



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E
AMBIENTAL DA ELETRIFICAÇÃO DA
FROTA DE ÔNIBUS NO DISTRITO FEDERAL

JÚLIA MASCARENHAS NOGUEIRA PAIVA
ADRIEL LUCAS MORAIS CARVALHO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Análise técnico-econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus no Distrito Federal

**Júlia Mascarenhas Nogueira Paiva
Adriel Lucas Moraes Carvalho**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO(A) ELETRICISTA.

APROVADA POR:

**Prof. Dr.: Rafael Amaral Shayani (Universidade de Brasília, ENE)
(Orientador)**

**Prof. Dr.: Fernando Cardoso Melo (Universidade de Brasília, ENE)
(Professor Convidado)**

**Prof. Dr.: Rudi Henri van Els (Universidade de Brasília, FGA)
(Professor Convidado)**

Brasília/DF, setembro de 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

CARVALHO, ADRIEL LUCAS MORAIS

PAIVA, JÚLIA MASCARENHAS NOGUEIRA

Análise técnico-econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus no Distrito Federal.

[Brasília/DF], 2024.

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica.

- | | |
|------------------------------|-------------------------------|
| 1. Ônibus Elétrico | 2. Custo Total de Propriedade |
| 3. Impacto Ambiental | 4. Sistema Fotovoltaico |
| 5. Infraestrutura de Recarga | 6. Sustentabilidade Urbana |
| 7. Mobilidade Elétrica | 8. Distrito Federal |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Carvalho, Adriel Lucas Morais; Paiva, Júlia Mascarenhas Nogueira (2024). Análise técnico-econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus no Distrito Federal.

Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de
Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTORES: Adriel Lucas Moraes Carvalho e Júlia Mascarenhas Nogueira Paiva

TÍTULO: Análise técnico-econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus no Distrito Federal.

GRAU: Graduação ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de conclusão de curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

Adriel Lucas Moraes Carvalho

Júlia Mascarenhas Nogueira Paiva

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Engenharia Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

“A dúvida é o princípio da sabedoria” (Aristóteles)

AGRADECIMENTOS

Júlia Mascarenhas

Este trabalho só foi possível graças ao apoio e paciência de várias pessoas incríveis ao longo dessa jornada.

À minha família, por todo o amor e incentivo, especialmente nos momentos em que o cansaço quase me venceu. A vocês, minha eterna gratidão por sempre acreditarem em mim.

Aos meus amigos, que tornaram essa caminhada mais leve com palavras de apoio e risadas nos momentos certos. A troca de ideias e o compartilhamento de conhecimentos foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador, Rafael Shayani, pela paciência, sabedoria e por me guiar com tanto profissionalismo e dedicação. Seu conhecimento foi essencial para a conclusão deste projeto.

Meu agradecimento também a todos os professores, funcionários e colegas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e para a construção deste trabalho.

E, claro, ao Adriel, por compartilhar comigo cada desafio e conquista desse projeto. Agradeço profundamente pela dedicação, esforço e persistência ao longo de todo o processo.

Todas essas pessoas foram essenciais para tornar este TCC uma realidade, e por isso, meu sincero agradecimento. Cada um de vocês deixou uma marca neste projeto e na minha jornada acadêmica. Sem vocês, nada disso seria possível.

Adriel Carvalho

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha mãe, que sacrificou décadas de sua vida trabalhando de terça a domingo e, quando necessário, assumiu também o papel de pai, sempre com o objetivo de garantir a mim e a meus irmãos um ensino superior de qualidade. Sou grato por todo o esforço e dedicação. Agradeço igualmente ao meu pai, que me ensinou, muito antes de eu sequer cogitar cursar engenharia, sobre o universo da elétrica, além de me inspirar com

sua vontade de criar e inovar, características essenciais para qualquer engenheiro.

Aos meus irmãos, deixo minha sincera gratidão por terem sido mentores ao longo da minha vida, sempre compartilhando suas experiências e me ajudando a enfrentar os desafios que sabiam que eu também encontraria pelo caminho.

Agradeço à minha namorada, por ter sido meu porto seguro e fonte de equilíbrio durante esses anos de graduação, sempre ao meu lado, escutando minhas preocupações, me guiando, ajudando e retribuindo o apoio que busquei oferecer a ela.

Sou grato também ao meu orientador, professor Rafael Shayani, por sua orientação valiosa ao longo deste trabalho. Sua dedicação e conhecimento foram essenciais para a conclusão deste projeto.

Por fim, sou grato a todos os amigos e colegas que fiz, perdi, reaproximei ou mantive durante a graduação. Foram dois cursos, uma pandemia, cinco anos de desafios, e cada pessoa que cruzou meu caminho teve um impacto no resultado final. Um agradecimento especial à minha dupla neste trabalho, Júlia, que compartilhou essa ideia comigo mais de um ano atrás e aceitou seguir firme nessa jornada ao meu lado.

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise detalhada da viabilidade de implantação de ônibus elétricos no Distrito Federal, comparando especificamente os modelos BYD D9W e Mercedes-Benz O500U. A pesquisa abrange a avaliação de diversos aspectos técnico-econômicos, incluindo o Custo Total de Propriedade (TCO), o impacto ambiental em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), e o uso de sistemas fotovoltaicos (FV) para o carregamento dos veículos. O estudo apresenta três cenários distintos de TCO: um cenário sem o uso de sistemas FV, um com a implementação dos sistemas FV, e um terceiro cenário onde o sistema FV já foi amortizado, analisando o impacto em longo prazo e o retorno financeiro em cada caso.

Os dados operacionais dos ônibus, como consumo de energia, autonomia, e custos de manutenção, foram coletados e utilizados para simular o desempenho econômico em diferentes condições. Além disso, o trabalho explora a possibilidade de compensação de carbono através do mercado voluntário de carbono, calculando o potencial de geração de créditos de carbono a partir das emissões evitadas com a substituição de ônibus a diesel por elétricos. Também são discutidos os desafios e oportunidades relacionados ao financiamento da infraestrutura de recarga, com uma análise das políticas públicas e incentivos fiscais necessários para a viabilização do projeto.

O estudo conclui com a proposta para a transição de frotas urbanas para tecnologias mais sustentáveis, destacando as vantagens ambientais e econômicas da adoção de ônibus elétricos, bem como os impactos sociais positivos, como a redução de poluentes locais e a melhoria da qualidade de vida nas áreas atendidas.

Palavras-chave: ônibus elétrico, custo total de propriedade, impacto ambiental, sistema fotovoltaico, créditos de carbono, eletromobilidade, sustentabilidade urbana.

ABSTRACT

This study conducts a detailed analysis of the technical and economic feasibility of implementing electric buses in the Federal District, focusing on a comparison between the BYD D9W and Mercedes-Benz O500U models. The research covers key aspects such as the Total Cost of Ownership (TCO), environmental impact in terms of greenhouse gas (GHG) emissions reduction, and the advantages of using photovoltaic (PV) systems for vehicle charging. The study presents three distinct TCO scenarios: one without the use of PV systems, one with the implementation of PV systems, and a third scenario where the PV system has already been amortized, analyzing the long-term impact and financial return in each case.

Operational data from the buses, such as energy consumption, range, and maintenance costs, were collected and used to simulate economic performance under different conditions. Additionally, the study explores the potential for carbon offsetting through the voluntary carbon market, calculating the potential for generating carbon credits from the emissions avoided by replacing diesel buses with electric ones. The challenges and opportunities related to charging infrastructure financing are also discussed, along with an analysis of the public policies and incentives needed to make the project viable.

The study concludes with a proposal for transitioning urban fleets to more sustainable technologies, highlighting the environmental and economic benefits of adopting electric buses, as well as the positive social impacts, such as reduced local pollutants and improved quality of life in served areas.

Keywords: electric bus, total cost of ownership, environmental impact, photovoltaic system, carbon credits, electromobility, urban sustainability.

SUMÁRIO

Sumário	i
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas	viii
Lista de símbolos	x
Glossário	xi
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos do trabalho	4
1.3.1 Objetivos Gerais	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.3.3 Estrutura do trabalho	5
Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica	6
2.1 Acordo de Paris	6
2.2 Crise climática	6
2.3 Emissão de Gases do Efeito Estufa pelo Setor de Transportes	8
2.4 Objetivos de desenvolvimento sustentável	8
2.4.1 ODS 3 - Saúde e Bem-estar	9
2.4.2 ODS 7 - Energia Limpa e Acessível	9
2.4.3 ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis	10
2.4.4 ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima	11
2.5 Sistemas Fotovoltaicos	12
2.5.1 Tipos de sistemas	12
2.5.1.1 Sistemas Conectados à Rede	13
2.5.1.2 Sistemas Isolados	13

2.5.1.3	Sistemas Híbridos	13
2.5.2	Tipos de células	14
2.5.3	Módulos Fotovoltaicos	14
2.5.4	Controladores de Carga	14
2.5.4.1	Controladores PWM	15
2.5.4.2	Controladores MPPT	15
2.5.5	Inversores	15
2.6	Ônibus elétricos urbanos: cenário nacional e no Distrito Federal	17
2.7	Impactos da poluição atmosférica para a saúde	18
2.8	Mercado de Carbono	20
2.8.1	Funcionamento do Mercado de Carbono	20
2.8.1.1	Comércio de Emissões de GEE	20
2.8.1.2	Implementação Conjunta	21
2.8.1.3	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)	21
2.8.2	Mercado Voluntário	21
2.8.3	Fundos Voluntários	21
2.9	Incentivos Governamentais para Investimentos em Ônibus Elétricos	22
2.9.1	Investimento do PAC	22
2.9.2	Objetivos do Programa	22
2.9.2.1	Investimentos do BNDES	23
2.9.3	Programa MOVER	23
2.9.4	Benefícios para Empresas	24
2.9.5	Impacto dos Investimentos	24
2.10	Tecnologia Euro 5 e Euro 6	24
2.11	Considerações Finais	25
Capítulo 3 – Metodologia		26
3.1	Seleção dos Modelos de Ônibus	26
3.1.1	Ônibus a Diesel	26
3.1.2	Ônibus Elétrico	29
3.1.3	Estimativa de Consumo no carregamento	30
3.2	Estimativa de Consumo de Combustível	31
3.2.1	Cálculo do TCO (Custo Total de Propriedade)	34
3.2.1.1	Componentes do TCO	34
3.2.1.2	Fórmula do TCO	35
3.2.2	Payback	36
3.3	Modelos dos Equipamentos Fotovoltaicos Utilizados	37

3.3.1	Dados dos módulos fotovoltaicos	37
3.3.2	Dados dos inversores	38
3.4	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	39
3.4.1	Determinação da localização	40
3.4.2	Avaliação do recurso solar	40
3.4.3	Determinação de energia necessária	41
3.4.4	Dimensionamento dos componentes	41
3.4.4.1	Dimensionamento do gerador	42
3.4.4.2	Cálculo de tensão do módulo FV para diferentes temperaturas de operação	42
3.4.4.2.1	Tensão de circuito aberto (V_{oc}) para diferentes temperaturas de operação	42
3.4.4.2.2	Tensão de potência máxima(V_{mp}) para diferentes temperaturas de operação	43
3.4.4.2.3	Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos	43
3.4.4.2.4	Quantidade de módulos em série	43
3.4.4.2.5	Quantidade de módulos em paralelo	45
3.4.4.3	Dimensionamento do inversor	45
3.4.4.4	Dimensionamento dos condutores	46
3.4.4.4.1	Corrente de projeto	46
3.4.4.4.2	Método da seção mínima	47
3.4.4.4.3	Método de capacidade de condução de corrente	47
3.4.4.4.4	Método de queda de tensão	49
3.4.4.5	Dimensionamento dos dispositivos de proteção	50
3.4.4.5.1	Dimensionamento dos fusíveis	50
3.4.4.5.2	Dimensionamento dos disjuntores	51
3.5	Cálculo das Emissões de Gases de Efeito Estufa	51
3.5.1	Cálculo das Emissões Diárias de CO ₂	51
3.6	Impacto da Poluição do Ar na Saúde	52
3.7	Considerações Finais	54
Capítulo 4 – Resultados		55
4.1	Análise de Custo dos Ônibus	55
4.2	Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico	58
4.2.1	Dimensionamento do gerador	58
4.2.1.1	Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos	59
4.2.2	Correção de tensão para temperaturas máximas e mínimas	59
4.2.2.1	Tensão de circuito aberto (V_{oc}) para mínima temperatura	59

4.2.2.2	Tensão de potência máxima(V_{mp}) para mínima e máxima temperatura	59
4.2.3	Quantidade de módulos em série	60
4.2.4	Quantidade de módulos em paralelo	61
4.2.5	Dimensionamento do inversor	61
4.2.6	Tabela resumo do sistema	62
4.2.7	Dimensionamento dos condutores	62
4.2.7.1	Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos entre si	62
4.2.7.1.1	Método de capacidade de condução de corrente	62
4.2.7.1.2	Método de queda de tensão	63
4.2.7.1.3	Seção final dos cabos	63
4.2.7.2	Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos até o inversor	63
4.2.7.2.1	Método de capacidade de condução de corrente	64
4.2.7.2.2	Método de queda de tensão	64
4.2.7.2.3	Seção final dos cabos	64
4.2.7.3	Dimensionamento dos cabos que saem do inversor	64
4.2.7.3.1	Método da seção mínima	64
4.2.7.3.2	Método de capacidade de condução de corrente	65
4.2.7.3.3	Método de queda de tensão	66
4.2.7.3.4	Seção final dos cabos	66
4.2.8	Dimensionamento dos dispositivos de proteção	66
4.2.8.1	Dimensionamento dos fusíveis	66
4.2.8.2	Dimensionamento dos disjuntores	67
4.2.8.2.1	Disjuntor entre os módulos e o inversor	67
4.2.8.2.2	Disjuntor entre o inversor e as cargas	67
4.2.9	Tabela resumo dos condutores e dos dispositivos de proteção	68
4.2.10	Análise do espaço para instalação do sistema fotovoltaico	68
4.3	Análise financeira	69
4.3.1	Custo da Implementação do Ônibus Elétrico	69
4.3.2	Custo do Sistema Fotovoltaico	69
4.3.3	TCO	70
4.3.3.1	Cenário 1: Sem Sistema Fotovoltaico	70
4.3.3.2	Cenário 2: Considerando o Sistema Fotovoltaico	71
4.3.3.3	Cenário Extra: Sistema Fotovoltaico Já Implementado	71
4.3.4	Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico	72
4.3.4.1	Cenário 1	72

4.3.4.2	Cenário 2	74
4.3.4.3	Cenário 3	76
4.3.4.4	Comparação entre os Cenários	78
4.4	Investimentos Externos	80
4.5	Descarte dos Componentes	81
4.6	Redução nas Emissões de Gases de Efeito Estufa	82
4.7	Impacto nos gastos com saúde	83
4.8	Mercado de Carbono	85
4.9	Considerações Finais	86
Capítulo 5 – Conclusão		88
Referências		90
Anexos		95

LISTA DE FIGURAS

2.1	Evolução da frota de ônibus urbanos elétricos (2021-2024), no Brasil, por categoria de ônibus, até julho de 2024.	17
3.1	Ônibus O500U Euro 5 Utilizado pela Piracicabana DF	27
3.2	Ônibus O500U Euro 6 Utilizado pela Viação Pioneira	28
3.3	Chassis do Ônibus O500U Euro 6	28
3.4	Chassis do Ônibus BYD D9W	29
3.5	Ônibus BYD D9W Utilizado pela Piracicabana (Modelo 2018)	30
3.6	Linha 0.116	33
3.7	Linha 109.3	33
3.8	Módulo Fotovoltaico ODA465-36V-MH	38
3.9	Inversor SUN-8K-SG03LP1-EU	39
3.10	Irradiação solar para localidades próximas	40
3.11	Irradiação solar diária média	41
4.1	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 100%	73
4.2	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 100%	75
4.3	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 100%	77
4.4	Resultado da análise de TCO	78
4.5	Resultado da análise de TIR	78
4.6	Resultado da análise de VPL	79

5.1	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 90%	95
5.2	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 80%	96
5.3	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 70%	96
5.4	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 60%	97
5.5	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 50%	97
5.6	Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 40%	98
5.7	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 90%	98
5.8	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 80%	99
5.9	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 70%	99
5.10	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 60%	100
5.11	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 50%	100
5.12	Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 40%	101
5.13	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 90%	102
5.14	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 80%	103
5.15	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 70%	103
5.16	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 60%	104
5.17	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 50%	104
5.18	Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 40%	105

LISTA DE TABELAS

3.1	Especificações do Ônibus a Diesel	26
3.2	Especificações do Ônibus a Diesel Novo	27
3.3	Especificações do Ônibus Elétrico BYD D9W	29
3.4	Dados da Linha 0.116 a Diesel	33
3.5	Dados da Linha 109.3 Elétrica	33
3.6	Especificações do Módulo Fotovoltaico	37
3.7	Especificações do Inversor	38
3.8	Fator de correção de temperatura	48
3.9	Métodos de instalação	48
3.10	Número de condutores carregados a ser adotado para diferentes esquemas de circuitos	49
4.1	Dados da Linha 0.116 a Diesel	55
4.2	Dados da Linha 109.3 Elétrica	56
4.3	Dados da Linha 0.116 Elétrica	57
4.4	Comparativo de Gastos: O500U vs. D9W	58
4.5	Resumo do Sistema Projetado	62
4.6	Capacidade de condução de corrente para condutores expostos ao sol no Modo de Instalação 1	63
4.7	Capacidade de condução de corrente para cabos em eletroduto diretamente enterrado (Instalação A.3)	64

4.8	Resumo do Sistema Projetado	68
4.9	Valores do Ônibus Elétrico	69
4.10	Valores do Sistema Projetado	69
4.11	Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 1	74
4.12	Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 2	76
4.13	Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 3	78

LISTA DE SÍMBOLOS

CO ₂ e	Carbono Equivalente
MP ₁₀	Material Particulado de diâmetro inferior a 10 micrômetros
MP _{2,5}	Material Particulado de diâmetro inferior a 2,5 micrômetros
β	Coeficiente de resposta à concentração de poluentes

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BYD	Build Your Dreams (Fabricante de veículos elétricos)
CAPEX	Capital Expenditure (Despesas de capital)
CER	Certified Emission Reductions (Reduções Certificadas de Emissões)
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ e	Carbono Equivalente
COP	Conference of the Parties (Conferência das Partes)
DC	Corrente Contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FV	Fotovoltaico
GHG	Greenhouse Gases (Gases de Efeito Estufa)
HSP	Horas de Sol Pleno
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
IR	Infraestrutura de Recarga
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)

MP ₁₀	Material Particulado de diâmetro inferior a 10 micrômetros
MP _{2,5}	Material Particulado de diâmetro inferior a 2,5 micrômetros
NDC	Nationally Determined Contributions (Contribuições Nacionalmente Determinadas)
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIE	Oferta Interna de Energia
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PEE	Programa de Eficiência Energética
PIB	Produto Interno Bruto
Procel	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PV	Photovoltaic (Fotovoltaico)
TCO	Total Cost of Ownership (Custo Total de Propriedade)
UnB	Universidade de Brasília
USD	Dólar Americano
VOC	Tensão de Circuito Aberto
WWF	World Wide Fund for Nature

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A crise ambiental global, amplificada pelo aquecimento global e pela poluição atmosférica, tem levado governos e organizações a buscar alternativas sustentáveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. O setor de transporte, tanto público quanto privado, é um dos principais responsáveis pela poluição urbana, contribuindo significativamente para as emissões de CO_2 e outros poluentes que afetam a saúde humana e o meio ambiente.

Os ônibus movidos a diesel, amplamente utilizados no transporte público, são reconhecidos por sua participação nas emissões de poluentes. A Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta que a exposição prolongada a esses poluentes está diretamente relacionada a problemas respiratórios, cardíacos e outros danos à saúde. Além disso, a dependência de combustíveis fósseis agrava a vulnerabilidade econômica e energética, especialmente em tempos de flutuação dos preços internacionais do petróleo.

Neste cenário, os ônibus elétricos aparecem como uma alternativa sustentável e promissora para o transporte público. Ao serem alimentados por motores elétricos movidos a baterias recarregáveis, esses veículos eliminam as emissões diretas de poluentes durante a operação, oferecendo benefícios significativos para a qualidade do ar e redução do impacto ambiental nas cidades. Além de mitigar os efeitos das mudanças climáticas, os ônibus elétricos também contribuem para a diminuição dos níveis de ruído urbano.

Brasília, uma cidade planejada, enfrenta desafios únicos de mobilidade urbana. Com uma população em crescimento constante e uma infraestrutura viária projetada em um contexto de priorização do transporte individual, a necessidade de modernizar e tornar seu sistema de transporte público mais sustentável se torna cada vez mais evidente. A adoção de ônibus elétricos surge como uma solução que pode desempenhar um papel central na melhoria da

mobilidade e na redução das emissões de poluentes.

No entanto, para maximizar os benefícios ambientais e econômicos dessa transição, é essencial considerar fontes de energia renovável para o abastecimento dos ônibus elétricos. Nesse contexto, a utilização de sistemas fotovoltaicos para gerar energia elétrica a partir da luz solar se apresenta como uma solução viável e eficiente. A integração de energia solar no carregamento da frota de ônibus elétricos não apenas reduz ainda mais as emissões de carbono, mas também contribui para a autossuficiência energética, diminuindo a pressão sobre a rede elétrica local e aproveitando o vasto potencial solar da região.

Dessa forma, a eletrificação do transporte público, aliada à implementação de sistemas fotovoltaicos, representa uma estratégia de modernização sustentável, capaz de gerar impactos positivos tanto no ambiente quanto na economia. Diante desse contexto, este trabalho busca investigar a viabilidade da adoção de ônibus elétricos no Distrito Federal, com foco no impacto ambiental e no custo-benefício da utilização de energia solar para o abastecimento da frota.

1.2 MOTIVAÇÃO

A poluição do ar, combinada com os altos níveis de emissões de gases de efeito estufa, tornou-se uma questão crítica para a saúde pública e o meio ambiente ao redor do mundo. A exposição a poluentes atmosféricos impacta a saúde humana, elevando as taxas de mortalidade e morbidade. A evidência epidemiológica dos efeitos adversos da poluição do ar tem se tornado cada vez mais robusta, e hoje, a poluição do ar é reconhecida como o maior fator de risco ambiental à saúde humana (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2023). A dependência de veículos movidos a combustíveis fósseis, em particular os ônibus a diesel, contribui significativamente para a degradação da qualidade do ar e o aumento das emissões de CO₂, agravando os problemas ambientais e de saúde pública.

Conforme destacado no Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o setor de transporte é uma das maiores fontes de emissões de CO₂, sendo um dos principais alvos de intervenções voltadas para a redução das emissões globais (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2023). A transição para um sistema de transporte coletivo mais sustentável, utilizando tecnologias de baixa

emissão, como os ônibus elétricos, é imprescindível para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e melhorar a qualidade de vida nas áreas urbanas. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a eletrificação do transporte público é uma medida crucial para alcançar as metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Além das questões ambientais, o avanço tecnológico, a necessidade de modernização do transporte público e a busca por soluções energeticamente eficientes e economicamente viáveis impulsionam a transição para a eletromobilidade. A BloombergNEF destaca que o mercado global de veículos elétricos está em rápida expansão, impulsionado por inovações tecnológicas e políticas governamentais favoráveis (BLOOMBERGNEF, 2023). Nesse cenário, o Distrito Federal tem a oportunidade de se posicionar como uma referência em inovação e sustentabilidade no transporte público, adotando uma frota de ônibus elétricos capaz de atender às necessidades de mobilidade urbana da população de forma eficiente e ambientalmente responsável.

Uma abordagem central neste processo é o uso de energia renovável para o abastecimento dos ônibus elétricos. A integração de sistemas fotovoltaicos, que captam energia solar, surge como uma solução que pode reduzir significativamente a dependência da rede elétrica tradicional e minimizar as emissões de carbono associadas ao abastecimento da frota. A energia solar é abundante em regiões como o Distrito Federal, oferecendo uma fonte limpa e economicamente competitiva para o carregamento de ônibus elétricos (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA), 2021). Estudos indicam que a instalação de sistemas fotovoltaicos pode reduzir significativamente os custos de operação a longo prazo, além de contribuir para a sustentabilidade energética das frotas (SOLAR ENERGY INTERNATIONAL, 2020).

Diante da relevância do tema e dos benefícios potenciais, este estudo visa fornecer uma análise detalhada da viabilidade da implementação de ônibus elétricos no Distrito Federal, com ênfase no impacto ambiental e nos custos associados, incluindo a utilização de sistemas fotovoltaicos como fonte de energia. A transição para um transporte público mais sustentável não apenas reduzirá as emissões de gases de efeito estufa, mas também trará melhorias significativas na qualidade do ar, reduzirá os níveis de ruído urbano e promoverá uma cidade mais saudável e habitável para seus moradores (WORLD BANK, 2023).

Este trabalho encontra-se dentro do âmbito do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de

descritores energéticos baseados em complementaridade para gerenciamento de usinas híbridas flexíveis visando ambientes de mercado emergentes”, Edital FAPDF nº 09/2023.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivos Gerais

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnico-econômica da transição da frota de ônibus do Distrito Federal para veículos elétricos, assim como seus impactos. O estudo busca realizar análises econômicas, ambientais e operacionais para determinar os benefícios e desafios da eletrificação.

Para isso, serão avaliados o custo de aquisição e operação dos ônibus elétricos, a infraestrutura de recarga utilizando sistemas fotovoltaicos, o impacto na redução de emissões de gases de efeito estufa e nos gastos com saúde, além da viabilidade de financiamento e inserção no mercado de carbono.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos do trabalho se dão nos seguintes tópicos:

- Realizar avaliação técnica e do custo de aquisição e operação de ônibus elétricos
- Realizar avaliação técnica e do custo de aquisição e operação de sistemas fotovoltaicos para o carregamento de ônibus elétricos
- Dimensionar o impacto da eletrificação dos ônibus na emissão de gases do efeito estufa e na saúde
- Analisar a possibilidade de implementação de um sistema de mercado de carbono para viabilizar os custos dos ônibus elétricos
- Examinar a relevância da eletrificação de frotas de ônibus na resolução de problemas relacionados a mudanças climáticas

1.3.3 Estrutura do trabalho

- 2 Revisão Bibliográfica: Análise aprofundada sobre a contextualização e apresentação do cenário atual.
- 3 Metodologia: Estabelecimento dos materiais e métodos a serem utilizados para o desenvolvimento do estudo.
- 4 Resultados: Dimensionamento dos ônibus elétricos e sistema fotovoltaico proposto, quantificação das reduções de emissões de gases do efeito estufa e dos efeitos nos gastos com saúde e no mercado de carbono e análise crítica dos resultados.
- 5 Conclusões: Principais conclusões obtidas e propostas para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ACORDO DE PARIS

Na 21^a Conferência das Partes (COP21) em Paris, foi estabelecido um novo acordo com o objetivo principal de fortalecer a resposta global às mudanças climáticas e aumentar a capacidade dos países para enfrentar os impactos dessas mudanças.

O Acordo de Paris, aprovado por 195 países, visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no contexto do desenvolvimento sustentável. O compromisso é manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5°C acima desses níveis.

Para alcançar esse objetivo, os governos desenvolveram seus próprios compromissos por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, na sigla em inglês). Cada país apresentou sua contribuição para a redução das emissões de GEE, conforme o que cada governo considera viável dentro de seu contexto social e econômico.

A NDC do Brasil se compromete a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, com uma meta indicativa subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 (Ministério do Meio Ambiente, s.d.).

Em relação ao financiamento climático, o Acordo de Paris estipula que os países desenvolvidos devem investir 100 bilhões de dólares por ano em medidas de combate e adaptação às mudanças climáticas nos países em desenvolvimento.

2.2 CRISE CLIMÁTICA

Entre o fim de abril e o início de maio de 2024, fortes chuvas no estado do Rio Grande do Sul resultaram em grande destruição ambiental, causando a perda de vidas humanas, o isolamento

de famílias e agravando a vulnerabilidade social em várias áreas.

Conforme informações da Defesa Civil do estado, 172 pessoas morreram e mais de 629 mil foram deslocadas de suas casas devido a esses eventos, considerados a maior tragédia climática do estado (G1 RS, 2024b).

O governo do Rio Grande do Sul estima que serão necessários quase R\$ 19 bilhões, a médio e longo prazo, para reconstruir o estado após as enchentes. Já o Governo Federal destinou R\$ 50,9 bilhões para a recuperação dos municípios e das famílias afetadas (G1 RS, 2024a).

Esse evento foi o mais recente e devastador efeito climático observado no Brasil, mas os centros urbanos do país têm enfrentado desastres climáticos constantes. Tragédias têm ocorrido no Rio de Janeiro, São Paulo e em outros estados, e estão relacionadas às mudanças climáticas.

Os efeitos dessas mudanças são desiguais. Enquanto países do Sul Global, especialmente regiões marginalizadas, sofrem grandes transformações devido a essas tragédias, países do Norte Global dispõem de mais recursos para garantir a qualidade de vida de suas populações.

Segundo um estudo realizado por pesquisadores do ClimaMeter, as mudanças climáticas provocadas pela ação humana, especialmente a emissão de gases de efeito estufa liberados pela queima de combustíveis fósseis, tornaram as chuvas no Rio Grande do Sul mais intensas. Os pesquisadores destacam a necessidade urgente de ações concretas, alertando para a possibilidade de novos eventos semelhantes se nada for feito (PEIXOTO, 2024).

O Estudo de Projeções de Mudanças do Clima para a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (Ride), de 2021, aponta uma tendência de aumento da temperatura no DF e arredores, de 2 a 8 °C até o final do século, em relação ao período histórico (Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal, 2021).

