant improvements in the economic indicators compared to other scenarios.

Keywords: Electric bus. Photovoltaic systems. Battery energy storage system. Economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quinta Avenida em Nova Iorque nos anos 1900 com diversidade de veículos nas ruas.....	23
Figura 2 - Carregadores e ônibus elétricos em Shenzhen - China.....	25
Figura 3 - Iniciativas em prol da eletrificação de ônibus no nível municipal	26
Figura 4 – Trajeto Campus Trindade (A) ao Sapiens Parque (B).	27
Figura 5 – eBus Fotovoltaica UFSC.....	28
Figura 6 - Painel visualizado pelo motorista mostrando informações sobre a bateria e o motor.....	28
Figura 7 - Sistemas fotovoltaicos do Lab. Fotovoltaica UFSC e suas potências	30
Figura 8 - Exemplos de geração fotovoltaica e consumo do eBus e VE em duas condições meteorológicas: (a) céu sem nuvens (b) dia chuvoso	38
Figura 9 - Comparações entre a geração de energia medida e simulada para o sistema do edifício A do laboratório Fotovoltaica UFSC.....	43
Figura 10 - Preços de sistemas fotovoltaicos para o cliente final	44
Figura 11 - Resultados de VPL para os cenários avaliados na análise inicial.....	52
Figura 12 - Resultados de TIR para os cenários avaliados na análise inicial.....	52
Figura 13 - Gráfico do fluxo de caixa do cenário C1B	53
Figura 14 - Gráfico do fluxo de caixa do cenário C2A	53
Figura 15 - Gráfico do fluxo de caixa acumulado descontado do cenário C1B.....	54
Figura 16 - Gráfico do fluxo de caixa acumulado descontado do cenário C2A	55
Figura 17 - Gráfico com resultados da análise de sensibilidade do cenário C1B com TMA de 5,5%	58
Figura 18 - Gráfico com resultados da análise de sensibilidade do cenário C2A com TMA de 10%	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos em julho de 2021	29
Tabela 2 - Parâmetros iniciais do sistema	37
Tabela 3 – Custo do sistema fotovoltaico por interpolação	44
Tabela 4 - Representação gráfica do fluxo de caixa usado na análise econômica	48
Tabela 5 - Resumo dos custos iniciais utilizados	50
Tabela 6 - Matriz com os principais resultados da análise inicial.....	51
Tabela 7 - Resultados de payback descontado para os cenários avaliados na análise inicial	55
Tabela 8 - Resultados da análise de sensibilidade do custo do ônibus e do diesel	56
Tabela 9 - Resultados da análise de sensibilidade do custo do BESS.....	59
Tabela 10 - Resultados do melhor cenário (C1B) e do cenário C2B com BESS em 35% do custo considerado inicialmente	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP - Agência Nacional do Petróleo
BESS - Battery Energy Storage System
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
EPA - United States Environmental Protection Agency
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FV - Fotovoltaico
GEE - Gases de Efeito Estufa
IEA - Agência Internacional de Energia
LIBs - Baterias de Íons de Lítio
OMS - Organização Mundial da Saúde
PIB - Produto Interno Bruto
SC - Santa Catarina
TIR - Taxa Interna de Retorno
TMA - Taxa Mínima de Atratividade
VE - Veículo Elétrico
VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Problemática dos veículos no meio urbano.....	17
2.1.1	Gases do efeito estufa, poluição atmosférica e efeitos na saúde humana	17
2.2	Smart cities e mobilidade elétrica.....	18
2.2.1	Principais vantagens de sistemas de mobilidade elétrica.....	19
2.2.2	Principais desafios de sistemas de mobilidade elétrica	20
2.2.3	Resumo histórico.....	22
2.2.4	Panorama – ônibus elétricos em cidades	24
2.3	Componentes do Sistema eBus do Lab. Fotovoltaica UFSC	26
2.3.1	Geração de energia – sistema fotovoltaico	29
2.3.2	Sistemas de armazenamento de energia – ESS.....	31
2.4	Método de avaliação de viabilidade econômica.....	33
2.4.1	Valor presente líquido (VPL).....	34
2.4.2	Taxa interna de retorno (TIR).....	35
2.4.3	Payback	35
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	Definição das condições de contorno.....	36
3.1.1	Dinâmica de abastecimento ônibus elétrico	37
3.1.2	Cenários avaliados.....	39
3.1.3	Premissas utilizadas.....	40
3.2	Análise de viabilidade econômica	41
3.2.1	Custos de aquisição	42
3.2.2	Custos de operação.....	45
3.2.3	Custos de manutenção.....	46
3.2.4	Valor residual de revenda.....	47
3.2.5	Fluxo de caixa	48
3.2.6	Análise de sensibilidade	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Resultados da análise econômica inicial.....	50
4.2	Resultados da análise de sensibilidade	56
4.2.1	Análise de sensibilidade custo do ônibus e custo do diesel.....	56
4.2.2	Análise de sensibilidade custo do BESS	59
4.3	Limitações e oportunidades de melhoria	60
5	CONCLUSÃO.....	63

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar e a dependência de petróleo são problemas graves e urgentes para a maioria dos formuladores de políticas públicas ao redor do mundo, principalmente nas economias em rápido desenvolvimento (KAHN RIBEIRO et al., 2007). Nesse contexto, o surgimento e repercussão do Acordo de Paris destaca o interesse de países e organizações em reverter estas problemáticas. Investimentos em carros híbridos e elétricos estão presentes em diversos países e representam oportunidades importantes no processo de redução das emissões de GEE e descarbonização do setor de transporte rodoviário, inclusive no Brasil (LA ROVERE, 2016; FGV, 2017).

O aumento do trânsito nas cidades e da demanda por transporte público potencializam o crescimento do mercado de ônibus elétricos, tendência comprovada pelo relatório do Bloomberg New Energy Finance (BNEF) de 2019. Cidades chinesas e europeias tomaram a frente investindo em frotas de ônibus elétricos, porém, países latinos como a Argentina, Chile e Brasil também estão investindo na tecnologia. Várias cidades brasileiras, dentre elas São Paulo, Brasília e Salvador já possuem veículos elétricos para transporte público em operação (Estadão, 2020; Sousa, 2020;Vinhote, 2020).

As vantagens da substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos vão além da redução de emissões de GEE. Ônibus elétricos também emitem menos ruídos, gases poluentes nocivos à saúde humana, e podem ser associados a fontes de energia renovável, como a energia solar, o que contribui para a diversificação da matriz elétrica nacional. Porém, existem ainda algumas barreiras para a adoção desta tecnologia em maior escala, como o elevado investimento inicial pelo uso de baterias e de sua infraestrutura de recarga (EPE, 2020a).

Dentre as iniciativas pioneiras de eletrificação de ônibus no país, foi inaugurado em 2016 o eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC. O eBus é um projeto piloto que atende a comunidade acadêmica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Toda a energia utilizada para carregar o veículo é produzida pelos painéis fotovoltaicos instalados na estrutura do laboratório e, no momento está em construção um banco de baterias de segunda vida de veículos elétricos, para armazenamento da energia solar gerada. O eBus, além de atender a comunidade com os trajetos que acontecem de forma gratuita, ajuda a analisar a viabilidade da mobilidade elétrica nas cidades (UFSC Fotovoltaica, 2021; Mattes, 2019).

Apesar das barreiras dos sistemas de ônibus elétricos, projetos estão surgindo em municípios brasileiros, uma vez que sua adoção gera relevante impacto social e ambiental.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da substituição da tecnologia de ônibus a diesel por ônibus elétrico associado a energia solar, considerando condições de operação do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC. Para isso, foram avaliados indicadores financeiros para quatro cenários iniciais e realizada uma análise de sensibilidade de acordo com a variação de alguns dos parâmetros.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho de conclusão de curso.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a viabilidade econômica de um ônibus elétrico, considerando o contexto do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC, em relação a um ônibus a diesel.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar o modelo de funcionamento e estudos de performance do eBus do laboratório fotovoltaica UFSC;
- Identificar custos de implantação, operação e manutenção do eBus e de um ônibus convencional equivalente a diesel;
- Comparar Capex, Opex e Payback de ônibus elétrico com a alternativa de ônibus a diesel em diferentes cenários;
- Avaliar viabilidade econômica do ônibus elétrico a sensibilidade a variações de alguns parâmetros relevantes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROBLEMÁTICA DOS VEÍCULOS NO MEIO URBANO

O aquecimento global pode ser definido como um aumento médio nas temperaturas combinadas do ar e da superfície do mar no planeta. Desde meados do século 20, ações antrópicas impactaram de forma relevante no aquecimento observado no globo, gerando aproximadamente um aquecimento de 1°C acima dos níveis pré-industriais em 2017, sendo que algumas regiões do globo sofrem aquecimento acima da média global (IPCC, 2013; IPCC, 2021).

Neste contexto, o setor de transportes, o qual é responsável por 24% das emissões diretas de CO₂ da queima de combustíveis, contribui com aproximadamente 14% da emissão global dos gases de efeito estufa, causadores do aquecimento global (IPCC, 2014; IEA, 2020). Destas emissões, quase três quartos das emissões do setor de transportes são provenientes dos veículos rodoviários - carros, caminhões, ônibus e veículos de duas e três rodas (IEA, 2020).

Considerando o uso constante de ônibus no meio urbano para transporte público e sua circulação em regiões movimentadas, o risco representado por estes veículos se torna ainda maior, expondo um grande número de pessoas às emissões (HORROX et al., 2019). Além disso, é previsto um crescimento contínuo do número de passageiros, o que pode representar um desafio para as medidas de mitigação de emissões do setor, a menos que as estas possam ser fortemente dissociadas do crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) (BEDNAR-FRIEDL et al., 2015).

2.1.1 Gases do efeito estufa, poluição atmosférica e efeitos na saúde humana

A poluição atmosférica afeta diferentes aspectos da saúde humana e é considerada uma das grandes preocupações de saúde pública globalmente. Segundo estimativas da Organização Mundial da Saúde - OMS, em 2016 cerca de 4,2 milhões de mortes foram atribuídas a essa problemática, e aproximadamente 91% dessas mortes ocorrem em países de baixa e média renda (OMS, 2018).

Os ônibus movidos a combustíveis fósseis emitem gases poluentes que contribuem para o efeito estufa e impactam na saúde da comunidade que atendem. A maior parte dos ônibus em operação no Brasil são movidos a diesel, por exemplo, na cidade de São Paulo

estes representam mais de 98% da frota de ônibus de transporte coletivo. As emissões do diesel contribuem para a diminuição da qualidade do ar podendo gerar doenças cardíacas, acidentes vasculares cerebrais, câncer de pulmão, asma e doenças pulmonares obstrutivas crônicas (Horrox et al., 2019; Dallmann, 2019; EPA, 2003).

Além dos impactos na saúde humana, a combustão do diesel também libera poluentes climáticos, como dióxido de carbono (CO₂) e carbono negro, associado a emissão de material particulado. Os gases gerados contribuem com o aumento do efeito estufa, e ainda, produzem ozônio ao nível do solo, impactando diretamente a vegetação e podendo ocasionar chuva ácida (EPA, 2012).

2.2 SMART CITIES E MOBILIDADE ELÉTRICA

As cidades historicamente se adaptaram às mudanças do ambiente. Em um contexto caracterizado por duas principais megatendências – o movimento de urbanização e a revolução digital, cresce a utilização do conceito *Smart Cities*, ou Cidades Inteligentes. Apesar de não existir um consenso do que define exatamente uma cidade inteligente, estas geralmente utilizam a tecnologia para prestar de forma mais eficiente os serviços urbanos, assim como melhorar a qualidade de vida das pessoas e transformar a relação entre entidades locais, empresas e cidadãos proporcionando uma nova forma de viver na cidade (CBRE, 2012).

De acordo com a União Europeia, o conceito de *Smart Cities* pode ser decomposto em seis principais áreas: *Smart environment* (meio ambiente); *Smart mobility* (mobilidade); *Smart living* (segurança); *Smart people* (educação); *Smart economy* (economia) e *Smart governance* (governo). Destas áreas, as duas primeiras são diretamente relacionadas a sistemas inteligentes de transporte público urbano, devido à utilização de veículos mais sustentáveis, incluindo ônibus elétricos (JANECKI E KAROŃ, 2014).

De acordo com relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA), em 2019 o número de carros elétricos nas estradas do mundo ultrapassou a marca de 7 milhões. Além do surgimento do mercado de veículos elétricos (VE's), frotas de ônibus e caminhões elétricos também estão se tornando mais comuns em cidades ao redor do mundo. Dentre os motivos estão a diminuição dos custos e melhor desempenho das baterias (IEA, 2020).

De acordo com o *Renewables 2021 Global Status Report*, tomadores de decisão ao redor do mundo estão focando cada vez mais na expansão do uso de energias renováveis no

setor de transportes. Apesar de os biocombustíveis serem importantes atores nessa transição para uma mobilidade urbana mais sustentável, o foco nestes últimos anos é na eletrificação do setor (REN21, 2021a).

Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, cada vez mais os grandes fabricantes estão focando sua produção em ônibus elétricos. De acordo com um relatório da *Bloomberg New Energy Finance* estima-se que os ônibus elétricos ocuparão metade da frota mundial até 2025 (CASALE; MAHONEY, 2018).

2.2.1 Principais vantagens de sistemas de mobilidade elétrica

A introdução de veículos elétricos na frota de ônibus de uma cidade proporciona diversos benefícios ambientais para a comunidade por ser uma tecnologia mais limpa. Dentre as vantagens ambientais se tem a redução dos níveis de emissões de poluentes locais, contribuindo para uma melhor qualidade do ar e da saúde pública. Também, são emitidos menos ruídos pela ausência de motores a combustão interna. Em centros urbanos mais densamente ocupados estes benefícios são ainda mais significantes (EPE, 2020; MDIC, 2018). Além disso, a troca do diesel pela eletricidade traria grandes benefícios climáticos, uma vez a matriz elétrica brasileira é composta em mais de 80% por fontes renováveis (EPE, 2020b).

Ao substituir os ônibus a diesel, os mais utilizados hoje nas cidades brasileiras, são eliminadas as emissões de escapamento e evita-se a emissão de grandes quantidades de material particulado e óxidos de nitrogênio, dois dos mais importantes poluentes do ar que impactam a saúde pública. Outro benefício social da substituição das tecnologias é que os menores custos operacionais e totais dos ônibus elétricos podem impactar na redução de tarifas para os passageiros, ampliando a acessibilidade ao transporte público, além de alavancar a posição competitiva industrial do país quanto a novas tecnologias (MDIC, 2018).

Ônibus elétricos também podem gerar diversos benefícios financeiros, como custos reduzidos em manutenção e com abastecimento. Além disso, estima-se que a vida útil máxima para VEs em comparação a veículo diesel seja superior, justificada por questões técnicas como maior durabilidade e menor presença de partes móveis (EPE, 2020a). Dessa forma, a amortização do investimento nestes veículos é ampliada. Em São Paulo, por exemplo, a idade máxima do veículo é de 15 anos para a frota com tração elétrica e de 10 anos para a frota a diesel (MDIC, 2018). Segundo dados da Associação Nacional das Empresas de Transportes

Urbanos (NTU) de 1996 e 2017, a idade média dos ônibus urbanos a óleo diesel nas principais capitais brasileiras foi 4,9 anos (EPE, 2020; NTU, 2018).

2.2.2 Principais desafios de sistemas de mobilidade elétrica

2.2.2.1 Investimento inicial e custos de infraestrutura

O investimento inicial necessário para implementar sistemas de ônibus elétricos em cidades é frequentemente citado como um obstáculo para uma transição rápida na mobilidade urbana. Embora os ônibus elétricos possam economizar dinheiro ao longo de sua vida, os custos de aquisição de suas estruturas são superiores do que os ônibus a diesel (CASALE; MAHONEY, 2018). Dessa forma, as políticas de eletrificação existentes em diversos países possuem elevada relevância na transição da mobilidade urbana. Em geral, estas são mais restritas e incluem grandes subsídios, além da introdução de ônibus em frotas governamentais (EPE, 2020a).

Um dos fatores que também influenciam na substituição das frotas de ônibus a diesel por elétricos é que a renovação destas é também baseada no valor de revenda dos veículos. Considerando que muitos municípios do país ainda não contam com infraestruturas de carregamento públicas, processo de revenda dos veículos se torna mais difícil (NTU, 2018).

Algumas questões que podem auxiliar a superar estes desafios são avaliar a mudança nas regras para a concessão do serviço de transporte público urbano coletivo; análises de projeto que contemplam não apenas os custos iniciais, mas os custos operacionais ao longo da vida útil dos veículos; novas opções de fontes de financiamento para tecnologias alternativas; e parcerias entre operadoras de ônibus e empresas de geração e distribuição de energia (EPE, 2020a).

O custo da tarifa de energia também é uma variável que influencia na viabilidade da mobilidade elétrica. A locação de geração distribuída de energia renovável pode constituir uma alternativa para a adoção de tarifas de energia inferiores ao mercado, de Ambiente de Contratação Regulada (ACR), o que por simplificação é assumido em 10% como fator redutor. Este modelo, com a locação de energia, foi utilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) na elaboração de uma ferramenta de avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil. Um dos benefícios da adoção deste modelo é que isenta os empreendedores da responsabilidade de implementação própria de projetos de geração de energia elétrica

distribuída, evitando problemas como assimetrias de informação ou desconhecimento de características técnicas do segmento (EPE, 2020a).

Porém, um dos benefícios da implementação de infraestrutura de geração distribuída na própria garagem de ônibus, ou em sítio dentro da mesma área de concessão da distribuidora de energia elétrica, é a modalidade *net-metering*, conhecida no Brasil como “sistema de compensação de energia elétrica”, prevista na Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 (EPE, 2020a).