As causas desse aumento de temperatura incluem, principalmente, a contribuição humana relacionada às atividades econômicas que geram emissões de gases de efeito estufa, especialmente o uso crescente de combustíveis fósseis.

2.3 EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA PELO SETOR DE TRANSPORTES

O setor de transportes, tanto de carga quanto de passageiros, é o maior consumidor de energia no Brasil, representando 33% do total de energia consumida em 2021, com crescimento de, aproximadamente, 5% em comparação a 2020 (EPE, 2023).

Esse setor também foi o maior emissor de CO₂ de origem antrópica, associado à matriz energética brasileira, devido à predominância de uso de combustíveis fósseis e ao pouco uso de fontes renováveis.

De acordo com o Inventário das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa, no Distrito Federal, as principais fontes dessas emissões também são do setor de transportes rodoviários, que representaram 53,59% das emissões totais em 2018 (FEDERAL, 2021).

A eletrificação de veículos pesados, como ônibus, é um fator chave para uma transição energética sustentável e para atingir metas de redução de emissões de gases de efeito estufa.

Considerando que o Brasil é o terceiro país do mundo em número de ônibus, e que 86,3% desses ônibus são destinados ao transporte coletivo (BERMUDEZ; CONSONI, 2019), esse setor pode desempenhar um papel central no processo de transição energética no Brasil.

A eletrificação de ônibus urbanos também busca melhorar a qualidade de vida, a mobilidade urbana e reduzir a poluição nos grandes centros urbanos, apoiada por incentivos de políticas públicas. Além disso, envolve a renovação da frota, a democratização do acesso à tecnologia e a redução das emissões de poluentes locais.

2.4 OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Em setembro de 2015, no septuagésimo aniversário da Organização das Nações Unidas (ONU), foram deliberados os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), um conjunto de objetivos e metas universais voltados para a humanidade. Com a meta de plena implementação da agenda até 2030, busca-se alcançar o desenvolvimento sustentável em suas três dimensões: econômica, social e ambiental (Organização das Nações Unidas (ONU), 2015).

Alguns desses ODS abordam diretamente a proposta deste trabalho, em seus aspectos am-

biental e econômico, sendo eles:

2.4.1 ODS 3 - Saúde e Bem-estar

O objetivo 3 tem como princípio assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todos, em todas as idades (BRASIL, s.d.c). Diversas metas específicas foram estabelecidas para até 2030. No entanto, de acordo com o sétimo Relatório Luz, documento elaborado pelo Grupo de Trabalho da Sociedade Civil, o país ainda sofre com os impactos da pandemia de COVID-19, o que fez com que grande parte das metas do ODS 3 esteja em retrocesso ou ameaçada.

Por exemplo, a meta 3.9, que propõe reduzir o número de mortes e doenças causadas por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar, água e solo, completou quatro anos de retrocesso contínuo em 2023. Entre os principais motivos está o atraso na implementação de políticas de controle da qualidade do ar. Conforme o Relatório Luz, apenas 1,7% dos municípios, grande parte no sudeste, monitoram a qualidade do ar, deixando a maior parte do país fora dos padrões do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A inexistência de penalidades para estados, municípios e empresas poluidoras contribui para este cenário, que anualmente leva à morte de cerca de 51 mil pessoas no país (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

2.4.2 ODS 7 - Energia Limpa e Acessível

O objetivo 7 tem como objetivo garantir o acesso a fontes de energia fiáveis, sustentáveis e modernas para todos (BRASIL, s.d.d). De acordo com o sétimo Relatório Luz da Sociedade Civil, o país demonstra um progresso insatisfatório em relação ao cumprimento das metas.

A meta 7.3 almeja dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética. Após três anos seguidos de retrocesso, a meta 7.3 continua em uma situação desfavorável. Em 2020 e 2021, a Intensidade Energética Primária manteve-se em 0,100 OIE por PIB ($\text{tep}/10^3 \text{ US\$ [ppp 2010]}$), e a relação entre a oferta interna de energia (OIE) e o PIB não avançou há pelo menos duas décadas, comprometendo a eficiência energética do país.

Além disso, a meta 7.b, que tem como objetivo expandir e modernizar a infraestrutura

para fornecer energia sustentável nos países em desenvolvimento, especialmente nos menos desenvolvidos, pequenos Estados insulares e países sem litoral, conforme seus programas de apoio, progredia lentamente, mas, infelizmente, retrocedeu (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

2.4.3 ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 tem como meta tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis (BRASIL, s.d.a). O sétimo Relatório Luz, elaborado pelo Grupo de Trabalho da Sociedade, indica que o ODS 11 reflete as frágeis políticas habitacionais, de mobilidade urbana, de saneamento (ODS 6), trabalhistas (ODS 8) e climáticas (ODS 13) (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023). Além disso, no painel ODS Brasil, não existem dados para cinco metas deste objetivo. Os estados e municípios brasileiros enfrentam dificuldades em lidar com os desafios impostos pela mudança climática e muitas vezes desconsideram as necessidades de adaptação.

A meta 11.2, que propõe assegurar transporte seguro, acessível e sustentável para todos, está em retrocesso pelo terceiro ano consecutivo. Os investimentos em transportes públicos coletivos caíram pela metade, passando de cerca de R\$ 1,2 bilhão em 2019 para apenas R\$ 600 milhões em 2022 (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

As metas 11.a e 11.b estabelecem, respectivamente, o apoio a relações econômicas, sociais e ambientais positivas entre áreas urbanas, periurbanas e rurais, e o fortalecimento do planejamento nacional e regional de desenvolvimento. Essas metas também propõem aumentar substancialmente o número de cidades que adotam políticas integradas para inclusão, eficiência de recursos, adaptação às mudanças climáticas e gestão holística do risco de desastres em todos os níveis, conforme o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030. No entanto, ambos os objetivos também seguem em retrocesso, com o desenvolvimento da Política Nacional de Desenvolvimento Urbano (PNDU) e do Plano Nacional de Adaptação às Mudanças do Clima permanecendo estagnados (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

Até o final de 2022, a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, por meio do Plano

Nacional de Gestão de Riscos e Respostas a Desastres, coordenou o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC). O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) monitorou 959 municípios (17,7%) em todas as regiões do Brasil. Durante o ano, ocorreram 11 grandes desastres devido ao aumento dos índices pluviométricos e à negligência em políticas de infraestrutura, drenagem, regularização fundiária e adequação de imóveis precários. Estes eventos resultaram em tragédias significativas, incluindo a devastação no Rio Grande do Sul em 2024, evidenciando a necessidade urgente de investimentos em políticas de mitigação e a luta contra o racismo ambiental (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

2.4.4 ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima

O ODS 13 propõe adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e seus impactos (BRASIL, s.d.b). No entanto, assim como os outros objetivos apresentados, o retrocesso é evidente.

Um exemplo claro é a meta 13.2, que visa integrar medidas de mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais. Em 2020, o Brasil revisou a sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), aumentando em 400 milhões de toneladas as emissões de gases de efeito estufa previstas até 2030. A atualização da NDC em 2022 retrocedeu ainda mais em relação ao compromisso vinculante de 2016, elevando o nível permitido de emissões em 314 milhões de toneladas de CO₂ para 2025 e em 81 milhões de toneladas para 2030 (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

Essa revisão também ignorou o compromisso feito na COP 26 de zerar o desmatamento e reduzir em 30% as emissões de metano até 2030. O Brasil foi criticado por retroceder em suas metas no âmbito do Acordo de Paris, prejudicando a implementação do Pacto Climático de Glasgow, embora não tenha sido o único país do G20 a ser acusado de falta de ambição climática.

Em 2021, o Brasil emitiu 2,4 bilhões de toneladas brutas de gases de efeito estufa (GEE), o que representa um aumento de 12,2% em comparação com 2020 e configura a maior taxa de emissões em quase duas décadas (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030,

2023).

O Plano Nacional de Adaptação (PNA) permaneceu desatualizado até 2022, mas o governo eleito naquele ano anunciou a criação do "Plano Clima", que englobará a estratégia nacional de mitigação e adaptação, além de planos setoriais. O projeto de lei no Senado que estabelece diretrizes para elaboração dos planos de adaptação à mudança do clima, incluindo a participação da sociedade civil por meio do Fórum Brasileiro de Mudança do Clima (FBMC), ainda não avançou (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

Embora a meta geral da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) para 2020 tenha sido cumprida no agregado, a implementação total da política não foi efetiva. A curva de carbono do país continua ascendente, e apesar da tendência de queda no desmatamento da Amazônia a partir de abril de 2023, nos 12 meses anteriores foram devastados 5.936 km², superando em 20% o recorde registrado entre agosto de 2021 e abril de 2022. Nos últimos 38 anos (1985-2022), o Brasil perdeu 96 milhões de hectares de vegetação nativa, o equivalente a 2,5 vezes o tamanho da Alemanha (Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030, 2023).

2.5 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

A cada ano, a necessidade de alinhar o desenvolvimento sustentável ao crescimento econômico se torna mais essencial. A capacidade de coletar recursos energéticos por meio do Sol se concretiza com o uso da energia solar fotovoltaica, um conceito que existe antes mesmo do século passado, mas que na última década se tornou mais acessível financeiramente e tecnicamente. No entanto, apenas uma célula não é capaz de produzir energia suficiente, sendo necessário o uso de conjuntos de células, chamados de módulos fotovoltaicos (SOUZA, 2017).

2.5.1 Tipos de sistemas

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em três principais categorias: sistemas conectados à rede, sistemas isolados e sistemas híbridos.

2.5.1.1 Sistemas Conectados à Rede

Os sistemas conectados à rede, também conhecidos como sistemas *on-grid*, estão ligados diretamente à rede elétrica pública. Eles permitem que a energia gerada pelos painéis solares seja consumida imediatamente pelos equipamentos elétricos da residência ou empresa, e o excedente seja injetado na rede elétrica. Este tipo de sistema não requer baterias, pois a rede elétrica atua como um "reservatório" para a energia excedente. Além disso, geralmente esses sistemas utilizam medidores bidirecionais, que contabilizam tanto a energia consumida quanto a energia gerada e injetada na rede.

2.5.1.2 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, ou *off-grid*, são independentes da rede elétrica pública e comumente utilizados em locais remotos onde não há acesso à rede. Estes sistemas dependem de baterias para armazenar a energia gerada durante o dia, que é utilizada à noite ou em períodos de baixa insolação. Eles são ideais para aplicações rurais, comunidades afastadas e locais onde o custo de extensão da rede elétrica é proibitivo.

2.5.1.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos combinam características dos sistemas *on-grid* e *off-grid*. Eles são conectados à rede elétrica, mas também possuem baterias para armazenar a energia excedente. Este tipo de sistema oferece maior flexibilidade e segurança energética, permitindo o uso da energia solar armazenada durante apagões ou em horários de pico tarifário.

Cada tipo de sistema fotovoltaico possui suas próprias vantagens e é adequado para diferentes necessidades e condições de instalação, permitindo uma ampla gama de aplicações, desde residenciais até industriais.

2.5.2 Tipos de células

Existem diversos tipos de tecnologias e elementos que podem ser aplicados na fabricação de células solares. Atualmente, as células de silício representam 90% da produção atual. As tecnologias fotovoltaicas podem ser classificadas em primeira, segunda e terceira geração (BUHLER, 2011).

As células de primeira geração são formadas por uma camada única e de grande superfície, geralmente feitas de silício mono ou multicristalino. Foram pioneiras na tecnologia e ainda representam grande parte do que é produzido atualmente em termos de células fotovoltaicas (BUHLER, 2011).

A célula de segunda geração consiste em filmes finos como o silício amorfado ou o telureto de cádmio. São inferiores em eficiência quando comparadas à primeira geração, mas seu custo é menor, visto que utilizam menos material (BUHLER, 2011).

A terceira geração é voltada para aplicações espaciais e usa compostos de carbono, como nanotubos. Essa tecnologia está sendo estudada e tem uma estimativa de até 45% de eficiência (BUHLER, 2011).

2.5.3 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos são compostos por várias células solares associadas em série e/ou paralelo, permitindo aumentar a tensão e a corrente fornecida. A eficiência e durabilidade dos módulos dependem dos materiais utilizados, sendo comum a utilização de camadas de vidro temperado, EVA (*Etil Vinil Acetato*), e fluoreto de polivinil para garantir proteção e longevidade (BUHLER, 2011). A vida útil dos módulos é geralmente superior a 20 anos, dependendo das condições de uso.

2.5.4 Controladores de Carga

Controladores de carga são dispositivos que ficam entre os módulos solares e as baterias, regulando a tensão e a corrente de entrada para evitar sobrecargas e descargas excessivas

nas baterias, o que poderia reduzir significativamente a vida útil das mesmas. Existem dois principais tipos de controladores de carga: o PWM (*Pulse Width Modulation*) e o MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) (NEOSOLAR, s.d.a).

2.5.4.1 Controladores PWM

Os controladores PWM são mais simples e acessíveis. Eles funcionam por meio de modulação de largura de pulso, ajustando a tensão de carregamento das baterias em pequenos pulsos. No entanto, a eficiência desse tipo de controlador é limitada, o que resulta em uma maior perda de energia durante o processo de carregamento (NEOSOLAR, s.d.a).

2.5.4.2 Controladores MPPT

Por outro lado, os controladores MPPT são mais avançados e eficientes. Eles funcionam buscando continuamente o ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos, otimizando a quantidade de energia que é convertida e armazenada nas baterias. Apesar de serem mais caros que os PWM, sua eficiência no carregamento faz com que sejam amplamente recomendados para sistemas de maior porte ou onde a máxima eficiência é uma prioridade (NEOSOLAR, s.d.a).

2.5.5 Inversores

Os inversores são responsáveis pela conversão da corrente contínua (CC) gerada pelos módulos fotovoltaicos em corrente alternada (CA), que é a forma de energia usada pela maioria dos equipamentos elétricos. Além de converter a corrente, eles também ajustam as tensões e, em alguns casos, sincronizam a energia gerada com a da rede elétrica em sistemas *on-grid* (NEOSOLAR, s.d.b).

Existem diversos tipos de inversores, cada um adequado para diferentes tipos de sistemas:

- **Inversores de Onda Quadrada:** São os mais simples e econômicos, mas adequados apenas para aplicações de baixa potência. São utilizados principalmente em sistemas

off-grid, como pequenas instalações rurais ou dispositivos portáteis.

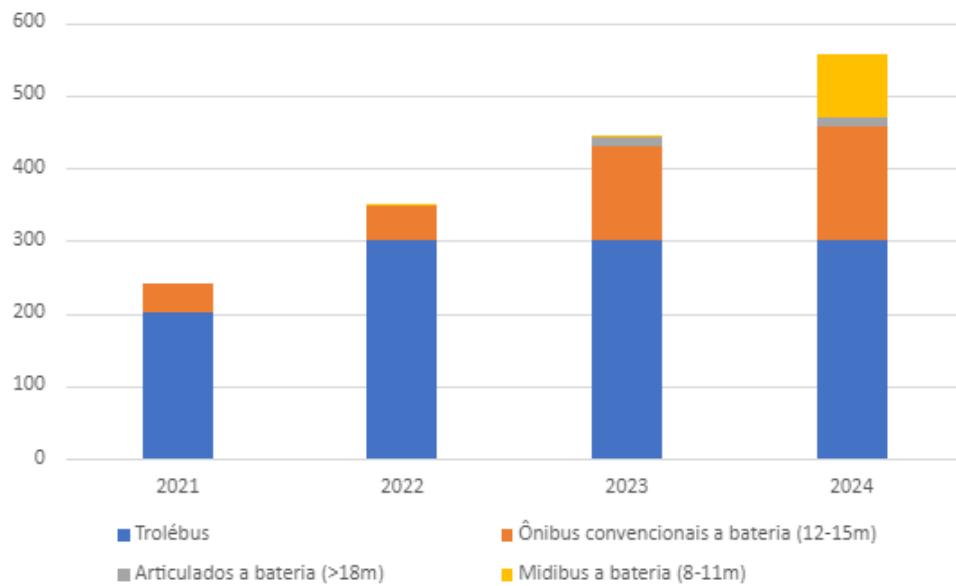
- **Inversores de Onda Senoidal Modificada:** Esses inversores produzem uma onda intermediária entre a quadrada e a senoidal pura, sendo mais versáteis que os de onda quadrada, mas ainda limitados para dispositivos eletrônicos sensíveis. São mais comuns em pequenas instalações *off-grid*.
- **Inversores de Onda Senoidal Pura:** Esses inversores produzem uma onda senoidal praticamente perfeita, compatível com qualquer tipo de aparelho elétrico, incluindo os mais sensíveis, como eletrodomésticos e equipamentos médicos. Eles são recomendados tanto para sistemas *off-grid* quanto *on-grid*, sendo uma escolha confiável para instalações residenciais e comerciais maiores.
- **Inversores para Conexão à Rede (*Grid-tie*):** Esses inversores são utilizados em sistemas conectados à rede elétrica. Além de converter a corrente contínua em alternada, eles sincronizam a energia com a frequência e a fase da rede, permitindo a injeção do excedente de energia na rede pública. Eles possuem mecanismos de segurança, como o “ilhamento”, que impede que a energia continue sendo injetada na rede em casos de desligamento da mesma, garantindo segurança para técnicos de manutenção (NEOSOLAR, s.d.b).
- **Microinversores para Conexão à Rede (*Grid-tie*):** Os microinversores são uma tecnologia mais recente, onde cada painel solar pode ter seu próprio inversor, ou, em alguns casos, um microinversor pode ser conectado a mais de um painel solar. Essa abordagem aumenta a eficiência, a modularidade e facilita a manutenção do sistema. Além disso, são amplamente utilizados em sistemas *on-grid*
- **Inversor/Carregador:** Além da função de inversor, esses dispositivos podem carregar as baterias a partir de uma fonte externa de energia, como a rede elétrica ou um gerador. Eles são usados principalmente em sistemas *off-grid*, permitindo que o sistema funcione mesmo em períodos de baixa geração solar ou quando as baterias estão descarregadas (NEOSOLAR, s.d.b).

2.6 ÔNIBUS ELÉTRICOS URBANOS: CENÁRIO NACIONAL E NO DISTRITO FEDERAL

Nos últimos anos, o Brasil apresentou um grande crescimento nas vendas de ônibus elétricos. Segundo dados de junho de 2024, obtidos na Plataforma E-Bus Radar, o país possui 556 ônibus elétricos em operação, sendo 302 trólebus, 156 ônibus convencionais a bateria (12-15m), 13 articulados a bateria (>18m) e 85 midibus a bateria (8-11m). Esse número de ônibus elétricos representa 2,69% do total de veículos incluídos na plataforma (E-BUS RADAR, 2024).

A partir desses dados, verifica-se uma expansão de 25,2% da frota de elétricos, em relação a 2023, principalmente nas vendas de ônibus convencionais e midibus elétricos.

Figura 2.1: Evolução da frota de ônibus urbanos elétricos (2021-2024), no Brasil, por categoria de ônibus, até julho de 2024.



Fonte: Autoria própria com dados de (E-BUS RADAR, 2024).

Quando comparado com outros países da América Latina, o Brasil ocupa a 4^a posição em quantidade de ônibus elétricos, mas ainda está muito atrás de países como o Chile, com 20,93% de sua frota eletrificada, e a Colômbia, com 11,37% dos veículos elétricos.

Além disso, destaca-se que a maioria dos veículos elétricos no Brasil ainda está concentrada em São Paulo, com cerca de 85% dos veículos elétricos brasileiros.

Em Brasília, o primeiro ônibus elétrico começou a operar em 2018 na frota da empresa

Piracicabana, realizando o trajeto rodoviária do Plano Piloto/Esplanada dos Ministérios. O segundo entrou em operação um mês depois, em agosto, indo da rodoviária do Plano até a UnB.

Em 2024, após seis anos desde o início da operação desses veículos, seis ônibus compõem a frota elétrica de Brasília, todos da empresa Piracicabana, sendo do modelo D9W da BYD. (PIRACICABANA, 2024)

De acordo com a Secretaria de Transporte e Mobilidade (SEMOB), a frota de ônibus do Distrito Federal é composta por cerca de 2.800 veículos, que operam em, aproximadamente, 800 linhas.

Assim, a frota de ônibus elétricos no Distrito Federal representa 0,21% da frota total, um valor bastante abaixo da média nacional de 2,69%.

2.7 IMPACTOS DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA PARA A SAÚDE

Os efeitos à saúde relacionados à exposição à poluição atmosférica têm sido objeto de numerosos estudos que demonstram a ligação entre essa exposição e a mortalidade e morbidade por diversas causas, como doenças cardiovasculares e respiratórias.

Os riscos para a saúde associados a MP_{10} e $MP_{2,5}$ são de grande relevância para a saúde pública. Tanto o $MP_{2,5}$ quanto o MP_{10} são capazes de penetrar profundamente nos pulmões, mas o $MP_{2,5}$ pode até entrar na corrente sanguínea, resultando principalmente em impactos cardiovasculares e respiratórios, além de afetar outros órgãos.

As partículas inaláveis (MP) são geradas principalmente pela combustão de combustíveis em diferentes setores, incluindo transportes, energia, residências, indústria e agricultura. Em 2013, a poluição do ar e as partículas foram classificadas como cancerígenas pela Agência Internacional de Investigação sobre o Câncer (IARC) da OMS.

Em 2019, mais de 90% da população mundial vivia em áreas onde as concentrações de poluentes excediam as diretrizes de qualidade do ar da OMS de 2005 para exposição a longo prazo a $MP_{2,5}$. (OMS, 2021)

Além disso, quase 80% das mortes relacionadas com $MP_{2,5}$ poderiam ser evitadas no mundo

se os atuais níveis de poluição atmosférica fossem reduzidos aos valores propostos nas diretriz atualizada, de acordo com análise realizada pela OMS. E os países que implementaram políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade do ar registraram frequentemente uma redução acentuada da poluição atmosférica.

Além de resultados diretos na saúde da população, na maioria dos casos, a adoção de estratégias e políticas públicas mais saudáveis também gera melhores resultados econômicos a longo prazo, devido à redução dos custos com cuidados de saúde.

Os benefícios financeiros para a saúde podem ser avaliados economicamente, sendo uma ferramenta importante para a análise de custo-benefício em saúde pública, auxiliando na tomada de decisões políticas.

Um estudo realizado em São Paulo, no período de 2009 a 2011, revelou que os níveis de MP_{10} e $MP_{2,5}$ eram mais altos do que os recomendados pela OMS.

De acordo com o mesmo estudo, se o nível de MP_{10} recomendado pela OMS de $20 \mu g/m^3$ fosse atingido, São Paulo teria evitado mais de 1.500 internações cardiovasculares e respiratórias anualmente, com uma economia de US\$ 7,25 milhões em custos de saúde.

Já se os padrões da OMS para $MP_{2,5}$ fossem alcançados ($10 \mu g/m^3$), o número anual de mortes evitadas teria sido superior a 5.000 e a expectativa de vida aumentaria em 15,8 meses. Isso equivale a um ganho de 266.486 anos de vida e US\$ 15,1 bilhões anualmente. (ABE; MIRAGLIA, 2016)

Em outro estudo semelhante, estimando a mortalidade atribuída às concentrações de MP_{10} e $MP_{2,5}$ em 29 Regiões Metropolitanas brasileiras, que totalizaram 20.050 óbitos, foram calculados os custos associados a essa mortalidade por meio da metodologia DALY (*Disability Adjusted Life Years*, anos de vida ajustados por incapacidade em inglês). O custo dessas mortes prematuras no Brasil resultou em US\$ 1,7 bilhão anualmente. (MIRAGLIA; GOUVEIA, 2014)

Reducir os níveis de MP_{10} e $MP_{2,5}$ pode salvar vidas e diminuir significativamente os gastos com saúde em um país onde os recursos econômicos são limitados. Além disso, esses esforços trazem benefícios de longo prazo, ao contribuir para a mitigação das mudanças climáticas também associadas à poluição atmosférica.

2.8 MERCADO DE CARBONO

Em junho de 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como ECO-92 ou RIO-92 reunindo mais de 180 países.

Em 1997, em Quioto, Japão, foi determinado que os países participantes assumiriam compromissos mais rígidos para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Esse acordo ficou conhecido como Protocolo de Quioto.

Para que o protocolo entrasse em vigor, era necessário que 55% dos países, representando 55% das emissões globais de GEE, o ratificassem. Esse marco foi alcançado em 2005, após a ratificação da Rússia.

Com o nascimento do mercado de carbono, a limitação ou redução de gases de efeito estufa passou a gerar valor econômico. Por convenção, uma tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivale a um crédito de carbono, que pode ser negociado no mercado internacional. A redução de outros gases de efeito estufa também pode ser convertida em créditos, usando o conceito de carbono equivalente (CO₂e), que relaciona as emissões de diferentes gases com base em seu potencial de aquecimento global (IPAM, s.d.a).

2.8.1 Funcionamento do Mercado de Carbono

Os negociadores do protocolo estipularam três mecanismos para reger o mercado de carbono, sendo eles:

2.8.1.1 Comércio de Emissões de GEE

Países desenvolvidos que possuírem limites de emissões em excesso, ou seja, que não utilizarem todo o seu montante de emissões permitidas, podem vender esse restante para outras nações que estão acima do limite de emissões.

2.8.1.2 Implementação Conjunta

Os países desenvolvidos podem atuar em conjunto para atingir suas metas. Por meio de acordos de cooperação, os países podem dividir os custos para redução e transferir tecnologia e investimentos entre si.

2.8.1.3 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Esse mecanismo permite a implementação de projetos de redução de emissões em países em desenvolvimento que não possuem metas de redução fixadas pelo Protocolo. Assim, os países podem obter reduções certificadas de emissões (CER), que representam uma tonelada de CO₂e, podendo negociá-las com os países que possuem metas de redução dentro do Protocolo.

Para serem elegíveis, os projetos devem ser aprovados pela entidade nacional designada de cada país (DNA). No Brasil, essa responsabilidade cabe à Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, composta por representantes de onze ministérios (IPAM, s.d.b).

Em ação desde 2006, o mecanismo já registrou mais de mil projetos, representando mais de 2,7 bilhões de toneladas de CO₂ equivalentes. (IPAM, s.d.b)

2.8.2 Mercado Voluntário

No mercado voluntário, empresas, ONGs, instituições, governos ou até mesmo cidadãos tomam a iniciativa de reduzir emissões voluntariamente. Os créditos de carbono podem ser gerados em qualquer lugar do mundo e são auditados por uma entidade independente do sistema das Nações Unidas. No mercado voluntário, os créditos não são equivalentes às reduções de metas dos países, e a operação possui menos burocracia, permitindo a participação de projetos não reconhecidos pelo mercado regulado.

2.8.3 Fundos Voluntários

Além do mercado de carbono, outra forma de financiar projetos de redução de emissões ou sequestro de carbono são os chamados fundos voluntários. Nesses fundos, não há créditos

de carbono, e o valor da doação não pode ser utilizado para metas de redução de países. Assim como no mercado voluntário, projetos não reconhecidos pelo mercado regulado podem participar.

2.9 INCENTIVOS GOVERNAMENTAIS PARA INVESTIMENTOS EM ÔNIBUS ELÉTRICOS

O governo brasileiro tem implementado uma série de incentivos para promover o investimento em ônibus elétricos e tecnologias mais sustentáveis no setor de transporte público. Abaixo estão descritos alguns dos principais programas e investimentos realizados nos últimos anos.

2.9.1 Investimento do PAC

Em 2023, o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) anunciou um investimento de R\$ 10,5 bilhões para a modernização da frota de transporte público em todo o país. Este investimento inclui a aquisição de 2.529 ônibus elétricos, 2.782 ônibus Euro 6 e 39 trens. Os ônibus Euro 6 são veículos que atendem à norma Euro 6 de emissões, uma das mais rigorosas do mundo, estabelecendo limites baixos para a emissão de poluentes como óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas finas (Estadão Mobilidade, 2024).

2.9.2 Objetivos do Programa

Os principais objetivos do programa incluem:

- **Redução das emissões de gases poluentes:** Os ônibus elétricos e Euro 6 são projetados para emitir significativamente menos poluentes em comparação com os veículos convencionais movidos a diesel, contribuindo para a melhora da qualidade do ar.
- **Melhoria da qualidade do ar nas cidades:** Com a redução das emissões, espera-se uma diminuição dos problemas de saúde pública relacionados à poluição do ar, como doenças respiratórias e cardiovasculares.

- **Diminuição do consumo de combustível:** Os ônibus elétricos operam com energia elétrica, que é mais eficiente e menos poluente do que o diesel. Já os ônibus Euro 6 são mais eficientes em termos de consumo de combustível em comparação com as gerações anteriores de ônibus a diesel.
- **Promoção da eficiência energética:** A transição para tecnologias mais avançadas, como a eletrificação e os motores Euro 6, promove um uso mais eficiente dos recursos energéticos.
- **Oferecimento de um transporte público mais moderno, confortável e acessível:** A renovação da frota com veículos novos e mais avançados proporciona um serviço de transporte público de maior qualidade para os usuários.
- **Estímulo ao uso do transporte coletivo e redução do congestionamento urbano:** Melhorando a qualidade do transporte público, o governo incentiva as pessoas a utilizarem menos os veículos particulares, ajudando a reduzir o tráfego e a poluição nas cidades.

2.9.2.1 Investimentos do BNDES

Também em 2023, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciou um investimento de R\$ 4,5 bilhões para financiar a aquisição de 1.034 ônibus elétricos e 1.149 ônibus Euro 6. Esses recursos são provenientes do Fundo Clima e do Fundo de Amparo ao Transporte (FAT), demonstrando o compromisso do governo com a sustentabilidade e a eficiência energética (Redação Mobilidade Estadão, 2024).

2.9.3 Programa MOVER

O Programa MOVER, lançado em 2023, foi criado para promover a Mobilidade Verde e Inovação. Ele concede créditos financeiros proporcionais aos investimentos realizados em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Para cada real investido, os créditos variam entre R\$ 0,50 e R\$ 3,20, que podem ser usados para abatimento de tributos administrados pela Receita Federal. Este incentivo busca estimular a inovação e o desenvolvimento de novas tecnologias no setor automotivo (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2024).

2.9.4 Benefícios para Empresas

Empresas que transferirem operações de produção e equipamentos para o Brasil também podem obter benefícios adicionais. Estes incluem créditos financeiros equivalentes ao imposto de importação e abatimentos no Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) e na Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL). Essas medidas são projetadas para atrair investimentos estrangeiros e fortalecer a indústria nacional (Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec), 2024).

2.9.5 Impacto dos Investimentos

O ciclo de investimentos previsto entre 2021 e 2030 deve ter um impacto significativo na redução de emissões e na melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas. Essa série de investimentos substanciais reflete o compromisso do governo brasileiro com a sustentabilidade e a modernização do transporte público.

2.10 TECNOLOGIA EURO 5 E EURO 6

As tecnologias Euro 5 e Euro 6 são padrões de emissão estabelecidos pela União Europeia para regular a quantidade de poluentes emitidos por veículos automotores. Elas são amplamente aplicadas em veículos de passeio, veículos comerciais leves, caminhões e ônibus, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental em áreas urbanas e rodoviárias. O Euro 5, introduzido em 2009, impôs limites mais rigorosos para emissões de partículas e óxidos de nitrogênio (NOx) em comparação aos padrões anteriores. A norma Euro 6, implementada em 2014, reduziu ainda mais esses limites, exigindo o uso de tecnologias avançadas de controle de emissões, como sistemas de Redução Catalítica Seletiva (SCR) e filtros de partículas diesel (DPF) (União Europeia, 2024).

- **Euro 5:** Introduzido em 2009, limita as emissões de NOx a 180 mg/km para carros a diesel e partículas a 5 mg/km.
- **Euro 6:** Implementado em 2014, reduz as emissões de NOx para 80 mg/km e mantém

as partículas em 5 mg/km, com a adição de requisitos para emissões em condições de condução real.

Essas normas são cruciais para a redução do impacto ambiental dos veículos em áreas urbanas, melhorando significativamente a qualidade do ar.

2.11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, discutiram-se temas centrais relacionados ao Acordo de Paris e à crise climática, com ênfase no impacto das emissões de gases de efeito estufa, especialmente no setor de transportes. Foram também abordados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, destacando metas ambientais e energéticas que são relevantes para a sustentabilidade. Além disso, foram apresentadas tecnologias de sistemas fotovoltaicos, desde os tipos de módulos até inversores, com o intuito de explorar seu papel na transição energética. A importância de políticas públicas e incentivos governamentais também foi explorada, reforçando a necessidade de ações concretas para a promoção de soluções sustentáveis no setor de transporte e energia.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 SELEÇÃO DOS MODELOS DE ÔNIBUS

Para realizar o estudo de viabilidade da implementação de ônibus elétricos no Distrito Federal (DF), será feita uma comparação entre dois modelos de ônibus, sendo um elétrico e outro a diesel. A escolha dos modelos foi baseada na similaridade de suas dimensões e características operacionais, permitindo uma comparação justa. Optou-se por utilizar ônibus e linhas da Piracicabana, pois ela é a única empresa operando ônibus elétricos no DF. Os modelos escolhidos foram:

- Ônibus a diesel: Mercedes O500U
- Ônibus elétrico: BYD D9W

3.1.1 Ônibus a Diesel

O ônibus a diesel, utilizado pela Piracicabana, mais semelhante em tamanho e capacidade de passageiros em relação ao modelo elétrico é o Mercedes Benz O500U. O modelo em operação é a versão antiga, utilizando a tecnologia Euro 5, mas o novo modelo difere pouco em especificações:

Tabela 3.1: Especificações do Ônibus a Diesel

Característica	Valor
Modelo	O500U 1826/59 (EURO 5)
Potência máxima (cv)	256
Torque (kgfm)	91,8
Certificação	Euro 5
Carga máxima eixo dianteiro (kg)	7,000
Carga máxima eixo traseiro (kg)	11,500
Consumo (km/L)	3,15
Preço, com carroceria Marcopolo (R\$)	500.000,00

Fonte: (MERCEDES-BENZ, 2024; PIRACICABANA, 2024).

Figura 3.1: Ônibus O500U Euro 5 Utilizado pela Piracicabana DF



Fonte: William Gabriel.

Já o novo modelo, oferecido pela Mercedes Benz, apresenta as seguintes características:

Tabela 3.2: Especificações do Ônibus a Diesel Novo

Característica	Valor
Modelo	O500U 1928/59 (EURO 6)
Potência máxima (cv)	286
Torque (kgfm)	112,2
Certificação	Euro 6
Carga máxima eixo dianteiro (kg)	7,100
Carga máxima eixo traseiro (kg)	12,500
Consumo (km/L)	Não Disponível

Fonte: (MERCEDES-BENZ, 2024).

Considerando que os ônibus diferem pouco em suas especificações e que foram fornecidas informações de consumo apenas para a versão Euro 5, optou-se por utilizar esses dados no estudo.

Figura 3.2: Ônibus O500U Euro 6 Utilizado pela Viação Pioneira



Fonte: Heitor B. S. Bezerra.

Figura 3.3: Chassis do Ônibus O500U Euro 6

||| | O 500 U



 Mercedes-Benz

Fonte: Mercedes Benz.

3.1.2 Ônibus Elétrico

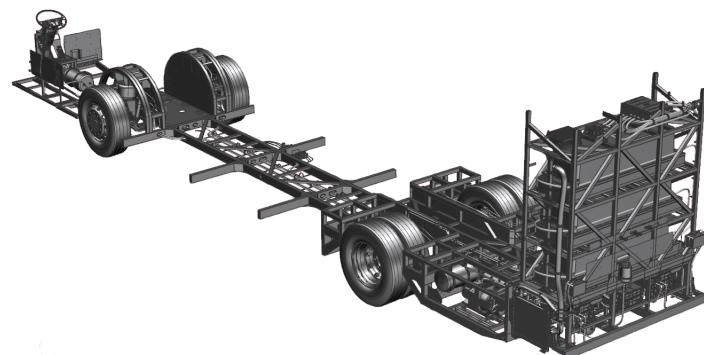
Para o estudo de viabilidade da implementação de ônibus elétricos no Distrito Federal, foi selecionado o modelo BYD D9W. Esse modelo é atualmente utilizado pela Viação Piracicabana na linha 109.3. Embora tenha sido brevemente utilizado na linha 110, foi posteriormente removido dessa rota. A escolha deste modelo permite avaliar o desempenho e os custos de operação de um ônibus elétrico em funcionamento real no contexto local.

Tabela 3.3: Especificações do Ônibus Elétrico BYD D9W

Característica	Valor
Modelo	BYD D9W
Bateria	LiFePO ₄
Capacidade da Bateria (kWh)	344
Potência Nominal (cv)	2 × 201 (150 kW)
Torque (kgfm)	2 × 56
Autonomia (km)	250
Carga máxima eixo dianteiro (kg)	7.000
Carga máxima eixo traseiro (kg)	12.500
Carregamento DC (kW)	Até 160
Tensão	380 V
Peso Bruto (ton)	20,5
Comprimento (m)	12,265
Custo de Manutenção Mensal (R\$)	2.500,00
Custo de Compra (R\$)	1.980.000,00

Fonte: Dados fornecidos pela BYD e Viação Piracicabana

Figura 3.4: Chassis do Ônibus BYD D9W



Fonte: (BYD, 2023).

Figura 3.5: Ônibus BYD D9W Utilizado pela Piracicabana (Modelo 2018)



Fonte: José Antônio Gama.

3.1.3 Estimativa de Consumo no carregamento

De acordo com informações fornecidas pela equipe de vendas da BYD, os chassis dos ônibus elétricos BYD D9W vendidos para a Viação Piracicabana inicialmente utilizavam um sistema de carregamento em corrente alternada (CA), com um carregador de 80 kW. Na época, não havia disponibilidade de carregadores CA mais potentes, e o tempo de carregamento com esse sistema era de aproximadamente 4 horas e 30 minutos.

A partir de 2022, a tecnologia de carregamento dos chassis foi atualizada para corrente contínua (CC), com potência de carregamento aumentada para 160 kW. Essa mudança reduziu o tempo de carregamento para cerca de 2 horas e 30 minutos. Embora a BYD não forneça diretamente os carregadores, ela indica fornecedores que disponibilizam modelos testados e aprovados para o chassis dos ônibus.

Conforme informado pela Piracicabana e confirmado pela equipe técnica da BYD, o chassis do BYD D9W possui uma autonomia de 250 km com uma carga completa. Entretanto, recomenda-se utilizar apenas 80% da capacidade da bateria, mantendo 20% de reserva, semelhante ao tanque de reserva de veículos convencionais movidos a combustão. Com essa prática, a autonomia real do veículo é reduzida para cerca de 216 km.

Levando em consideração esses fatores, para determinar o consumo real necessário para completar uma carga do veículo, ou seja, abastecer os 80% da capacidade da bateria efetivamente utilizados, é necessário calcular o consumo diário em kWh, acrescido de perdas associadas ao processo de carregamento. Essas perdas são estimadas em torno de 10% para refletir a eficiência real do sistema de carregamento:

$$C_{\text{real}} = C_{\text{dia}} \cdot (1 + P) \quad (3.1)$$

Onde:

- C_{real} é o **Consumo Real Necessário**, que representa a quantidade total de energia necessária para completar a carga, considerando as perdas.
- C_{dia} é o **Consumo Diário**, que corresponde à quantidade de energia consumida durante o dia para operar o veículo.
- P é a **Porcentagem de Perdas**, estimada em 10% (ou 0,10 em termos decimais).

3.2 ESTIMATIVA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para estimar o consumo de um ônibus, diversos fatores devem ser considerados, como a duração da viagem, a altitude do percurso e o trajeto. Com o objetivo de apresentar um exemplo prático e realista, foram selecionadas duas linhas arbitrárias. Esse método permite estimar a quantidade de ônibus elétricos necessária para substituir um ônibus a diesel em plena operação na sua linha.

A determinação do percurso diário foi realizada multiplicando o número de viagens pela distância da rota. Para o cálculo do gasto mensal, considerou-se o mês com 30 dias. Os dados referentes à eficiência, medidos em km/L para o ônibus a diesel e km/kWh para o ônibus elétrico, foram obtidos durante uma palestra ministrada pela Viação Piracicabana em um evento da Secretaria de Mobilidade do DF (SEMOB) (PIRACICABANA, 2023), (FEDERAL, 2023).

O consumo diário (C_d) é calculado dividindo-se a distância total percorrida diariamente pelo consumo de combustível ou eletricidade:

$$C_d = \frac{D_d}{E} \quad (3.2)$$

onde D_d é a distância diária percorrida (em km) e E é a eficiência (em km/L para diesel ou km/kWh para elétrico).

O gasto diário (G_d) com combustível ou eletricidade é calculado pela fórmula:

$$G_d = C \times C_d \quad (3.3)$$

onde C é o custo do combustível por unidade (R\$/L para diesel ou R\$/kWh para eletricidade) e C_d é o consumo diário do ônibus (L para diesel ou kWh para elétrico).

Para o cálculo do gasto mensal (G_m), considera-se o número de dias no mês:

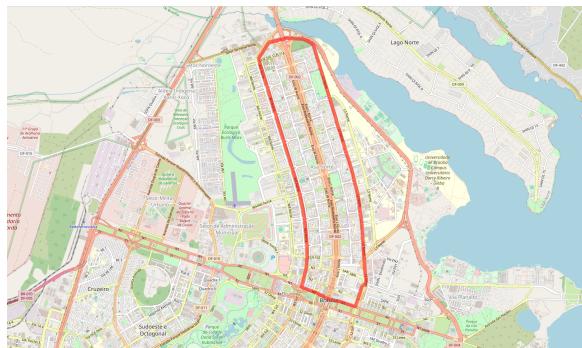
$$G_m = G_d \times 30 \quad (3.4)$$

A soma dos gastos mensais ao longo do ano fornece o custo anual total.

Para estimar o consumo diário, semanal, mensal e anual do ônibus a diesel, foi escolhida a linha 0.116. Com base na análise dos dias da semana, neste caso específico, domingo, foi possível calcular manualmente o percurso diário de cada ônibus. Utilizando esses dados, juntamente com informações fornecidas pela Secretaria de Mobilidade do DF (SEMOB) e pela Petrobras, foi possível estimar a quantidade de diesel utilizada (PETROBRAS, 2023).

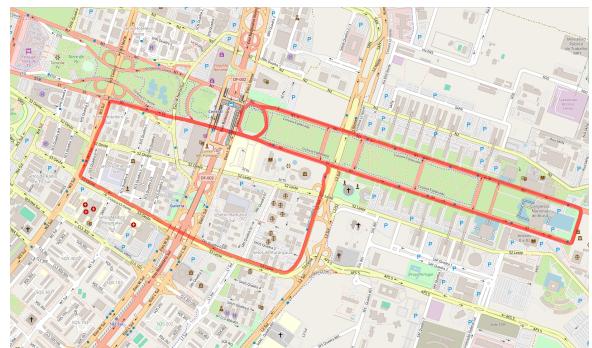
Em seguida, foram analisados os dados da linha de ônibus elétricos, a 109.3, obtendo-se informações semelhantes. Com esses dados, foi possível estimar a quantidade de ônibus elétricos necessária para substituir um ônibus convencional, bem como os custos envolvidos nessa substituição.

Figura 3.6: Linha 0.116



Fonte: (Secretaria de Mobilidade do Distrito Federal, 2024)

Figura 3.7: Linha 109.3



Fonte: (Secretaria de Mobilidade do Distrito Federal, 2024)

Tabela 3.4: Dados da Linha 0.116 a Diesel

Característica	Valor
Modelo de ônibus	O500U 1826/59 com carroceria Marcopolo
Combustível	Diesel
Preço do Diesel (R\$/L)	5,93
Eficiência (km/L)	3,15
Partidas por dia	60
Distância da rota (km)	16,04
Número mínimo de ônibus	4
Número mínimo de viagens por ônibus	15
Distância diária por ônibus (km)	240,6
Consumo diário (L)	76,4

Fonte: (PIRACICABANA, 2023), (FEDERAL, 2023)

Tabela 3.5: Dados da Linha 109.3 Elétrica

Característica	Valor
Modelo de ônibus	BYD D9W com carroceria Marcopolo
Combustível	Elétrico
Preço do combustível (R\$/kWh)	0,52
Eficiência (km/kWh)	0,79
Partidas por dia	51
Distância da rota (km)	9,73
Número mínimo de ônibus	3
Número mínimo de viagens por ônibus	17
Distância diária por ônibus (km)	165,41
Consumo diário (kWh)	210,2

Fonte: (PIRACICABANA, 2023), (FEDERAL, 2023)

Para determinar a quantidade necessária de ônibus elétricos para substituir um ônibus a diesel, deve-se considerar a autonomia de ambos os tipos de ônibus, levando em conta que o

ônibus elétrico deve operar com uma reserva de 20% de sua capacidade total de autonomia, conforme recomendado.

A fórmula para calcular o número de ônibus elétricos necessários (N_E) é:

$$N_E = \left(\frac{A_D}{A_E} \right) \times N_D \quad (3.5)$$

onde:

- A_D é a autonomia diária do ônibus a diesel,
- A_E é a autonomia efetiva do ônibus elétrico (considerando 80% da capacidade total),
- N_D é o número de ônibus a diesel necessários para a operação.

Como os valores podem não ser exatos, deve-se sempre arredondar o resultado para cima, garantindo que haja ônibus elétricos suficientes para cobrir a demanda total de transporte.

Para a estimativa dos custos, foram considerados os preços atuais do diesel e da eletricidade, além dos custos de manutenção e outros fatores relevantes, que serão tratados na determinação do Custo Total de Propriedade (TCO, *Total Cost of Ownership* em inglês).

3.2.1 Cálculo do TCO (Custo Total de Propriedade)

O Custo Total de Propriedade (TCO) é uma métrica essencial para avaliar os custos associados à aquisição e operação de um ônibus ao longo de sua vida útil. O cálculo do TCO inclui vários componentes, como o custo de aquisição, os custos operacionais, a manutenção e a depreciação do veículo, ajustado para considerar os juros compostos ao longo do período de operação.

3.2.1.1 Componentes do TCO

Os principais componentes do TCO são:

- **Custo de Aquisição (C_A):** O valor inicial pago pela compra do ônibus.

- **Gasto Diário** (G_d): Despesas diárias com combustível ou eletricidade.
- **Custo Total de Combustível ou Eletricidade** (G_{TC}): Gastos totais com combustível ou eletricidade ao longo do tempo de operação.
- **Custo Anual de Manutenção** (M): Gastos anuais com manutenção preventiva e corretiva.
- **Custo Total de Manutenção** (M_{TC}): Custo total de manutenção ao longo dos anos de uso.
- **Valor de Revenda** (V_f): Valor estimado de revenda ao final da vida útil do ônibus.
- **Número de Anos** (N_a): Vida útil estimada do ônibus, em anos.
- **Taxa de Juros Compostos** (i): Taxa de juros anual aplicada ao longo do tempo.

3.2.1.2 Fórmula do TCO

A fórmula para calcular o TCO é a seguinte:

$$TCO = C_A + \sum_{t=1}^{N_a} \frac{(G_d \times 365 + M)}{(1+i)^t} - \frac{V_f}{(1+i)^{N_a}} \quad (3.6)$$

Onde:

- C_A é o **Custo de Aquisição**.
- G_d é o **Gasto Diário com combustível ou eletricidade**.
- M é o **Custo Anual de Manutenção**.
- V_f é o **Valor de Revenda**.
- i é a **Taxa de Juros Compostos Anual**.
- t é o **Número de anos de operação**

Com essa equação, os custos de operação e manutenção são ajustados anualmente pela taxa de juros composta ao longo dos N_a anos. O valor de revenda também é descontado com base na taxa de juros ao final da vida útil.

3.2.2 Payback

O payback é uma ferramenta essencial para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, especialmente quando se trata de investimentos em novas tecnologias ou infraestruturas. Em termos simples, o payback nos diz quanto tempo levará para que o investimento inicial seja recuperado com os retornos gerados pelo projeto.

Para calcular o payback, existem algumas etapas básicas:

- **Determinação do Custo Inicial (C_I):** Este é o valor total do investimento necessário para implementar o projeto.
- **Cálculo dos Fluxos de Caixa Anuais (F):** Estes são os benefícios financeiros anuais esperados, que podem incluir economias com combustível, custos reduzidos de manutenção, entre outros.
- **Cálculo do Payback:** Divide-se o custo inicial pelo fluxo de caixa anual para determinar o tempo necessário para recuperar o investimento.

A fórmula para o payback é a seguinte:

$$\text{Payback} = \frac{C_I}{F} \quad (3.7)$$

Onde:

- C_I representa o **Custo Inicial** do investimento;
- F é o **Fluxo de Caixa Anual**.

No caso de projetos que envolvem fluxos de caixa variáveis ao longo do tempo, o cálculo do payback pode ser ajustado para incluir uma análise de valor presente líquido, o que proporcionaria uma visão mais precisa de quanto tempo é necessário para o retorno do investimento, considerando a taxa de juros aplicada.

A fórmula do Payback Ajustado com Juros Compostos seria:

$$\text{Payback Ajustado} = \frac{C_I}{\sum_{t=1}^{N_a} \frac{F}{(1+i)^t}} \quad (3.8)$$

Onde:

- i é a **taxa de juros** anual composta.
- t é o **tempo em anos**.

3.3 MODELOS DOS EQUIPAMENTOS FOTOVOLTAICOS UTILIZADOS

Um aspecto crucial para o dimensionamento adequado de um sistema fotovoltaico é a definição dos modelos dos dispositivos a serem utilizados. Esta seção apresenta os modelos, marcas e principais informações dos *datasheets* dos principais dispositivos.

3.3.1 Dados dos módulos fotovoltaicos

Para o projeto foi selecionado, o módulo fotovoltaico da marca OSDA Solar, modelo ODA465-36V-MH. O módulo tem potência de 465 W. Na tabela 3.6 estão representados os dados do *datasheet* do módulo.

Tabela 3.6: Especificações do Módulo Fotovoltaico

Característica	Valor
Modelo	ODA465-36V-MH
Potência máxima (Pmp) - STC (W)	465
Tensão em Circuito Aberto - Voc (V) - STC	49,90 \pm 3%
Corrente de curto-circuito - Isc (A) - STC	11,78 \pm 3%
Tensão de máxima potência - Vmp (V) - STC	42,10
Corrente de máxima potência - Imp (A) - STC	11,06
Eficiência do módulo - STC (%)	21,30
Coeficiente de Temperatura em Pmáx (%/°C)	-0,350
Coeficiente de Temperatura Voc (%/°C)	-0,270
Coeficiente de Temperatura Isc (%/°C)	+0,048
Área de um módulo (m ²)	2,102 \cdot 1,040 \approx 2,186

Fonte: (SOLAR, s.d.)

Figura 3.8: Módulo Fotovoltaico ODA465-36V-MH



Fonte: (SOLAR, s.d.).

Para a escolha do modelo de módulo fotovoltaico foi levada em consideração além de sua potência máxima, a sua corrente de máxima potência. O modelo descrito é o que se enquadrou nos critérios estabelecidos.

3.3.2 Dados dos inversores

Para os inversores, foi escolhido o modelo SUN-8K-SG03LP1-EU da marca Deye, que possui uma potência nominal de 8 kW. Essas e outras informações detalhadas podem ser encontradas na tabela 3.7, que representa o *datasheet* do dispositivo.

Tabela 3.7: Especificações do Inversor

Característica	Valor
Modelo	SUN-8K-SG03LP1-EU
Potência de saída (VA ou W)	8000
Eficiência (%)	97,6
Tensão de saída (VCA)	220/230
Corrente máxima de carga CC (A)	190
Corrente máxima de saída CA (A)	40
Tensão de entrada CC (VCC) - por canal	370
Tipo de baterias aceitas	Chumbo-ácido ou Lítio
Frequência Nominal de saída (Hz)	50/60
Corrente máxima de entrada CC (A) - por canal	26
Faixa de operação da MPPT (V)	150 - 425
Número de MPPT	2
Número de strings por MPPT	2

Fonte: (DEYE, s.d.)

Figura 3.9: Inversor SUN-8K-SG03LP1-EU



Fonte: (DEYE, s.d.).

3.4 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O projeto de um sistema fotovoltaico envolve diversos aspectos, como a orientação dos módulos, a disponibilidade de área, o recurso solar disponível e a demanda de energia a ser atendida. O dimensionamento de um sistema fotovoltaico é o ajuste entre a energia recebida do sol pelos módulos fotovoltaicos e a necessidade de suprir a demanda de energia elétrica. O objetivo principal do projeto é adequar o gerador fotovoltaico às necessidades de consumo, garantindo que a energia gerada pelos módulos atenda à demanda elétrica.

O sistema a ser dimensionado é do tipo conectado à rede (on-grid), ou seja, não é necessário o uso de baterias para armazenamento de energia, pois a energia excedente será enviada para a rede elétrica local.

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) estabelecem os requisitos para o acesso à rede por micro e minigeração distribuída. Além disso, a instalação de um sistema conectado à rede deve seguir as normas específicas da concessionária de distribuição local, que no Distrito Federal é a Neoenergia.

De acordo com a necessidade de energia identificada, o projeto será classificado como minigeração, já que a potência instalada está entre 75 kW e 5 MW. Sendo assim, o sistema deve atender à norma DIS-NOR-033, que regula a conexão de geradores em paralelo e a minigeração distribuída em média tensão.

Este projeto tem como foco o autoconsumo remoto, onde a geração de energia ocorre em um

local diferente das unidades consumidoras que se beneficiarão dela. Nesse caso, será necessário solicitar a compensação dessa geração em forma de créditos de energia, conforme a legislação vigente sobre geração distribuída no Brasil.

3.4.1 Determinação da localização

A localização foi determinada baseada na hipótese de que o sistema fotovoltaico será instalado em uma localidade no Distrito Federal. A localização escolhida foi um ponto na Universidade de Brasília, e que possui características de irradiação solar semelhante ao restante do DF.

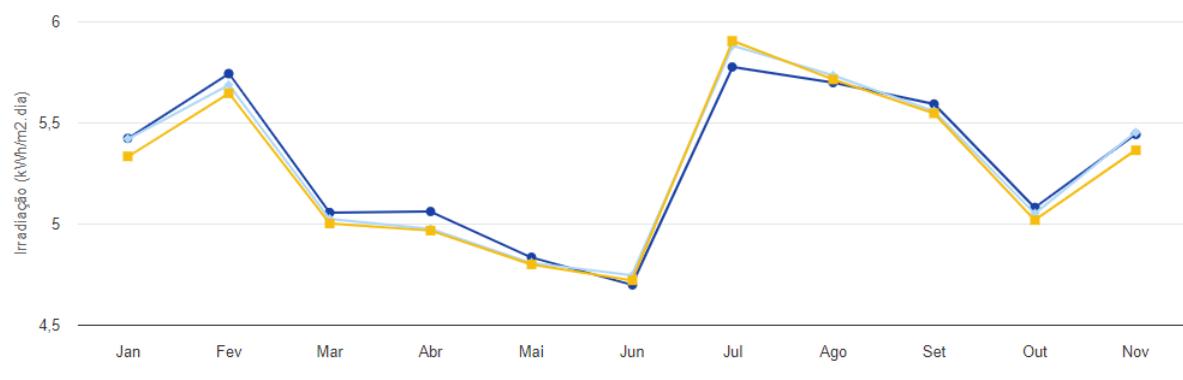
3.4.2 Avaliação do recurso solar

A etapa inicial consiste em avaliar o recurso solar, assegurando que os componentes do sistema sejam dimensionados corretamente de acordo com as demandas do projeto.

Para esse projeto foram utilizadas as coordenadas 15.7571913 S, 47.8879656 O, e assim foi possível determinar os dados de irradiação solar na região utilizando o software disponível no site do CRESESB.(CRESESB, 2018)

A figura 3.10 mostra que em localizações próximas à escolhida a irradiação solar durante todo o ano é bastante semelhante. Assim, entende-se que o projeto para a localização escolhida e para áreas próximas poderia ser replicado.

Figura 3.10: Irradiação solar para localidades próximas



Fonte: (CRESESB, 2018)

A tabela 3.11 apresenta as informações detalhadas de recurso solar na região. Essas foram as informações utilizadas para calcular o número de Horas de Sol Pleno (HSP), que representa o número de horas em que a irradiância solar se mantém constante em $1\ kW/m^2$.

Tabela 3.11: Irradiação solar diária média

Estação: Brasília
Município: Brasília, DF - BRASIL
Latitude: 15,801° S
Longitude: 47,949° O

Distância do ponto de ref. (15,767191° S; 47,887966° O) 8,2 Km

#	Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]													
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
<input checked="" type="checkbox"/>	Plano Horizontal	0° N	5,33	5,64	5,00	4,97	4,80	4,72	5,02	5,90	5,71	5,55	5,02	5,36	5,25	1,18
<input checked="" type="checkbox"/>	Ângulo igual a latitude	16° N	4,93	5,41	5,04	5,35	5,52	5,63	5,93	6,63	5,93	5,40	4,69	4,91	5,45	1,93
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior média anual	18° N	4,87	5,36	5,03	5,37	5,58	5,72	6,02	6,69	5,93	5,36	4,64	4,84	5,45	2,05
<input checked="" type="checkbox"/>	Maior mínimo mensal	4° N	5,26	5,61	5,04	5,09	5,01	4,98	5,28	6,12	5,80	5,54	4,96	5,27	5,33	1,16

Fonte: (CRESESB, 2018)

Conforme mostrado na tabela 3.11, o valor médio de irradiação solar é de $5,45\ kWh/m^2\cdot dia$.

Portanto, o valor das Horas de Sol Pleno (HSP) é de 5,45 h/dia.

3.4.3 Determinação de energia necessária

Para a determinação da energia necessária a ser fornecida pelo sistema fotovoltaico foi levada em consideração a capacidade da bateria do ônibus elétrico a ser carregado. A bateria do ônibus analisado 3.3 possui capacidade de 344 kWh e deve ser carregada diariamente de forma completa ao fim do dia. Assim, a energia necessária para o sistema fotovoltaico proposto é de 344 kWh/dia.

3.4.4 Dimensionamento dos componentes

Para o desenvolvimento desse projeto fotovoltaico foi utilizado como referência principal o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), publicado pelo Grupo de Trabalho de Energia Solar da CRESESB (Centro de Referência para Energia Solar e Eólica) em parceria com o CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

3.4.4.1 Dimensionamento do gerador

A potência do gerador que compõe o sistema fotovoltaico conectado a rede pode ser calculado pela equação 3.9, onde determina-se quanto da demanda de energia elétrica vai ser suprida.

$$P_{FV}(Wp) = \frac{(E/TD)}{HSP} \quad (3.9)$$

Em que:

$P_{FV}(Wp)$ - Potência de pico do sistema FV;

$E(\text{Wh/dia})$ - Consumo diário médio;

$HSP(\text{h/dia})$ - Média diária anual de horas de sol pleno incidente no plano do painel FV;

$TD(\text{adimensional})$ - Taxa de desempenho.