2.2.2.2 Baterias

O número crescente de veículos elétricos nas cidades pode resultar na geração de uma grande quantidade de resíduos quando esses veículos chegam ao fim de suas vidas. Conforme as baterias são carregadas e descarregadas, elas perdem desempenho e autonomia, o que as torna menos atrativas para uso em veículos (IEA, 2020).

Baterias de íons de lítio (LIBs), as mais comumente utilizadas em VEs, possuem uma grande pegada ecológica, uma vez que sua extração primária envolve um processo de mineração poluente e grande quantidade de matéria-prima. Para extrair uma tonelada de lítio, são necessárias 1900 toneladas de água, que se perdem por evaporação (SLATER et al., 2019).

Além do lítio, metais raros como níquel e cobalto são usados para produção dos eletrodos das baterias. Estes metais são escassos e estão se tornando mais caros devido ao aumento de demanda (TURCHENIUK et al., 2018). Mais da metade das reservas de cobalto do mundo estão na República Democrática do Congo, e sua extração traz preocupações éticas e socioambientais, incluindo casos de trabalho infantil (SLATER et al., 2019).

Desta forma, destaca-se a importância de pesquisas e investimentos para o desenvolvimento de eletrodos fabricados de elementos mais abundantes, que tenham eficiência similar à dos compostos por cobalto e níquel (TURCHENIUK et al., 2018). Alinhado a esses esforços, os processos de reciclagem de LIBs no fim da vida útil pode fornecer benefícios econômicos importantes, evitando a necessidade de nova extração de minerais (GAINES, 2014).

O processo de reciclagem das baterias de veículos elétricos ainda possui diversos desafios. O armazenamento das baterias, se realizado de forma incorreta, pode ocasionar incêndios, como os ocorridos em unidades de recuperação de metais nas cidades americanas

de San Carlos em 2016, Guernsey e Tacoma em 2018. A existência de diferentes modelos de baterias em funcionamento no mercado, com variados formatos, tamanhos e componentes, é também um desafio, pois dificulta a construção de um modelo de reciclagem automatizado (SLATER et al., 2019).

Atualmente, módulos de baterias são desmontados à mão para posterior reaproveitamento, seja para reuso ou para reciclagem. Para estes processos, considerados perigosos, Elwert (2018 apud Slater et al., 2019) comenta que são necessários funcionários qualificados e ferramentas específicas, o que inviabiliza economicamente o processo em países com custo elevado de mão de obra. O mesmo autor também destaca que devido ao grande número de requisitos como segurança em caso de colisão, centro de gravidade, otimização do espaço e facilidade de manutenção, o design dos veículos e, conseqüentemente, das baterias, acaba não sendo otimizado para o processo de reciclagem.

Além disso, a tecnologia por trás das baterias ainda está evoluindo, assim, processos de reciclagem desenvolvidos para um design ou componentes específicos de baterias podem rapidamente se tornar obsoletos (GAINES, 2014).

2.2.3 Resumo histórico

Não existe um consenso sobre a origem do primeiro veículo elétrico, uma vez que inventores na Hungria, Países Baixos e Estados Unidos desenvolveram veículos similares paralelamente. Ao contrário do que muitos imaginam, estes primeiros carros elétricos foram desenvolvidos há mais de 100 anos, e surgiram no mesmo período dos veículos a combustão (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014). A Figura 1 mostra uma diversidade de veículos na Quinta Avenida, em Nova Iorque, nos anos 1900.

Figura 1 - Quinta Avenida em Nova Iorque nos anos 1900 com diversidade de veículos nas ruas



Fonte: Library of Congress apud US Department of Energy (2014).

Os carros elétricos atingiram seu auge em 1900, representando um terço de todos os veículos nas estradas – contando com veículos a combustão e carroças, que ainda eram o principal meio de transporte na época. Benefícios como emitir menos ruídos, maior facilidade para dirigir e não emitir gases incômodos fizeram com que os carros elétricos se destacassem entre os compradores, porém, com o lançamento do *Model T*, carro movido a gasolina desenvolvido por Henry Ford em 1908, o cenário mudou. O Model T custava menos da metade do que um veículo elétrico e, além disso, fatores como o descobrimento de reservas de petróleo e a dificuldade de acesso a energia elétrica em muitas cidades influenciaram no quase desaparecimento dos carros elétricos na época (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

O interesse em veículos elétricos surgiu novamente nos anos 1960 e 1970, com a alta nos preços de gasolina, porém, limitações no desempenho dos veículos impede que o mercado se estabeleça. Por fim, o mercado só voltou a ganhar força nos anos 2000, com o surgimento do Toyota Prius e da *startup* Tesla (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2014).

Na virada do século 20, melhorias nos veículos a gasolina surpreenderam a população, que inicialmente não acreditava que máquinas produzidas pelo homem substituiriam os cavalos e carroças. Da mesma forma, inovações na tecnologia dos veículos elétricos cresceram rapidamente nos últimos 10 anos, abrindo novas oportunidades para

enfrentar desafios ambientais e de saúde pública críticos que são resultado da queima de combustíveis fósseis e do setor do transporte no início do século 21 século (HORROX et al., 2019).

Dessa forma, impulsionado pela ameaça do aquecimento global, acordos globais como o Acordo de Paris e por legislações ambientais exigentes ao redor do mundo, o mercado dos veículos elétricos volta a tomar força e, hoje, a tecnologia é alvo de fabricantes automotivas ao redor do mundo.

2.2.4 Panorama – ônibus elétricos em cidades

Luxemburgo e Itália foram precursores na introdução desta tecnologia em suas grandes cidades, e Pequim (China) e Nova York (EUA) também seguiram a tendência e colocaram ônibus elétricos em suas ruas (FGV, 2017). Em 2020 a China liderou o mercado de ônibus elétricos (SUSTAINABLE BUS, 2020), já, na Europa, a Dinamarca foi o país que mais inseriu a tecnologia em sua frota, seguida por Luxemburgo e Países Baixos (TRANSPORT; COMMISSION, 2021). A cidade de Santiago, no Chile é a cidade que possui a maior frota de ônibus elétricos fora da China (DIÁLOGO CHINO, 2020).

Diversas cidades ao redor do mundo utilizaram modelos piloto de ônibus elétricos para avaliar a viabilidade de implementação da tecnologia em toda sua frota. De acordo com o estudo realizado por Horrox (2019), em cidades dos Estados Unidos, os ônibus pilotos em boa parte dos casos mostrou um bom desempenho, com custos com manutenção e eletricidade menores do que os custos dos ônibus convencionais equivalentes a diesel (HORROX et al., 2019). Alguns dos casos mostraram custos maiores do que o previsto com energia, porém, nestes casos as cidades eram localizadas em regiões com invernos frios e não foram citados sistemas complementares de geração de energia renovável para o carregamento dos veículos.

A cidade de Shenzhen na China possui o tamanho de São Paulo e se tornou em 2018 a primeira metrópole do mundo com 100% das frotas de ônibus e carros movidas a energia elétrica, com uma frota de 17 mil ônibus e 12,6 mil taxis elétricos. Além de emitir menos ruídos e gases nocivos à saúde humana, a prefeitura local também relatou a diminuição da formação de ilhas de calor na cidade. Para viabilizar a transformação do setor o governo federal e local da China ofereceram subsídios que diminuíram em até 50% o volume de impostos cobrados sobre veículos elétricos em comparação com carros tradicionais. Além

disso, a cidade criou garagens de ônibus com mais de 5 mil carregadores mais de 500 postos elétricos para taxis (ZMOGINSKI, 2021).

Figura 2 - Carregadores e ônibus elétricos em Shenzhen - China



Fonte: Zmoginski, Mobilize (2021).

No Brasil o contexto para a transição para a mobilidade elétrica ainda não é tão favorável quanto nos países que estão liderando o movimento, uma vez que ainda não existem políticas de planejamento, promoção e conscientização acerca dessa temática. O sistema de infraestrutura de recarga também é insuficiente atualmente, o que não proporciona confiança em um ecossistema de recarga público (MDIC, 2018).

Porém, várias cidades brasileiras, dentre elas São Paulo, Campinas, Brasília e Salvador já possuem veículos elétricos para transporte público em operação. Em Florianópolis foi inaugurado em 2016 o projeto do ônibus elétrico alimentado por energia solar, o eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC. Além destas, outras experiências foram documentadas em Curitiba (PR), Santos (SP), Bauru (SP), Belém (PA) e Volta Redonda (RJ). A Figura 3 mostra as iniciativas de eletrificação de ônibus no Brasil a nível municipal até o ano de 2015 a 2018 (Estadão, 2020; Vinhote, 2020).

Figura 3 - Iniciativas em prol da eletrificação de ônibus no nível municipal



Fonte: Elaboração EPE (2020a) com base em estudo do MDIC de 2018 (MDIC, 2018).

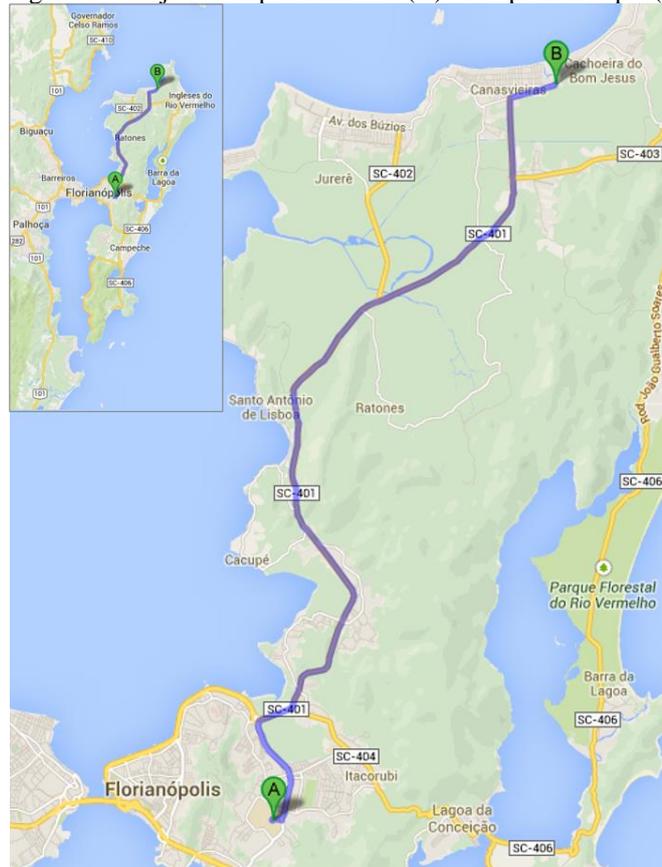
Em São Paulo, a Lei Municipal 16.802/2018 prevê que até o ano de 2028 50% das emissões de carbono devem ser reduzidas, e, por fim, eliminadas até 2038. Para atingir estes objetivos, a SPTrans (São Paulo Transporte) conta com um cronograma de transição do sistema de mobilidade, e, segundo o atual prefeito Ricardo Nunes, a expectativa é que até 2024 estejam circulando entre 2,4 mil e 2,6 mil ônibus elétricos na cidade (Sousa, 2020; Bazani, 2021).

Um dos pontos relevantes do processo de eletrificação do setor no Brasil, que potencializa a vantagem da transição, é a composição da matriz elétrica nacional, a qual é composta por mais de 80% de fontes renováveis (EPE, 2020b). Uma oportunidade nacional para impulsionar o ritmo da eletrificação da mobilidade é o programa Rota 2030 desenvolvido pelo Governo Federal, que tem como objetivo ampliar a inserção global da indústria automotiva brasileira (SENAI, 2021). A partir do programa podem ser viabilizadas ações de P&D, investimentos no setor em infraestrutura de recarga, por exemplo (MDIC, 2018).

2.3 COMPONENTES DO SISTEMA EBUS DO LAB. FOTOVOLTAICA UFSC

O eBus, Ônibus Elétrico Alimentado por Energia Solar da UFSC foi inaugurado em 2016 e entrou em operação em 2017. O projeto foi idealizado pelo laboratório Fotovoltaica UFSC - Centro de Pesquisa e Capacitação em Energia Solar da UFSC, que fica localizado no Sapiens Parque, no norte da ilha de Santa Catarina, em Florianópolis. O ônibus realiza um trajeto de 26 km que conecta o laboratório com o Campus Trindade, o principal da universidade (UFSC FOTOVOLTAICA, 2021).

Figura 4 – Trajeto Campus Trindade (A) ao Sapiens Parque (B).



Fonte: Fotovoltaica UFSC (2021).

A estrutura interna do ônibus (ver Figura 5) conta com duas mesas de reunião, tomadas 220V e USB, ar-condicionado, wi-fi e poltronas confortáveis para 38 passageiros sentados. O trajeto, de 52 km, ida e volta, é realizado 5 vezes por dia de forma gratuita, beneficiando a comunidade da UFSC. O projeto contou com financiamento de um milhão de reais pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, atual MCTIC) e com parcerias das empresas WEG, Marcopolo, Mercedes e Eletra (UFSC FOTOVOLTAICA, 2021).

O sistema de baterias do ônibus é composto por 4 módulos de baterias da Mitsubishi conectados em paralelo que fornecem uma capacidade total de 128 kWh, um sistema de resfriamento ativo e um BMS (Battery Management System), que equaliza o carregamento e descarga das células de baterias. Além disso, existem duas baterias separadas, de 24V e 135 Ah que garantem que os sistemas sejam alimentados constantemente, mesmo nos momentos de carregamento ou manutenção das outras baterias (MATTES, 2019).

Figura 5 – eBus Fotovoltaica UFSC.



Fonte: Fotovoltaica UFSC (2021).

Cada trajeto do ônibus de ida e retorno (Sapiens Parque – Campus Trindade – Sapiens Parque) leva cerca de uma hora e, após este percurso, o ônibus é carregado por também aproximadamente uma hora. O carregamento é realizado conectando o veículo à rede, uma vez que o processo necessita de uma performance constante e alta, porém, o sistema fotovoltaico instalado nas edificações do laboratório produzem energia suficiente para suprir a demanda anual de recarga do ônibus (MATTES, 2019).

A cada parada do ônibus são medidos alguns parâmetros para monitoramento e avaliação de desempenho do ônibus, como o State of Charge (SOC) da bateria, a quantidade de pessoas e o horário de saída e chegada (ver Figura 6). A cada carregamento do ônibus é também é medido e registrado o tempo e a energia consumida (MATTES, 2019).

Figura 6 - Painel visualizado pelo motorista mostrando informações sobre a bateria e o motor



Fonte: Mattes (2019).

2.3.1 Geração de energia – sistema fotovoltaico

Durante o período de pandemia do Covid-19 a capacidade instalada de energia renovável no mundo cresceu mais de 256 gigawatts, o maior crescimento já registrado (REN21, 2021a). Já, no Brasil, os investimentos cresceram em 23%, marcando o sétimo ano consecutivo de crescimento. Quanto à energia solar fotovoltaica, as instalações anuais no país em 2020 foram de 31 GW, 68,6% acima do que em 2019 (REN21, 2021b).

O processo de eletrificação do setor de transporte recebeu grande atenção no ano de 2020. Em muitos países surgiram políticas voltadas para o setor, porém, na maioria dos países não foram mencionados links diretos entre a eletrificação dos transportes e energias renováveis. Apesar disso, o incentivo à eletrificação do setor oferece o potencial para uma maior penetração de eletricidade renovável através dos sistemas de carregamento dos veículos a partir de fontes renováveis (REN21, 2021a).

Com o crescimento da mobilidade elétrica deve-se gerar uma demanda de alta carga de energia nas cidades. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos podem desempenhar um papel importante na redução dessa demanda (DE OLIVEIRA et al., 2020).

O Laboratório Fotovoltaica-UFSC é composto atualmente por dois edifícios: A e B, com 450,57 m² e 174,84 m² respectivamente e um edifício C em construção. Além disso, o laboratório também conta com uma área de estacionamento, sistemas no solo e uma estação de carregamento do eBus. Módulos fotovoltaicos integram a cobertura destas áreas totalizando em 2021 um sistema de 105,53 kWp no laboratório. A Tabela 1 mostra a capacidade instalada em cada um destes locais no período avaliado (julho de 2021):

Tabela 1 - Capacidade instalada dos sistemas fotovoltaicos em julho de 2021

CAPACIDADE INSTALADA	
	[kWp]
EDIFÍCIO A	66,15
EDIFÍCIO B	13,50
ESTACIONAMENTO	13,44
ESTAÇÃO REGARGA	2,44
SISTEMAS SOLO	10

Na Figura 7 são mostrados os sistemas existentes em operação no momento e suas respectivas potências instaladas.

Figura 7 - Sistemas fotovoltaicos do Lab. Fotovoltaica UFSC e suas potências.



Fonte: Mattes (2019).

A inclinação e orientação ideal para os painéis fotovoltaicos em Florianópolis é de 27° voltados para o norte, porém, apenas dois terços dos módulos estão orientados nesta direção e a inclinação não é ideal, pois acompanha a cobertura das estruturas (MATTES, 2019). Dessa forma, a geração de energia solar não é maximizada, porém, a quantidade de energia gerada é suficiente para o abastecimento do consumo das edificações e recargas do eBus.

Estudos realizados pelo laboratório mostram que a energia fotovoltaica associada à mobilidade elétrica representa um modelo interessante para o contexto brasileiro, uma vez que a disponibilidade do recurso solar no país é abundante e que a integração dessas tecnologias pode ser pensada desde a etapa de projeto de edificações. No caso do eBus do laboratório, os sistemas fotovoltaicos geram anualmente 25% de energia a mais do que a consumida pela soma do consumo das edificações e do eBus (ANTONIOLLI; MONTENEGRO; RÜTHER, 2017).