A taxa de desempenho é definida como a relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho máximo teórico possível. De acordo com o Manual de Engenharia pra Sistemas fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), uma taxa entre 70 e 80% pode ser obtida nas condições de radiação solar encontradas no Brasil.

3.4.4.2 Cálculo de tensão do módulo FV para diferentes temperaturas de operação

A variação de temperatura exerce uma grande influência no funcionamento de sistemas fotovoltaicos, especialmente em relação a variações de tensão. Assim, é necessário determinar as tensões para as temperaturas máximas e mínimas de operação.

3.4.4.2.1 Tensão de circuito aberto (V_{oc}) para diferentes temperaturas de operação

Pode-se calcular a tensão de circuito aberto (V_{oc}) para diferentes temperaturas de operação através da equação 3.10.

$$V_{oc}(T) = V_{oc} \times (1 + \beta \times (T - 25)) \quad (3.10)$$

Onde:

V_{oc} (V) - Tensão de circuito aberto;

β (V/°C) - Coeficiente de temperatura V_{oc} ;

T(°C) - Temperatura de operação.

3.4.4.2.2 Tensão de potência máxima(V_{mp}) para diferentes temperaturas de operação

De forma semelhante a tensão de circuito aberto V_{oc} , pode-se determinar a tensão de máxima potência (V_{mp}) para diferentes temperaturas de operação através da equação 3.11.

$$V_{mp}(T) = V_{mp} \times (1 + \beta_{mp} \times (T - 25)) \quad (3.11)$$

Onde:

V_{mp} (V) - Tensão de máxima potência;

β_{mp} (V/°C) - Coeficiente de temperatura de máxima potência;

T(°C) - Temperatura de operação.

3.4.4.2.3 Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos

Para definir a quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para o sistema, utiliza-se o valor de potência definido por meio da equação 3.9 e a potência de pico do módulo fotovoltaico. O modelo de módulo selecionado tem uma potência de pico de 465 Wp, como descrito na tabela 3.6. Desta forma, para determinar a quantidade de módulos necessários, realiza-se o cálculo descrito na equação 3.12.

$$\text{Quantidade de Módulos} = \frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência do módulo}} \quad (3.12)$$

3.4.4.2.4 Quantidade de módulos em série

A tensão de entrada do inversor é a tensão dos módulos associados em série. Essa tensão é fortemente influenciada pela temperatura de operação do gerador.

Deve-se definir a máxima tensão de entrada do inversor, que não deve ser ultrapassada, e assim definir a quantidade de módulos em série.

A máxima tensão do sistema ocorre quando o painel está em circuito aberto (V_{oc}) em baixas temperaturas. Logo, o número máximo de módulos em série pode ser calculado pela equação 3.13.

$$N^{\text{mod.serie}} \times V_{oc,Tmin} \leq V_{Imax} \quad (3.13)$$

Onde:

$V_{oc,Tmin}$ (V) - Tensão em circuito aberto de um módulo FV na menor temperatura prevista;

V_{Imax} (V) - Máxima tensão CC admitida pela entrada do inversor.

Para a definição do número de módulos em série, também deve ser considerada a faixa de tensão de MPPT (Seguidor do Ponto de Potência Máxima, sigla em inglês) do inversor.

Portanto, o número de módulos conectados em série deve ser suficiente para que a tensão do painel FV seja superior à mínima tensão de MPPT. Além disso, a tensão de potência máxima na menor temperatura prevista do módulo FV deve ser menor que a tensão máxima de operação do MPPT.

$$\frac{V_{Inv_{MPPTmin}}}{V_{mp,Tmax}} \leq N^{\text{mod.serie}} \leq \frac{V_{Inv_{MPPTmax}}}{V_{mp,Tmin}} \quad (3.14)$$

Onde:

$V_{Inv_{MPPTmin}}$ (V) - Mínima tensão CC de operação do MPPT do inversor;

$V_{Inv_{MPPTmax}}$ (V) - Máxima tensão CC de operação do MPPT do inversor;

$V_{mp,Tmax}$ (V) - Tensão de potência máxima do módulo FV na maior temperatura de operação prevista;

$V_{mp,Tmin}$ (V) - Tensão de potência máxima do módulo FV na menor temperatura de operação prevista.

3.4.4.2.5 Quantidade de módulos em paralelo

O inversor possui uma máxima corrente CC de entrada. O máximo de módulos em paralelo conectados no sistema deve garantir que esse valor não seja ultrapassado, conforme equação 3.20.

$$N^{\circ} \text{mod. paralelo} = \frac{I_{Imax}}{I_{sc}} \quad (3.15)$$

Onde:

I_{Imax} (A) - Corrente máxima CC na entrada do inversor;

I_{sc} (A) - Corrente de curto-círcuito do módulo FV.

Além disso, muitas vezes o fabricante também indica o número máximo de módulos em paralelo que podem ser conectados ao inversor.

3.4.4.3 Dimensionamento do inversor

O dimensionamento de um inversor depende da potência do gerador FV e das características elétricas do módulo escolhido para compor o sistema. A otimização do inversor é crucial para garantir que ele não opere por longos períodos em potência abaixo da nominal, nem seja sobrecarregado.

O fator de dimensionamento do inversor pode ser calculado pela equação 3.16, e representa a relação entre a potência nominal em corrente alternada (CA) do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico (FV).

$$FDI = \frac{P_N}{P_{FV}} \quad (3.16)$$

Onde:

FDI (adimensional) - Fator de dimensionamento do inversor;

P_N (W) - Potência nominal em CA do inversor;

P_{FV} (Wp) - Potência de pico do painel FV.

De acordo com o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), os valores recomendados de FDI variam entre 0,75 e 0,85, com um limite superior de 1,05.

3.4.4.4 Dimensionamento dos condutores

Para o dimensionamento de condutores em um sistema fotovoltaico, algumas normas específicas devem ser seguidas. Entre as normas relevantes estão a ABNT NBR 16612 - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura – Requisitos de desempenho, a ABNT NBR 16690 - Instalações elétricas de baixa tensão – Arranjos fotovoltaicos, e a ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão.

De acordo com a Norma ABNT NBR 16690, uma vez obtida a corrente de projeto dos circuitos, as seções nominais dos cabos das instalações fotovoltaicas devem ser determinadas de acordo com os critérios de capacidade de condução de corrente e queda de tensão. Deve-se escolher, ao final, a maior seção obtida entre os dois critérios, conforme definido na ABNT NBR 5410.

Já os cabos que operam em corrente alternada em baixa tensão, que são os cabos que saem do inversor, devem ser dimensionados conforme os critérios da ABNT NBR 5410.

Esses critérios são: método da seção mínima, método da capacidade de condução de corrente e método de queda de tensão. Ao final deve-se escolher a maior seção obtida entre esses três critérios.

3.4.4.4.1 Corrente de projeto

A corrente de projeto (I_B) para o dimensionamento de um circuito fotovoltaico deve ser igual à corrente mínima em relação à qual a seção nominal dos condutores fotovoltaicos deve ser dimensionada, de acordo com o tipo de arranjo definido pela ABNT NBR 16690.

De acordo com a ABNT NBR 16690, a corrente de projeto para um arranjo fotovoltaico com apenas um arranjo fotovoltaico pode ser determinado pela equação 3.17.

$$I_B = 1,5 \times I_{sc} \times N^o \text{ mod.paralelo} \quad (3.17)$$

Onde:

I_{sc} (A)- corrente de curto-circuito de um módulo fotovoltaico ou de uma série fotovoltaica.

Para os cabos que saem do inversor, de baixa tensão em corrente alternada, a corrente de projeto pode ser calculada como:

$$I_b = \frac{P}{V} \quad (3.18)$$

Onde:

$P(W)$ - potência ativa

$V(V)$ - tensão nominal.

3.4.4.4.2 Método da seção mínima

O método da seção mínima está descrito na Tabela 47 da ABNT NBR 5410, onde se encontra a seção mínima dos condutores para cada tipo de circuito. Para um sistema fotovoltaico, é considerada a seção mínima aplicada para circuitos de força de $2,5 \text{ mm}^2$.

3.4.4.4.3 Método de capacidade de condução de corrente

Pelo método da capacidade de condução de corrente, calcula-se a corrente de projeto do circuito corrigida conforme os fatores de correção apresentados na norma.

Para o dimensionamento dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos entre si e dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos até o inversor, utilizam-se as tabelas C.1 a C.10 da ABNT 16612 com os critérios de capacidade de condução de corrente.

Em seguida, consultam-se as tabelas 36 a 39 da ABNT NBR 5410 para definir a seção nominal do condutor.

Para os cabos de baixa tensão devem-se calcular os fatores de correção. Eles são de temperatura, de agrupamento e, se necessário, para linhas subterrâneas.

Por meio da Tabela 3.8, baseada na Tabela 40 da NBR 5410, define-se o fator de correção de temperatura.

Tabela 3.8: Fator de correção de temperatura

Temperatura Ambiente (°C)	Isolação	
	PVC	EPR ou XLPE
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
30	1,00	1,00
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82

Fonte: Dados adaptados da Tabela 40 da NBR 5410 (ABNT, 2004)

Define-se o método de instalação por meio da Tabela 3.9, baseada na Tabela 33 da NBR 5410.

Tabela 3.9: Métodos de instalação

Descrição	Método de referência
Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante	A1
Cabo multipolar em eletroduto de seção circular embutido em parede termicamente isolante	A2
Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B1
Cabo multipolar em eletroduto aparente de seção circular sobre parede ou espaçado desta menos de 0,3 vez o diâmetro do eletroduto	B2

Fonte: Dados adaptados da Tabela 33 da NBR 5410 (ABNT, 2004)

Por meio da Tabela 3.10, baseada na Tabela 46 da NBR 5410, define-se o número de condutores carregados a ser adotado.

Tabela 3.10: Número de condutores carregados a ser adotado para diferentes esquemas de circuitos

Esquema de condutores vivos do circuito	Número de condutores carregados
Monofásico a dois condutores	2
Monofásico a três condutores	2
Duas fases sem neutro	2
Duas fases com neutro	3
Trifásico sem neutro	3
Trifásico com neutro	3 ou 4

Fonte: Dados adaptados da Tabela 46 da NBR 5410 (ABNT, 2004)

Com a definição do método de instalação e do número de condutores carregados, é possível definir, por meio da Tabela 42 da NBR 5410, o fator de agrupamento.

Com todos os fatores definidos pode-se calcular a corrente de projeto corrigida, conforme equação

$$I'_b = \frac{I_b}{k_1 \cdot k_2} \quad (3.19)$$

O coeficiente k_1 corresponde ao fator de correção de temperatura, e k_2 corresponde ao fator de correção de agrupamento.

Por meio do cálculo da corrente de projeto corrigida, é possível definir a seção transversal do condutor mais apropriada.

3.4.4.4.4 Método de queda de tensão

Este método considera a ocorrência de uma queda de tensão devido à passagem de corrente por todos os elementos do circuito. A NBR 5410 estabelece limites para essa queda de tensão que devem ser obedecidos, e a seção nominal adotada deve respeitar esse limite. Salienta-se que sistemas em corrente contínua com tensões nominais de 12V, 24V e 48V, normalmente o limite de queda de tensão é entre 1% e 3% .

Considerando esse critério, utiliza-se a equação 3.20 para determinar a seção nominal do condutor.

$$S = \rho \times \frac{d \times I}{\Delta V} \quad (3.20)$$

Onde:

S (mm^2) - Seção transversal do condutor;

ρ ($\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$) - Resistividade do material do condutor;

d (m) - Distância total do condutor;

I (A) - Corrente que passa pelo condutor;

ΔV (V) - Queda de tensão tolerada (calculada sobre a tensão nominal do sistema).

3.4.4.5 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Com relação à dispositivos de proteção, sistemas fotovoltaicos normalmente utilizam chaves, fusíveis, disjuntores e dispositivos de proteção contra surtos. Tais dispositivos devem ser escolhidos com base nos valores máximos de tensão e corrente permitidos em cada trecho do circuito

A corrente do arranjo máxima é dada pela corrente de curto-círcuito em condições de irradiação máxima, que normalmente é multiplicada por um fator de 1,25 de segurança no momento de se dimensionar os componentes de proteção instalados entre os módulos e os inversores.

Também é essencial observar a adequação dos componentes para operar com tensão CC ou CA no local de instalação.

3.4.4.5.1 Dimensionamento dos fusíveis

Para o dimensionamento dos fusíveis para o lado do sistema de corrente contínua, para cada série, é necessário determinar a corrente nominal do fusível (I_n) por meio dos valores da corrente de curto-círcuito (I_{sc}) e da tensão de circuito aberto (V_{oc}). As definições do tipo de fusível a ser utilizado são feitas a partir das equações 3.21 e 3.22.

$$V_{oc_{total}} = V_{oc_{mod.}} \times N^o \text{ mod. serie} \quad (3.21)$$

$$I_{sc_{total}} = I_{sc_{mod.}} \times N^o \text{ mod.paralelo} \quad (3.22)$$

A partir dos valores encontrados, é possível aplicar a condição estabelecida na NBR 16690. Essa condição determina que a corrente nominal do dispositivo de proteção deve ser maior que 1,5 vezes a corrente de curto-circuito da série e menor que 2,4 vezes essa corrente.

3.4.4.5.2 Dimensionamento dos disjuntores

Para o disjuntor entre os módulos e o inversor pode-se definir que a corrente do disjuntor deve ser superior à corrente total de curto-circuito do arranjo de módulos, conforme a equação 3.23.

$$I_{total} = I_{sc_{mod.}} \times N^o \text{ mod.paralelo} \quad (3.23)$$

Para dimensionar os disjuntores de corrente alternada entre o inversor e as cargas, é necessário aplicar a relação que define a potência como sendo o produto da tensão pela corrente.

Comumente, a potência a ser considerada é a potência instalada, mas como o sistema é composto por diversos inversores, a potência considerada será a potência nominal do inversor e será considerada a tensão de saída do inversor.

Além disso, aplica-se um fator de 15% sobre o valor da corrente para encontrar o valor máximo possível para a corrente do disjuntor. Assim, o valor da corrente do disjuntor pode ser calculado pela equação 3.24.

$$0,85 \cdot I_{disj} = \frac{P}{V} \quad (3.24)$$

3.5 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

3.5.1 Cálculo das Emissões Diárias de CO₂

Para calcular as emissões diárias de CO₂ de um ônibus a diesel, é necessário considerar o consumo diário de combustível e o fator de emissão associado ao diesel. O processo de cálculo

é descrito a seguir:

- **Autonomia do Ônibus (A):** A distância que o ônibus pode percorrer com um litro de diesel.
- **Meta de Quilometragem Diária (D):** A distância total percorrida diariamente pelo ônibus.
- **Cálculo do Consumo Diário de Diesel ($C_{diário}$):** O consumo diário de diesel pode ser calculado pela fórmula:

$$C_{diário} = \frac{D}{A} \quad (3.25)$$

Onde:

- D é a meta de quilometragem diária.
- A é a autonomia do ônibus.
- **Fator de Emissão de CO2 por Litro de Diesel (E_{CO2}):** O fator de emissão de CO2 para o diesel é de 2,779 kg de CO2 por litro de diesel.
- **Cálculo das Emissões Diárias de CO2 ($E_{CO2, diário}$):** As emissões diárias de CO2 podem ser calculadas pela fórmula:

$$E_{CO2, diário} = C_{diário} \times E_{CO2} \quad (3.26)$$

Onde:

- $C_{diário}$ é o consumo diário de diesel calculado anteriormente.
- E_{CO2} é o fator de emissão de CO2 (2,779 kg/L).

3.6 IMPACTO DA POLUIÇÃO DO AR NA SAÚDE

De acordo com estudo realizado (ABE; MIRAGLIA, 2016), foram avaliados os benefícios à saúde que poderiam ser alcançados se as concentrações de poluentes fossem diminuídas. Em relação ao material particulado MP_{10} e ao ozônio, a exposição de curto prazo foi estimada, e o impacto nas condições de saúde pode ser calculado de acordo com a equação 3.27.

$$\Delta y = y_0 \times (1 - e^{-\beta \Delta x}) \quad (3.27)$$

Onde:

Δy - diminuição do número anual de hospitalizações ou mortes associadas à redução das concentrações de poluentes;

y_0 - valor base de saúde, em número anual de mortes ou hospitalizações;

β - coeficiente de resposta à concentração de poluentes;

Δx - diminuição da concentração de poluentes, em $\mu g/m^3$.

Um indicador padrão para expressar a compensação entre mortalidade e custos econômicos é o DALY (*Disability-Adjusted Life Years*), elaborado pela OMS em colaboração com o Banco Mundial. Esse indicador leva em consideração os Anos de Vida Perdidos por mortes prematuras (YLL, da sigla em inglês) e os Anos de Vida Vividos com Incapacidade (YLD, da sigla em inglês).

Para a análise atual, será considerado apenas o fator dos Anos de Vida Perdidos. Esse fator pode ser expressado em termos econômicos como Valor de Vida Ano (VOLY, da sigla em inglês), que foi considerado de € 50.000,00. De acordo com a conversão atual (06 de agosto de 2024), isso equivale a R\$ 309.152,22.

Além disso, podem ser analisados os custos de hospitalização, aplicando um valor que avalia os custos diretos e indiretos de uma internação. Assim, a análise de morbidade pode ser realizada utilizando a seguinte equação:

$$Ch = Vi \times Nd \times Nc \quad (3.28)$$

Onde:

Ch - Custo de hospitalização;

Vi - Valor de uma admissão diária;

Nd - Número médio de dias de admissão hospitalar para determinada doença;

Nc - Número de casos de determinada doença.

De acordo com o DATASUS, em 2023, ocorreram 7.302 internações por causas cardíacas em adultos com 30 anos ou mais, com permanência média de 10,4 dias, resultando em 345 óbitos e um valor médio de internação de R\$ 4.952,48. (Ministério da Saúde, s.d.)(Doenças consideradas: Infarto agudo do miocárdio, Outras doenças isquêmicas do coração, Embolia pulmonar, Insuficiência cardíaca, Outras doenças do coração).

Para doenças pulmonares e respiratórias, o número de internações foi de 4.694 em 2023, em adultos com 30 anos ou mais, com um tempo médio de permanência de 11,8 dias e um custo médio de R\$ 3.150,74, resultando em 723 óbitos. (Ministério da Saúde, s.d.)(As doenças consideradas foram Tuberculose pulmonar, Outras tuberculoses respiratórias, Restante de tuberculose respiratória, Pneumonia, Bronquite aguda e bronquiolite aguda, Asma, Bronquiectasia, Pneumoconiose e Outras doenças do aparelho respiratório).

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foi abordado o processo de seleção dos modelos de ônibus, a coleta de dados operacionais e de consumo para estimativa do TCO e do payback, bem como o dimensionamento de um sistema fotovoltaico para abastecimento dos veículos elétricos. Além disso, foram apresentados os cálculos para emissões de CO₂ e o impacto ambiental comparado entre os modelos de ônibus a diesel e elétrico. No próximo capítulo, os resultados desses cálculos serão aplicados para avaliar a viabilidade técnica e econômica da transição para uma frota de ônibus elétricos no Distrito Federal.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DE CUSTO DOS ÔNIBUS

O modelo a diesel O500U tem um valor de compra estimado em aproximadamente 500 mil reais, conforme fornecido pela Piracicabana. O consumo médio deste modelo é de 3,15 km/L e, de acordo com os dados disponibilizados pela Petrobras, o preço médio do diesel no Distrito Federal é de cerca de R\$ 5,90 por litro. A manutenção preventiva mensal, incluindo peças, varia entre 2 mil e 2,5 mil reais. Com base nessas informações, é possível estimar o custo operacional do O500U na linha 0.116, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Dados da Linha 0.116 a Diesel

Característica	Valor
Modelo de ônibus	O500U 1826/59 Com carroceria Marcopolo
Combustível	Diesel
Preço do Diesel (R\$/L)	5,90
Eficiência (km/L)	3,15
Partidas por dia	60
Distância da rota (km)	16,04
Número mínimo de ônibus	4
Número mínimo de viagens por ônibus	15
Distância diária por ônibus (km)	240,60
Consumo diário (L)	76,38
Gasto diário com combustível (R\$)	450,65
Gasto mensal com combustível (R\$)	13.519,43
Gasto anual com combustível (R\$)	162.233,14
Gasto mensal com manutenção (R\$)	2.500
Gasto anual com manutenção (R\$)	30.000
Gasto anual total (R\$)	192.233,14

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, o modelo elétrico BYD D9W possui um valor de aquisição entre 2,8 e 3 milhões de reais, já incluindo a aquisição do carregador de 160 kW DC. O modelo adquirido pela Piracicabana veio com o carregador incluso, pois, na época, não existiam representantes

comerciais de carregadores DC no Brasil. Atualmente, um carregador custa em média entre 55 e 70 mil reais, a depender da potência e número de tomadas. O consumo médio do D9W é de 0,79 km por kWh, com uma autonomia de 216 km, considerando uma reserva de 20% da bateria. A tarifa fora de ponta, conforme a Neoenergia, é de R\$ 0,52 por kWh. O carregamento é realizado por carregadores DC de 160 kW, e a manutenção mensal do veículo é de cerca de 2,5 mil reais. Esses fatores resultam nos seguintes custos operacionais, conforme mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Dados da Linha 109.3 Elétrica

Característica	Valor
Modelo de ônibus	BYD D9W Com carroceria Marcopolo
Combustível	Elétrico
Tarifa fora de ponta (R\$/kWh)	0,52
Eficiência (km/kWh)	0,79
Partidas por dia	51
Distância da rota (km)	9,73
Número mínimo de ônibus	3
Número mínimo de viagens por ônibus	17
Distância diária por ônibus (km)	165,41
Consumo diário (kWh)	209,38
Consumo de carregamento diário, com perdas (kWh)	230,32
Gasto diário com carregamento (R\$)	119,76
Gasto semanal com carregamento (R\$)	838,36
Gasto mensal com carregamento (R\$)	3.592,96
Gasto anual com carregamento (R\$)	43.115,48
Gasto mensal com manutenção (R\$)	2.500
Gasto anual com manutenção (R\$)	30.000
Gasto anual total (R\$)	73.115,48

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados apresentados, podemos calcular o custo de operação hipotético de uma unidade da linha 0.116 utilizando apenas ônibus elétricos. A Tabela 4.4 apresenta esses resultados.

Tabela 4.3: Dados da Linha 0.116 Elétrica

Característica	Valor
Modelo de ônibus	BYD D9W Com carroceria Marcopolo
Combustível	Elétrico
Tarifa fora de ponta (R\$/kWh)	0,52
Eficiência (km/kWh)	0,79
Partidas por dia	60
Distância da rota (km)	16,04
Número mínimo de ônibus	5
Número mínimo de viagens por ônibus	12
Distância diária por ônibus (km)	192,48
Consumo diário (kWh)	243,65
Consumo de carregamento diário, com perdas (kWh)	268,01
Gasto diário com carregamento (R\$)	139,37
Gasto semanal com carregamento (R\$)	975,56
Gasto mensal com carregamento (R\$)	4.180,96
Gasto anual com carregamento (R\$)	50.171,50
Gasto mensal com manutenção (R\$)	2.500
Gasto anual com manutenção (R\$)	30.000
Gasto anual total (R\$)	80.171,50

Fonte: Autoria própria.

Embora os ônibus elétricos apresentem um custo inicial significativamente mais alto do que os modelos a diesel, os custos anuais de operação relacionados ao abastecimento são significativamente menores, chegando a uma economia de até 80% em comparação com os ônibus a diesel.

A Tabela 4.4 apresenta uma comparação direta entre os gastos operacionais do modelo a diesel Mercedes-Benz O500U e o ônibus elétrico BYD D9W, considerando uma autonomia de 216 km para ambos.

Tabela 4.4: Comparativo de Gastos: O500U vs. D9W

Característica	O500U (Diesel)	BYD D9W (Elétrico)
Preço do Combustível	R\$ 5,90/L	R\$ 0,52/kWh
Eficiência	3,15 km/L	0,79 km/kWh
Consumo Diário	68,57 L	273,42 kWh
Gasto Diário com Combustível	R\$ 404,57	R\$ 156,39
Gasto Semanal com Combustível	R\$ 2.832,00	R\$ 1.094,76
Gasto Mensal com Combustível	R\$ 12.137,14	R\$ 4.691,85
Gasto Anual com Combustível	R\$ 145.645,71	R\$ 56.302,18
Gasto Anual com Manutenção	R\$ 30.000,00	R\$ 30.000,00
Gasto Anual Total	R\$ 175.645,71	R\$ 86.302,18

Fonte: Autoria própria.

Apesar do investimento inicial elevado, a economia anual, quando acumulada ao longo de uma vida útil de 10 a 15 anos, representa um valor substancial, além de reduzir significativamente a emissão de CO₂. A implementação de um sistema fotovoltaico para alimentar os ônibus elétricos pode potencializar ainda mais a economia, melhorando a viabilidade financeira e ambiental da transição.

Considerando que a vida útil desses veículos é geralmente de 10 a 15 anos, outros fatores, como os custos de manutenções mais severas e a depreciação, também precisam ser levados em conta. Além disso, a adoção de um sistema fotovoltaico pode reduzir o tempo de payback dos ônibus, embora aumente o tempo de retorno do sistema como um todo. No entanto, diferentemente dos ônibus, o sistema fotovoltaico possui uma vida útil superior a 20 anos, permitindo que continue a gerar economia e benefícios ambientais mesmo após o fim da vida útil dos veículos elétricos.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

4.2.1 Dimensionamento do gerador

Para determinarmos a potência a ser gerada pelo sistema utilizamos a equação 3.9, considerando a taxa de desempenho de 75%, a energia ativa necessária de 344 kWh/dia e as HSP de 5,45 h/dia.

$$P_{FV}(Wp) = \frac{(E/TD)}{HSP} = \frac{(344000/0,75)}{5,45} = 84159,02 \text{ Wp} \quad (4.1)$$

4.2.1.1 Definição da quantidade de módulos fotovoltaicos

A partir da potência calculada na equação 4.1 é possível determinar a quantidade de módulos necessários no sistema.

$$\text{Quantidade de Módulos} = \frac{\text{Potência do sistema}}{\text{Potência do módulo}} = \frac{84159,02}{465} = 180,987 \approx 181 \text{ módulos} \quad (4.2)$$

4.2.2 Correção de tensão para temperaturas máximas e mínimas

4.2.2.1 Tensão de circuito aberto (V_{oc}) para mínima temperatura

Para calcular a tensão de circuito aberto (V_{oc}) para a mínima temperatura de operação utiliza-se os valores de tensão de circuito aberto V_{oc} e β disponíveis no *datasheet* do módulo e presentes na tabela 3.6 e a temperatura mínima definida como 20°C. A tensão é calculada através da equação 4.3.

$$V_{oc,Tmin} = V_{oc} \times (1 + \beta \times (Tmin - 25)) = 49,90 \times (1 + (-0,270\%) \times (20 - 25)) = 50,574 \text{ V} \quad (4.3)$$

4.2.2.2 Tensão de potência máxima(V_{mp}) para mínima e máxima temperatura

Para calcular a tensão de máxima potência (V_{mp}) para a mínima temperatura de operação utiliza-se os valores de tensão de máxima potência V_{mp} e β_{mp} disponíveis no *datasheet* do módulo e presentes na tabela 3.6 e a temperatura mínima definida como 20°C. A tensão é calculada na equação 4.4.

$$V_{mp,Tmin} = V_{mp} \times (1 + \beta_{mp} \times (Tmin - 25)) = 42,10 \times (1 + (-0,350\%) \times (20 - 25)) = 42,837 \text{ V} \quad (4.4)$$

De forma semelhante, para calcular a tensão de máxima potência (V_{mp}) para a máxima temperatura de operação utilizam-se os mesmos valores de tensão e coeficiente e define-se a temperatura máxima como 70°C, conforme a equação 4.5

$$V_{mp,Tmax} = V_{mp} \times (1 + \beta_{mp} \times (Tmax - 25)) = 42,10 \times (1 + (-0,350\%) \times (70 - 25)) = 35,469 V \quad (4.5)$$

4.2.3 Quantidade de módulos em série

Para determinar a quantidade de módulos em série do sistema, devem-se utilizar dois métodos. O primeiro é descrito pela equação 4.6. Utilizando o resultado já obtido de $V_{oc,Tmin}$ em 4.3 e os valores do *datasheet* do inversor, podemos calcular:

$$\begin{aligned} N^{\circ}mod.serie \times V_{oc,Tmin} &< V_{Imax} \\ N^{\circ}mod.serie &< \frac{370}{50,574} \\ N^{\circ}mod.serie &< 7,316 \text{ módulos} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Pelo primeiro método, através da equação 4.6, define-se que a quantidade máxima de módulos em série por inversor é de 7 módulos.

Para o segundo método, podemos utilizar a equação 4.7 para determinar a quantidade de módulos FV em série, utilizando os valores da Tabela 3.7, dados do *datasheet* do inversor, além dos valores calculados em 4.4 e 4.5.

$$\begin{aligned} \frac{V_{I_{MPPT}min}}{V_{mp,Tmax}} \leq N^{\circ}mod.serie &\leq \frac{V_{I_{MPPT}max}}{V_{mp,Tmin}} \\ \frac{150}{35,469} \leq N^{\circ}mod.serie &\leq \frac{425}{42,837} \\ 4,229 \leq N^{\circ}mod.serie &\leq 9,921 \text{ módulos} \end{aligned} \quad (4.7)$$

Assim, podemos confirmar que o número de módulos FV em série indicado para esse sistema é de **7 módulos**.

4.2.4 Quantidade de módulos em paralelo

Conforme as condições estabelecidas no capítulo 3, para calcular a quantidade de módulos em paralelo, utiliza-se a equação 3.20. Com os valores encontrados nas Tabelas 3.6 e 3.7, referentes aos dados dos módulos FV e do inversor, calcula-se na equação 4.8:

$$N^{\circ} \text{mod.paralelo} = \frac{I_{I_{max}}}{I_{sc}} = \frac{26}{11,78} = 2,207 \text{ módulos} \quad (4.8)$$

Assim, define-se que a quantidade de módulos em paralelo deve ser de **2 módulos**. Também de acordo com o *datasheet* do inversor, duas string, ou seja, 2 módulos em paralelo, devem ser instaladas por MPPT. Este inversor possui 2 MPPTs, então podem ser instaladas até 4 *strings*.

Considerando que o arranjo definido para os módulos FV é de 7 módulos em série e 2 módulos em paralelo, calcula-se a potência de cada arranjo:

$$P_{FV_{arranjo}} = N^{\circ} \text{mod.paralelo} \times N^{\circ} \text{mod.serie} \times P_{mod} = 2 \times 7 \times 465 = 6510 \text{ W} \quad (4.9)$$

Também pode-se calcular a quantidade de arranjos necessários para o sistema completo:

$$N^{\circ} \text{arranjos} = \frac{P_{FV}}{P_{FV_{arranjo}}} = \frac{84159,02}{6510} = 12,92 \approx 13 \text{ arranjos} \quad (4.10)$$

4.2.5 Dimensionamento do inversor

O fator de dimensionamento do inversor é calculado pela equação 3.16.

A partir do valor por arranjo, determinado em 4.9, pode-se definir o fator de dimensionamento do inversor:

$$FDI = \frac{P_N}{P_{FV}} = \frac{8000}{6510} = 1,229 \quad (4.11)$$

De acordo com o proposto pelo Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (PINHO; GALDINO, 2014), os valores ideais de FDI são abaixo de 1,05, mas para este projeto, o valor de 1,2 ainda é considerado factível.

4.2.6 Tabela resumo do sistema

Tabela 4.5: Resumo do Sistema Projetado

Característica	Valor
Potência gerada (Wp)	84630
Quantidade de arranjos	13
Quantidade de módulos/arranjo	14
Quantidade de mód. em paralelo	2
Quantidade de mód. em série	7
Quantidade de inversores	13
Quantidade de módulos	182

Fonte: Autoria própria.

4.2.7 Dimensionamento dos condutores

4.2.7.1 Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos entre si

A princípio, deve-se determinar a corrente de projeto, conforme Equação 3.17.

Como cada arranjo no projeto é uma série fotovoltaica e séries fotovoltaicas são um grupo de módulos fotovoltaicos ligados em série, a corrente de curto-círcuito é igual à do módulo fotovoltaico.

De acordo com a Tabela 3.6, o valor de I_{sc} é 11,78 A, então pode-se calcular a corrente de projeto:

$$I_B = 1,5 \times I_{sc} \times N^o \text{ mod.paralelo} = 1,5 \times 11,78 \times 2 = 35,34 \text{ A} \quad (4.12)$$

4.2.7.1.1 Método de capacidade de condução de corrente

Com a corrente de projeto determinada, pode-se determinar a seção nominal dos condutores. O critério utilizado é descrito pela tabela abaixo.

Tabela 4.6: Capacidade de condução de corrente para condutores expostos ao sol no Modo de Instalação 1

Seção Nominal (mm ²)	Capacidade de Condução de Corrente (A)
1,5	20
2,5	26
4	35
6	44

Fonte: Dados adaptados da Tabela C.3 da norma (ABNT, 2017).

Conforme a Tabela 4.6, para $I_B = 35,34$ A, instalação exposta ao sol, Modo de Instalação 1, a seção que suporta uma corrente mais próxima à corrente de projeto é a de 6 mm², que tem capacidade máxima de 44 A.

4.2.7.1.2 Método de queda de tensão

De acordo com a ABNT NBR 16690, a queda de tensão em um arranjo fotovoltaico não deve ultrapassar 3% em seu ponto de máxima potência. Sabendo disso e utilizando a equação 3.20, pode-se determinar a seção nominal do condutor.

Consideramos ρ como $0,0219 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$, que é o coeficiente de condutividade do cobre a 90°C, a hipótese mais desfavorável. Admite-se uma queda de tensão de 2%.

$$S = \rho \times \frac{d \times I}{\Delta V} = 0,0219 \times \frac{50 \times 35,34}{0,02 \times 42,10 \times 7} = 6,565 \text{ mm}^2 \quad (4.13)$$

A seção nominal padronizada mais próxima superior a 6,565 mm² é 10 mm².

4.2.7.1.3 Seção final dos cabos

Deve-se escolher a maior entre as seções calculadas. Portanto, a seção nominal do cabo fotovoltaico que interliga os módulos entre si é 10 mm², conforme o critério de queda de tensão.

4.2.7.2 Dimensionamento dos cabos fotovoltaicos que interligam os módulos até o inversor

Também deve ser determinada a corrente de projeto entre os módulos e o inversor para o dimensionamento desses condutores. Essa corrente é a corrente da série de módulos, e a tensão

máxima do projeto é a mesma tensão máxima do conjunto.

4.2.7.2.1 Método de capacidade de condução de corrente

O método de instalação escolhido para esta ligação é o A.3 (Cabo em eletroduto diretamente enterrado). Temperatura máxima do solo: 30 °C.

Tabela 4.7: Capacidade de condução de corrente para cabos em eletroduto diretamente enterrado (Instalação A.3)

Seção Nominal (mm ²)	Capacidade de Condução de Corrente (A)
1,5	20
2,5	26
4	34
6	42

Fonte: Dados adaptados da Tabela C.9 da norma (ABNT, 2017).

Conforme a Tabela 4.7, para $I_B = 35,34$ A, a seção que suporta uma corrente mais próxima à corrente de projeto é a de 6 mm², que tem capacidade máxima de 42 A.

4.2.7.2.2 Método de queda de tensão

Admitindo-se uma queda de tensão de 1% no trecho, calcula-se a seção nominal:

$$S = \rho \times \frac{d \times I}{\Delta V} = 0,0219 \times \frac{40 \times 35,34}{0,01 \times 42,10 \times 7} = 10,504 \text{ mm}^2 \quad (4.14)$$

A seção nominal padronizada mais próxima superior a 10,504 mm² é 16 mm².

4.2.7.2.3 Seção final dos cabos

Deve-se escolher a maior entre as seções calculadas. Portanto, a seção nominal do cabo fotovoltaico que interliga os módulos até o inversor é 16 mm², conforme o critério de queda de tensão.

4.2.7.3 Dimensionamento dos cabos que saem do inversor

4.2.7.3.1 Método da seção mínima

Para um sistema fotovoltaico, é considerada a seção aplicada para circuitos de força, sendo a seção mínima do condutor de $2,5\ mm^2$.

4.2.7.3.2 Método de capacidade de condução de corrente

Para calcular a corrente de projeto nesse caso, utiliza-se o valor da potência ativa de saída do inversor, que de acordo com o *datasheet* do dispositivo é de 8.000 W, e a tensão nominal de saída do sistema, que de acordo com o *datasheet* do inversor é de 220 VCA.

$$I_b = \frac{P}{V} = \frac{8000}{220} = 36,36\ A \quad (4.15)$$

Em seguida, calcula-se a corrente de projeto corrigida.

Define-se a utilização de isolação de XLPE. Para definir o fator de correção de temperatura, considera-se a temperatura ambiente de 40 °C. Dessa forma, por meio da Tabela 40 da NBR 5410, representada na Tabela 3.8, o fator de correção de temperatura é de 0,91.

Em seguida, define-se o método de instalação por meio da Tabela 33 da NBR 5410; para o sistema projetado, é selecionado o tipo "B1", que se refere a "Condutores isolados ou cabos unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre a parede ou espaçado desta menos de 0,3 vezes o diâmetro do eletroduto", como apresentado na Tabela 3.9.

Por meio da Tabela 46 da NBR 5410 na Tabela 3.10, define-se o número de condutores carregados a ser adotado, que para um sistema monofásico é de 2.

Com a definição do método de instalação e do número de condutores carregados, é possível definir, por meio da Tabela 42 da NBR 5410, o fator de correção de agrupamento, que é 0,80.

E assim, calcula-se a corrente de projeto corrigida.

$$I'_b = \frac{I_b}{k_1 \cdot k_2} = \frac{36,36}{0,91 \cdot 0,80} = 49,95\ A \quad (4.16)$$

Utilizando a Tabela 37 da ABNT NBR 5410, a seção que suporta uma corrente mais próxima à corrente de projeto corrigida é a de $6\ mm^2$, que tem capacidade máxima de 54 A. No entanto, para maior segurança, sugere-se a utilização de um condutor com seção de $10\ mm^2$, que possui capacidade máxima de até 75 A.

4.2.7.3.3 Método de queda de tensão

Pelo método da queda de tensão, pode-se determinar a seção mínima do condutor para o caso, conforme a equação abaixo:

$$S = \rho \times \frac{d \times I}{\Delta V} = 0,017 \times \frac{10 \times 49,95}{0,07 \times 220} = 0,5 \approx 1 \text{ mm}^2 \quad (4.17)$$

A seção mínima encontrada é 1 mm^2 .

4.2.7.3.4 Seção final dos cabos

Deve-se adotar o maior valor encontrado utilizando todos os métodos. A seção do condutor encontrada por meio dos métodos de capacidade de condução de corrente e de seção mínima foi de 10 mm^2 .

4.2.8 Dimensionamento dos dispositivos de proteção

4.2.8.1 Dimensionamento dos fusíveis

As definições do tipo de fusível a ser utilizado são feitas a partir das equações 3.21 e 3.22:

$$V_{oc_{total}} = V_{oc_{mod.}} \times N^o \text{ mod.serie} = 49,90 \times 7 = 349,3 \text{ V} \quad (4.18)$$

$$I_{sc_{total}} = I_{sc_{mod.}} \times N^o \text{ mod.paralelo} = 11,78 \times 1 = 11,78 \text{ A} \quad (4.19)$$

A partir dos valores encontrados, é possível aplicar a condição estabelecida na NBR 16690 de que a corrente nominal do dispositivo de proteção deve ser maior que 1,5 vezes a corrente de curto-circuito da série e menor que 2,4 vezes essa corrente.

$$1,5 \cdot I_{sc} < I_n < 2,4 \cdot I_{sc}$$

$$1,5 \cdot 11,78 < I_n < 2,4 \cdot 11,78 \quad (4.20)$$

$$17,67 < I_n < 28,27 \text{ A}$$

Por meio dessa condição, é possível identificar que a corrente do fusível deve estar entre 17,67 A e 28,27 A. Define-se, então, um fusível de 25 A para cada arranjo de módulos.

4.2.8.2 Dimensionamento dos disjuntores

4.2.8.2.1 Disjuntor entre os módulos e o inversor

A corrente do disjuntor deve ser superior à corrente total de curto-circuito do arranjo de módulos, conforme a equação 3.23.

$$I_{total} = I_{sc_{mod.}} \times N^o \text{ mod.paralelo} = 11,78 \times 2 = 23,56 \text{ A} \quad (4.21)$$

Por meio dessa condição, é possível definir que a corrente do disjuntor deve ser de 30 A para garantir a proteção adequada do sistema.

4.2.8.2.2 Disjuntor entre o inversor e as cargas

Para dimensionar os disjuntores de corrente alternada entre o inversor e as cargas, a potência considerada será a potência nominal do inversor, que é de 8.000 W, de acordo com o *datasheet* do equipamento, e a tensão de saída do inversor, que é 220 V, também de acordo com o *datasheet* do equipamento.

Assim, o valor da corrente do disjuntor pode ser calculado pela equação 3.24.

$$0,85 \cdot I_{disj} = \frac{P}{V}$$

$$0,85 \cdot I_{disj} = \frac{8000}{220} \quad (4.22)$$

$$I_{disj} = 42,78 \text{ A}$$

Dessa forma, será utilizado um disjuntor de corrente alternada com corrente nominal de 50 A.

4.2.9 Tabela resumo dos condutores e dos dispositivos de proteção

Tabela 4.8: Resumo do Sistema Projetado

Equipamento	Valor
Cabos dos módulos entre si	10 mm^2
Cabos dos módulos até o inversor	16 mm^2
Cabos da saída do inversor	10 mm^2
Fusíveis	25 A
Disjuntor entre os módulos e o inversor	30 A
Disjuntor entre o inversor e as cargas	50 A

Fonte: Autoria própria.

4.2.10 Análise do espaço para instalação do sistema fotovoltaico

De acordo com o dimensionamento realizado, serão necessários 182 módulos fotovoltaicos, dispostos em 13 arranjos de 7 x 2. De acordo com a Tabela 3.6, cada módulo tem uma área de $2,102 \times 1,040 = 2,186 \text{ m}^2$. Dessa forma, a área total ocupada por cada *string* de módulos é de $15,302 \text{ m}^2$.

Para determinar a área máxima a ser ocupada pelo sistema fotovoltaico completo, deve-se considerar o ambiente da instalação. No caso de uma instalação em solo, é necessário levar em conta o fator de sombreamento, o qual pode ser causado por estruturas próximas ou até mesmo entre os próprios módulos. Dessa forma, é necessário prever espaçamento adequado entre os módulos para mitigar esse efeito. Portanto, a área total ocupada pode exceder a estimativa inicial $15,302 \text{ m}^2 \times 26 \text{ strings} = 397,852 \text{ m}^2$). Considerando as dimensões de até 13,2 metros de comprimento, dependendo da carroceria, e 2,3 metros de largura, é possível abrigar aproximadamente 13 ônibus do modelo BYD D9W sob os painéis fotovoltaicos, o que sugere que a instalação dos painéis sobre uma garagem coberta pode ser uma possibilidade.

Caso o sistema seja instalado em um telhado, deve-se garantir que a estrutura disponível suporte o peso dos equipamentos a serem instalados e também observar os fatores de direção e ângulo dos módulos.

4.3 ANÁLISE FINANCEIRA

4.3.1 Custo da Implementação do Ônibus Elétrico

Com base na estimativa realizada anteriormente, é possível determinar os valores a serem investidos para implementar a tecnologia do ônibus elétrico, excluindo os custos de abastecimento. Os valores aproximados para a implementação de um ônibus elétrico, conforme dados obtidos em julho de 2024, estão descritos na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Valores do Ônibus Elétrico

Equipamento	Modelo	Valor (R\$)
Chassis	BYD D9W 2024	1.980.000,00
Carroceria	Marcopolo Torino	≈ 800.000,00
Carregador	Zbeny DC 30kW-240kW 2 tomadas	≈ 65.700,00
Total		2.845.700,00

Fonte: Autoria própria.

Os custos de carregamento diário e manutenção serão abordados na análise de Custo Total de Propriedade (TCO) em dois cenários: um considerando a implementação de um sistema fotovoltaico e seus respectivos gastos, e outro sem essa implementação.

4.3.2 Custo do Sistema Fotovoltaico

Para o sistema fotovoltaico, a partir do dimensionamento realizado, pode-se determinar os valores a serem investidos para sua instalação.

Conforme dados obtidos em julho de 2024, os valores aproximados para o sistema estão descritos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Valores do Sistema Projetado

Equipamento	Quantidade	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
Módulos fotovoltaicos	182	1.199,00	218.218,00
Inversores	13	14.589,90	189.668,70
Total			407.886,70

Fonte: Autoria própria.

4.3.3 TCO

O cálculo do Custo Total de Propriedade (TCO) será realizado em dois cenários: um sem a presença de um sistema fotovoltaico e o outro considerando sua presença. A taxa de inflação utilizada para o ano de 2024 é de 4,59%, e para 2025 é de 3,51%. Essas projeções são baseadas no Boletim Focus, divulgado pelo Banco Central do Brasil, que reflete as expectativas do mercado financeiro para a inflação medida pelo IPCA (Índice de Preços ao Consumidor Amplo) (Banco Central do Brasil, 2024)

4.3.3.1 Cenário 1: Sem Sistema Fotovoltaico

Neste cenário, desconsidera-se a presença de um sistema fotovoltaico, o que implica que os custos de carregamento diário pela rede elétrica devem ser contabilizados. Para determinar o TCO, utilizam-se os seguintes valores:

- **Custo de Aquisição (C_A) = R\$ 2.845.822,28**
- **Gasto Diário com Carregamento (G_d) = R\$ 156,39**
- **Custo Anual de Manutenção (M) = R\$ 30.000,00**
- **Custo Total de Manutenção em 15 anos (M_{TC}) = R\$ 450.000,00**
- **Valor de Revenda (V_f) = R\$ 569.140,00 (20% do valor de aquisição)**
- **Número de Anos (N_a) = 15 anos**
- **Taxa de Inflação para 2024 = 4,59%**
- **Taxa de Inflação para 2025 = 3,51%**

Dessa forma, o TCO para este cenário pode ser calculado com os seguintes resultados:

- Inflação de 4,59% (2024): R\$ 3.484.974,04
- Inflação de 3,51% (2025): R\$ 3.508.850,21

4.3.3.2 Cenário 2: Considerando o Sistema Fotovoltaico

Neste cenário, considera-se a presença de um sistema fotovoltaico para o carregamento do ônibus elétrico, o que elimina os custos diários de carregamento pela rede elétrica, substituindo-os pelo investimento inicial no sistema FV e seus custos de manutenção.

Os valores considerados para o TCO neste cenário são:

- **Custo de Aquisição do Ônibus** (C_A) = R\$ 2.845.822,28
- **Investimento no Sistema Fotovoltaico** (I_{FV}) = R\$ 407.886,70
- **Custo Anual de Manutenção do Ônibus** (M_{onibus}) = R\$ 30.000,00
- **Custo Anual de Manutenção do Sistema FV** (M_{FV}) = R\$ 5.000,00
- **Valor de Revenda do Ônibus** (V_f) = R\$ 569.140,00 (20% do valor de aquisição)
- **Número de Anos** (N_a) = 15 anos
- **Taxa de Inflação** = 4,59% (2024), 3,51% (2025)

Dessa forma, o TCO para este cenário pode ser calculado com os seguintes resultados:

- Inflação de 4,59% (2024): R\$ 3.336.964,91
- Inflação de 3,51% (2025): R\$ 3.317.309,46

4.3.3.3 Cenário Extra: Sistema Fotovoltaico Já Implementado

Neste cenário, considera-se que o sistema fotovoltaico já foi implementado e pago anteriormente. Apenas os custos de manutenção do sistema fotovoltaico serão considerados ao longo da vida útil do ônibus elétrico.

Dessa forma, o TCO para este cenário pode ser calculado com os seguintes resultados:

- Inflação de 4,59% (2024): R\$ 2.929.078,21
- Inflação de 3,51% (2025): R\$ 2.909.422,76

4.3.4 Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico

A EPE disponibiliza uma ferramenta de avaliação de viabilidade de ônibus elétrico em seu site. Essa ferramenta é baseada em uma nota técnica emitida pela empresa em 2020, que considera diversos fatores técnico-econômicos e ambientais.

Com essa ferramenta, é possível obter uma análise ampla, incluindo condições de financiamento e indicadores financeiros. No primeiro caso analisado, foi considerada a implementação de 1 ônibus elétrico. Em seguida, estudos foram realizados considerando a redução do custo de aquisição dos ônibus de 10% em 10%, até atingir uma redução total de 40%, refletindo a evolução de tecnologias como sistemas fotovoltaicos e carros elétricos, que se tornaram mais acessíveis ao longo dos anos.

4.3.4.1 Cenário 1

No primeiro cenário, utilizamos os dados previamente discutidos, juntamente com informações disponibilizadas pela EPE, sendo eles:

- **Distância média anual (D_A)** = 67.500 km/ano
- **Dias de operação por ano (O_A)** = 312 dias/ano
- **Custo de Aquisição do ônibus (C_A)** = R\$ 2.845.700,00
- **Infraestrutura de Recarga (I_R)** = R\$ 65.700,00
- **Custo Operacional (C_O)** = R\$ 0,66/km
- **Custo de Manutenção (M)** = R\$ 0,48/km
- **Custo de Capital Próprio (C_P)** = 12,5%
- **Custo de Financiamento (C_F)** = 9%
- **Percentual Financiado (P_F)** = 80%
- **Prazo de Financiamento (P_f)** = 15 anos

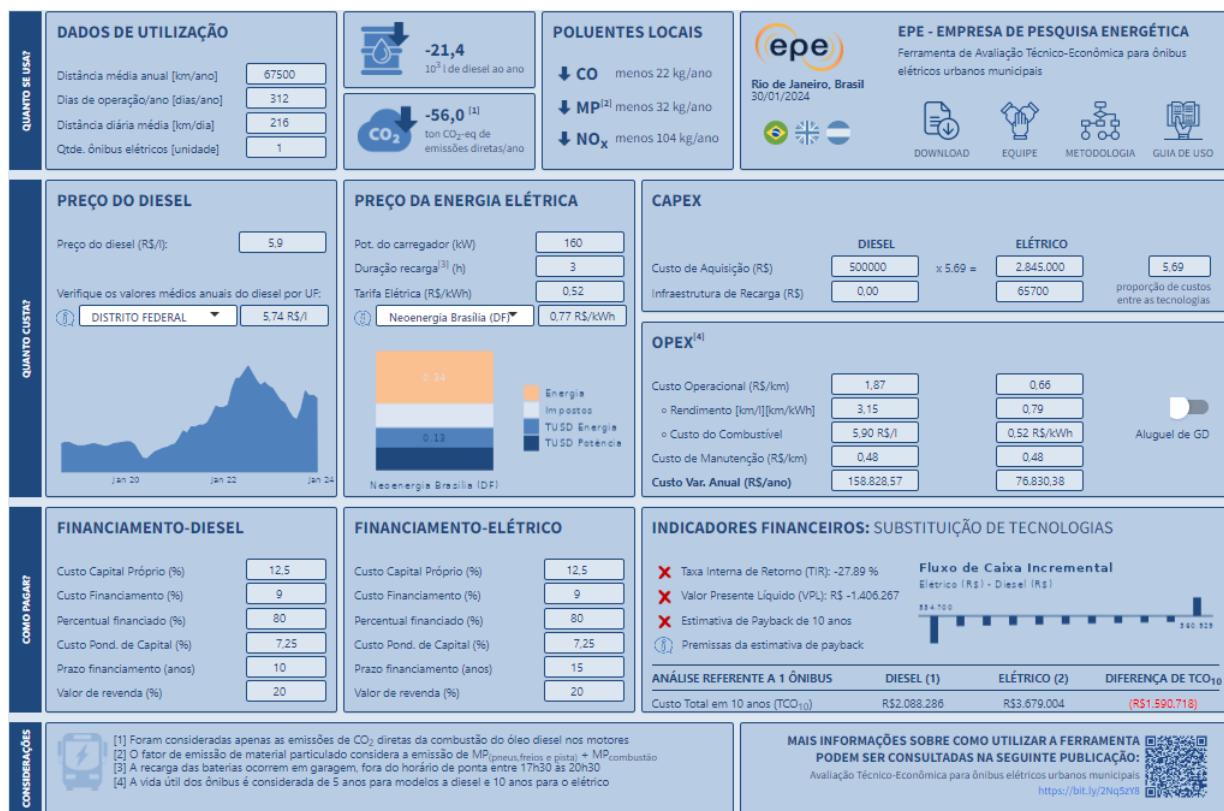
- **Valor de Revenda** (V_f) = 20% do valor de aquisição

Além disso, não foi considerada a presença de um sistema fotovoltaico para o carregamento do ônibus.

Também foi considerada uma redução progressiva de 10% em 10% no custo de aquisição, até atingir 40%, para demonstrar como a viabilidade aumenta conforme o custo diminui, seguindo a tendência de redução de preços com o avanço tecnológico.

A seguir, é apresentada a imagem dos resultados da análise de viabilidade financeira para 100% do custo de aquisição:

Figura 4.1: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 100%



Fonte: (EPE, 2021)

A seguir, são apresentados os resultados da análise de viabilidade financeira para os diferentes percentuais de custo de aquisição (90%, 80%, 70%, 60%, 50%, e 40%):

Tabela 4.11: Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 1

Parâmetro	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%
Custo de Aquisição do Ônibus Elétrico (R\$)	2.845.000	2.560.000	2.275.000	1.990.000	1.705.000	1.425.000	1.140.000
Custo da Infraestrutura de Recarga (R\$)	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00
Custo Operacional (R\$/km)	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Custo do Combustível (R\$/kWh)	0,52	0,52	0,66	0,52	0,52	0,52	0,52
Taxa Interna de Retorno (TIR) (%)	-27,89%	-25,72%	-22,89%	-19,03%	-13,48%	-5,13%	9,25%
Valor Presente Líquido (VPL) (R\$)	-1.406.267	-1.166.881	-927.495	-688.108	-448.722	-213.535	25.851
Estimativa de Payback (anos)	>10	>10	>10	>10	>10	>10	9
TCO Diesel (R\$)	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286
TCO Elétrico (R\$)	3.679.004	3.394.004	3.109.004	2.824.004	2.539.004	2.259.004	1.974.004
Diferença de TCO (R\$)	1.590.718	1.305.718	1.020.718	735.718	450.718	170.718	114.282

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que somente a partir de uma redução de 40% nos custos de aquisição os indicadores financeiros apresentaram valores viáveis para a adoção do veículo. Também é relevante considerar a quantidade de CO₂ poupada ao transicionar para o elétrico. É importante apontar que a EPE utiliza outros valores e métodos para calcular suas emissões de CO₂ em comparação com os utilizados neste trabalho.

4.3.4.2 Cenário 2

No segundo cenário, foram mantidos os mesmos dados gerais do cenário anterior, com os seguintes ajustes:

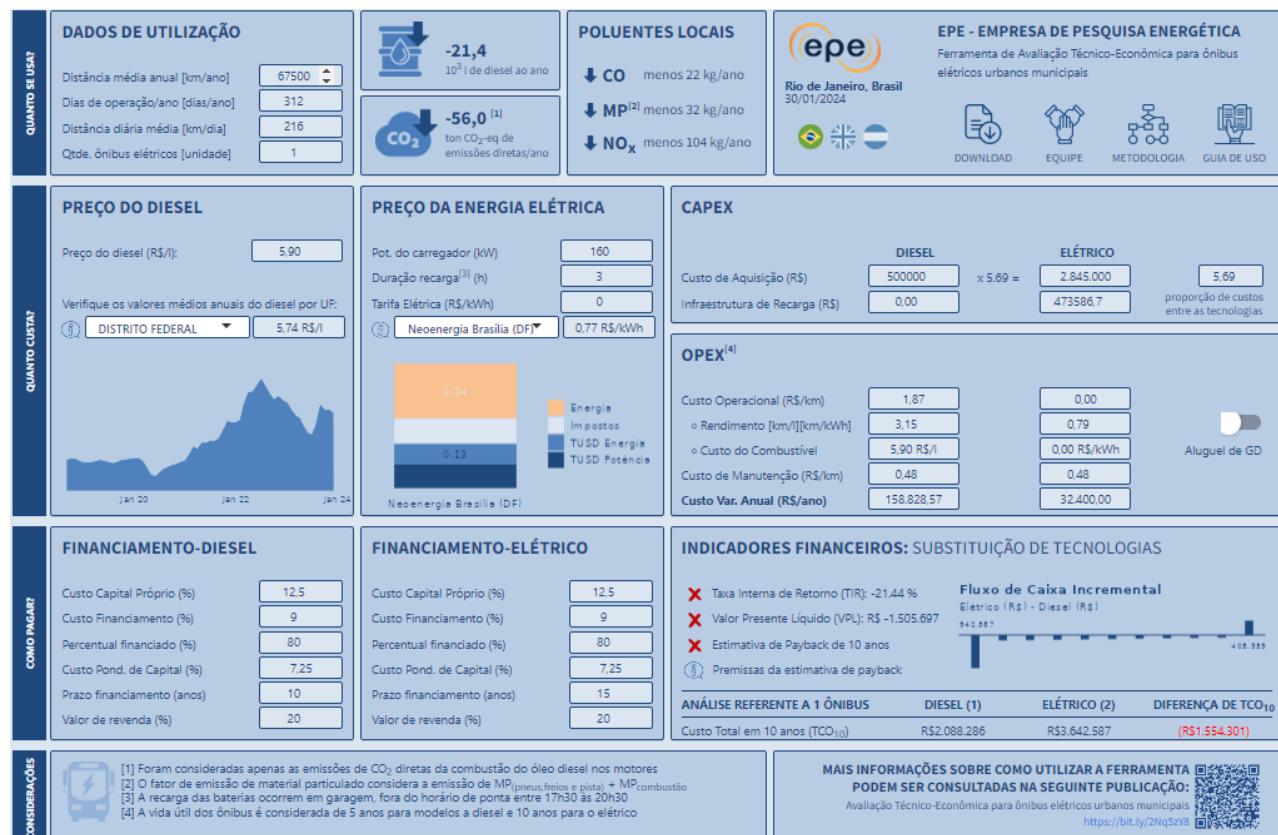
- **Distância média anual (D_A) = 67.500 km/ano**
- **Dias de operação por ano (O_A) = 312 dias/ano**
- **Custo de Aquisição do ônibus (C_A) = R\$ 2.845.700,00**
- **Infraestrutura de Recarga (I_R) = R\$ 473.586,70**
- **Custo Operacional (C_O) = R\$ 0,00/km**
- **Custo de Manutenção (M) = R\$ 0,48/km**
- **Custo de Capital Próprio (C_P) = 12,5%**
- **Custo de Financiamento (C_F) = 9%**

- **Percentual Financiado (P_F) = 80%**
- **Prazo de Financiamento (P_f) = 15 anos**
- **Valor de Revenda (V_f) = 20% do valor de aquisição**

Neste cenário, considerou-se a presença de um sistema fotovoltaico para o carregamento do ônibus. Dessa forma, o custo da energia elétrica não foi contabilizado, mas foi incluído o custo de implementação do sistema fotovoltaico.