2.3.2 Sistemas de armazenamento de energia – ESS

Algumas fontes de energia renovável, como a fotovoltaica e a eólica, são consideradas fontes intermitentes de geração de energia, ou seja, utilizam recursos energéticos renováveis que não podem ser armazenados em sua forma original (ANEEL, 2012). Devido ao aumento da participação destes tipos de energias renováveis no mercado, surge a demanda desafiadora de equilibrar a demanda de eletricidade e o fornecimento de energia ao longo do tempo para todos os pontos de consumo conectados à rede (CARRASCO et al., 2006).

Formas de integração adequadas entre fontes de geração de energias renováveis intermitentes e sistemas de armazenamento de energia podem proporcionar uma melhor inserção destas tecnologias no mercado, assim como minimizar emissões de carbono (CARRASCO et al., 2006). Através de um fornecimento de energia coordenado, levando em consideração horários de pico de geração e consumo, os sistemas de armazenamento de energia (Energy Storage Systems – ESS) podem equalizar flutuações e compensar incompatibilidades existentes na rede (HESSE et al., 2017).

De acordo com o estudo realizado por Mattes (2019), uma simulação envolvendo uma bateria *Power Wall* de 75MWh, a qual armazena energia fotovoltaica gerada ao longo do dia, mostra que o eBus poderia se tornar independente da rede, ou seja, zerar os custos de aquisição de energia em horários de pico da distribuidora.

2.3.2.1 Sistemas de armazenamento de energia com baterias - BESS

Os sistemas de armazenamento de energia com baterias (BESS – *Battery Energy Storage Systems*) vêm sendo estudados e implementados em diferentes aplicações e localidades. Vantagens como tempo rápido de resposta, alta eficiência, baixa auto-descarga e possibilidade de expansão do sistema devido a uma estrutura modular tornam esta tecnologia fortemente competitiva quando comparada a outras alternativas de armazenamento de energia (HESSE et al., 2017).

Dado o elevado valor agregado à produção de baterias de íons de lítio, é importante desenvolver estratégias para otimizar o uso destes produtos e os impactos ambientais ao longo de seus ciclos de vida. Com este objetivo e, também, para extrair o máximo valor econômico das baterias após sua utilização em veículos elétricos, sugere-se seguir a hierarquia de gestão de resíduos, onde a reutilização é preferível à reciclagem (SLATER et al., 2019).

As baterias de íons de lítio são normalmente utilizadas em veículos elétricos até atingirem aproximadamente 80% de sua capacidade original. Fatores como design, temperatura de operação, processo de carregamento e estado de carga das baterias influenciam neste processo, que leva em média de cinco a sete anos. Porém, estas baterias, que não geram interesse para a utilização nos veículos pois atendem mais requisitos de mobilidade - quilometragem mais limitada por carga completa, ainda podem ser utilizadas em aplicações estacionárias, como sistemas de armazenamento de energia (REID; JULVE, 2016).

Quando as baterias de VEs são reutilizadas, recebem o nome de baterias de segunda vida. As aplicações estacionárias são menos restritivas em termos de espaço e peso do que as aplicações em mobilidade. Até o ano de 2018, Sun (2018) comenta que existem muitos projetos de demonstração destes sistemas e alguns empreendimentos comerciais (SUN et al., 2018).

Conforme divulgado pela IRIS, um projeto financiado pelo Horizon 2020 da União Europeia, iniciativas de demonstração de BESS com baterias novas e de segunda vida foram implementadas nas cidades de Gotemburgo, Nice e Utrecht com o objetivo de aumentar o autoconsumo de energia proveniente de painéis fotovoltaicos nas edificações, assim como proporcionar maior flexibilidade para a rede. Em Gotemburgo o sistema de baterias de segunda vida funcionou sem complicações e trouxe os benefícios esperados. Já, os resultados das cidades de Nice e Gotemburgo evidenciaram alguns desafios presentes no mercado de baterias de segunda vida para BESS, dentre eles:

- Falta de padronização das baterias e poucos fornecedores para soluções específicas;
- Baixas vantagens competitivas com sistemas de baterias novas, uma vez que o custo das baterias de segunda vida é elevado, a oferta ainda é baixa e o volume necessário é maior para uma mesma capacidade de armazenamento;
- Poucas empresas possuem experiência com a regulamentação de segurança necessária para implementação dos sistemas em edificações;

No geral, estes sistemas representam uma alternativa interessante ao reutilizarem baterias de VEs, considerando também a perspectiva de aumento do número de baterias no futuro. Porém, as circunstâncias locais influenciam na viabilidade dos projetos e o sucesso de implementação das iniciativas depende de fatores como condições do mercado local e no quadro regulamentar com a consideração dos aspectos de segurança (IRIS SMART CITIES, 2020).

Baterias de segunda vida tendem a custar de 30 a 40% do valor das baterias novas, assim, estas constituem uma alternativa economicamente interessante para os sistemas de BESS para aplicações estáticas (GOLDIE-SCOT, 2019). Além disso, a curva de aprendizado de sistemas fotovoltaicos e das baterias de veículos elétricos são equivalentes e mostram uma redução constante nos custos de aquisição inicial destes sistemas. Considerando que o custo dos módulos FV reduziram aproximadamente 10x em 10 anos, o custo das baterias também tende a se tornar mais acessível (FRAUNHOFER ISE, 2020; IEA, 2020).

No primeiro semestre de 2021 foi projetado um sistema de armazenamento de energia com baterias de segunda vida do veículo elétrico Nissan Leaf, associado ao projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado no Laboratório Fotovoltaica UFSC (GOULART, 2021). Os módulos, doados pela Nissan do Brasil, são provenientes de uma frota de 25 taxis que rodaram em São Paulo e Rio de Janeiro de forma exaustiva por 5 anos, e muitos deles utilizando postos de recarga rápida. O projeto contava com o objetivo de avaliar as consequências da operação nos veículos neste formato de operação exaustivo (CANAL DANA, 2016).

A capacidade energética média restante nos veículos foi de 62,08%, valor utilizado no projeto de construção do BESS. A proposta do BESS em questão é mediar através de um esquema híbrido o autoconsumo de energia solar e o despacho estratégico de energia em horário de ponta (GOULART, 2021). O armazenamento de energia solar excedente gerada criará créditos de energia no horário de ponta, onde a tarifa é mais cara, beneficiando o campus central da instituição com um generoso desconto na conta mensal de energia elétrica (ZOMER et al., 2020a).

2.4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Atualmente as práticas de aquisição de veículos acabam favorecendo as tecnologias de menor preço de compra, porém, este é apenas um fator e não necessariamente representa a alternativa mais viável economicamente. No caso das tecnologias de ônibus, o preço de compra de uma tecnologia não mostra as diferenças nos custos de operação e manutenção, que podem impactar fortemente no custo total de propriedade de um veículo ao longo de sua vida útil (MILLER et al., 2017).

No geral, projetos de investimentos podem ser classificados em categorias, são elas: expansão, substituição, modernização e intangíveis. Os investimentos em substituição são

caracterizados por substituir ou renovar artigos obsoletos ou gastos pela vida útil, ou pela reposição ou atualização tecnológica (RICARDO BORDEAUX-REGO, 2015). Quanto à substituição de tecnologias veiculares, são avaliadas variáveis referentes aos custos fixos (investimento inicial do veículo e infraestrutura), custos variáveis (manutenção e abastecimento), distância média percorrida e rendimento dos veículos (EPE, 2020a).

O princípio básico que orienta a avaliação de substituição entre tecnologias veiculares é o ponto de equilíbrio financeiro, também conhecido como *breakeven point*. Este representa o equilíbrio entre os custos fixos e variáveis avaliados de forma comparativa entre as alternativas. Ou seja, para ser considerada viável, a utilização de ônibus elétricos requer que a redução de custos variáveis em relação aos ônibus a diesel seja, pelo menos, equivalente ao acréscimo de custo fixo resultante da aquisição dos veículos elétricos e de sua infraestrutura de recarga (EPE, 2020a).

Os principais indicadores financeiros de projeto para avaliações econômicas de investimentos são o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Payback. Para encontrar os respectivos valores, deve-se também construir um fluxo de caixa para o projeto e definir uma taxa de desconto (LUCHESES, 2011). Mais detalhes sobre estes indicadores estão reunidos nos tópicos 2.4.1, 2.4.2 e 2.4.3.

2.4.1 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido é a soma de todos os valores dos fluxos de caixa projetados no instante “0”, ou seja, na data presente. Assim, se faz necessário trazer todos os valores dos fluxos de caixa até a data presente e, para isso, é necessário definir como taxa de desconto uma taxa de atratividade ou taxa exigida frente ao risco, também chamada de Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TMA representa a taxa mínima que um investidor aceita como rentabilidade para um investimento. Dessa forma, ao somar os valores do fluxo de caixa ajustados para o mesmo instante de tempo, encontra-se o valor presente líquido (LUCHESES, 2011).

Se o VPL for igual a zero, o investimento é indiferente, se for menor do que zero, significa que o investimento não é economicamente atrativo e se for positivo quer dizer que o investimento é atrativo, com as entradas maiores do que as saídas de caixa.

O VPL pode ser calculado através da seguinte equação:

$$VPL = P + \sum_{t=1}^n \frac{FCt}{(1+i)^t}$$

Onde:

P = Investimento inicial;

FCt = Fluxo de caixa líquido esperado no momento t;

n = Número total de períodos / Vida estimada do investimento;

i = Taxa de desconto / TMA.

2.4.2 Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é a taxa de retorno de um projeto, ou seja, é a taxa de desconto que faz com que o VPL do projeto seja igual a zero. Um projeto é considerado atrativo quando a sua TIR for maior do que o custo de capital do projeto, ou, no caso da utilização da TMA como taxa de desconto, quando a TIR for maior que a TMA. A fórmula geral para a TIR é:

$$0 = P + \frac{FC_1}{1 + TIR} + \frac{FC_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1 + TIR)^n}$$

2.4.3 Payback

O Payback, ou Tempo de Retorno do Investimento, é referente ao tempo decorrido entre o investimento inicial de um projeto e o momento no qual o seu lucro líquido acumulado é igualado ao valor do investimento. Pode-se calcular este tempo através do método de payback simples ou o de payback descontado.

O payback simples é o tempo que leva para que o lucro líquido acumulado se iguale ao investimento inicial, sem levar em consideração o valor do dinheiro no tempo. Já, o payback descontado tem o mesmo conceito do payback simples, porém, leva em conta a TMA do investidor.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em realizar uma análise econômica comparativa entre a tecnologia de um veículo a diesel convencional e um veículo 100% elétrico à bateria associado a energia solar e com sistema de armazenamento de energia. Primeiramente foi necessário estudar o sistema existente do Laboratório Fotovoltaica UFSC, para entender as características do ônibus elétrico, sistemas fotovoltaicos, geração e consumo energético associado.

Quanto aos procedimentos técnicos para entender o sistema e levantar dados existentes sobre os seus componentes realizou-se uma pesquisa bibliográfica de artigos científicos elaborados por membros do laboratório e pesquisa documental, baseada em documentos técnicos e planilhas de acompanhamento de dados disponibilizados por membros da equipe.

Em seguida, foram levantados dados necessários referentes aos custos iniciais dos ônibus e infraestruturas atualizados para o ano de 2021, assim como taxas, custos de operação e manutenção das tecnologias. Além disso, foram levantados dados históricos e atuais do setor de transportes brasileiro, com o objetivo de realizar projeções de cenários futuros nacionais para parâmetros relevantes da análise econômica.

Para avaliar a viabilidade econômica do ônibus elétrico comparado ao a diesel, considerou-se a diferença entre os custos e receitas das tecnologias para montar um fluxo de caixa para cada um dos cenários avaliados, que estão descritos no Tópico 3.1.2. Dessa forma, as entradas e saídas dos fluxos de caixa resultantes são referentes às diferenças anuais de custos das tecnologias. Quanto aos métodos de análise de viabilidade de investimento, os indicadores utilizados foram o Valor Presente Líquido (VPL), o Tempo de Retorno do Investimento (Payback descontado) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

3.1 DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como comentado no Tópico 2.2.4, projetos piloto de ônibus elétricos surgiram em diversos países. O eBus do Laboratório Fotovoltaica UFSC foi idealizado como um projeto piloto em 2016 e desde 2017 está em operação e fornece insumos para a realização de pesquisas acadêmicas. Neste trabalho o cenário de funcionamento e dados de desempenho do sistema do eBus serviram como base para as análises econômicas.

Para comparar as tecnologias de forma coerente é necessário definir alguns parâmetros de análise. Assim, considerou-se o atual trajeto e rotina de funcionamento do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC para ambas as tecnologias, assim como características gerais do ônibus, como o ano de aquisição da tecnologia, 2021. Estas condições iniciais estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros iniciais do sistema

VARIÁVEL	FONTE	UNIDADE	VALOR
Distância percorrida por trajeto	(MATTES, 2019)	Km	52
Viagens por dia	(MATTES, 2019)	n° / dia	5
Recargas por dia	(MATTES, 2019)	n° / dia	5
Consumo médio por recarga	Planilha de acompanhamento do laboratório	kWh	60

Quanto à distância percorrida pelos ônibus na análise, considerou-se o trajeto de 52 km (ida e retorno), realizado 5 vezes ao dia por, em média, 22 dias no mês. Assim, a distância percorrida anual por ônibus é de 68.640 km por ano.

3.1.1 Dinâmica de abastecimento ônibus elétrico

O sistema do eBus do laboratório Lab. Fotovoltaica UFSC entrou em operação em março de 2017. O ônibus é 100% elétrico com baterias de íons de lítio e é conectado à rede de distribuição de energia da Celesc, não estando diretamente conectado aos sistemas fotovoltaicos para seu abastecimento. Estes, por sua vez, também são conectados à rede, e geram quantidade de energia suficiente para suprir toda a demanda energética do laboratório, incluindo o carregamento do ônibus elétrico.

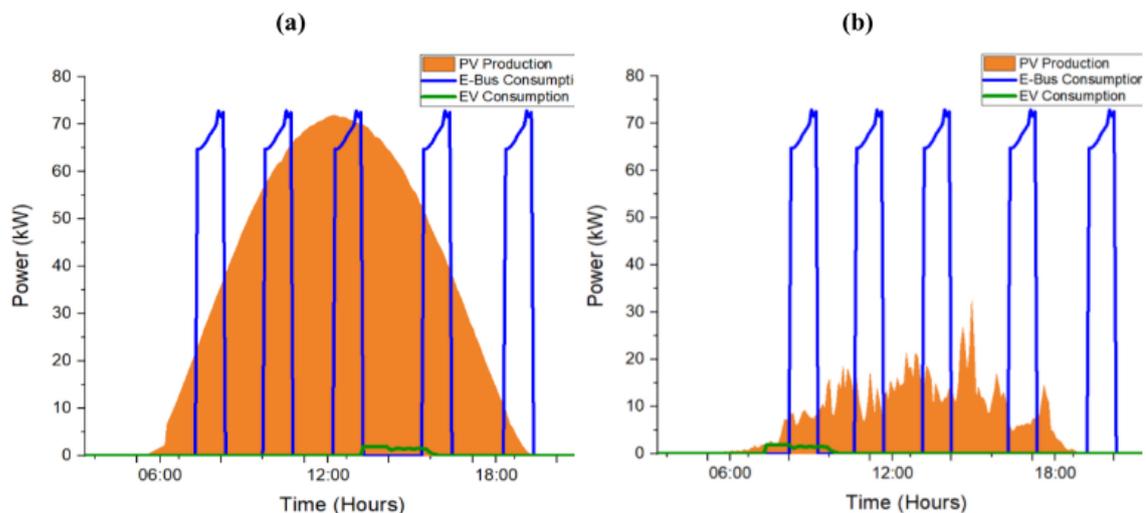
Como os sistemas não estão diretamente conectados, considera-se que a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos do laboratório é vendida para a rede e que a energia utilizada para o carregamento do ônibus é comprada da rede.

A recarga das baterias do ônibus acontece ao final de cada viagem programada no Sapiens Parque. Cada carga simulada leva cerca de 1 hora. Quanto aos horários de

carregamento, considerou-se também o cenário de operação do eBus: 5 horários de carregamento por dia.

Destas recargas, 4 são realizadas em horários nos quais a energia é mais barata (fora de ponta) e 1 horário no qual a energia é mais cara (ponta). De acordo com dados levantados referentes às tarifas de energia pagas pelo laboratório de 2016 até 2020, a tarifa de ponta foi de 337% em 2016 a 392% em 2020 maior do que a tarifa fora de ponta. Estes valores tarifários são referentes à classificação tarifária do subgrupo A4, modalidade Horossazonal Verde, para o laboratório universitário localizado em Florianópolis. Na Figura 8 é possível observar exemplos de geração fotovoltaica do laboratório (laranja) e os momentos de recarga do ônibus em dias de céu aberto sem nuvens e em dias chuvosos.

Figura 8 - Exemplos de geração fotovoltaica e consumo do eBus e VE (outro projeto) em duas condições meteorológicas: (a) céu sem nuvens (b) dia chuvoso.



Fonte: de Oliveira et al. (2020).

A partir destes dados e de uma taxa de aumento tarifário anual de 5,2%, calculada a partir de dados de aumento tarifário de 2012 a 2019 (DE ALBUQUERQUE MONTENEGRO; ANTONIOLLI; RÜTHER, 2020) foram realizadas projeções de tarifas de energia de ponta e fora de ponta para o laboratório para os anos de 2021 à 2031.