A seguir, é apresentada a imagem dos resultados da análise de viabilidade financeira para 100% do custo de aquisição:

Figura 4.2: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 100%



Fonte: (EPE, 2021)

A seguir, são apresentados os resultados da análise de viabilidade financeira para os diferentes percentuais de custo de aquisição (90%, 80%, 70%, 60%, 50%, e 40%):

Tabela 4.12: Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 2

Parâmetro	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%
Custo de Aquisição do Ônibus Elétrico (R\$)	2.845.000,00	2.560.000	2.275.000	1.990.000	1.705.000	1.425.000	1.140.000
Custo da Infraestrutura de Recarga (R\$)	473.586,70	473.586,70	473.586,70	473.586,70	473.586,70	473.586,70	473.586,70
Custo Operacional (R\$/km)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Combustível (R\$/kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Taxa Interna de Retorno (TIR) (%)	-21,44%	-18,90%	-15,82%	-12,05%	-7,44%	-1,93%	4,88%
Valor Presente Líquido (VPL) (R\$)	-1.505.697	-1.266.310	-1.026.294	-787.538	-548.151	-312.965	-73.578
Estimativa de Payback (anos)	>10	>10	>10	>10	>10	>10	>10
TCO Diesel (R\$)	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286
TCO Elétrico (R\$)	3.642.587	3.357.587	3.072.587	2.787.587	2.502.587	2.222.587	1.937.587
Diferença de TCO (R\$)	1.554.301	1.269.301	984.301	699.301	414.301	134.301	150.699

Fonte: Autoria própria.

No mesmo padrão observado no cenário anterior, verifica-se que, apesar de não haver gastos com carregamento, o custo de implementação do sistema fotovoltaico é quase equivalente ao gasto com o carregamento de um ônibus elétrico ao longo de sua vida útil.

4.3.4.3 Cenário 3

No terceiro cenário, foram utilizados os mesmos dados gerais dos cenários anteriores, com os seguintes ajustes:

- **Distância média anual (D_A) = 67.500 km/ano**
- **Dias de operação por ano (O_A) = 312 dias/ano**
- **Custo de Aquisição do ônibus (C_A) = R\$ 2.845.700,00**
- **Infraestrutura de Recarga (I_R) = R\$ 65.700,00**
- **Custo Operacional (C_O) = R\$ 0,00/km**
- **Custo de Manutenção (M) = R\$ 0,48/km**
- **Custo de Capital Próprio (C_P) = 12,5%**
- **Custo de Financiamento (C_F) = 9%**
- **Percentual Financiado (P_F) = 80%**

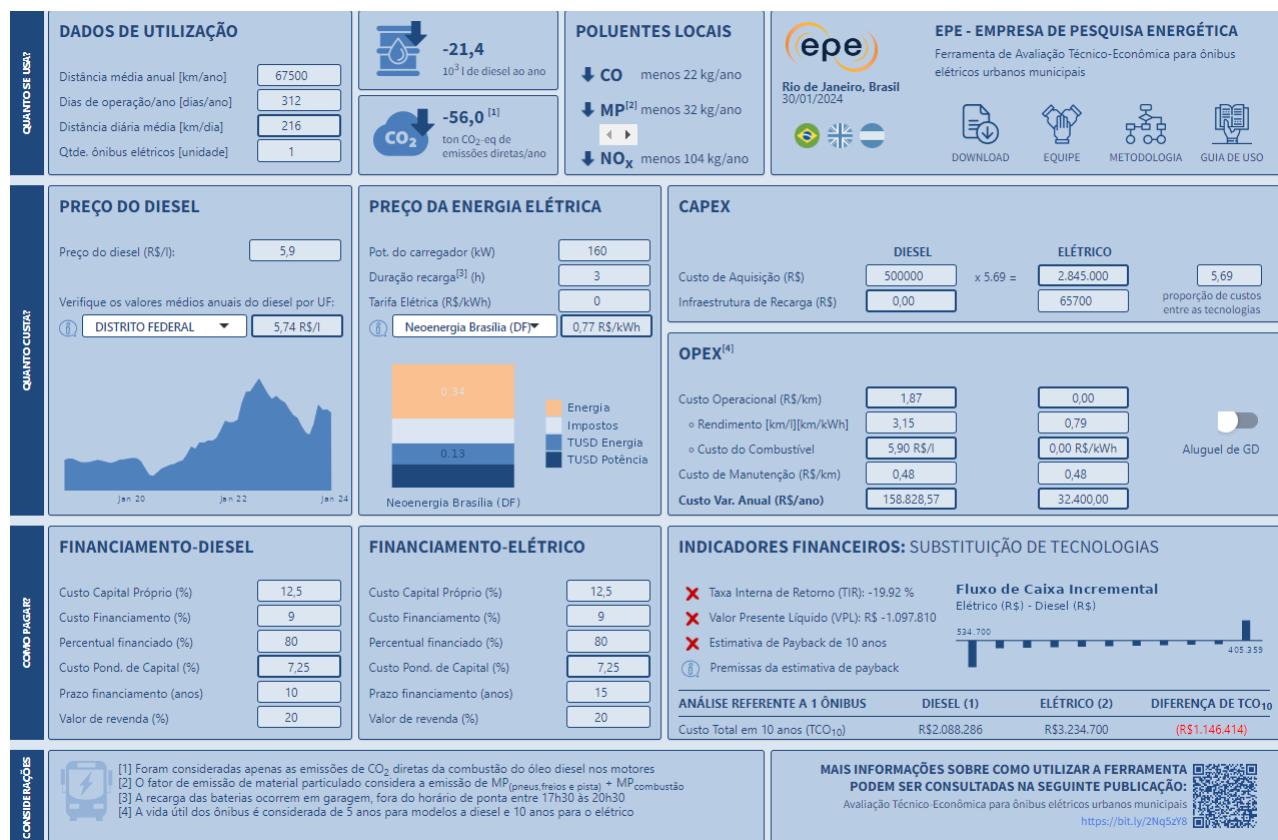
- **Prazo de Financiamento (P_f) = 15 anos**

- **Valor de Revenda (V_f) = 20% do valor de aquisição**

No terceiro cenário, considerou-se a implementação de uma nova geração de ônibus após o tempo de payback do sistema fotovoltaico. Dessa forma, o custo de implementação do sistema fotovoltaico não foi contabilizado.

A seguir, é apresentada a imagem dos resultados da análise de viabilidade financeira para 100% do custo de aquisição:

Figura 4.3: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 100%



Fonte: (EPE, 2021)

A seguir, são apresentados os resultados da análise de viabilidade financeira para os diferentes percentuais de custo de aquisição (90%, 80%, 70%, 60%, 50%, e 40%):

Tabela 4.13: Análise de viabilidade financeira para diferentes percentuais de custo de aquisição - Cenário 3

Parâmetro	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%
Custo de Aquisição do Ônibus Elétrico (R\$)	2.845.000,00	2.560.000	2.275.000	1.990.000	1.705.000	1.425.000	1.140.000
Custo da Infraestrutura de Recarga (R\$)	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00	65.700,00
Custo Operacional (R\$/km)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo do Combustível (R\$/kWh)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Taxa Interna de Retorno (TIR) (%)	-19,92%	-16,74%	-12,61%	-7,03%	0,89	12,63	32,40
Valor Presente Líquido (VPL) (R\$)	-1.097.810	-858.424	-619.037	-379.651	-140.264	94.922	334.309
Estimativa de Payback (anos)	>10	>10	>10	>10	>10	9	3
TCO Diesel (R\$)	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286	2.088.286
TCO Elétrico (R\$)	3.234.700	2.949.700	2.664.700	2.379.700	2.094.700	1.814.700	1.529.700
Diferença de TCO (R\$)	1.146.414	861.414	576.414	291.414	6.414	273.586	558.586

Fonte: Autoria própria.

Neste caso, observa-se a presença de viabilidade financeira já a partir de uma redução de 50% no custo de aquisição. Isso indica que, após o tempo de payback do sistema fotovoltaico e a substituição por uma nova geração de ônibus, os custos tornam-se mais competitivos, tornando a adoção do veículo elétrico financeiramente viável.

4.3.4.4 Comparação entre os Cenários

Os gráficos a seguir mostram uma análise visual clara dos impactos de cada cenário em termos de TCO, TIR e VPL, facilitando a comparação entre as diferentes abordagens para a implementação de ônibus elétricos e sistemas fotovoltaicos.

Figura 4.4: Resultado da análise de TCO

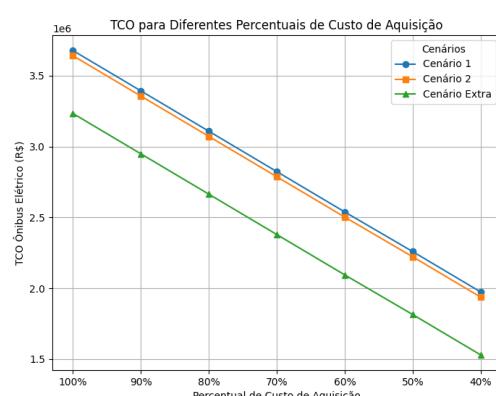
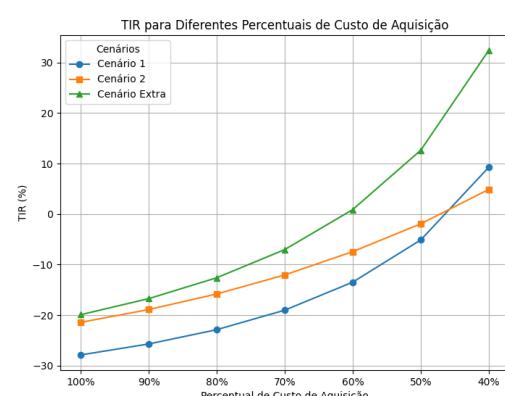


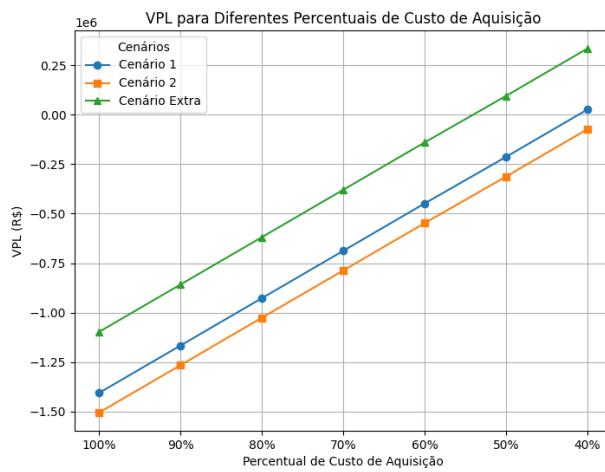
Figura 4.5: Resultado da análise de TIR



Fonte: Autoria própria.

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6: Resultado da análise de VPL



Fonte: Autoria própria.

Ao comparar os três cenários, é possível identificar que:

- No Cenário 1, sem a presença de um sistema fotovoltaico, a viabilidade financeira é alcançada somente após uma redução de 60% nos custos de aquisição do ônibus.
- No Cenário 2, com a implementação do sistema fotovoltaico, os custos de operação se mantêm semelhantes ao cenário anterior, devido ao alto custo de instalação do sistema fotovoltaico. Assim, também é necessária uma redução de 60% para atingir a viabilidade financeira.
- No Cenário Extra, que considera a substituição por uma nova geração de ônibus após o payback do sistema fotovoltaico, a viabilidade financeira é alcançada mais rapidamente, a partir de uma redução de 50% nos custos de aquisição do ônibus.

Esses resultados indicam que, embora a implementação de sistemas fotovoltaicos envolva um custo inicial elevado, eles têm o potencial de se tornar economicamente vantajosos a longo prazo. Essa vantagem é particularmente ampliada quando os sistemas são integrados a estratégias de renovação de frota, permitindo que a substituição por uma nova geração de veículos após o tempo de payback maximize a viabilidade econômica. Investimentos iniciais em tecnologias sustentáveis, como a energia solar, demonstram ser uma abordagem estratégica que pode gerar retornos substanciais ao longo do tempo, tanto em termos financeiros quanto ambientais.

4.4 INVESTIMENTOS EXTERNOS

O investimento necessário para a implementação de uma única unidade de ônibus elétrico é substancial. Entretanto, o impacto ambiental positivo associado a essa tecnologia é considerável. Nesse contexto, é de interesse tanto do Governo do Distrito Federal quanto do Governo Federal apoiar esses projetos por meio de incentivos fiscais, subsídios e políticas de apoio, com o objetivo de atrair investimentos externos.

Exemplos internacionais, como o da China, ilustram a eficácia desses incentivos. O país oferece subsídios substanciais para a aquisição de ônibus elétricos e a instalação da infraestrutura de carregamento. A cidade de Shenzhen é um caso emblemático, sendo a primeira no mundo a eletrificar toda a sua frota de ônibus, um projeto que começou em 2009. Esse marco foi atingido por meio de um programa nacional que desafiou dez cidades a implementar, em três anos, ao menos mil unidades de veículos elétricos, entre ônibus e táxis.

Shenzhen foi pioneira ao eletrificar completamente sua frota de 16.359 ônibus e também avança em direção ao objetivo de eletrificar sua frota de 21.609 táxis. Outros veículos, como carros particulares, caminhões de lixo e veículos pesados, também estão em transição para a eletrificação. Subsídios generosos dos governos nacional e local reduziram significativamente o custo de aquisição, o que foi essencial para a adoção em larga escala. Além disso, o governo municipal se esforçou para resolver a questão do espaço necessário para a construção de estações de carregamento.

A fabricante dos ônibus ofereceu uma garantia que cobre toda a vida útil dos veículos na cidade, além de suporte de manutenção e treinamento de pessoal, o que reduziu os custos de manutenção e incentivou a inovação. Outra parceria crucial foi estabelecida com fornecedores de carregadores, que auxiliaram na adaptação da rede elétrica da cidade para suportar a nova demanda energética.

No Brasil, cidades como São Paulo e Curitiba estão buscando converter parte de suas frotas de ônibus públicos para elétricos. No entanto, o custo elevado continua sendo um desafio significativo. Em São Paulo, a prefeitura reservou cerca de R\$ 2,5 bilhões para ajudar a custear o projeto. Já em Curitiba, estima-se que cerca de 54 ônibus elétricos serão adquiridos, com um investimento de R\$ 380 milhões do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC).

Em maio de 2024, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciou o financiamento para a renovação da frota de ônibus em municípios brasileiros. Ao todo, serão investidos R\$ 4,5 bilhões para a aquisição de 1.034 ônibus elétricos e 1.149 ônibus Euro 6, que representam o que há de mais moderno em eficiência energética e baixo consumo de combustível. A renovação da frota com veículos sustentáveis é uma das modalidades do Novo PAC Seleções, que prevê a destinação de R\$ 10,5 bilhões para a aquisição de 2.529 ônibus elétricos, 2.782 ônibus Euro 6 e 39 trens, beneficiando 98 municípios brasileiros .

No Distrito Federal, uma abordagem semelhante poderia ser adotada para promover a eletrificação da frota de ônibus locais. O governo local poderia buscar apoio junto ao BNDES para financiar a aquisição de ônibus elétricos, aproveitando os programas já existentes, como o Novo PAC Seleções. Além disso, seria estratégico desenvolver parcerias com fabricantes de ônibus, como a BYD e a Marcopolo, que já possuem experiência consolidada na eletrificação de frotas.

Além de incentivos fiscais e subsídios específicos para a infraestrutura de carregamento e aquisição de ônibus elétricos, o Distrito Federal poderia também investir em programas de capacitação para motoristas e técnicos, garantindo a manutenção eficiente da nova frota. Incentivos para a criação de startups e pequenas empresas voltadas à tecnologia de carregamento e à manutenção de veículos elétricos poderiam estimular o desenvolvimento de um ecossistema de suporte local, gerando empregos e fortalecendo a economia regional.

Por fim, a implementação de corredores exclusivos para ônibus elétricos e a integração com sistemas de transporte já existentes, como o metrô, poderiam aumentar a eficiência operacional e a adesão da população ao uso de transporte público sustentável. Com uma abordagem estratégica e integrada, o Distrito Federal pode não só modernizar sua frota de ônibus, mas também posicionar-se como um modelo de referência em mobilidade sustentável no Brasil.

4.5 DESCARTE DOS COMPONENTES

Diversos itens do sistema proposto possuem uma vida útil limitada, e, antes mesmo de implementar um projeto, é essencial analisar o descarte de seus componentes. Isso é ainda mais relevante quando esses itens podem comprometer o progresso ambiental alcançado, ao poluir a

natureza de outra forma. No caso dos ônibus elétricos, o principal componente que demanda atenção quanto à reciclagem é o conjunto de baterias. No Distrito Federal, o tempo de uso de cada veículo da frota é geralmente de 10 anos, mas, muitas vezes, esses modelos são revendidos para uso em outras regiões por pelo menos mais 5 anos. Portanto, deve-se considerar uma vida útil de 15 anos para as baterias.

Atualmente, a principal forma de descarte adequado dessas baterias é a devolução aos fabricantes ou importadores, para que realizem o processo de reciclagem. No entanto, existe o risco de esse descarte ser feito de maneira inadequada, devido à falta de regulamentação específica, o que impede que as baterias usadas sejam devidamente recicladas ou reutilizadas. As baterias contêm diversos componentes que são facilmente recicláveis, como plástico, metais comuns e até metais mais raros, como cobre e neodímio. Uma alternativa viável seria reutilizar essas baterias em processos que não exigem tanto desempenho, como em sistemas de armazenamento de energia estacionários, prolongando assim sua vida útil e mitigando os impactos ambientais.

Já o sistema fotovoltaico apresenta uma vida útil aproximadamente duas vezes maior que a do ônibus em si, variando entre 30 e 35 anos. Isso permite que o sistema possa ser utilizado para alimentar o carregamento de duas gerações diferentes de veículos. Além disso, como a tecnologia fotovoltaica não é tão recente, o descarte de seus componentes já possui meios mais aprimorados para ser realizado. Um módulo fotovoltaico, conforme descrito anteriormente, apresenta uma variedade de materiais em sua composição, como silício, vidro, cobre, alumínio, prata e plástico, todos recicláveis com facilidade.

Ademais, existe um Projeto de Lei (PL) nº 3784, de 2023, que propõe a obrigação dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de painéis solares fotovoltaicos a estruturar e implementar sistemas de logística reversa.

4.6 REDUÇÃO NAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Ao analisar a substituição de um ônibus a diesel pelo modelo elétrico BYD D9W, é possível observar uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Considerando que, para percorrer os mesmos 216 km de autonomia de um D9W (com 20% de carga de reserva), um ônibus a diesel modelo O500U consome cerca de 69 litros de combustível, o que

resulta em aproximadamente 191 kg de CO₂ emitidos por dia, ou 70 toneladas por ano. Ao longo de uma vida útil de 15 anos, esse número alcançaria 1.050 toneladas de CO₂.

Entretanto, é importante reconhecer que a fabricação dos componentes dos ônibus elétricos, bem como a geração de energia elétrica para seu carregamento, também geram emissões de CO₂. Se o ônibus for carregado pela rede elétrica em vez de um sistema fotovoltaico, considerando o fator de emissão de 0,0385 quilograma de CO₂ por kWh gerado, conforme fornecido pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Assim, as emissões resultantes seriam de cerca de 13 kg de CO₂ por dia ou 4,75 toneladas por ano, totalizando aproximadamente 70 toneladas ao longo de 15 anos.

Esses dados ressaltam a importância de incentivar o uso de fontes de energia renovável, como a energia solar, para o carregamento dos ônibus elétricos, potencializando ainda mais a redução das emissões de GEE .

4.7 IMPACTO NOS GASTOS COM SAÚDE

De acordo com os resultados encontrados para as emissões de gases do efeito estufa evitadas pela implementação de ônibus elétricos, pode-se calcular o impacto causado nos gastos com saúde.

A quantidade de emissões de CO₂ evitadas é 69.989,12 kg anualmente. Assim pode-se determinar como essas emissões evitadas contribuem para a diminuição da concentração de poluentes no ar no Distrito Federal. Assim, determina-se o valor da concentração reduzida de poluentes em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

A fórmula para calcular a concentração de poluentes em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ é:

$$\text{Concentração}(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{E \times 10^{12}}{A \times h \times t} \quad (4.23)$$

Onde:

E - emissões de CO₂ (em toneladas/ano)

A - área da concentração (em m^2)

h - altura de dispersão (em m)

t - tempo (em segundos)

Para o projeto a área utilizada é a do Distrito Federal, de 5.779 km^2 de acordo com o GDF. A altura de dispersão para estimativas de poluição atmosférica em regiões urbanas varia entre 500 e 1500 m, e o valor utilizado é de 1000 m.

Substituindo os valores:

$$\text{Concentração} = \frac{70 \times 10^{12}}{5,779 \cdot 10^9 \times 1000 \times 3,156 \cdot 10^7} \approx 0,038 \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad (4.24)$$

Assim, a concentração de poluentes diminuída para uma emissão evitada de 69.989,12 kg é de $0,038 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A partir desse valor podemos calcular os impactos nos gastos com saúde.

Para doenças cardíacas e respiratórias, a redução no número de mortes e internações associadas à diminuição da concentração de poluentes pode ser calculada utilizando a equação 3.27.

Consideramos o coeficiente β o valor padrão de 0,1 para essa projeção. Esse valor varia de acordo com diferentes poluentes e diferentes doenças.

Doenças cardíacas:

$$\Delta y_{cardacas} = 7.302 \times (1 - e^{-0,1 \times 0,038}) \approx 27,69 \text{ internações evitadas} \quad (4.25)$$

$$\Delta y_{cardacas} = 345 \times (1 - e^{-0,1 \times 0,038}) \approx 1,31 \text{ mortes evitadas} \quad (4.26)$$

Doenças respiratórias:

$$\Delta y_{respiratrias} = 4.694 \times (1 - e^{-0,1 \times 0,038}) \approx 17,80 \text{ internações evitadas} \quad (4.27)$$

$$\Delta y_{respiratrias} = 723 \times (1 - e^{-0,1 \times 0,035}) \approx 2,74 \text{ mortes evitadas} \quad (4.28)$$

Agora, calculamos o impacto econômico utilizando a equação 3.28 para os custos de hospitalização.

Doenças cardíacas:

$$Ch_{cardacas} = 4.952,48 \times 10,4 \times 27,69 \approx R\$1.426.195,38 \quad (4.29)$$

Doenças respiratórias:

$$Ch_{respiratrias} = 3.150,74 \times 11,8 \times 17,80 \approx R\$661.781,43 \quad (4.30)$$

Também pode-se calcular o impacto econômico em relação aos óbitos evitados, considerando o VOLY de R\$ 309.152,22.

Doenças cardíacas:

$$V_{cardacas} = 309.152,22 \times 1,31 \approx R\$404.989,41 \quad (4.31)$$

Doenças respiratórias:

$$V_{respiratrias} = 309.152,22 \times 2,74 \approx R\$847.077,08 \quad (4.32)$$

Os custos evitados com hospitalizações e óbitos devido à redução das concentrações de poluentes são:

- Custo evitado para doenças cardíacas: aproximadamente **R\$ 1.831.184,79**;
- Custo evitado para doenças respiratórias: aproximadamente **R\$ 1.508.858,51**.

4.8 MERCADO DE CARBONO

De acordo com a redução de emissões ocasionada pelo projeto, seria possível compensar essas emissões por meio do mercado de carbono, utilizando o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Para que isso ocorra, o projeto de redução de emissões precisaria ser aprovado por uma entidade competente. Dessa forma, as toneladas de CO₂ equivalente (CO₂e) evitadas poderiam ser negociadas com países que possuem metas de redução estabelecidas pelo Protocolo de Quioto.

Entretanto, o Brasil ainda não possui um Mercado Regulado de Carbono. Sendo assim, o projeto poderia integrar o Mercado Voluntário, onde seria auditado por entidades internacionais, como as Nações Unidas, gerando créditos de carbono que, apesar de não contribuírem oficialmente para as metas de redução dos países, ainda poderiam ser comercializados.

Para realizar uma simulação e prever o retorno financeiro das emissões de carbono evitadas, pode-se considerar o preço médio global dos créditos de carbono, que foi de US\$ 22,63 por crédito em 2022, sendo que cada crédito equivale a uma tonelada de CO₂e (BIOECONOMIA, 2024). Com base nesse valor, é possível calcular um retorno financeiro hipotético para o projeto proposto.

O projeto proposto visa evitar a emissão de aproximadamente 70 toneladas de CO₂ por ano, o que geraria 70 créditos de carbono. Esses créditos poderiam ser negociados por aproximadamente \$ 1.584,10, o que equivale a R\$ 8.634,77 no mercado atual. Vale destacar que, dependendo da natureza e da escala do projeto, os valores negociados podem ser mais elevados.

Embora esta simulação seja limitada a um único ônibus, o projeto foi idealizado para ser replicado em frotas inteiras, o que poderia resultar em valores de créditos de carbono consideravelmente mais expressivos e, consequentemente, em maiores retornos financeiros.

Considerando a substituição da frota de ônibus inteira do DF de 2.800 ônibus, o valor negociado no mercado de carbono chegaria a R\$ 24.177.356.

Esse valor poderia compensar a aquisição de até 8 ônibus elétricos, o que ainda é um valor baixo considerando o tamanho do projeto, mas auxilia na recuperação dos valores investidos.

4.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste capítulo, foram realizados os cálculos e o dimensionamento dos componentes para o sistema fotovoltaico proposto. Foram analisados diferentes cenários operacionais, destacando as particularidades do ônibus a diesel Mercedes-Benz O500U e do ônibus elétrico BYD D9W, além do impacto financeiro e ambiental da transição para o sistema elétrico.

O estudo evidenciou que, embora o investimento inicial na tecnologia dos ônibus elétricos seja elevado, os benefícios econômicos e ambientais a longo prazo são substanciais. A economia operacional, principalmente no custo com combustível e manutenção, torna o ônibus elétrico uma solução viável, especialmente quando combinado com um sistema de geração de energia fotovoltaica. No cenário com sistema fotovoltaico, observou-se uma redução significativa nas emissões de CO₂, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Além dos benefícios econômicos e ambientais, o projeto de eletrificação das frotas urbanas pode gerar impactos sociais positivos. Com a redução nas emissões de gases de efeito estufa e na poluição atmosférica, há um potencial de melhoria na qualidade do ar, o que pode reduzir gastos públicos com saúde relacionados a doenças respiratórias e cardiovasculares.

Em suma, a implementação de ônibus elétricos, associada ao uso de energia renovável, posiciona-se como uma estratégia essencial para a modernização sustentável do transporte público no Distrito Federal, trazendo vantagens ambientais, econômicas e sociais.

No próximo capítulo, será apresentada uma conclusão geral sobre o trabalho desenvolvido, consolidando os principais achados e contribuições. Além disso, serão discutidos os impactos das soluções propostas no contexto de mobilidade sustentável e eletrificação do transporte público. O capítulo final também abordará as recomendações para futuras pesquisas e melhorias no campo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise técnico-econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus do Distrito Federal. Ao longo da pesquisa, foi possível observar que um projeto desse tipo tem um impacto extremamente positivo, especialmente considerando aspectos ambientais.

O impacto da redução de emissões de GEE tanto na operação dos ônibus, quanto na utilização de fonte de energia limpa e renovável para seu carregamento, energia solar, é bastante relevante, especialmente considerando o objetivo de mitigar as mudanças climáticas no Brasil e no mundo.

Um único ônibus elétrico pode reduzir em 70 toneladas/ano a emissão de CO_2 . Com a expansão desse projeto os ganhos ambientais são ainda maiores. Considerando a expectativa de ampliação para a frota inteira do DF de 2.800 ônibus, esse valor chega a 196.000 em toneladas/ano de CO_2 e em créditos de carbono.

Outros aspectos positivos observados são o menor custo operacional e a maior durabilidade dos ônibus elétricos, o que possibilita frotas mais duradouras. Os custos de operação e de manutenção do ônibus elétrico são 49% menores do que o ônibus a diesel, ainda sem utilizar sistema fotovoltaico.

Também pode ser observada a grande longevidade dos sistemas fotovoltaicos, que tem um tempo de payback bastante razoável e vantajoso.

Esses aspectos são extremamente positivos para o projeto, que além de considerar os aspectos ambientais, busca também considerar os aspectos financeiros de um trabalho como esse.

Além disso, também é bastante relevante o impacto positivo no bem estar da população com a redução da poluição do ar. Foi verificada uma diminuição no número de mortes e internações em decorrência de doenças cardíacas e respiratórias que são associadas a poluição do ar.

Um único ônibus elétrico pode reduzir até R\$ 3.340.043,30 em custos com doenças respiratórias e cardíacas por ano. Considerando a expectativa de ampliação para a frota inteira do DF de 2.800 ônibus, esse valor chega a R\$ 9,4 bilhões por ano.

Apesar das vantagens, o projeto apresenta algumas limitações, como o alto custo de investimento inicial, tanto dos ônibus em si quanto de um sistema fotovoltaico para seu carregamento.

Um projeto completo para um único ônibus custaria R\$ 3.319.286,70. Esse valor é um alto investimento que, sem qualquer investimento externo, é inviável para as empresas de transporte público, ainda que cada dia as tecnologias evoluam e fiquem mais baratas.

O mercado de carbono, que seria uma opção de recuperação do investimento em tecnologias sustentáveis, é ainda pouco sólido no Brasil e dificulta ainda mais que esses investimentos ocorram. Da forma como o mercado funciona hoje poderiam ser recuperados R\$ 8.634,77, um valor pequeno considerando o total a ser investido. Considerando a substituição de toda a frota, de 2.800 ônibus, o valor recuperado seria de R\$ 24.177.356, um valor suficiente para recuperar a aquisição de cerca de 8 ônibus.

Dessa forma, sugere-se que a eletrificação das frotas seja realizada de forma gradual e utilizando investimentos externos e subsídios governamentais, tal que os ganhos para a população são muito relevantes no contexto de mudanças climáticas e saúde.

Em suma, a pesquisa realizada demonstrou que a utilização de ônibus elétricos em grandes centros, como o Distrito Federal, tem grande impacto ambiental e social, que devem ultrapassar impactos financeiros negativos, o que reforça a importância desse projeto.

Para estudos futuros, se sugere:

- Avaliação do aumento de demanda de energia e infraestrutura necessária para suportar o carregamento de frotas de ônibus elétricos.
- Estudo de tecnologias de carregamento sem fio, carregamento rápido e carregamento por indução para otimizar o tempo de operação dos veículos.
- Análise do potencial de integração de outras fontes de energia renovável no carregamento de frotas.
- Estudo de estratégias para a reutilização de baterias de veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

ABE, K. C.; MIRAGLIA, S. G. E. K. Health impact assessment of air pollution in são paulo, brasil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 and 52.

ABNT. *ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão*. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 48 and 49.

ABNT. *ABNT NBR 16612: Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores — Requisitos de desempenho*. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 63 and 64.

ABNT. *ABNT NBR 16690: Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto*. 2019. Sem citações no texto.

Banco Central do Brasil. *Boletim Focus - Projeções para a Inflação (IPCA) de 2024 e 2025*. 2024. Acesso em: set. 2024. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/publicacoes/focus>>. Citado na página 70.

BERMUDEZ, T.; CONSONI, F. As cidades como líderes dos processos de trasnsição para uma mobilidades debaixo-carbono: o caso dos ônibus de baixa emissão em são paulo, brasil. *XXI ENGEMA*, 2019. Citado na página 8.

BIOECONOMIA, F. G. V. F. O. de. *Dashboard de Precificação de Carbono*. 2024. <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiNTZkNjc0NTAtYTVjMi00OTc1LWJhZTEtYWQxY2M0YzdjMGM0IiwidCI6ImRlNGNlMThjIpageName=ReportSection8563bbab36110c9ec008>>. Acesso em Setembro de 2024. Citado na página 86.

BLOOMBERGNEF. *Electric Vehicle Outlook 2023: Bloomberg New Energy Finance*. 2023. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>>. Citado na página 3.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>>. Citado na página 10.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 13: Ação contra a mudança global do clima*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/13>>. Citado na página 11.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 3: Saúde e Bem-estar*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/3>>. Citado na página 9.

BRASIL, N. U. *Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Energia Limpa e acessível*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>>. Citado na página 9.

BUHLER, A. J. *Estudo de técnicas de determinação experimental e pós-processamento de curvas características de módulos fotovoltaicos*. 2011. Citado na página 14.

BYD. *Chassi D9W – BYD Brasil: Energia Limpa e Mobilidade Elétrica*. 2023. Disponível em: <<https://byd.com.br/d9w>>. Acesso em: Julho de 2024. Citado na página 29.

CRESESB. *Potencial Solar - SunData v 3.0*. 2018. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://cresesb.cepel.br/index.php#data>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 and 41.

DEYE. *Inversor Híbrido Monofásico SUN-3.6K-SG03LP1-EU*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/amfile/file/download/file/263/product/33476>>. Citado 2 vezes nas páginas 38 and 39.

E-BUS RADAR. *ÔNIBUS ELÉTRICOS NA AMÉRICA LATINA*. 2024. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>. Citado na página 17.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Informativo Técnico: Fatores de Emissão*. [S.l.], 2022. Acesso em Agosto de 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf>. Sem citações no texto.

EPE. *Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico*. 2021. Acesso em Agosto de 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/simulador-para-avaliacao-de-viabilidade-de-onibus-eletro>>. Citado 14 vezes nas páginas 73, 75, 77, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, and 105.

EPE. *Balanço Energético Nacional 2023*. 2023. Citado na página 8.

Estadão Mobilidade. *Governo anuncia investimento para renovação da frota nacional*. 2024. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/planeta-eletro/governo-anuncia-investimento-para-renovacao-da-frota-nacional/>>. Citado na página 22.

FEDERAL, S. de Estado do Meio Ambiente do D. *Inventário das Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa*. 2021. Citado na página 8.

FEDERAL, S. de Mobilidade do D. *Dados sobre Transporte Público no DF*. 2023. Dados fornecidos pela Secretaria de Mobilidade do DF em evento público. Disponível em: <<https://www.semob.df.gov.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 and 33.

G1 RS. *Governo do RS estima em R\$ 19 bilhões custo para plano de reconstrução do estado após enchentes*. 2024. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/09/governo-do-rs-estima-em-r-19-bilhoes-custo-para-plano-de-reconstrucao-do-rs-apos-enchentes.ghtml>>. Citado na página 7.

G1 RS. *Um mês de enchentes no RS: veja cronologia do desastre que atingiu 471 cidades, matou mais de 170 pessoas e expulsou 600 mil de casa.* 2024. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/29/um-mes-de-enchentes-no-rs-veja-cronologia-do-desastre.ghtml>>. Citado na página 7.

Grupo de Trabalho da Sociedade Civil para a Agenda 2030. *VII Relatório Luz da Sociedade Civil da Agenda 2030 de Desenvolvimento Sustentável Brasil.* 2023. Citado 4 vezes nas páginas 9, 10, 11, and 12.

Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor (Idec). *Governo Federal lança programa de financiamento de frota de ônibus elétrico sugerido pelo Idec.* 2024. Acesso em Junho de 2024. Disponível em: <<https://idec.org.br/release/governo-federal-lanca-programa-de-financiamento-de-frota-de-onibus-elettrico-sugerido-pelo>>. Citado na página 24.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023: The Physical Science Basis.* 2023. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>>. Citado na página 2.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global EV Outlook 2023: Electrifying public transport.* 2023. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>>. Citado na página 3.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Renewable Power Generation Costs in 2021.* IRENA, 2021. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>>. Citado na página 3.

IPAM. *CO₂ equivalente (CO₂e).* s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://ipam.org.br/glossario/co2-equivalente-co2e/>>. Citado na página 20.

IPAM. *O que é e como funciona o mercado de carbono?* s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://ipam.org.br/cartilhas-ipam/o-que-e-e-como-funciona-o-mercado-de-carbono/>>. Citado na página 21.

MERCEDES-BENZ. *O500U Especificações Técnicas.* 2024. Disponível em: <<https://viacircular.com.br/chassis/mercedes-benz/o-500u-1826-256cv/>>. Acesso em: Julho de 2024. Citado 2 vezes nas páginas 26 and 27.

Ministério da Saúde. *DATASUS.* s.d. Acesso em Agosto de 2024. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/deftohtm.exe?sih/cnv/nidf.def>>. Citado na página 54.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Programa MOVER.* 2024. Acesso em Junho de 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/programa-mover>>. Citado na página 23.

Ministério do Meio Ambiente. *Acordo de Paris.* s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>. Citado na página 6.

MIRAGLIA, S. G. E. K.; GOUVEIA, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. *Ciência Saúde Coletiva*, 2014. Citado na página 19.

Natural Resources Canada. *Autosmart: Fact Sheet 9 - Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency*. 2019. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <https://natural-resources.canada.ca/sites/nrcan/files/oee/pdf/transportation/fuel-efficient-technologies/autosmart_factsheet_9_e.pdf>. Sem citações no texto.

NEOSOLAR. *CONTROLADOR DE CARGA SOLAR*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controladores-de-carga>>. Citado na página 15.

NEOSOLAR. *INVERSOR SOLAR*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/inversores-ou-conversores>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 and 16.

OMS. *New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution*. 2021. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.who.int/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>>. Citado na página 18.

Organização das Nações Unidas (ONU). *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)*. 2015. Acordo internacional adotado na Assembleia Geral das Nações Unidas. Acesso em: Maio de 2024. Citado na página 8.

PEIXOTO, R. *Mudança climática tornou chuvas no RS mais intensas, aponta estudo*. 2024. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/05/10/mudanca-climatica-tornou-chuvas-no-rs-mais-intensas-aponta-estudo.ghtml>>. Citado na página 7.

PETROBRAS. *Preços de Combustíveis no Brasil*. 2023. Consulta pública de preços no site oficial. Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br>>. Citado na página 32.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. *Manual de Engenharia de Sistemas Fotovoltaicos*. 2014. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 46, and 61.

PIRACICABANA, V. *Dados Operacionais dos Ônibus Elétricos e a Diesel no DF*. 2023. Informações obtidas em palestra realizada pela Piracicabana e evento da Secretaria de Mobilidade do DF. Disponível em: <<https://www.piracicabana.com.br>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 and 33.

PIRACICABANA, V. *Dados operacionais de consumo de combustível da frota*. 2024. Dados fornecidos pela Viação Piracicabana. Citado 2 vezes nas páginas 18 and 26.

Redação Mobilidade Estadão. *Governo anuncia R\$ 10,5 bi para compra de 2 mil ônibus elétricos e renovação da frota nacional*. 2024. Acesso em Junho de 2024. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/planeta-eletro/governo-anunciainvestimento-para-renovacao-da-frota-nacional/#:~:text=da%20frota%20nacional-,Governo%20anuncia%20R%24%2010%2C5%20bi%20para%20compra%20de%202,0renova%C3%A7%C3%A3o%20da%20frota%20nacional>>. Citado na página 23.

Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal. *Estudo de Projeções de Mudanças do Clima para a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno – Ride*. 2021. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.sema.df.gov.br/estudos-de-projcoes-de-mudancas-do-clima-para-a-regiao-integrada-de-desenvolvimento-do-districto-f>>. Citado na página 7.

Secretaria de Mobilidade do Distrito Federal. *DF no Ponto - Consulta de Linhas*. 2024. Acesso em Setembro de 2024. Disponível em: <<https://dfnoponto.semob.df.gov.br/#linha>>. Citado na página 33.

SOLAR ENERGY INTERNATIONAL. *Solar Electric Handbook: Photovoltaic Fundamentals and Applications*. 6th. ed. Solar Energy International, 2020. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.solarenergy.org/solar-electric-handbook/>>. Citado na página 3.

SOLAR, O. *ODA465-36V-MH*. s.d. Acesso em Julho de 2024. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/amfile/file/download/file/25/product/31471/>>. Citado 2 vezes nas páginas 37 and 38.

SOUZA, J. R. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: Editora Solar, 2017. Citado na página 12.

Topline Bus. *Preço da Carroceria Marcopolo*. 2024. Comunicação pessoal. Informação fornecida pela concessionária Topline Bus da Marcopolo. Sem citações no texto.

União Europeia. *Normas de Emissão Euro 5 e Euro 6*. 2024. Acesso em Junho de 2024. Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/factsheets/pt/sheet/76/emissions-dos-veiculos-motores>>. Citado na página 24.

World Bank. Electrification of public transport: A case study of the shenzhen bus group. 2021. Acesso em setembro de 2024. Disponível em: <<https://www.atlasevhub.com/resource/electrification-of-public-transport-a-case-study-of-the-shenzhen-bus-group/>>. Sem citações no texto.

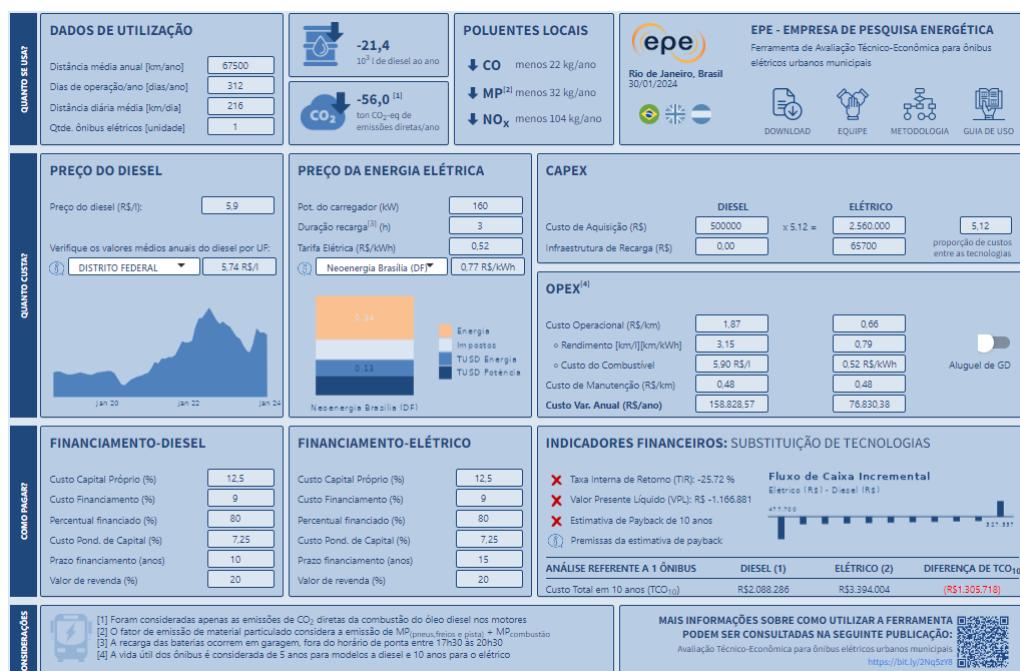
WORLD BANK. *World Development Report 2023: Cities and Climate Change*. World Bank, 2023. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <<https://www.worldbank.org/en/publication/wdr2023>>. Citado na página 3.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Ambient air pollution: Health impacts*. 2023. Acesso em Maio de 2024. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)>. Citado na página 2.

ANEXOS

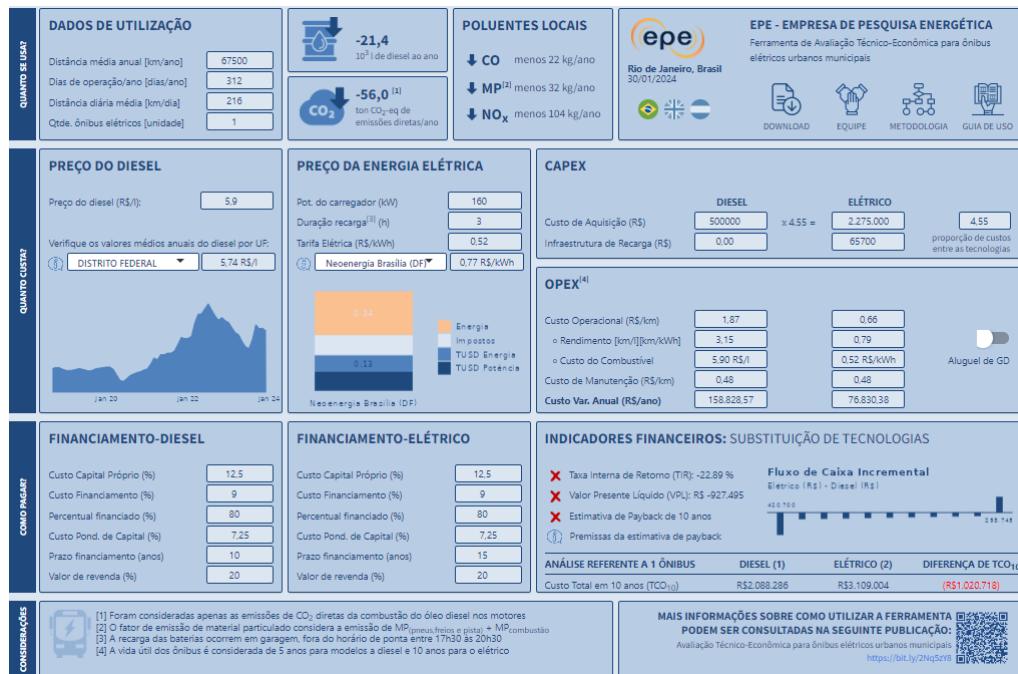
ANEXO A - CENÁRIO 1: RESULTADOS DETALHADOS POR PERCENTUAL DE CUSTO DE AQUISIÇÃO

Figura 5.1: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 90%



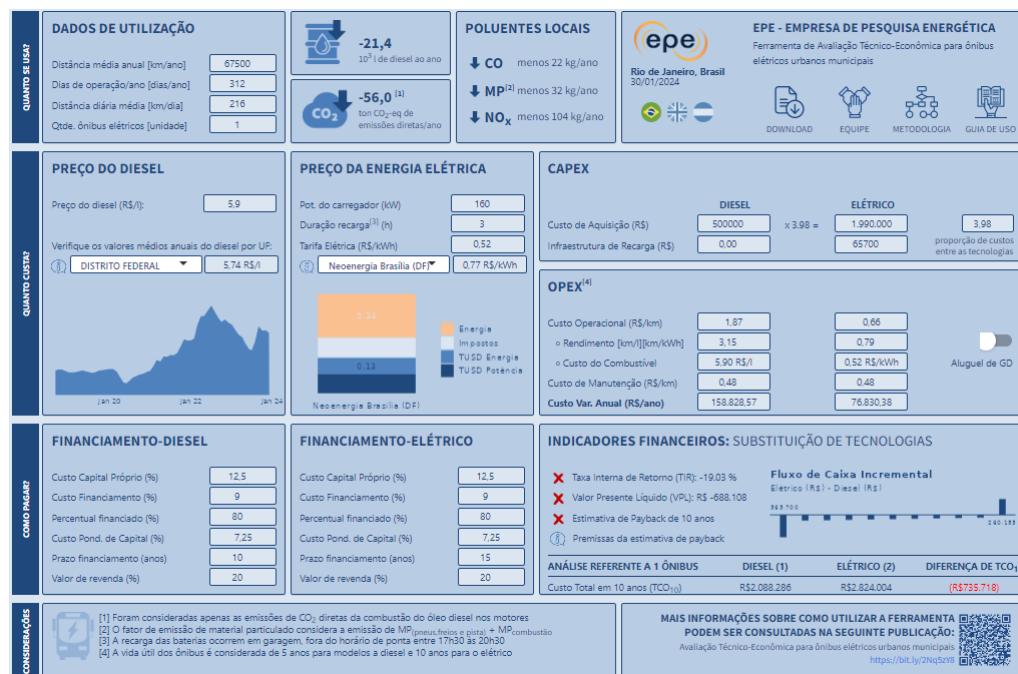
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.2: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 80%



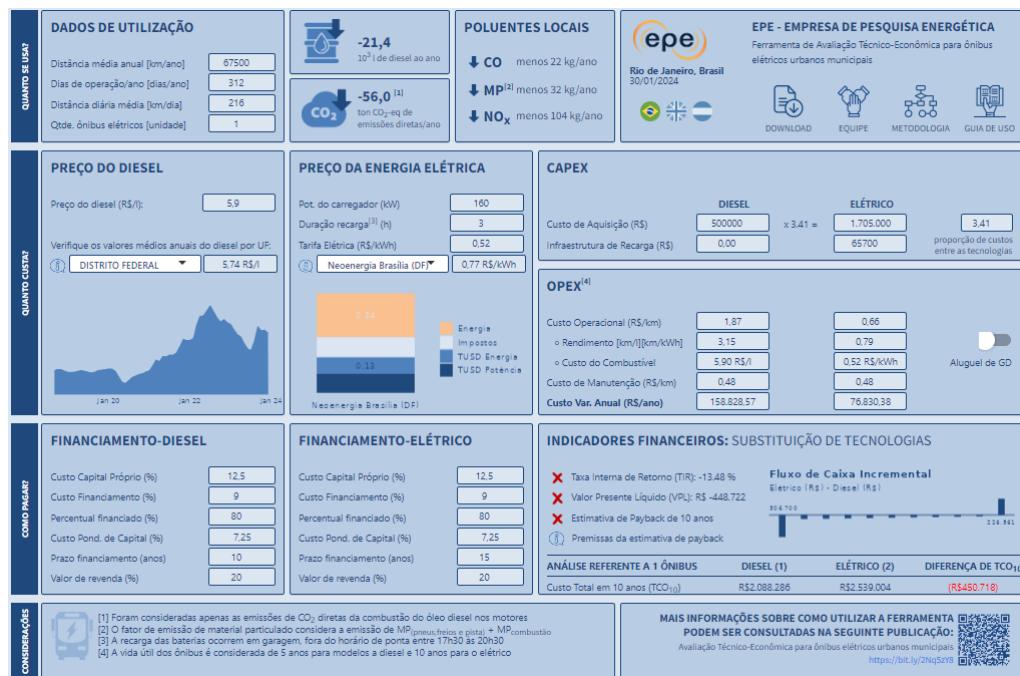
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.3: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 70%



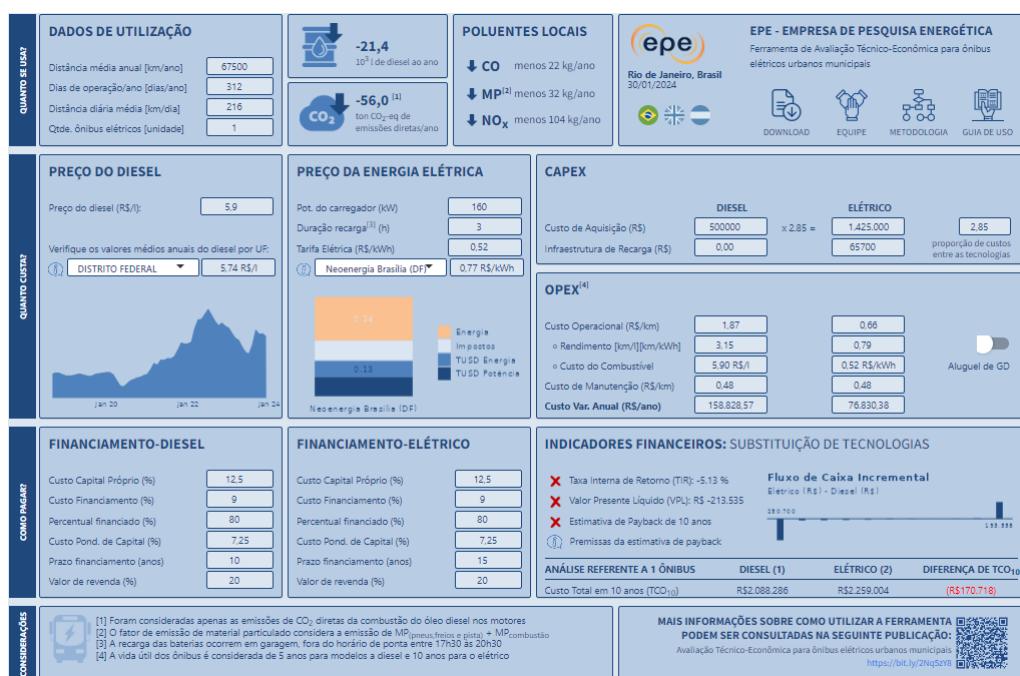
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.4: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 60%



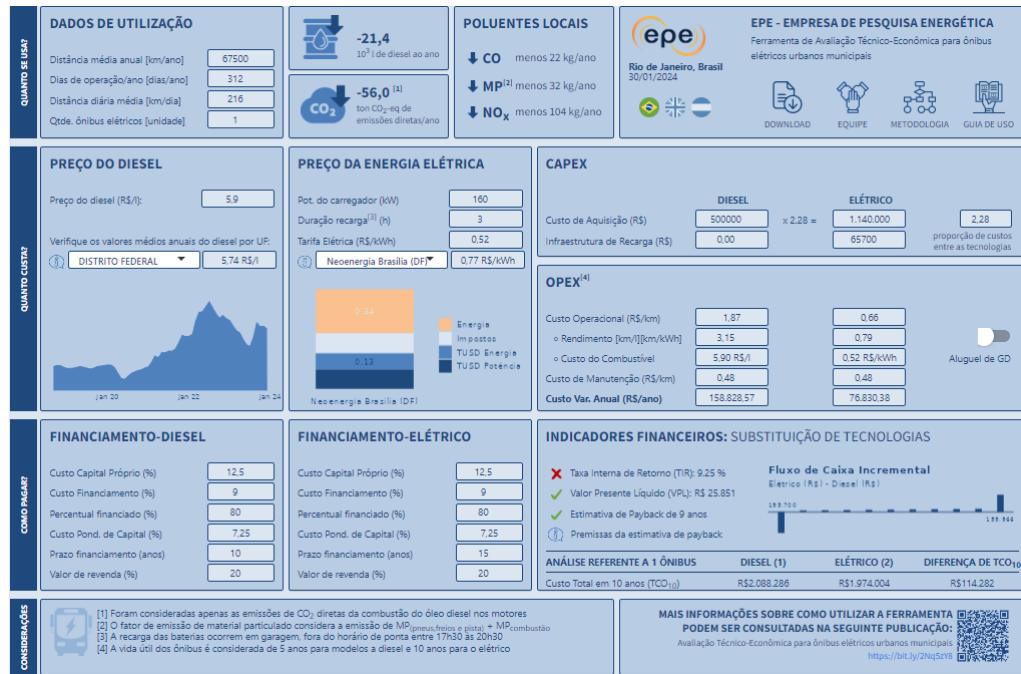
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.5: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 50%



Fonte: (EPE, 2021)

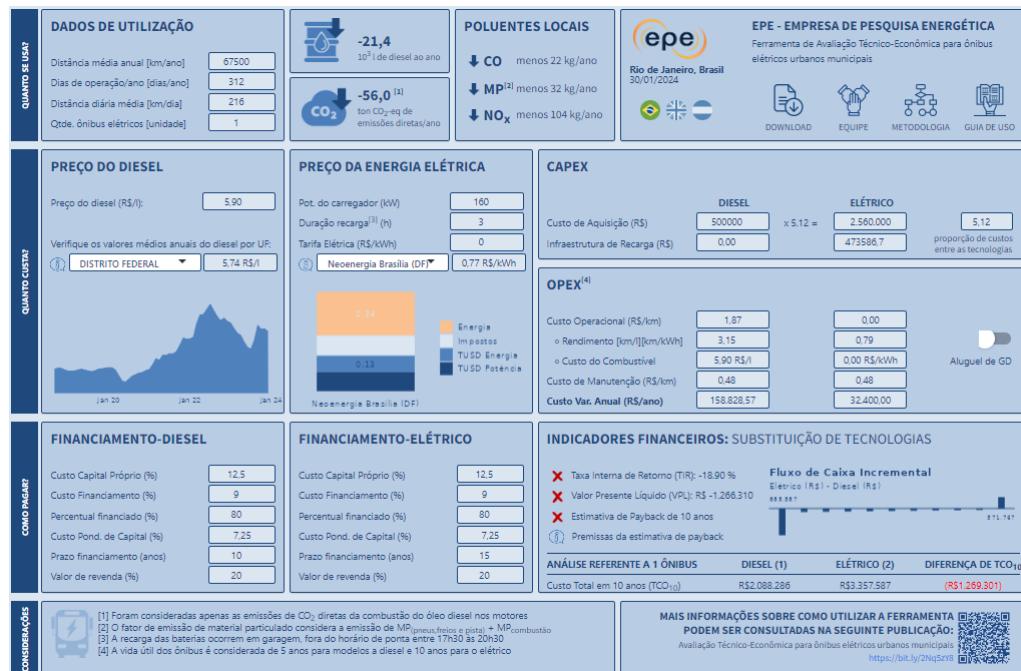
Figura 5.6: Resultado da análise de viabilidade do cenário 1 para 40%



Fonte: (EPE, 2021)