3.1.2 Cenários avaliados

Para a análise de viabilidade neste trabalho foram considerados quatro diferentes cenários, e, para cada um deles, avaliadas diferentes taxas de desconto. As variáveis analisadas foram as seguintes:

- **Vida útil das tecnologias**

10 anos para ambas tecnologias: Em um dos cenários foi considerado um tempo de vida útil de 10 anos para as duas tecnologias de ônibus. Esta premissa foi utilizada em estudos comparativos de diferentes tecnologias de ônibus como o feito por Dallmann para o ICCT (DALLMANN, 2019) e MDIC em 2018, que utilizaram o método de Custo Total de Propriedade (sigla em inglês TCO) para a avaliação, também conhecido como custo do ciclo de vida. O TCO é definido como a soma dos custos para adquirir, operar e manter o veículo e sua infraestrutura de abastecimento durante determinado período (MDIC, 2018).

10 anos para o ônibus elétrico e 5 anos para o a diesel: Como comentado no tópico 2.2.1 deste trabalho, os ônibus a diesel são normalmente substituídos no Brasil após aproximadamente 5 anos de uso. Ainda, estima-se que ônibus elétricos podem ser utilizados por até 15 anos. Dessa forma, definiu-se como um segundo cenário para a vida útil das tecnologias um tempo total de análise de 10 anos, com a vida útil dos ônibus a diesel de cinco anos, e o elétrico de dez anos. No caso do ônibus a diesel, além da aquisição da tecnologia no primeiro ano, no quinto ano do fluxo de caixa, substitui-se o veículo adquirido por um novo, considerando uma saída de caixa no valor da aquisição, e uma entrada de caixa referente ao valor da revenda. No décimo ano, há uma nova revenda, porém sem a compra de um novo veículo, e este último também acontece para o ônibus elétrico.

- **Existência de BESS**

Considerou-se o cenário de existência ou não de sistema de armazenamento de energia com baterias, que representa um custo a mais de investimento inicial do sistema, porém impacta no custo da tarifa de energia, que é considerada apenas como de horário fora de ponta.

- Taxa de desconto / Taxa mínima de atratividade

Para cada um dos cenários foram avaliadas 3 taxas diferentes como Taxa Mínima de Atratividade – 5,5%, 7% e 10%. A taxa de 5,5% foi escolhida pois se aproxima da taxa Selic no momento que o estudo foi realizado (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2021). Já a taxa de 10% foi utilizada devido à existência de um esquema de financiamento do BNDES para ônibus elétricos, o FINEM Meio Ambiente, que possui créditos que cobrem 80-100% do custo do ônibus, duram toda a vida útil do ativo (até 34 anos) e têm uma taxa de juros de 9-11% (ICCT; C40, 2020).

Para facilitar a identificação dos cenários nos próximos tópicos deste trabalho, foram definidos códigos para identificação dos quatro principais cenários avaliados, onde “1” significa sem BESS e “2” com BESS e “A” é referente a um mesmo tempo de vida útil para os ônibus e “B” tempos de vida útil no projeto diferentes:

- **C1A:** Vida útil de 10 anos para ônibus elétrico e ônibus a diesel - Sem BESS
- **C2A:** Vida útil de 10 anos para ônibus elétrico e ônibus a diesel - Com BESS
- **C1B:** Vida útil de 10 anos para ônibus elétrico e 5 para ônibus a diesel - Sem BESS
- **C2B:** Vida útil de 10 anos para ônibus elétrico e 5 para ônibus a diesel - Com BESS

Neste trabalho também é analisado o efeito das diminuições projetadas no preço de um ônibus elétrico em relação a um ônibus a diesel, da variação do custo do óleo diesel e da diminuição do custo do BESS. Este assunto é explorado em maiores detalhes no tópico 3.2.6, de análise de sensibilidade.

3.1.3 Premissas utilizadas

Com o objetivo de realizar uma análise realista, foram adotadas premissas para a avaliação, dentre elas:

- O trajeto e eficiência do ônibus elétrico é equivalente ao realizado pelo eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC;
- Em todos os cenários, considera-se que o ônibus elétrico é abastecido por energia comprada da rede e que o sistema FV gera energia que é injetada na rede;

- A depreciação dos dois tipos de ônibus é de 8% ao ano e o valor do veículo depreciado no final do seu prazo de propriedade é tratado como um fluxo de caixa positivo (DALLMANN, 2019);
- Todos os cenários consideram o custo de aquisição da tecnologia e infraestrutura para o ano de 2021;
- Os valores referentes a custos de manutenção dos ônibus, sistema fotovoltaico e BESS foram ajustados anualmente de acordo com uma taxa de reajuste tarifário e inflação de 3,5% (GREENER; NEWCHARGE, 2021);
- Não são considerados cenários de financiamento ou outras medidas de incentivos nesta análise, apenas as taxas mínimas de atratividade. Dessa forma, os fluxos de caixa resultantes da análise não apresentam possíveis efeitos resultantes destes aspectos de natureza fiscal ou tributária, que eventualmente possam ser estabelecidas durante a concepção ou andamento do projeto.

Mais detalhes sobre os fatores avaliados no trabalho e seus métodos de cálculo estão dispostos no Tópico 3.2.

3.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

O objetivo da análise é avaliar a viabilidade econômica da substituição das tecnologias de ônibus – diesel para elétrico, considerando os aspectos de funcionamento do eBus do Laboratório Fotovoltaica UFSC, e que o ônibus elétrico funciona associado a um sistema de geração de energia FV e, em alguns cenários, com um banco de armazenamento de energia com baterias de segunda vida.

Sendo assim, foram considerados quatro diferentes cenários e em cada um deles, três diferentes taxas de desconto, como citado no capítulo anterior deste trabalho.

Para calcular os indicadores de viabilidade econômica do sistema, o VPL, a TIR e o tempo de retorno (payback descontado), realizou-se previamente o levantamento de dados relevantes e a elaboração do fluxo de caixa de cada um dos cenários. O procedimento metodológico atrás destes processos, assim como as fontes de dados e os valores de referência, estão descritos nos itens a seguir.

3.2.1 Custos de aquisição

Para o cálculo do CAPEX, custos de aquisição dos sistemas, consideram-se o investimento inicial na aquisição dos veículos e das infraestruturas necessárias. No caso do sistema de ônibus a diesel, o investimento inicial consiste apenas no custo do veículo, enquanto para o ônibus elétrico considera-se também a infraestrutura necessária de recarga, o sistema fotovoltaico associado e, em um alguns dos cenários, o banco de baterias para armazenamento de energia.

3.2.1.1 Veículos

Os custos dos veículos foram obtidos através do estudo do ICCT de 2019 (DALLMANN, 2019), que utilizou valores de referência da SPTrans e do CARB. Os valores foram ajustados de acordo com a variação do câmbio do dólar, uma vez que a maior parte dos componentes são importados.

3.2.1.2 Infraestrutura de recarga

Nesta análise foi considerado um carregador tradicional plug-in, localizado na sede do laboratório no Sapiens Park. O eletro posto de recarga do eBus foi desenhado pensando numa proposta de parada de ônibus, que ao mesmo tempo atendesse à necessidade de abrigar um trafo de 100 kVA e um carregador com 75 kW de potência (Takaoka/Mitsubushi) do tipo “carga lenta” (1h30 para fazer cada recarga completa). O custo da infraestrutura de recarga foi obtido através do estudo do ICCT de 2019 (DALLMANN, 2019), e o valor atualizado para o ano de 2021 de acordo com a variação do dólar, assim como feito para os custo de aquisição dos veículos.

Como neste trabalho a análise foi realizada para comparação entre tecnologias, com os valores relativos a um ônibus, o preço da infraestrutura de recarga considerado na análise foi uma fração proporcional à quantidade de horas que o ônibus a utiliza, pensando que em um cenário mais realista outros veículos também usufruiriam da estrutura. Assim, de acordo com as condições de contorno estabelecidas previamente, o valor da estrutura de recarga para o ônibus elétrico em questão foi encontrado através da equação:

$$\text{Custo Infra Recarga} = \text{Custo Infra RecargaTotal} * \frac{\text{n}^\circ \text{ horas utilizadas por dia}}{\text{n}^\circ \text{ horas no dia}}$$

3.2.1.3 Sistema fotovoltaico

Para este trabalho considerou-se a construção de um sistema fotovoltaico semelhante ao do Edifício A do laboratório, de 66,15 kWp (ver Figura 7), com suas características de orientação e inclinação, localizado em Florianópolis. Ao longo dos anos o sistema mostrou capacidade de geração de energia suficiente para abastecimento do ônibus. Dessa forma, foram utilizados valores reais de geração de energia fotovoltaica deste sistema, obtidos em uma pesquisa realizada por Zomer com dados de 2017 e publicada em 2020. A Figura 9 mostra um gráfico elaborado por Zomer que compara valores medidos e valores simulados de geração FV do laboratório. Neste trabalho foi utilizada uma média anual de geração FV, calculada a partir dos valores medidos, da primeira linha da tabela da parte inferior do gráfico.

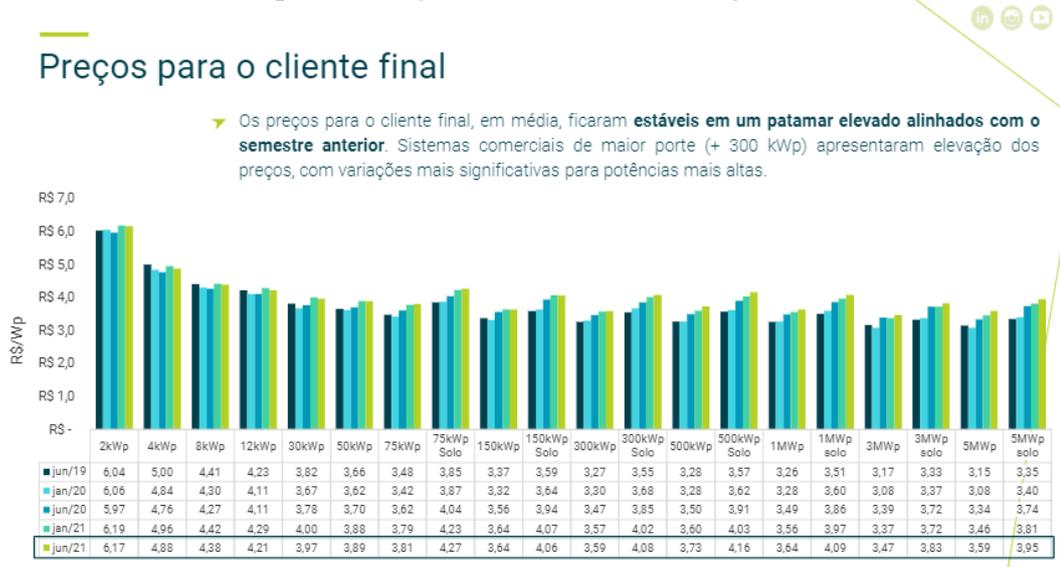
Figura 9 - Comparações entre a geração de energia medida e simulada para o sistema do edifício A do laboratório Fotovoltaica UFSC



Fonte: Clarissa Zomer et al. (2020).

Para calcular o custo do sistema fotovoltaico nesta análise, foram utilizados valores médios de custos de sistema fotovoltaico por kWp para o consumidor final divulgados pela Greener em julho de 2021, mostrados na Figura 10.

Figura 10 - Preços de sistemas fotovoltaicos para o cliente final



Fonte: Greener (2021).

Calculou-se por interpolação o custo aproximado para um sistema de 65 kWp a partir dos dados de sistemas de 50 kWp e 75 kWp. A Tabela 3 mostra os resultados da interpolação e o custo aproximado para um sistema de 65 kWp.

Tabela 3 – Custo do sistema fotovoltaico por interpolação

Potência do sistema (kWp)	Custo do sistema – jun 2021 (R\$ / Wp)
50	3,890
75	3,810
65	3,842

3.2.1.4 Sistema de armazenamento de energia

Como comentado no tópico 3.1.2, referente aos Cenários Avaliados, em alguns casos foi considerado o investimento em um sistema de armazenamento de energia com baterias – BESS. O valor de investimento inicial utilizado para o sistema foi de R\$4,00 / Wh, equivalente a um sistema com baterias de íons de lítio novas, de acordo com um relatório da Greener (GREENER; NEWCHARGE, 2021). Do mesmo relatório também foi obtido um custo médio anual de manutenção do sistema.

Para calcular a capacidade de armazenamento necessária pelo sistema foi utilizada a equação:

$$\text{Capacidade BESS} = \text{Consumo médio diário eBus} * \frac{\text{n}^\circ \text{ horas de recarga horário de ponta}}{\text{n}^\circ \text{ horas de recarga por dia}} * 1,2$$

Sendo 1,2 um fator de segurança para garantir aproximadamente 20% a mais de energia armazenada.

3.2.2 Custos de operação

Foram considerados como custos de operação os custos com abastecimento dos ônibus – diesel e energia. Outros custos como salário dos motoristas e entradas referentes a ticket de passagem foram desconsiderados, uma vez que o objetivo deste trabalho é a comparação entre as tecnologias.

Para determinar os custos de abastecimento para o ônibus elétrico foi utilizado o consumo médio anual do eBus, calculado a partir do consumo médio de cada recarga e número de recargas por dia e número de dias de funcionamento no ano (ver Tabela 2). Além disso, considerou-se a geração FV do sistema de aproximadamente 82670 kWh/ano (considerando uma degradação do sistema com perda de produtividade de 0,3% ao ano) e a dinâmica de venda e compra de energia da rede de distribuição e as tarifas de energia pagas pelo Laboratório Fotovoltaica UFSC, subgrupo A4, modalidade Horossazonal Verde (ver Tópico 3.1.1).

Dessa forma, a equação para cálculo da receita anual de geração energia é:

$$\text{Receita} = \text{Geração de energia} * \text{Tarifa de energia FP}$$

Sendo a geração de energia em kWh/ano, considerando a perda de produtividade do sistema, e a tarifa de energia em R\$ por kWh. Considera-se que toda a energia produzida gera receita em horário fora de ponta, quando há incidência solar. Já, as equações de despesa anual com consumo de energia da rede é:

$$\text{Despesa sem BESS} = \text{Consumo eBus} * \text{Tarifa FP} * \frac{4}{5} + \text{Consumo anual eBus} * \text{Tarifa P} * \frac{1}{5}$$

$$\text{Despesa com BESS} = \text{Consumo eBus} * \text{Tarifa FP}$$

Sendo o consumo do eBus em kWh/ano, e as tarifas FP e P tarifas fora de ponta e de ponta, respectivamente, ambas em R\$ por kWh. O consumo do eBus é considerado o mesmo ao longo dos anos e todas as tarifas contam com o ajuste anual de 5,2%, citado anteriormente neste capítulo.

Já, para o ônibus a diesel, considera-se como custo de operação o custo com combustível. Para realizar o cálculo foram obtidos valores de custo de óleo diesel S10 da “Série histórica levantamento de preços de combustíveis para Florianópolis” divulgados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2021). Com base na série histórica foi obtido uma porcentagem média de aumento anual do custo do combustível, de 5,74% ao ano. Assim, foram estimados valores para o custo do diesel de 2021 a 2031.

Quanto ao rendimento médio do ônibus foi utilizado 2 km/l, ou seja, meio litro de diesel é consumido para cada quilômetro rodado, considerando um ônibus refrigerado e rodando em meio urbano. Este dado foi obtido do estudo realizado pela EPE, que analisou valores de diferentes localidades brasileiras (EPE, 2020a). A equação utilizada neste estudo é a seguinte:

$$\text{Despesa diesel} = \text{Rendimento médio} * \text{Distância rodada} * \text{Custo diesel}$$

Onde o rendimento é em litros por quilômetros, a distância rodada é a distância total anual rodada pelo ônibus em quilômetros e o custo do diesel, em R\$ por litro, é o valor médio anual de diesel S10 no ano em questão para o consumidor final.

Nesta análise não são considerados alguns custos de funcionamento dos sistemas, como administração, salário de motoristas, licenciamento, receita com tarifas para passageiros e seguro, uma vez que o objetivo é avaliar os custos que dependem da seleção da tecnologia dos ônibus e que estes custos não influenciariam de forma relevante no estudo.

3.2.3 Custos de manutenção

Os custos de manutenção nesta análise contemplam os custos de manutenção dos veículos, sistema fotovoltaico e BESS. Os valores de referência utilizados para os veículos

são de 0,58 e 0,77 reais por quilômetro rodado para o ônibus elétrico e a diesel, respectivamente. No custo de manutenção estão incluídos todos os custos necessários para a correta operação dos veículos, como peças e acessórios, lubrificantes e pneus, assim como revisão nos motores, substituição de baterias ou custos de atualização. A origem do valor utilizado para o ônibus elétrico é o banco de dados do CARB de 2016 (apud MDIC, 2018) e do a diesel é o relatório de avaliação tarifária do SPTrans de 2018 (apud MDIC, 2018).

Considerou-se que o veículo elétrico possui frenagem regenerativa, o que reflete em um menor desgaste dos freios e conseqüentemente um menor custo de manutenção. Além disso, é relevante destacar que os propulsores elétricos dos ônibus elétricos são simplificados em relação aos motores a diesel convencionais e, por isso, exigem menos manutenção regular (CARB, 2016b apud MDIC, 2018).

Quanto ao custo de manutenção do sistema fotovoltaico, considerou-se 1% do valor total de investimento inicial do sistema no primeiro ano, o mesmo valor adotado em outros trabalhos de pesquisa em viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil (SCHNEIDER; SORGATO; RÜTHER, 2018).

Já, o custo de manutenção do sistema de BESS é considerado 0,5% por ano, de acordo com o estudo estratégico de mercado de armazenamento de energia da Greener (GREENER; NEWCHARGE, 2021).

Todos os custos de manutenção foram ajustados com uma taxa de reajuste tarifário e inflação de 3,5% ao ano.

3.2.4 Valor residual de revenda

Foi utilizada uma taxa de depreciação de 8% ao ano para ambas as tecnologias de ônibus, segundo dados disponibilizados pela SPTrans de 2018 (apud MDIC, 2018). De modo geral, as grandes capitais procuram manter sua frota de ônibus a diesel com idade média próxima de 5 anos (EPE, 2020a). Dessa forma, foram definidos os diferentes cenários de vida útil para esta tecnologia, um considerando a vida útil maximizada em 10 anos e um considerando 5 anos. O valor do veículo depreciado no final do seu prazo de propriedade é levado em consideração na elaboração do fluxo de caixa.

Apesar de ser uma estimativa mais incerta, devido ao fato de ser uma tecnologia mais recente, também considera-se a depreciação dos ônibus elétricos também é de 8% ao ano, em média (MDIC, 2018). Ainda, vale ressaltar que, como comentado no Tópico 2.2.1, a vida útil

dos ônibus elétricos é mais longa, podendo manter o veículo em operação por até 15 anos. Nesta análise considerou-se 10 anos de vida útil para este ônibus em todos os cenários.

3.2.5 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa descontado é um dos métodos mais utilizados para realizar análises de investimentos. Para construir o fluxo de caixa projetado de um investimento é necessário definir os custos de investimento inicial, custos de operação, período de vida útil do projeto, estimativa de valor residual e uma taxa de desconto (RICARDO BORDEAUX-REGO, 2015).

Uma vez definidos estes custos, foi possível identificar e projetar os fluxos de entrada e saída de caixa, correspondentes às diferenças de receita e despesa das tecnologias durante a vida útil do projeto.

As entradas no fluxo de caixa são o resultado do saldo energético do sistema ônibus elétrico com sistema fotovoltaico e BESS, quando houver, e da despesa com combustível do ônibus a diesel, somadas às diferenças entre os custos de manutenção das tecnologias. O método de cálculo e referências para os dados de cada uma destas variáveis estão detalhados nos Tópicos 3.2.2 e 3.2.3. Além disso, no ano 5 e ano 10 são considerados os custos com troca de ônibus a diesel e revenda dos veículos ao final do tempo de análise.

Graficamente, o fluxo de caixa considerado para cada cenário está representado na Tabela 4.

Tabela 4 - Representação gráfica do fluxo de caixa usado na análise econômica

CENÁRIO	ANO				
	0	...	5	...	10
C1A	- Custo inicial	+ Diferença O&M	+ Diferença O&M	+ Diferença O&M	+ Diferença O&M + Diferença valor de revenda dos ônibus
C2A	- Custo inicial com BESS				
C1B	- Custo inicial		+ Diferença O&M com custo evitado		
C2B	- Custo inicial com BESS		+ Diferença O&M com troca de ônibus diesel		

Onde “Diferença O&M” se refere à diferença entre os custos de operação e manutenção. Os cenários "1" não possuem BESS e os cenários "2" possuem BESS. Já, nos

cenários "A" considera-se a mesma vida útil para as tecnologias, enquanto nos "B" considera-se a vida útil de 10 anos para o ônibus elétrico e 5 anos para o ônibus a diesel.

3.2.6 Análise de sensibilidade

A viabilidade econômico-financeira dos sistemas de ônibus elétricos é influenciada por uma conjuntura de fatores que podem variar consideravelmente no futuro. Assim, após a identificação dos primeiros resultados da avaliação econômica do trabalho, foi realizada uma análise de sensibilidade de algumas variáveis-chave utilizadas. Estas variáveis estão detalhadas a seguir.

- **Preço de compra do ônibus elétrico:** As análises iniciais deste estudo consideraram os valores dos veículos de acordo com Dallmann (2019), os quais mostram o valor do ônibus elétrico sendo 1,75 vezes o valor do ônibus a diesel. Na análise de sensibilidade considerou-se esta relação como sendo de 1,3 vezes o valor do ônibus a diesel e uma alternativa onde as duas tecnologias custam o mesmo valor, uma vez que o custo de baterias, que representam grande parte do custo do veículo elétrico, tende a reduzir e existe a possibilidade de futuros subsídios aos veículos elétricos ou taxaço dos a diesel.
- **Variação no custo do diesel:** Inicialmente neste trabalho, foi utilizado o custo de diesel para o consumidor final, uma vez que, o cenário da análise é o laboratório Fotovoltaica UFSC, e não é considerada uma frota específica ou escala. Porém, o valor pago por concessionárias pode variar de acordo com o volume de diesel comprado, e, segundo estudo da EPE (EPE, 2020a), o preço pago por estas para o óleo diesel aproxima-se do preço de distribuição nacional. Dessa forma, na análise de sensibilidade considerou-se o cenário alternativo com o diesel mais barato, com o valor de distribuição, seguindo a mesma metodologia do tópico 3.2.2 para a estimativa do custo do diesel de acordo com dados da série histórica divulgada pela ANP (ANP, 2021).
- **BESS mais barato:** Outro aspecto estudado na análise de sensibilidade é o efeito da diminuição do custo do BESS nos indicadores financeiros. Na análise inicial considerou-se R\$4,00 por Wh, porém, este custo é relativo a um banco de baterias novas. Na última análise considerou-se o custo total do sistema sendo

35% do valor utilizado inicialmente, considerando um sistema com baterias de segunda vida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONÔMICA INICIAL

Para avaliação da viabilidade econômica do investimento em substituição de tecnologia de ônibus, considerou-se o horizonte de projeto de 10 anos com quatro principais cenários e três taxas de desconto. Para encontrar os valores de entradas e saídas do fluxo de caixa, foram utilizadas equações, bases de dados, artigos científicos e outras referências detalhadas no capítulo de Metodologia deste trabalho. Os principais *inputs* utilizados para os custos iniciais deste trabalho estão reunidos na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 - Resumo dos custos iniciais utilizados

CUSTO INICIAL	
ÔNIBUS ELÉTRICO 2021	R\$ 1.338.901,26
INFRAESTRUTURA DE RECARGA 2021	R\$ 46.994,21
ÔNIBUS A DIESEL 2021	R\$ 765.086,24
SISTEMA FV	R\$ 254.148,30
BESS	R\$ 288.000,00

Os valores relativos a custos iniciais do ônibus elétrico, ônibus a diesel e infraestrutura de recarga eram relativos a 2019, desta forma, foram reajustados de acordo com a variação do dólar para 2021, equivalente a 40%, como descrito anteriormente no Tópico 3.2.1. Considerou-se um sistema de 66,15 kWp para o cálculo do custo do sistema fotovoltaico. Para o valor da infraestrutura de recarga, vale ressaltar que foi considerado o custo como uma fração proporcional à quantidade de horas utilizadas por um ônibus (ver Tópico 3.2.1.2). Os fluxos de caixa resultantes estão disponíveis no APÊNDICE A – Fluxos de caixa dos cenários avaliados – C1A, ao final do documento.

Os principais resultados de VPL, TIR e Payback descontado (em anos) decorrentes da análise econômica inicial, considerando os quatro cenários – C1A, C2A, C1B e C2B, e as taxas de desconto de 5,5%, 7% e 10%, estão resumidos na matriz da Tabela 6 .

Tabela 6 - Matriz com os principais resultados da análise inicial

		SEM BESS				COM BESS			
		CENÁRIO C1A				CENÁRIO C2A			
		Sem BESS - vida útil 10 anos ambas tecnologias				Com BESS - vida útil 10 anos ambas tecnologias			
VIDA ÚTIL IGUAL		TMA	VPL	TIR	Payback descontado	TMA	VPL	TIR	Payback descontado
		5,5%	R\$ 678.005,87	17,28%	6,19	5,5%	R\$ 528.569,31	12,82%	7,53
		7,0%	R\$ 555.070,18	17,28%	6,53	7,0%	R\$ 395.032,80	12,82%	8,02
		10,0%	R\$ 348.285,68	17,28%	7,36	10,0%	R\$ 170.296,36	12,82%	9,14
		CENÁRIO C1B				CENÁRIO C2B			
		Sem BESS - vida útil 5 anos diesel e 10 anos elétrico				Com BESS - vida útil 5 anos diesel e 10 anos elétrico			
VIDA ÚTIL DIFERENTE		TMA	VPL	TIR	Payback descontado	TMA	VPL	TIR	Payback descontado
		5,5%	R\$ 776.936,30	19,56%	4,91	5,5%	R\$ 627.499,73	14,54%	6,24
		7,0%	R\$ 653.649,70	19,56%	5,08	7,0%	R\$ 493.612,32	14,54%	6,67
		10,0%	R\$ 443.963,27	19,56%	5,80	10,0%	R\$ 265.973,95	14,54%	7,75

Todos os cenários analisados mostraram ao longo do período de análise um VPL positivo. A alternativa mais promissora, ou seja, com melhor desempenho nas análises de indicadores econômicos, é o cenário C1B, uma vez que apresenta um VPL positivo de R\$776.936,30 com a TMA de 5,5%, referente ao valor mínimo de rendimento do investimento considerado atrativo. Além disso, o cenário teria como resultado uma TIR de 19,56%, e um payback descontado de aproximadamente 4 anos e 11 meses.

Os gráficos representados na Figura 11 e Figura 12 apresentam os resultados de VPL e TIR, respectivamente. Através dos gráficos pode-se observar que os valores para o cenário mais atrativo possuem destaque positivo quando comparados aos outros cenários.

Figura 11 - Resultados de VPL para os cenários avaliados na análise inicial

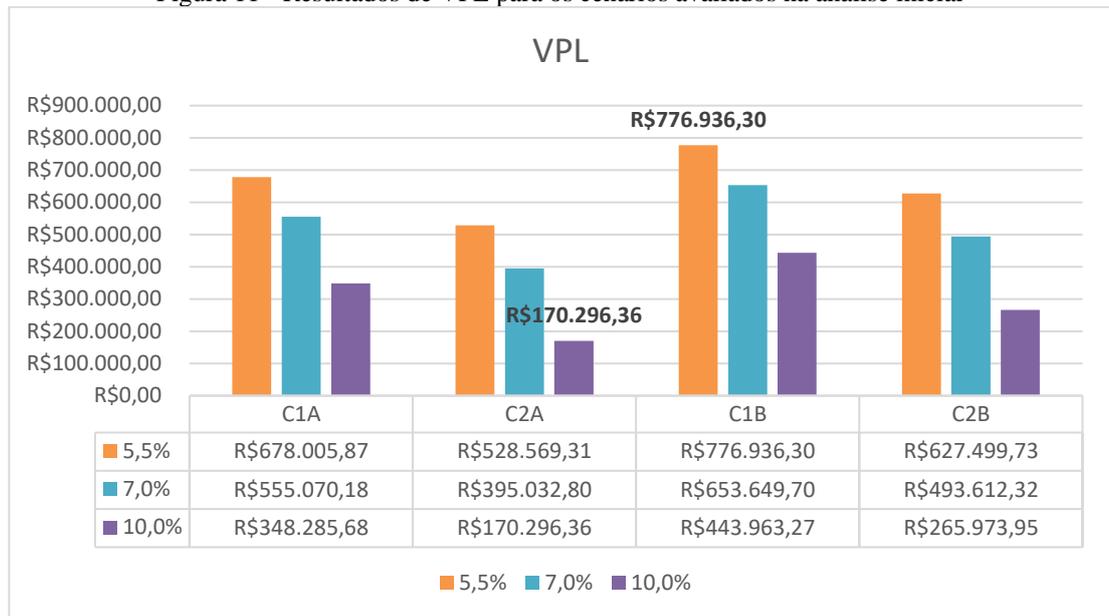
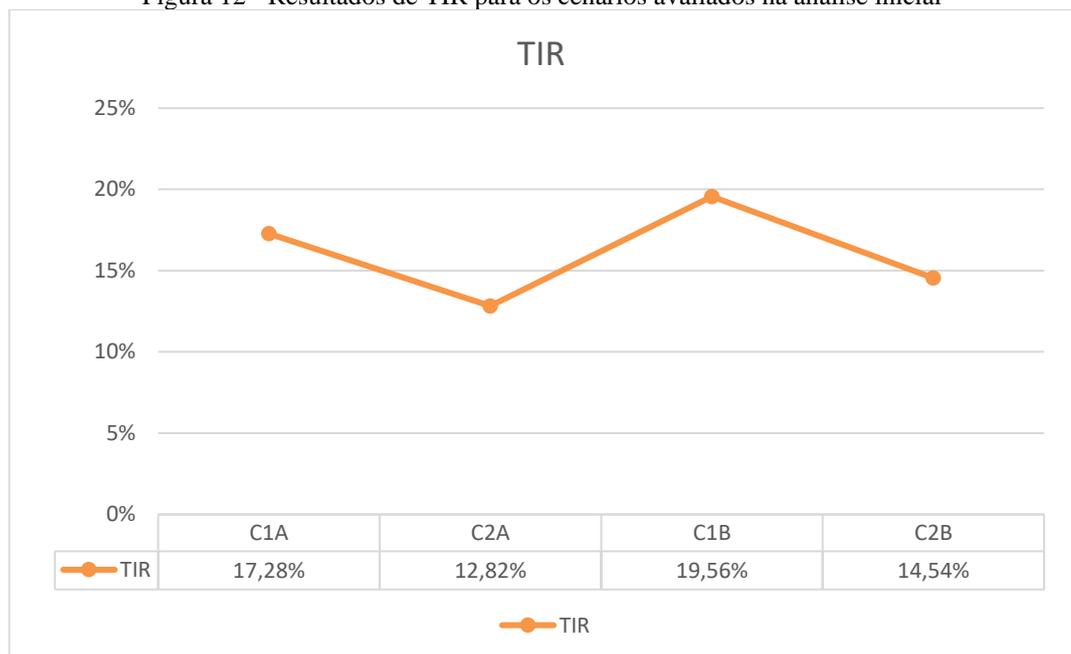


Figura 12 - Resultados de TIR para os cenários avaliados na análise inicial



O cenário que mostrou o resultado menos interessante economicamente é o cenário C2A, considerando a TMA de 10%. Neste cenário, o investimento geraria um retorno financeiro, VPL, de R\$ 170.296,36, com uma TIR de 12,82% e levaria mais de 9 anos para gerar lucro, sendo que o ciclo de projeto é de 10 anos.

A Figura 13 e Figura 14 mostram graficamente os fluxos de caixa resultantes do cenário mais promissor – C1B, e do menos promissor, C2A:

Figura 13 - Gráfico do fluxo de caixa do cenário C1B

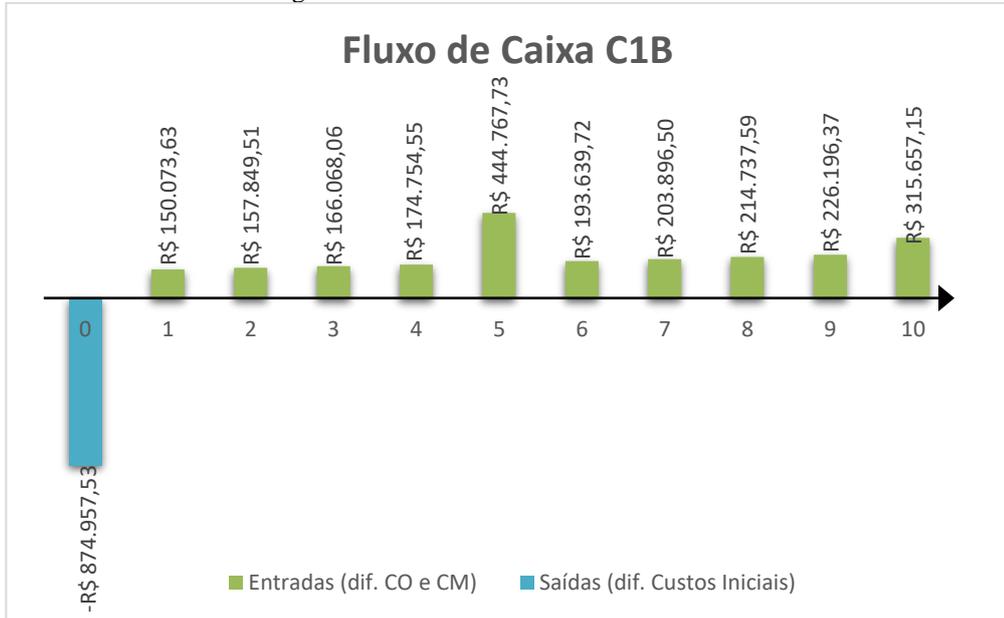
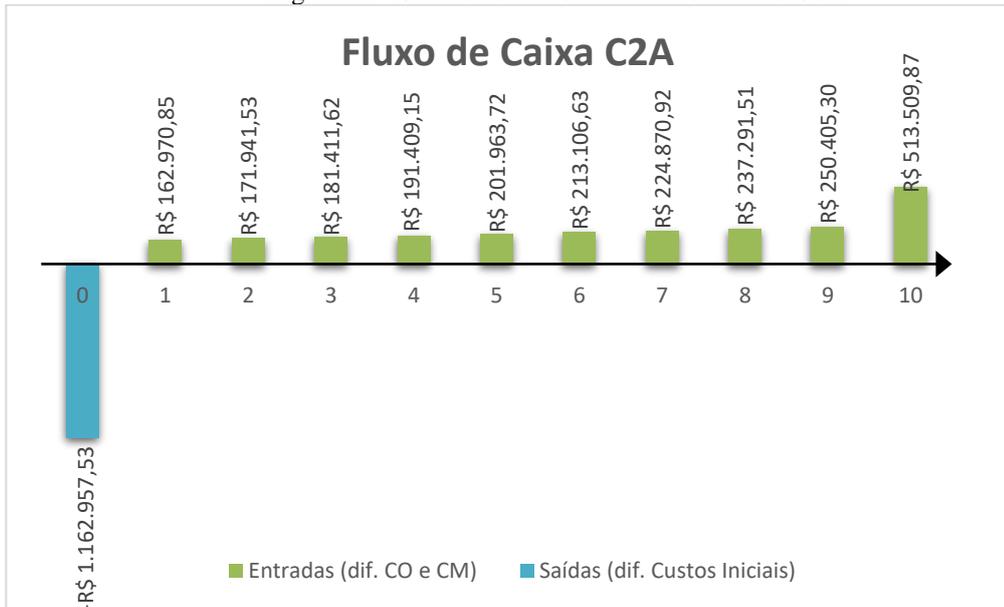


Figura 14 - Gráfico do fluxo de caixa do cenário C2A



Os gráficos de fluxo de caixa resultantes para cada cenário mostram de forma geral uma saída grande relativa à diferença entre os investimentos iniciais no ano zero, e entradas referentes às diferenças entre custos e receitas das duas tecnologias do ano 1 ao ano 10.

Os cenários que consideram a vida útil do ônibus a diesel como 5 anos, como o cenário C1B, geram uma “entrada” adicional no ano 5, referente ao custo evitado de substituição do veículo. Quanto ao valor final de revenda dos veículos ao final do período de

10 anos de análise do projeto, considerando a mesma taxa de depreciação anual de 8% para ambos os veículos, os ônibus elétricos seriam revendidos por um valor superior aos a diesel, resultando em uma diferença positiva que justifica os valores presentes no fluxo para o ano 10.

Para que um investimento seja considerado viável, o valor da TIR deve ser superior ao valor da TMA, é necessário que o VPL seja positivo e, também, que o tempo de retorno (payback descontado) do investimento seja inferior horizonte de projeto, neste caso, equivalente a 10 anos.

Os gráficos da Figura 15 e Figura 16 representam de forma visual o valor referente ao fluxo de caixa descontado acumulado ao longo dos anos, evidenciando o payback descontado, do cenário mais promissor – C1B, e do menos promissor, C2A.

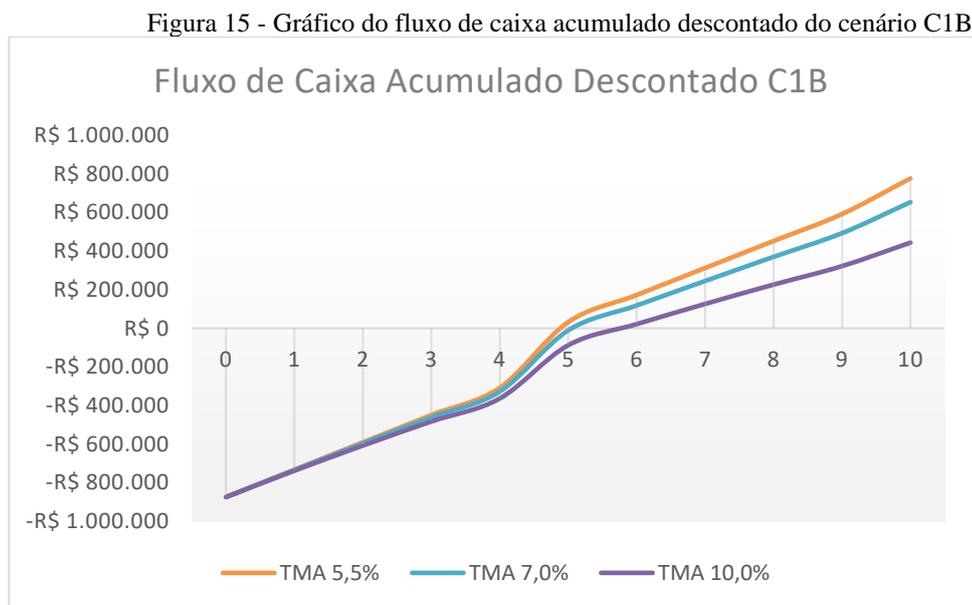
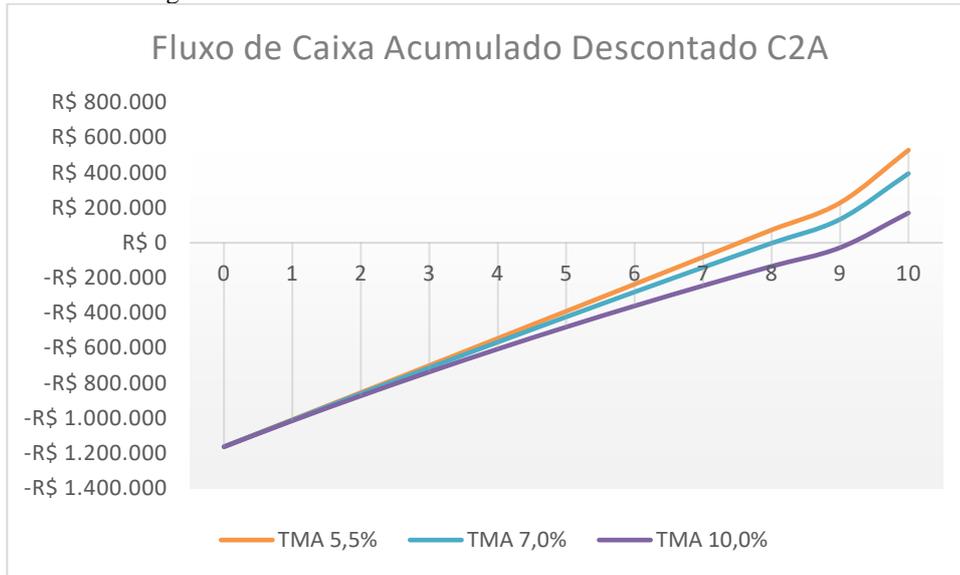


Figura 16 - Gráfico do fluxo de caixa acumulado descontado do cenário C2A



Os gráficos de fluxo de caixa e fluxo de caixa acumulado descontado dos outros cenários estão disponíveis no APÊNDICE B – Gráficos de fluxo de caixa e fluxo de caixa acumulado descontado dos cenários C1A e C2B.

A Tabela 7 mostra os resultados da análise comparativa dos diferentes tempos de retorno do investimento (payback descontado). Em destaque observa-se que o cenário considerado o mais viável, C1B, retorna financeiramente o investimento 4 anos e 3 meses antes do cenário menos viável, C2A.

Tabela 7 - Resultados de payback descontado para os cenários avaliados na análise inicial

TMA	CENÁRIOS			
	C1A	C2A	C1B	C2B
5,5%	6 anos e 2 meses	7 anos e 6 meses	4 anos e 11 meses	6 anos e 3 meses
7%	6 anos e 6 meses	8 anos	5 anos e 1 mês	6 anos e 8 meses
10%	7 anos e 4 meses	9 anos e 2 meses	5 anos e 10 meses	7 anos e 9 meses

De forma geral, as alternativas menos lucrativas foram as que possuem o BESS. Este resultado é decorrente de um custo ainda consideravelmente alto com investimento inicial do sistema. Um dos fatores que gerou este alto investimento foi ter considerado um custo inicial

de aquisição de um sistema com baterias novas, ao invés de baterias de segunda vida, como idealizado inicialmente. Esta escolha foi feita porque sistemas com baterias de segunda vida ainda não possuem um mercado e custos de implementação bem estabelecidos. Além disso, estes projetos ainda estão, em grande parte dos sistemas operantes, em fase de projeto piloto para testes de desempenho, como comentado no capítulo de Revisão Bibliográfica deste trabalho.

4.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

4.2.1 Análise de sensibilidade custo do ônibus e custo do diesel

A análise de sensibilidade permitiu identificar a variação resultante nos indicadores financeiros a partir da alteração de parâmetros utilizados do estudo de viabilidade econômica das alternativas. Como abordado no tópico 3.2.6, foram estudados diferentes valores para o custo inicial do ônibus elétrico. Além disso, também foi avaliado o resultado quando o valor pago pelo diesel é o de distribuição, ou seja, mais barato do que o utilizado na análise inicial.

A Tabela 8 mostra nas colunas da esquerda os parâmetros e resultados dos indicadores econômicos para a análise inicial, enquanto as colunas da parte direita da tabela mostram os parâmetros e resultados da análise de sensibilidade. Nesta tabela estão mostrados os resultados referentes aos cenários C1B e C2A, que foram os mais e menos atrativos para estas análises, respectivamente, assim como na análise inicial.

Tabela 8 - Resultados da análise de sensibilidade do custo do ônibus e do diesel

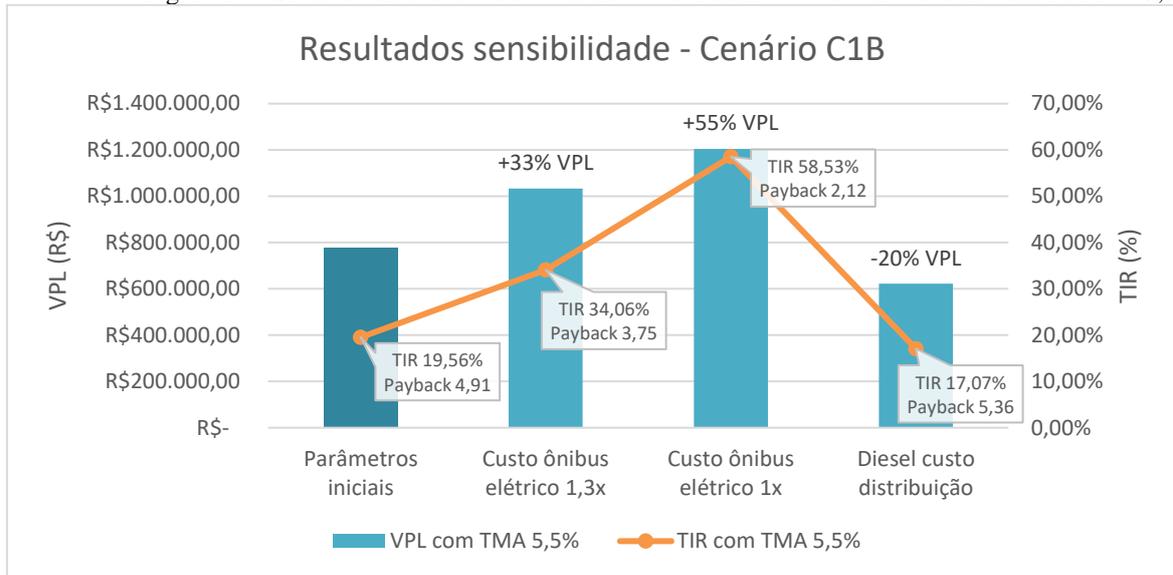
Parâmetros iniciais		Valores escolhidos para análise de sensibilidade		
		Ônibus elétrico -> 1,3x ônibus a diesel	Ônibus elétrico -> 1x ônibus a diesel	Diesel custo distribuição
Custo ônibus elétrico -> 1,75x ônibus a diesel	R\$ 1.338.901,26	R\$ 994.612,11	R\$ 765.086,24	-
Custo Diesel consumidor final (média das médias anuais - R\$/L)	R\$ 5,55	-	-	R\$ 4,93
INDICADORES FINANCEIROS C1B				
TMA 5,5%				
VPL	R\$ 776.936,30	R\$ 1.033.671,25	R\$ 1.204.827,71	R\$ 622.489,15
TIR	19,56%	34,06%	58,53%	17,07%
Payback descontado	4,91	3,75	2,12	5,36
TMA 7%				
VPL	R\$ 653.649,70	R\$ 921.912,56	R\$ 1.100.754,29	R\$ 510.660,87
TIR	19,56%	34,06%	58,53%	17,07%

Payback descontado	5,08	3,88	2,17	5,74
TMA 10%				
VPL	R\$ 443.963,27	R\$ 730.592,41	R\$ 921.678,31	R\$ 320.426,15
TIR	19,56%	34,06%	58,53%	17,07%
Payback descontado	5,80	4,07	2,27	6,63
INDICADORES FINANCEIROS C2A				
TMA 5,5%				
VPL	R\$ 528.569,31	R\$ 785.304,25	R\$ 956.460,71	R\$ 374.122,15
TIR	12,82%	20,37%	29,65%	10,79%
Payback descontado	7,53	5,30	3,81	8,36
TMA 7%				
VPL	R\$ 395.032,80	R\$ 663.295,66	R\$ 842.137,38	R\$ 252.043,97
TIR	12,82%	20,37%	29,65%	10,79%
Payback descontado	8,02	5,55	3,95	8,96
TMA 10%				
VPL	R\$ 170.296,36	R\$ 456.925,50	R\$ 648.011,40	R\$ 46.759,24
TIR	12,82%	20,37%	29,65%	10,79%
Payback descontado	9,14	6,14	4,25	9,75

No cenário C1B, ao considerar a TMA como 5,5% os resultados continuaram sendo mais atrativos, com o VPL variando de R\$ 622.489,15, TIR de 17,07% e payback descontado de 5 anos e 2 meses no cenário com o diesel mais barato com custo de distribuição à uma estimativa de VPL de R\$ 1.204.827,71, TIR de 58,53% e payback descontado de 2 anos e 1 mês no cenário que considera o custo inicial do ônibus elétrico equivalente ao custo do ônibus a diesel. Este é o cenário mais promissor de todas as análises, que resulta em uma TIR muito atrativa.

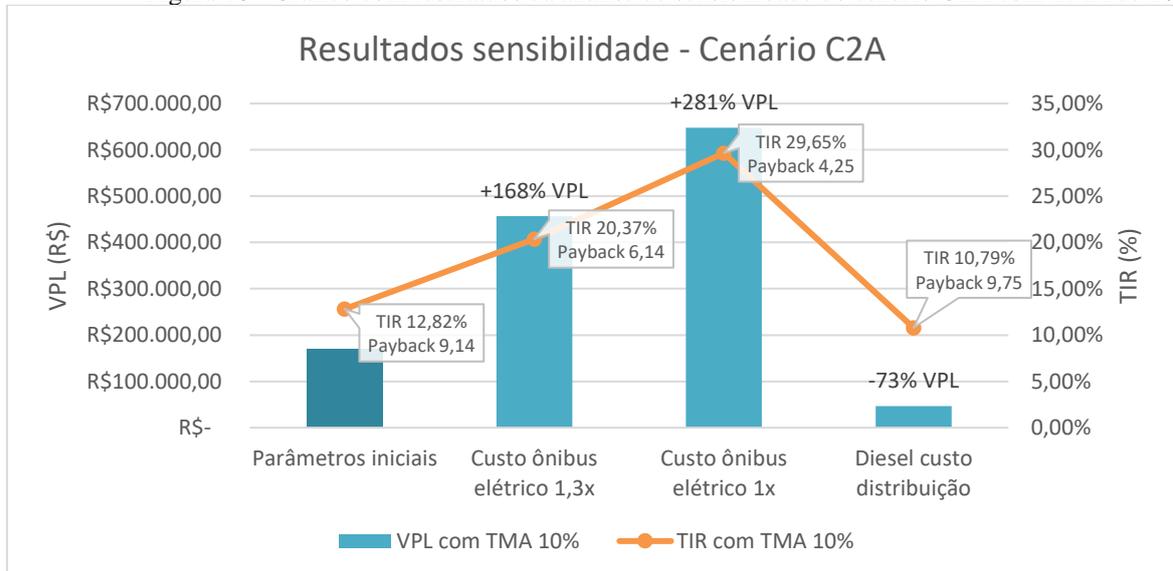
A Figura 17 mostra graficamente os resultados de VPL, TIR e Payback descontado para o cenário C1B com a TMA de 5,5%. No gráfico pode-se observar o impacto da variação de cada parâmetro nos indicadores, como o aumento de 55% do VPL no caso mais promissor.

Figura 17 - Gráfico com resultados da análise de sensibilidade do cenário C1B com TMA de 5,5%



Já a Figura 18 mostra os resultados de forma gráfica para o cenário menos promissor, o C2A com a TMA de 10%. Neste cenário, apesar de a TIR ainda ser maior do que a TMA, o payback descontado, que na análise inicial era de 9 anos e 2 meses, passa para 9 anos e 9 meses no período de 10 anos de projeto, evidenciando um investimento pouco atrativo.

Figura 18 - Gráfico com resultados da análise de sensibilidade do cenário C2A com TMA de 10%



Alguns resultados gerais da análise inicial se confirmaram com a análise de sensibilidade, como a identificação do cenário C1B como mais atrativo e o C2A menos interessante. Ainda, a TIR de todos os cenários foi acima da TMA estabelecida, representando

um indicativo de que o investimento é viável, porém, os resultados de VPL e Payback descontado mostram que em alguns casos o investimento demora muito para se pagar ou não representa uma diferença de lucro significativa ao final do período analisado.

A escolha dos parâmetros da análise financeira pode modificar significativamente a atratividade econômico-financeira do investimento. Os resultados dispostos na Tabela 8 mostram que enquanto a variação do custo do diesel influenciou na redução de aproximadamente 2% na TIR, o valor de custo inicial da tecnologia de ônibus elétricos provocou um aumento considerável na TIR. Para o cenário que resulta em um maior VPL, C1B com o ônibus custando o mesmo que o a diesel, o aumento resultante da TIR foi de 38,97%.

4.2.2 Análise de sensibilidade custo do BESS

Outro aspecto avaliado na análise de sensibilidade foi a variação do custo inicial do BESS, que, na análise inicial era relativo a R\$4,00 / Wh. O valor considerado na análise foi de 35% deste custo inicial, considerando um banco de baterias de segunda vida ao invés de baterias novas. Esta análise gerou resultados nos cenários C2A e C2B, que possuem o BESS, e estão representados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da análise de sensibilidade do custo do BESS

Parâmetros iniciais		Valor escolhido para análise de sensibilidade
		BESS -> 35%
Custo BESS 35% do custo inicial	R\$ 288.000,00	R\$ 100.800,00
INDICADORES FINANCEIROS C2A		
TMA 5,5%		
VPL	R\$ 528.569,31	R\$ 723.921,51
TIR	12,82%	16,88%
Payback descontado	7,53	6,28
TMA 7%		
VPL	R\$ 395.032,80	R\$ 589.798,97
TIR	12,82%	16,88%
Payback descontado	8,02	6,63
TMA 10%		
VPL	R\$ 170.296,36	R\$ 364.064,97
TIR	12,82%	16,88%
Payback descontado	9,14	7,47

INDICADORES FINANCEIROS C2B		
TMA 5,5%		
VPL	R\$ 627.499,73	R\$ 822.851,94
TIR	14,54%	18,92%
Payback descontado	6,24	5,00
TMA 7%		
VPL	R\$ 493.612,32	R\$ 688.378,50
TIR	14,54%	18,92%
Payback descontado	6,67	5,32
TMA 10%		
VPL	R\$ 265.973,95	R\$ 459.742,55
TIR	14,54%	18,92%
Payback descontado	7,75	6,06

Observa-se que os indicadores tiveram uma melhora considerável e que o investimento se torna mais atrativo, principalmente o cenário C2B. Porém, mesmo reduzindo consideravelmente o custo inicial do sistema, o cenário C1B, que não considera o BESS, ainda tem resultados mais atrativos, como mostra a Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do melhor cenário (C1B) e do cenário C2B com BESS em 35% do custo considerado inicialmente

CENÁRIO C1B				CENÁRIO C2B			
Sem BESS - vida útil 5 anos diesel e 10 anos elétrico				Com BESS - vida útil 5 anos diesel e 10 anos elétrico			
TMA	VPL	TIR	Payback descontado	TMA	VPL	TIR	Payback descontado
5,5%	R\$ 776.936,30	19,56%	4,91	5,5%	R\$ 822.851,94	18,92%	5,00
7,0%	R\$ 653.649,70	19,56%	5,08	7,0%	R\$ 688.378,50	18,92%	5,32
10,0%	R\$ 443.963,27	19,56%	5,80	10,0%	R\$ 459.742,55	18,92%	6,06

4.3 LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES DE MELHORIA

Para avaliar a viabilidade econômica de um projeto deve-se definir condições de contorno. Neste estudo, optou-se por utilizar como contexto o sistema do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC, seus componentes e trajeto. Desta forma, os resultados aqui apresentados podem variar de acordo com a escolha de outros parâmetros iniciais, explicados em maiores detalhes no capítulo de Metodologia deste trabalho.

Outra questão que limita de certa forma o estudo são as estimativas utilizadas para custos futuros de energia elétrica, óleo diesel e reajuste tarifário e inflação. Estas estimativas impactam diretamente nos custos de operação e manutenção dos sistemas. Já, o valor de revenda dos veículos ao final do período de vida útil dos mesmos também gera incertezas, uma vez que os ônibus a diesel possuem maior facilidade de serem revendidos enquanto os elétricos dependem de uma infraestrutura externa que ainda não existe na grande maioria dos municípios brasileiros.

A escolha na variação do parâmetro de custo de aquisição do ônibus elétrico na análise de sensibilidade foi baseada em diversos fatores, dentre eles a possibilidade de programas de financiamento, incentivos financeiros e crescentes restrições em emissão de poluentes por veículos, como está acontecendo em países europeus. Além disso, também se considerou a diminuição do custo dos componentes destes veículos, como baterias de íons de lítio, que são possibilidades e estimativas. Uma oportunidade de estudo a partir da metodologia utilizada neste trabalho é a avaliação de cenários específicos de incentivos para projetos semelhantes.

Com a implementação do sistema de BESS com baterias de segunda vida fornecidas pela Nissan, projetado em 2021, como comentado no tópico 2.3.2.1, o laboratório Fotovoltaica UFSC poderá realizar pesquisas com o objetivo de avaliar a eficiência destes sistemas de segunda vida. Além disso, poderá fornecer mais insumos para uma avaliação mais realista e específica de desempenho do sistema de armazenamento associado ao eBus e sistemas fotovoltaicos.

Deve-se levar em consideração que dentre as condições de contorno estabelecidas estão os trajetos percorridos pelo eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC, ou seja, com 4 abastecimentos diários em horários fora de ponta, e 1 abastecimento em horário de ponta. O custo em horário de ponta pago pelo laboratório chega a ser quase 400% maior em horário de ponta comparado a fora de ponta. Desta forma, a variação destes parâmetros pode tornar os cenários com o BESS mais atrativos, caso a dinâmica de recarga seja diferente e exista maior número de recargas à noite.

Neste estudo o foco foi a viabilidade econômica da substituição das tecnologias através de análises de indicadores financeiros de projetos, como VPL, TIR e Payback, porém, existem outros benefícios sociais e ambientais que poderiam ser considerados em futuras análises. A emissão de gases poluentes é danosa para a saúde humana, como comentado anteriormente, e a substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos evita a liberação de

substâncias tóxicas na atmosfera que prejudicam a saúde humana e geram custos para o sistema de saúde público local. Um estudo sobre estes recursos evitados em gastos com saúde pode ser relevante para a temática.

Por fim, um tema de extrema importância que pode ser abordado em um estudo futuro é a análise de ciclo de vida das tecnologias, a quantificação de carbono evitado na atmosfera ao longo do período de estudo e a possibilidade de comercialização de créditos de carbono proveniente da substituição das tecnologias.

5 CONCLUSÃO

O objetivo inicial deste trabalho de conclusão de curso era avaliar a viabilidade econômica do sistema do eBus do laboratório Fotovoltaica UFSC. Ao longo do desenvolvimento do estudo, optou-se por utilizar parâmetros do sistema existente do laboratório, localizado em Florianópolis – SC, como condições de contorno, porém foi definida a metodologia de forma que fosse possível ser replicada em outros locais. Além disso, observou-se a necessidade de avaliar diferentes cenários e variação de aspectos da análise, para verificar a influência destes componentes no projeto.

Desta forma, a metodologia foi definida dividida em duas partes: uma análise de viabilidade econômica inicial com as condições de contorno estabelecidas e uma análise de sensibilidade variando alguns dos parâmetros utilizados. Em todas as análises foi considerado um período de projeto de 10 anos. Em uma planilha do Microsoft Excel foram analisados indicadores financeiros e geradas tabelas e gráficos dos resultados, apresentados neste trabalho.

Para todos os quatro cenários iniciais e cenários resultantes da análise de sensibilidade, o VPL resultante foi positivo e a TIR foi maior do que a TMA. O cenário C1B apresentou resultados mais atrativos do que os outros cenários, chegando a possíveis taxas internas de retorno de quase 60%, enquanto o cenário C2A mostrou resultados menos atrativos, podendo demorar até 9 anos e 9 meses para o investimento se pagar.

O cenário C1B representa um contexto no qual os ônibus a diesel seriam substituídos a cada 5 anos, como ocorre em média na cidade de São Paulo, e os ônibus elétricos operam pelos 10 anos de horizonte de projeto. Além disso, neste cenário não é considerada a presença de um BESS – sistema de armazenamento de energia com baterias. As alternativas considerando o BESS foram menos lucrativas no geral, devido ao alto custo inicial para sua aquisição com baterias novas.

A implementação do BESS com baterias de segunda vida foi verificada na análise de sensibilidade, considerando um valor inicial reduzido de aquisição do sistema, porém, ainda não mostrou um cenário atrativo dentro das condições de contorno desse estudo. A viabilidade econômica da implementação de um BESS associado a ônibus elétricos alimentados por energia fotovoltaica ainda necessita de maiores estudos, verificando diferentes contextos.

Além de os resultados gerais do estudo indicarem viabilidade do sistema, principalmente no contexto do cenário C1B, observa-se a construção de um cenário favorável para a implementação de cada vez mais ônibus elétricos nos sistemas de transporte público das cidades, uma vez que as vantagens socioambientais desta tecnologia representam um argumento relevante para justificar investimentos públicos no setor.

Diversos países possuem atualmente incentivos fiscais que estimulam a transição para a mobilidade elétrica, os quais sustentam o aumento na escala da fabricação de veículos e baterias. Estes incentivos, presentes em países europeus, Estados Unidos e China por exemplo, englobam subsídios para compra e descontos em impostos, proporcionando mais competitividade para este mercado. Além disso, o estabelecimento de padrões de emissão de CO₂ mais rígidos, como está ocorrendo na União Europeia com a nova regulamentação da iniciativa Euro 7, impulsiona a eletrificação do segmento de mercado, e sugere um cenário futuro cada vez mais favorável para os veículos menos poluentes.

O controle das emissões de veículos pesados acontece no Brasil por meio do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) desde 1990. As normas brasileiras geralmente seguem os precedentes europeus de limites de emissões, assim como procedimentos de certificação, e isso ocorre com uma defasagem média de cinco anos em relação à União Europeia (MILLER; POSADA, 2019). Caso as normas brasileiras continuem seguindo a influência da União Europeia neste ritmo, os limites de emissões podem acelerar ainda mais este processo.

Enquanto o aumento do dólar nos últimos anos pode ter dificultado a inserção de carros elétricos no país, o segmento de caminhões e ônibus elétricos cresceu consideravelmente nos últimos anos. Em 2021 foram lançados o caminhão e-Delivery, da Volkswagen, e do chassi de ônibus eO500U, da Mercedes-Benz, ambos totalmente elétricos e desenvolvidos no Brasil (ALECRIM, 2021). Quanto a oportunidades de financiamento, existem opções atraentes no país, tanto públicas com o BNDES e o FINEM Meio Ambiente, quanto privadas com empresas que estão participando em discussões da área (ICCT; C40, 2020).

Com incentivos para a implementação da infraestrutura necessária e de frotas de veículos, pode se tornar possível trazer escala para o sistema no Brasil, barateando ainda mais os custos e impulsionando a transição para um sistema de mobilidade urbana sustentável.

Os resultados no geral e, mais especificamente considerando a análise de sensibilidade com o custo de aquisição do ônibus elétrico equivalente ao do ônibus a diesel,

evidenciam que incentivos financeiros e garantias governamentais podem gerar competitividade para a transição da mobilidade urbana, e, assim, promover a ampla adoção da tecnologia de veículos elétricos no médio prazo.

O desenvolvimento desse estudo tinha como objetivo avaliar a viabilidade econômica do sistema existente no laboratório Fotovoltaica UFSC em comparação com um ônibus a diesel convencional, e os resultados dos indicadores avaliados foram positivos. Espera-se que o presente trabalho fomente maiores estudos no tema, dissemine aprendizados e uma metodologia relevante para a comunidade acadêmica e indivíduos interessados no assunto.

REFERÊNCIAS

- ALECRIM, P. E. **Os caminhões e ônibus que fazem o Brasil avançar em veículos elétricos**. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/490223/caminhoes-onibus-eletrico-brasil-mercedes-benz-volkswagen/>>. Acesso em: ago. 2021.
- ANEEL, A. N. DE E. E. **Resolução normativa da ANEEL nº 493, de 5 de junho de 2012**, 2012.
- ANP. **Série histórica do levantamento de preços**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos/serie-historica-levantamento-precos>>. Acesso em: ago. 2021.
- ANTONIOLLI, A. F.; MONTENEGRO, A. DE A.; RÜTHER, R. **Onibus Elétrico Abastecido Por Edificação Solar Fotovoltaica**. XIV Encontro Nacional e X Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC/ELACAC). **Anais**. 2017
- BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de juros básicas – Histórico**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em: ago. 2021.
- BAZANI, A. **Eletromobilidade SPTrans diz que projeto construtivo de ônibus**. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2021/08/30/sptrans-diz-que-projeto-construtivo-de-onibus-eletrico-da-mercedes-benz-atende-as-especificacoes-exigidas-para-a-capital-paulista/>>. Acesso em: ago. 2021.
- BEDNAR-FRIEDL, B. et al. Transport. **Springer Climate**, p. 279–300, 2015.
- CANAL DANA. Após 4 anos, Nissan encerra programa experimental de táxis elétricos. **Canal Dana**, p. 19–20, 2016.
- CARRASCO, J. M. et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 53, n. 4, p. 1002–1016, 2006.
- CASALE, M.; MAHONEY, B. **Paying for Electric Buses Financing Tools for Cities and Agencies to Ditch Diesel**. 2018.
- CBRE. Smart Cities - SMART CITIES. **Research Gate**, v. 44, n. December, p. 17–39, 2012.
- DALLMANN, T. Benefícios de Tecnologias de Ônibus em Termos de Emissões de Poluentes do Ar e do Clima em São Paulo. p. 50, 2019.
- DE ALBUQUERQUE MONTENEGRO, A.; ANTONIOLLI, A. F.; RÜTHER, R. Photovoltaic distributed generation in Brazil: Investment valuation for the 27 capital cities. **IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2019**, n. January, p. 1448–1456, 2020.
- DE OLIVEIRA, A. K. V. et al. Analysis of the integration of an electric bus and an electric vehicle with grid-connected PV systems and a storage system. **Proceedings of the ISES Solar World Congress 2019 and IEA SHC International Conference on Solar Heating**

and Cooling for Buildings and Industry 2019, p. 1574–1581, 2020.

DIÁLOGO CHINO. **La transición hacia buses eléctricos en América Latina es irreversible**. Disponível em: <<https://dialogochino.net/es/clima-y-energia-es/38837-la-transicion-hacia-buses-electricos-en-america-latina-es-irreversible/>>. Acesso em: ago. 2021.

EPA. **Integrated Risk Information System: Diesel Engine Exhaust**. CASRN N.A, 2003.

EPA. **Report to Congress on Black Carbon: Executive Summary**. Department of the Interior, Environment, and Appropriations Act, 2010. n. March, 2012. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>>. Acesso em: set. 2021.

EPE. Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no brasil. **Nota Técnica Epe/Dea-Dpg/See-Sdb/001/2020.**, n. Setembro, p. 1–45, 2020a.

EPE. **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: jul. 2021.

ESTADÃO. **Quais cidades já têm ônibus elétricos no Brasil?** Disponível em: <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/guia-do-transporte-urbano/quais-cidades-ja-tem-onibus-eletricos-no-brasil/>>. Acesso em: set. 2021.

FGV. **Carros Elétricos**. Cadernos FGV Energia, 2017. Disponível em: <<https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/06/CARROS-ELERICOS-2017.pdf>>. Acesso em: jul. 2021.

Fraunhofer ISE. **Photovoltaics Report**. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, with support of PSE Projects GmbH, 2020. Disponível em: <www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: set. 2021.

GAINES, L. The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 1, p. 2–7, 2014.

GOLDIE-SCOT, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices. **BloombergNEF**, n. December 2018, p. 1–7, 2019.

GOULART, V. V. Projeto de um sistema de armazenamento de energia utilizando baterias de lítio de segunda vida descartadas de veículos elétricos Nissan Leaf. 2021.

GREENER. **Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída 1º Semestre de 2021**. Disponível em: <<https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-mercado-fotovoltaico-de-geracao-distribuida-1-semester-de-2021/>>. Acesso em: ago. 2021.

GREENER; NEWCHARGE. Estudo Estratégico Mercado de Armazenamento. p. 95, 2021.
HESSE, H. C. et al. **Lithium-ion battery storage for the grid - A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids**. [s.l.: s.n.]. v. 10

HORROX, J. et al. Electric Buses in America: Lessons from Cities Pioneering Clean Transportation. n. October, p. 1–48, 2019.

IEA. **Solar PV module manufacturing and demand, 2014-2020**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-module-manufacturing-and-demand-2014-2020>. Acesso em: set. 2021.

IEA. **Tracking Transport 2020**. IEA, Paris, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>. Acesso em: set. 2021.

ICCT; C40. Investing in electric bus deployment in Latin America: Overview of opportunity. 2020.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

IPCC. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

IRIS SMART CITIES. **Battery Energy Storage Systems Factsheet**, 2020.

JANECKI, R.; KAROŃ, G. Concept of smart cities and economic model of electric buses implementation. **Communications in Computer and Information Science**, v. 471, p. 100–109, 2014.

KAHN RIBEIRO, S., S. KOBAYASHI, M. BEUTHE, J. GASCA, D. GREENE, D. S. LEE, Y. MUROMACHI, P. J. NEWTON, S. PLOTKIN, D. SPERLING, R. W.; ZHOU, P. J. Transport and Its infrastructure. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]**, p. 323–386, 2007.

LA ROVERE, E. L., GESTEIRA, C., GROTTERA, C., & WILLS, W. **Pathways to a low carbon economy in Brazil**. Brazil in the Anthropocene: Conflicts Between Predatory Development and Environmental Policies, 2016.

LUCHESES, G. 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**, v. 16, n. 22, 2011.

MATTES, P. Performance of a Solar powered electric Bus. May, 2019.

MCKERRACHER, C. et al. **Electric Vehicle Outlook 2019**. BloombergNEF, 2019.
Disponível em: <<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>>. Acesso em: ago. 2021.

MDIC. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Brazil-Electromobility-PT-20122018.pdf>. Acesso em: ago. 2021.

MILLER, J. et al. Financing the Transition To Soot- Free Urban Bus Fleets in 20 Megacities. 2017.

MILLER, J.; POSADA, F. Norma PROCONVE P-8 de emissões no Brasil. **ICCT - The Internation Council on Clean Transportation**, n. Fevereiro, p. 1–8, 2019.

NTU. Anuario NTU 2017/2018. p. 76, 2018.

OMS. Burden of disease from ambient air pollution for 2016. p. 1–4, 2018.

REID, G.; JULVE, J. Second Life-Batterien als flexible Speicher für Erneuerbare Energien. **Report**, 2016.

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report**. Paris: [s.n.].

REN21. **Tendências no Brasil - Factsheet**. [s.l: s.n.].

RICARDO BORDEAUX-REGO. **Viabilidade econômico-financeira de projetos - FGV Management**. [s.l.] Editora FGV, 2015.

SCHNEIDER, K.; SORGATO, M. J.; RÜTHER, R. VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA APLICAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS (FV) DE TELURETO DE CÁDMIO (CdTe) EM. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018**, 2018.

SENAI. **Mobilidade e Logística**. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/senai/canais/rota-2030/>>. Acesso em: ago. 2021.

SLATER, P. et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. **Nature**, v. 575, November, p. 75–86, 2019.

SOUSA, M. DE. **Acordo prevê mais ônibus elétricos para SP**. Disponível em: <<https://www.mobilize.org.br/noticias/12441/mais-onibus-eletricos-para-sao-paulo.html?print=s>>. Acesso em: set. 2021.

SUN, S. I. et al. Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries. **Journal of Energy Storage**, v. 19, p. 41–51, 2018.

SUSTAINABLE BUS. **Electric bus , main fleets and projects around the world.** Disponível em: <<https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/electric-bus-public-transport-main-fleets-projects-around-world/>>. Acesso em: ago. 2021.

TRANSPORT, N. G. O.; COMMISSION, E. **Denmark , Luxembourg , Netherlands lead the way on emissions-free buses.** Disponível em: <<https://www.transportenvironment.org/press/denmark-luxembourg-netherlands-lead-way-emissions-free-buses>>. Acesso em: ago. 2021.

TURCHENIUK, K. et al. Ten years left to redesign lithium-ion batteries. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 467–470, 2018.

UFSC FOTOVOLTAICA. **Ônibus elétrico.** Disponível em: <<https://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/fotov/blog/2017/04/24/onibus-eletrico/>>. Acesso em: jul. 2021.

US DEPARTMENT OF ENERGY. **The History of the Electric Car.** p. 1–9, 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em: jul. 2021.

VINHOTE, A. L. **Ônibus elétricos começam a circular nesta segunda (29) “ É uma tendência mundial utilizar energias renováveis e limpas para fazer o transporte coletivo ”.** Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2020/06/28/onibus-eletricos-comecam-a-circular-nesta-segunda-29/>>. Acesso em: ago. 2021.

ZMOGINSKI, F. **Shenzhen , na China , a 1ª cidade a ter 100 % dos ônibus e táxis elétricos.** Disponível em: <<https://www.mobilize.org.br/noticias/11368/shenzhen-na-china-a-1a-cidade-a-ter-100-dos-onibus-e-taxis-eletricos.html>>. Acesso em: jul. 2021.

ZOMER, C. et al. Energy balance and performance assessment of PV systems installed at a positive-energy building (PEB) solar energy research centre. **Solar Energy**, v. 212, n. November, p. 258–274, 2020a.

ZOMER, C. et al. Performance assessment of partially shaded building-integrated photovoltaic (BIPV) systems in a positive-energy solar energy laboratory building: Architecture perspectives. **Solar Energy**, v. 211, n. October, p. 879–896, 2020b.

APÊNDICE A – Fluxos de caixa dos cenários avaliados – C1A

TMA 5,5%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (48.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 142.250	R\$ (732.708)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 141.820	R\$ (590.887)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 141.426	R\$ (449.462)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 141.065	R\$ (308.397)				
5					R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.936	R\$ 140.736	R\$ (167.661)				
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 140.436	R\$ (27.225)				6,19
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 140.166	R\$ 112.941				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 139.923	R\$ 252.864				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 139.705	R\$ 392.569				
10					R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 487.567	R\$ 285.436	R\$ 678.006				6,19 17%
																			R\$ 678.005,87
TMA 7,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (48.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 140.256	R\$ (734.702)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 137.872	R\$ (596.830)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 135.561	R\$ (461.269)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 133.319	R\$ (327.950)				
5					R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.936	R\$ 131.144	R\$ (196.806)				
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 129.030	R\$ (67.776)				6,53
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 126.976	R\$ 59.201				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 124.979	R\$ 184.180				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 123.036	R\$ 307.216				
10					R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 487.567	R\$ 247.854	R\$ 555.070				6,53 17%
																			R\$ 555.070,18
TMA 10,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (48.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 136.431	R\$ (738.527)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 130.454	R\$ (608.073)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 124.769	R\$ (483.303)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 119.360	R\$ (363.944)				
5					R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.936	R\$ 114.210	R\$ (249.734)				
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 109.305	R\$ (140.430)				
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 104.631	R\$ (36.798)				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 100.177	R\$ 64.378				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 95.929	R\$ 160.308				
10					R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (52.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 487.567	R\$ 187.978	R\$ 348.286				7,36 17%
																			R\$ 348.285,68

Fluxos de caixa dos cenários avaliados – C1B

TMA 5,5%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (45.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 142.250	R\$ (732.708)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 141.920	R\$ (590.887)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 141.426	R\$ (449.462)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 141.065	R\$ (308.397)				4,91
5	R\$ (260.832)			R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.640	R\$ 140.436	R\$ 31.910				
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 140.166	R\$ 172.347				
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 139.923	R\$ 312.513				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 139.923	R\$ 452.435				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 139.705	R\$ 592.141				
10	R\$ 504.254,20	R\$ 581.603		R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 315.657	R\$ 184.795	R\$ 776.936				4,91 20%
																			R\$ 776.936,30
TMA 7,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (45.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 140.256	R\$ (734.702)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 137.872	R\$ (586.830)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 135.561	R\$ (461.269)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 133.319	R\$ (327.950)				
5	R\$ (260.832)			R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.640	R\$ 129.030	R\$ 118.194				5,08
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 126.976	R\$ 245.171				
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 124.979	R\$ 370.150				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 123.036	R\$ 483.186				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 123.036	R\$ 633.650				
10	R\$ 504.254,20	R\$ 581.603		R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 315.657	R\$ 160.464	R\$ 663.650				5,08 20%
																			R\$ 663.649,70
TMA 10,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (301.143)	R\$ (874.958)									R\$ (874.958)	R\$ (874.958)	R\$ (874.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (45.734)	R\$ (7.215)	R\$ (144.247)	R\$ 137.032	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 150.074	R\$ 136.431	R\$ (738.527)				
2					R\$ 40.401	R\$ (48.113)	R\$ (7.712)	R\$ (152.520)	R\$ 144.808	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 157.850	R\$ 130.454	R\$ (608.073)				
3					R\$ 42.374	R\$ (50.614)	R\$ (8.240)	R\$ (161.267)	R\$ 153.026	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 166.068	R\$ 124.769	R\$ (483.303)				
4					R\$ 44.444	R\$ (53.246)	R\$ (8.802)	R\$ (170.515)	R\$ 161.713	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 174.755	R\$ 119.360	R\$ (363.944)				
5	R\$ (260.832)			R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (56.015)	R\$ (9.400)	R\$ (180.294)	R\$ 170.894	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 183.640	R\$ 276.166	R\$ (87.778)				5,80
6					R\$ 48.892	R\$ (58.928)	R\$ (10.036)	R\$ (190.634)	R\$ 180.598	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 193.640	R\$ 109.305	R\$ 21.527				
7					R\$ 51.280	R\$ (61.992)	R\$ (10.713)	R\$ (201.567)	R\$ 190.855	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 203.897	R\$ 104.631	R\$ 126.158				
8					R\$ 53.784	R\$ (65.216)	R\$ (11.431)	R\$ (213.127)	R\$ 201.696	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 214.738	R\$ 100.177	R\$ 226.334				
9					R\$ 56.411	R\$ (68.607)	R\$ (12.196)	R\$ (225.350)	R\$ 213.155	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 226.196	R\$ 95.929	R\$ 322.264				
10	R\$ 504.254,20	R\$ 581.603		R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (72.175)	R\$ (13.008)	R\$ (238.274)	R\$ 225.267	R\$ (62.853)	R\$ (39.811)	R\$ 13.042	R\$ 315.657	R\$ 121.699	R\$ 443.963				5,80 20%
																			R\$ 443.963,27

Fluxos de caixa dos cenários avaliados – C2B

TMA 5,5%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (589.143)	R\$ (1.162.958)									R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (28.856)	R\$ 9.664	R\$ (144.247)	R\$ 153.911	R\$ (52.853)	R\$ (43.793)	R\$ 9.060	R\$ 162.971	R\$ 154.475	R\$ (1.008.483)				
2					R\$ 40.401	R\$ (30.356)	R\$ 10.045	R\$ (152.520)	R\$ 162.564	R\$ (54.703)	R\$ (45.325)	R\$ 9.377	R\$ 171.942	R\$ 154.481	R\$ (854.002)				
3					R\$ 42.374	R\$ (31.935)	R\$ 10.440	R\$ (161.267)	R\$ 171.706	R\$ (56.617)	R\$ (46.912)	R\$ 9.705	R\$ 181.412	R\$ 154.493	R\$ (699.509)				
4					R\$ 44.444	R\$ (33.595)	R\$ 10.849	R\$ (170.515)	R\$ 181.364	R\$ (58.599)	R\$ (48.554)	R\$ 10.045	R\$ 191.409	R\$ 154.509	R\$ (545.000)				
5				R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (35.342)	R\$ 11.273	R\$ (180.294)	R\$ 191.567	R\$ (60.650)	R\$ (50.253)	R\$ 10.397	R\$ 462.796	R\$ 354.101	R\$ (190.899)				
6					R\$ 48.892	R\$ (37.180)	R\$ 11.712	R\$ (190.634)	R\$ 202.346	R\$ (62.773)	R\$ (52.012)	R\$ 10.761	R\$ 213.107	R\$ 154.555	R\$ (36.345)		6,24		
7					R\$ 51.280	R\$ (39.113)	R\$ 12.166	R\$ (201.567)	R\$ 213.734	R\$ (64.970)	R\$ (53.832)	R\$ 11.137	R\$ 224.871	R\$ 154.585	R\$ 118.240				
8					R\$ 53.784	R\$ (41.147)	R\$ 12.637	R\$ (213.127)	R\$ 225.765	R\$ (67.244)	R\$ (55.717)	R\$ 11.527	R\$ 237.292	R\$ 154.619	R\$ 272.859				
9					R\$ 56.411	R\$ (43.287)	R\$ 13.124	R\$ (225.350)	R\$ 238.475	R\$ (69.597)	R\$ (57.667)	R\$ 11.930	R\$ 250.405	R\$ 154.668	R\$ 427.516				
10				R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (45.538)	R\$ 13.629	R\$ (238.274)	R\$ 251.903	R\$ (72.033)	R\$ (59.685)	R\$ 12.348	R\$ 341.600	R\$ 199.983	R\$ 627.500		6,24	15%	R\$ 627.499,73
TMA 7,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (589.143)	R\$ (1.162.958)									R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (28.856)	R\$ 9.664	R\$ (144.247)	R\$ 153.911	R\$ (52.853)	R\$ (43.793)	R\$ 9.060	R\$ 162.971	R\$ 152.309	R\$ (1.010.648)				
2					R\$ 40.401	R\$ (30.356)	R\$ 10.045	R\$ (152.520)	R\$ 162.564	R\$ (54.703)	R\$ (45.325)	R\$ 9.377	R\$ 171.942	R\$ 150.180	R\$ (860.468)				
3					R\$ 42.374	R\$ (31.935)	R\$ 10.440	R\$ (161.267)	R\$ 171.706	R\$ (56.617)	R\$ (46.912)	R\$ 9.705	R\$ 181.412	R\$ 148.086	R\$ (712.382)				
4					R\$ 44.444	R\$ (33.595)	R\$ 10.849	R\$ (170.515)	R\$ 181.364	R\$ (58.599)	R\$ (48.554)	R\$ 10.045	R\$ 191.409	R\$ 146.025	R\$ (566.357)				
5				R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (35.342)	R\$ 11.273	R\$ (180.294)	R\$ 202.346	R\$ (60.650)	R\$ (50.253)	R\$ 10.397	R\$ 462.796	R\$ 329.987	R\$ (236.390)				
6					R\$ 48.892	R\$ (37.180)	R\$ 11.712	R\$ (190.634)	R\$ 213.734	R\$ (62.773)	R\$ (52.012)	R\$ 10.761	R\$ 213.107	R\$ 142.002	R\$ (94.388)		6,67		
7					R\$ 51.280	R\$ (39.113)	R\$ 12.166	R\$ (201.567)	R\$ 213.734	R\$ (64.970)	R\$ (53.832)	R\$ 11.137	R\$ 224.871	R\$ 140.038	R\$ 45.650				
8					R\$ 53.784	R\$ (41.147)	R\$ 12.637	R\$ (213.127)	R\$ 225.765	R\$ (67.244)	R\$ (55.717)	R\$ 11.527	R\$ 237.292	R\$ 136.106	R\$ 183.756				
9					R\$ 56.411	R\$ (43.287)	R\$ 13.124	R\$ (225.350)	R\$ 238.475	R\$ (69.597)	R\$ (57.667)	R\$ 11.930	R\$ 250.405	R\$ 136.204	R\$ 319.960				
10				R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (45.538)	R\$ 13.629	R\$ (238.274)	R\$ 251.903	R\$ (72.033)	R\$ (59.685)	R\$ 12.348	R\$ 341.600	R\$ 173.662	R\$ 493.612		6,67	15%	R\$ 493.612,32
TMA 10,0%																			
Fluxo de caixa																			
Ano	Custo - ônibus diesel	Custo - ônibus elétrico	Custo - Infra elétrico	Diferença custos	Receita geração FV	Despesas abastecimento elétrico	Saldo energético	Despesas abastecimento diesel	Diferença despesas abastecimento	Custos manutenção diesel	Custos manutenção elétrico	Diferença manutenção	Valor Líquido	Valor Descontado	Valor Acumulado Descontado	Payback Descontado	TIR	VPL (conferência)	
0	R\$ (765.086)	R\$ (1.338.901)	R\$ (589.143)	R\$ (1.162.958)									R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)	R\$ (1.162.958)				
1					R\$ 38.519	R\$ (28.856)	R\$ 9.664	R\$ (144.247)	R\$ 153.911	R\$ (52.853)	R\$ (43.793)	R\$ 9.060	R\$ 162.971	R\$ 148.155	R\$ (1.014.802)				
2					R\$ 40.401	R\$ (30.356)	R\$ 10.045	R\$ (152.520)	R\$ 162.564	R\$ (54.703)	R\$ (45.325)	R\$ 9.377	R\$ 171.942	R\$ 142.100	R\$ (872.702)				
3					R\$ 42.374	R\$ (31.935)	R\$ 10.440	R\$ (161.267)	R\$ 171.706	R\$ (56.617)	R\$ (46.912)	R\$ 9.705	R\$ 181.412	R\$ 136.297	R\$ (736.405)				
4					R\$ 44.444	R\$ (33.595)	R\$ 10.849	R\$ (170.515)	R\$ 181.364	R\$ (58.599)	R\$ (48.554)	R\$ 10.045	R\$ 191.409	R\$ 130.735	R\$ (605.670)				
5				R\$ 260.832	R\$ 46.615	R\$ (35.342)	R\$ 11.273	R\$ (180.294)	R\$ 191.567	R\$ (60.650)	R\$ (50.253)	R\$ 10.397	R\$ 462.796	R\$ 287.360	R\$ (318.310)				
6					R\$ 48.892	R\$ (37.180)	R\$ 11.712	R\$ (190.634)	R\$ 202.346	R\$ (62.773)	R\$ (52.012)	R\$ 10.761	R\$ 213.107	R\$ 120.293	R\$ (198.017)				
7					R\$ 51.280	R\$ (39.113)	R\$ 12.166	R\$ (201.567)	R\$ 213.734	R\$ (64.970)	R\$ (53.832)	R\$ 11.137	R\$ 224.871	R\$ 115.394	R\$ (82.622)		7,75		
8					R\$ 53.784	R\$ (41.147)	R\$ 12.637	R\$ (213.127)	R\$ 225.765	R\$ (67.244)	R\$ (55.717)	R\$ 11.527	R\$ 237.292	R\$ 110.698	R\$ 28.076				
9					R\$ 56.411	R\$ (43.287)	R\$ 13.124	R\$ (225.350)	R\$ 238.475	R\$ (69.597)	R\$ (57.667)	R\$ 11.930	R\$ 250.405	R\$ 106.196	R\$ 134.272				
10				R\$ 77.349	R\$ 59.167	R\$ (45.538)	R\$ 13.629	R\$ (238.274)	R\$ 251.903	R\$ (72.033)	R\$ (59.685)	R\$ 12.348	R\$ 341.600	R\$ 131.702	R\$ 265.974		7,75	15%	R\$ 265.973,95

APÊNDICE B – Gráficos de fluxo de caixa e fluxo de caixa acumulado descontado dos cenários C1A e C2B