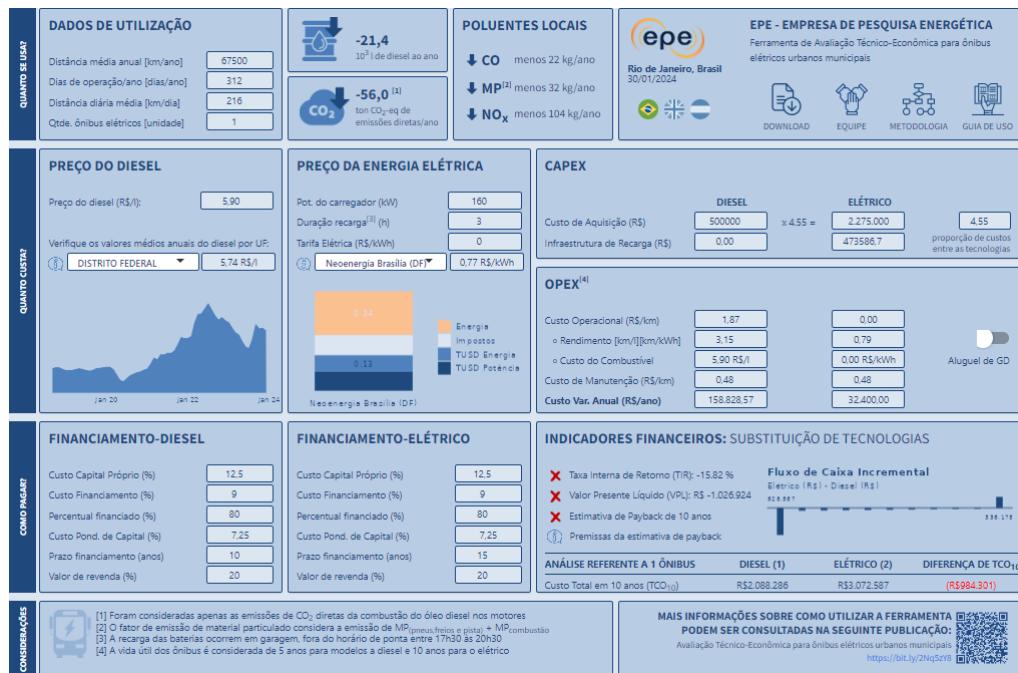
ANEXO B - CENÁRIO 2: RESULTADOS DETALHADOS POR PERCENTUAL DE CUSTO DE AQUISIÇÃO

Figura 5.7: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 90%



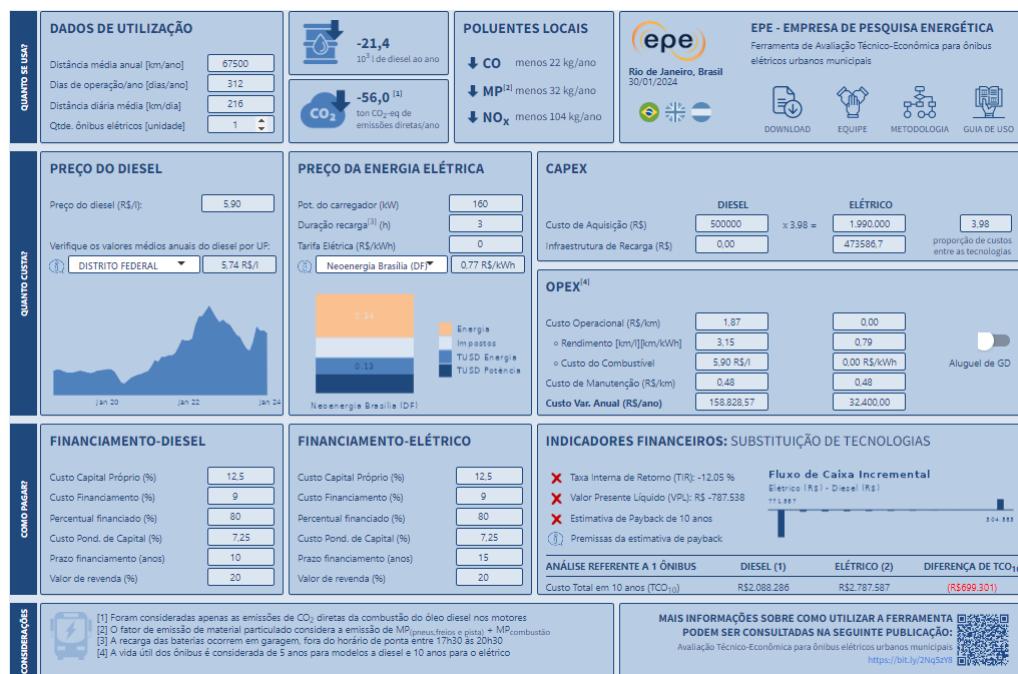
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.8: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 80%



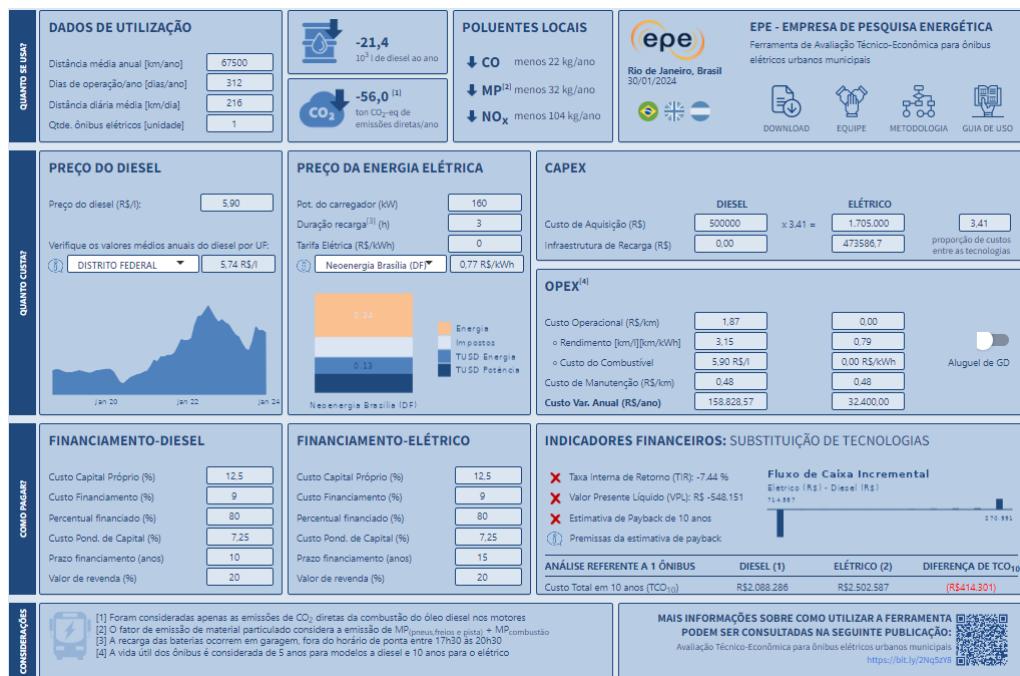
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.9: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 70%



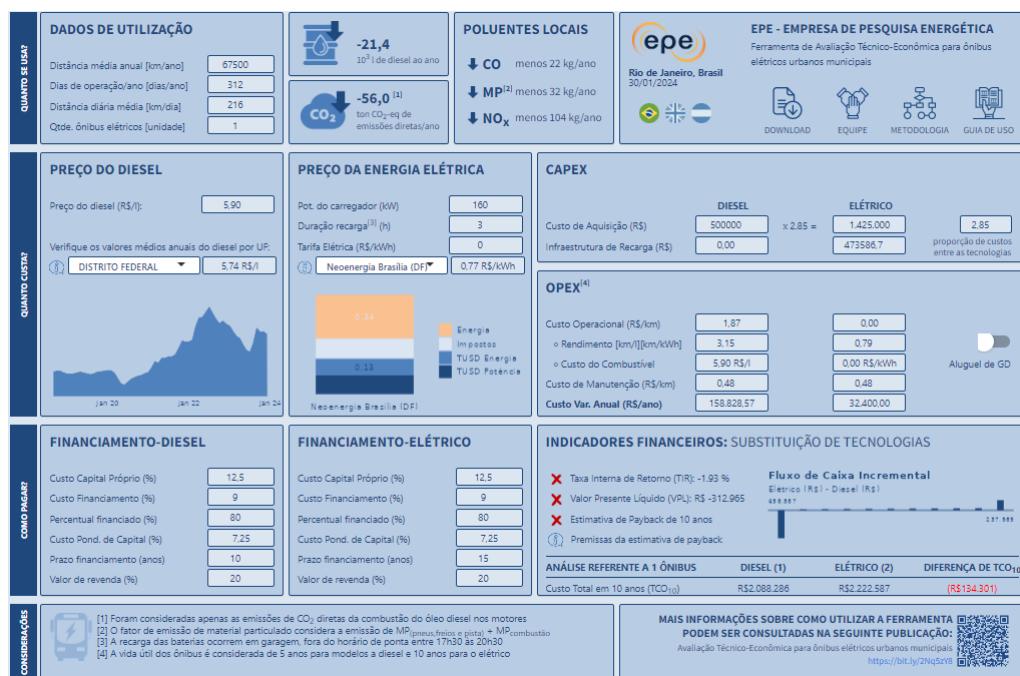
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.10: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 60%



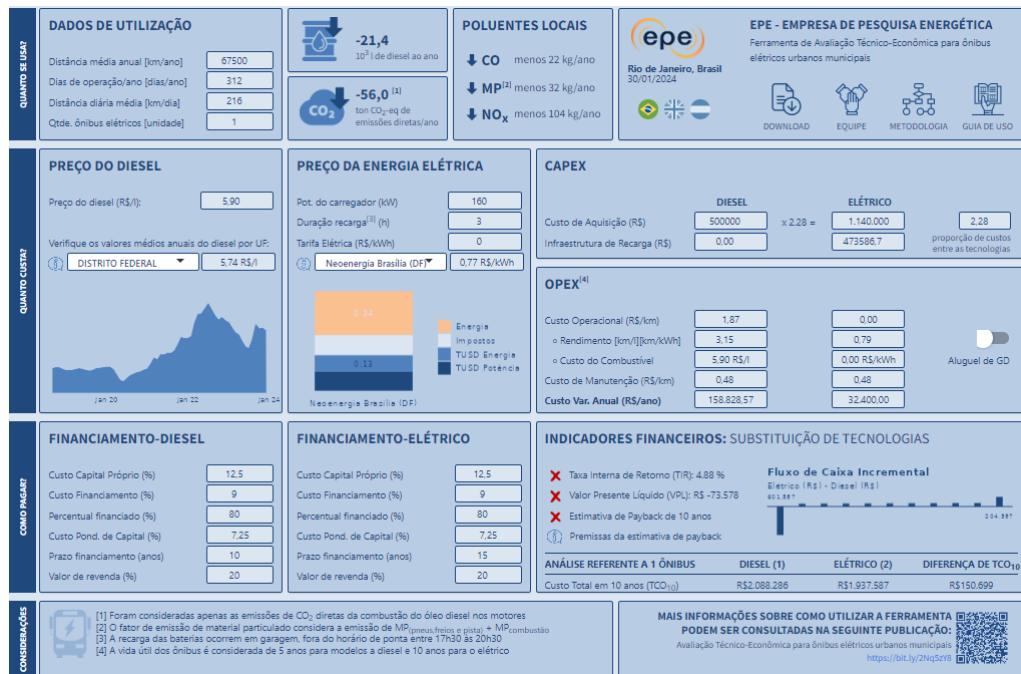
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.11: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 50%



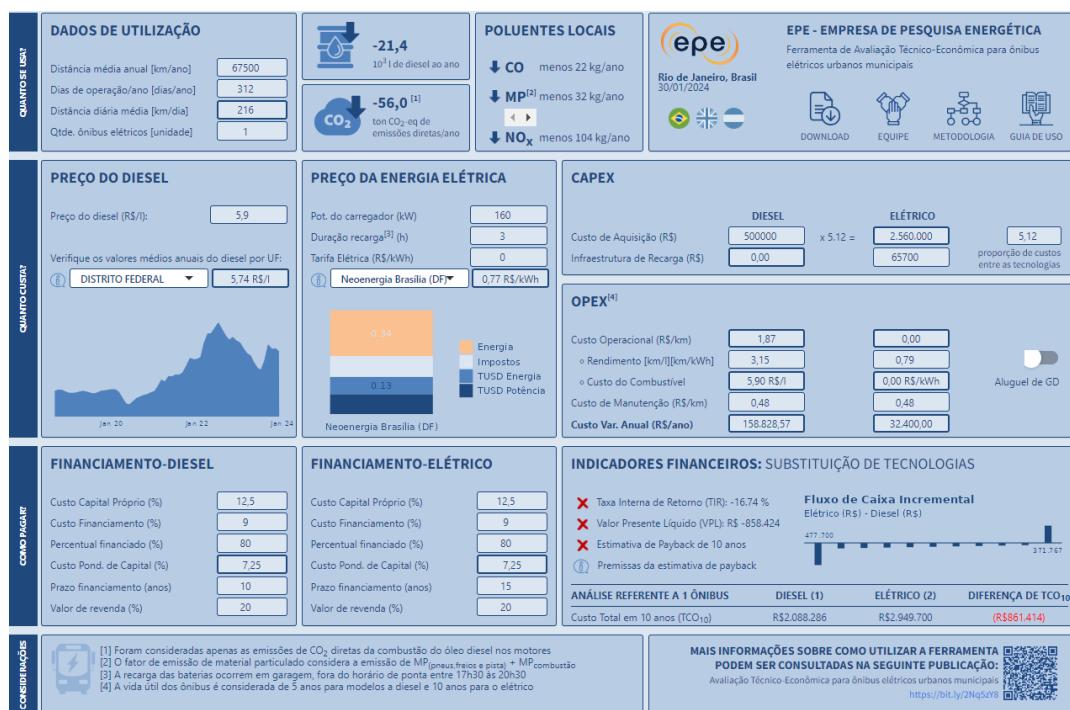
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.12: Resultado da análise de viabilidade do cenário 2 para 40%



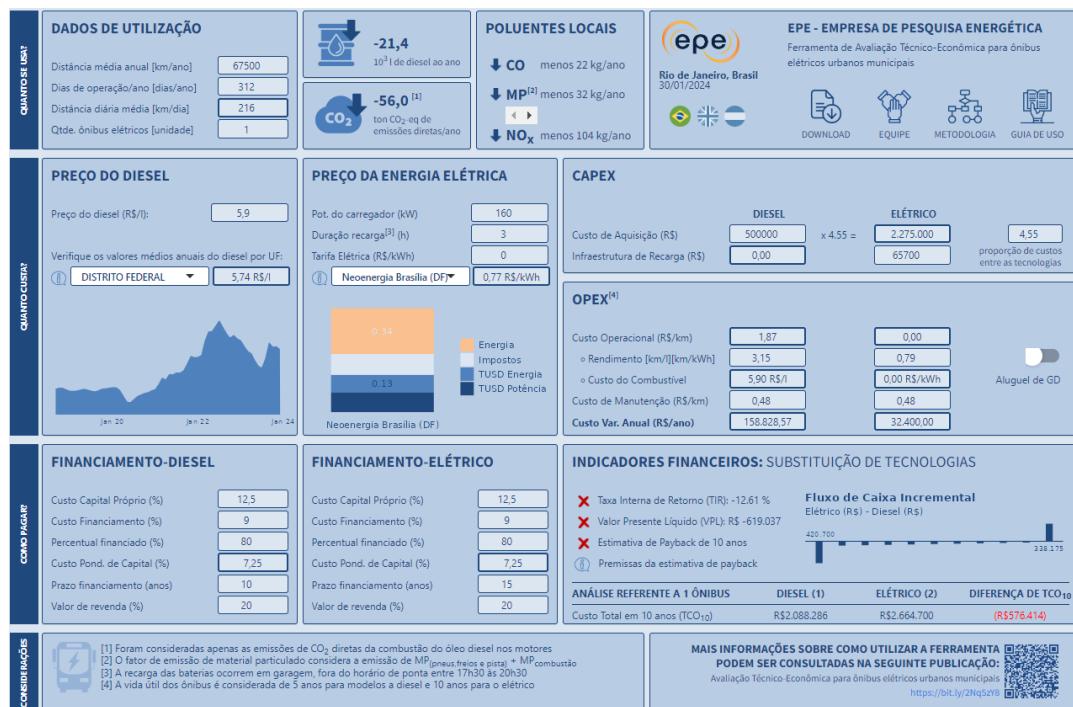
ANEXO C - CENÁRIO 3: RESULTADOS DETALHADOS POR PERCENTUAL DE CUSTO DE AQUISIÇÃO

Figura 5.13: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 90%



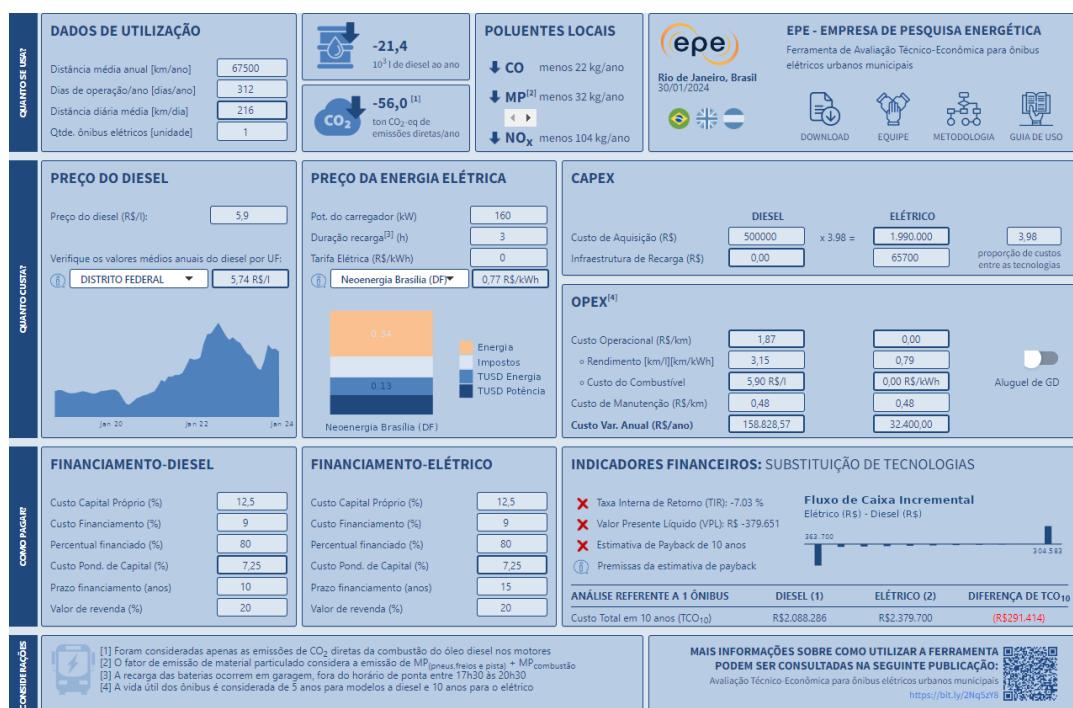
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.14: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 80%



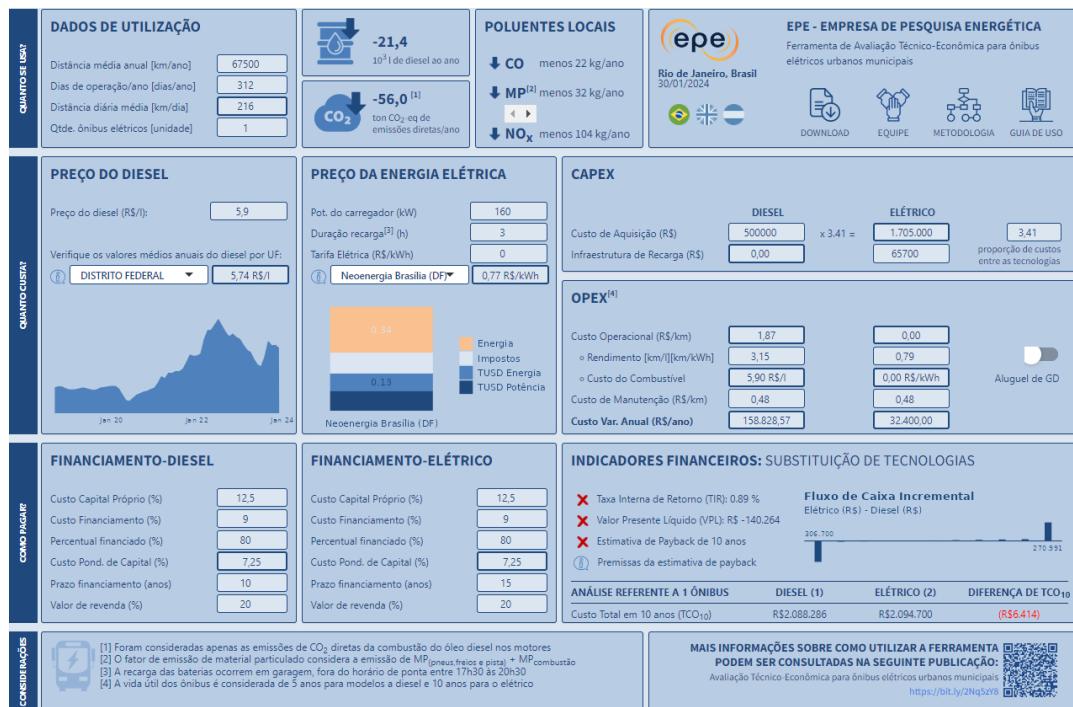
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.15: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 70%



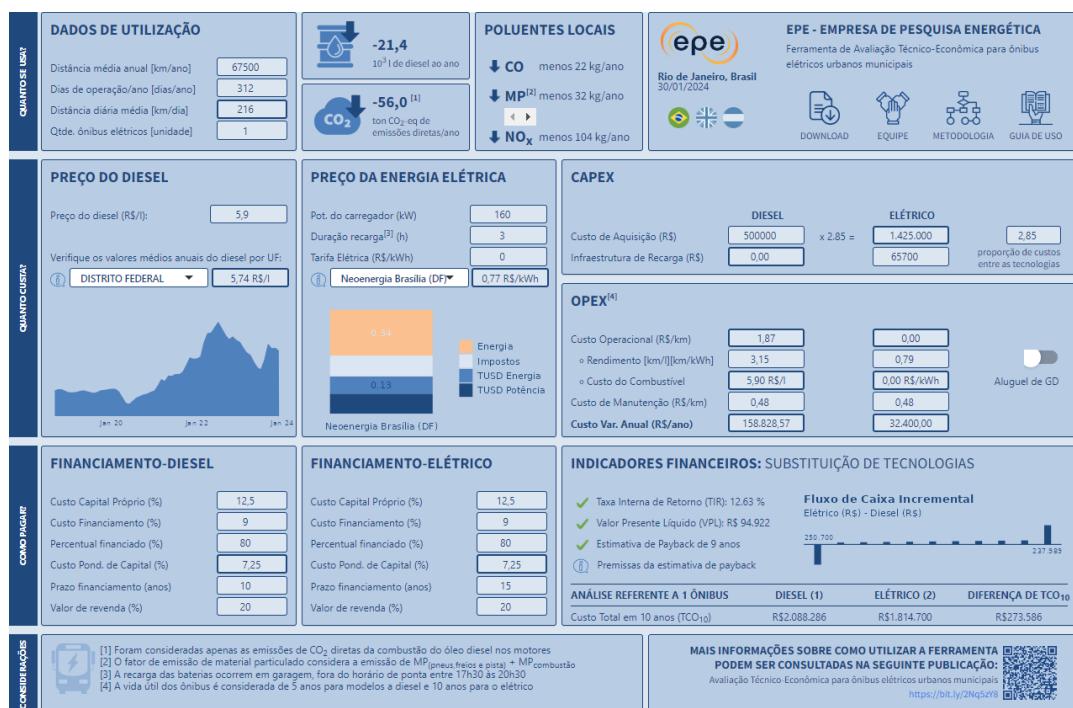
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.16: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 60%



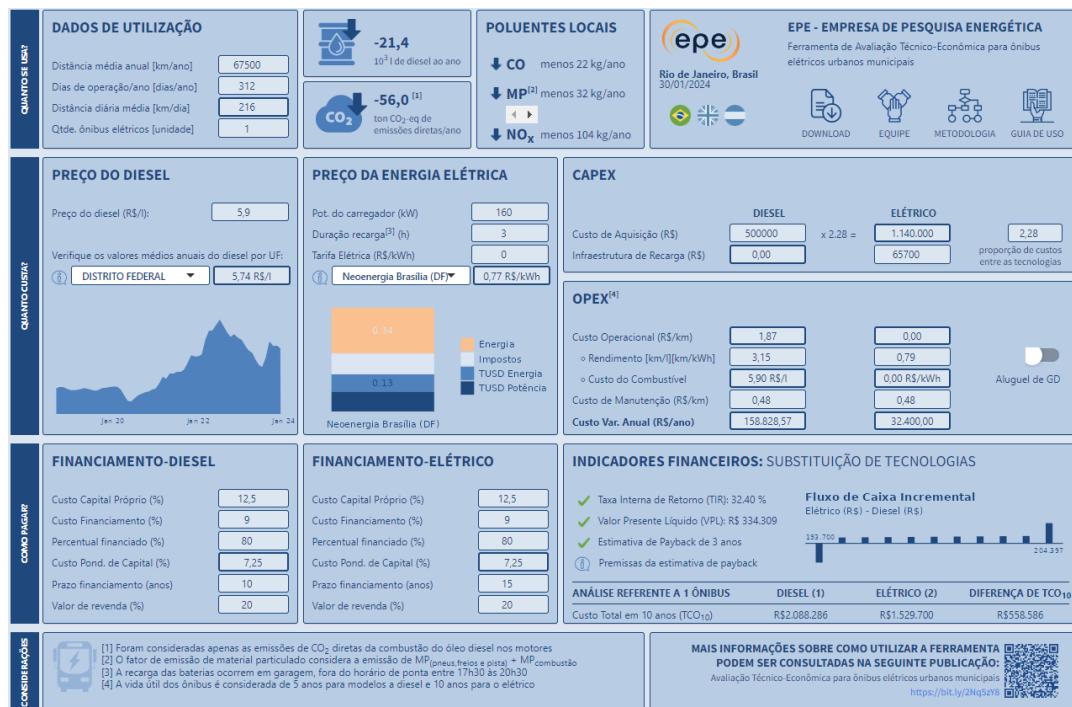
Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.17: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 50%



Fonte: (EPE, 2021)

Figura 5.18: Resultado da análise de viabilidade do cenário 3 para 40%



Fonte: (EPE, 2021)

ANEXO D - CÓDIGOS PYTHON UTILIZADOS PARA OS CÁLCULOS DE TCO E PAYBACK

O código a seguir foi utilizado para calcular o Total Cost of Ownership (TCO) e o Payback ajustado em diferentes cenários para a análise de viabilidade técnico-econômica dos ônibus elétricos. Esses cenários consideram variações no custo de aquisição e a implementação de sistemas fotovoltaicos.

Código para o Cálculo do TCO e Payback

```

# Definir as variaveis fornecidas
C_A = 2845822.28 # Custo de Aquisicao do onibus
I_FV = 407886.70 # Investimento no Sistema Fotovoltaico
M_onibus = 30000 # Custo Anual de Manutencao do nibus
M_FV = 5000 # Custo Anual de Manutencao do Sistema FV
V_f = 569140 # Valor de Revenda do onibus
G_d = 156.39 # Gasto Diario com carregamento sem sistema fotovoltaico
M = 30000 # Custo Anual de Manutencao do onibus sem sistema fotovoltaico

```

```

N_a = 15 # Número de Anos
i_2024 = 0.0459 # Taxa de Inflação 2024 (4,59%)
i_2025 = 0.0351 # Taxa de Inflação 2025 (3,51%)

# Função para calcular o TCO do Cenário 1 (sem sistema fotovoltaico)
def calcular_TCO_Cenário1(C_A, G_d, M, V_f, N_a, i):
    custo_carregamento_total = sum([(G_d * 365) / (1 + i)**n for n in
        range(1, N_a + 1)])
    custo_mantenção_total = sum([M / (1 + i)**n for n in range(1, N_a
        + 1)])
    TCO = C_A + custo_carregamento_total + custo_mantenção_total - (
        V_f / (1 + i)**N_a)
    return TCO

# Função para calcular o TCO do Cenário 2 (com sistema fotovoltaico)
def calcular_TCO_FV(C_A, I_FV, M_onibus, M_FV, V_f, N_a, i):
    custo_mantenção_total = sum([(M_onibus + M_FV) / (1 + i)**n for n
        in range(1, N_a + 1)])
    TCO = C_A + I_FV + custo_mantenção_total - (V_f / (1 + i)**N_a)
    return TCO

# Função para calcular o TCO do Cenário Extra (sistema fotovoltaico já
# implementado)
def calcular_TCO_FV_implementado(C_A, M_onibus, M_FV, V_f, N_a, i):
    custo_mantenção_total = sum([(M_onibus + M_FV) / (1 + i)**n for n
        in range(1, N_a + 1)])
    TCO = C_A + custo_mantenção_total - (V_f / (1 + i)**N_a)
    return TCO

# Calculando o TCO para os cenários com a taxa de inflação de 4,59%
TCO_cenário_1_2024 = calcular_TCO_Cenário1(C_A, G_d, M, V_f, N_a,
    i_2024)
TCO_cenário_2_2024 = calcular_TCO_FV(C_A, I_FV, M_onibus, M_FV, V_f,
    N_a, i_2024)
TCO_cenário_extra_2024 = calcular_TCO_FV_implementado(C_A, M_onibus,
    M_FV, V_f, N_a, i_2024)

# Calculando o TCO para os cenários com a taxa de inflação de 3,51%
TCO_cenário_1_2025 = calcular_TCO_Cenário1(C_A, G_d, M, V_f, N_a,
    i_2025)
TCO_cenário_2_2025 = calcular_TCO_FV(C_A, I_FV, M_onibus, M_FV, V_f,
    N_a, i_2025)
TCO_cenário_extra_2025 = calcular_TCO_FV_implementado(C_A, M_onibus,
    M_FV, V_f, N_a, i_2025)

# Mostrando os resultados ajustados do TCO para todos os cenários com
# arredondamento para duas casas decimais

# Cenário 1
print(f"TCO Cenário 1 (2024 - 4,59%): {round(TCO_cenário_1_2024, 2)}")
print(f"TCO Cenário 1 (2025 - 3,51%): {round(TCO_cenário_1_2025, 2)}")

```

```
# Cenario 2
print(f"TCO Cenario 2 (2024 - 4,59%): {round(TCO_cenario_2_2024, 2)}")
print(f"TCO Cenario 2 (2025 - 3,51%): {round(TCO_cenario_2_2025, 2)}")

# Cenario Extra
print(f"TCO Cenario Extra (2024 - 4,59%): {round(TCO_cenario_extra_2024
, 2)}")
print(f"TCO Cenario Extra (2025 - 3,51%): {round(TCO_cenario_extra_2025
, 2)}")
```

ANEXO E - DIAGRAMA UNIFILAR DO PROJETO FOTOVOLTAICO

O diagrama unifilar do projeto fotovoltaico pode ser visualizado abaixo:

