

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Júlia Ribeiro Matos

**Estudo de viabilidade econômica para utilização
de ônibus elétrico no transporte público da
Cidade de Porto Alegre - RS**

Porto Alegre

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Júlia Ribeiro Matos

**Estudo de viabilidade econômica para utilização de
ônibus elétrico no transporte público da Cidade de Porto
Alegre - RS**

Projeto de Diplomação do Curso de Engenharia Elétrica

UFRGS

Orientador: Prof. Dr. Maicon Ramos

Porto Alegre

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Júlia Ribeiro Matos

**Estudo de viabilidade econômica para utilização de
ônibus elétrico no transporte público da Cidade de Porto
Alegre - RS**

Projeto de Diplomação do Curso de Engenharia
Elétrica

Prof. Dr. Maicon Ramos
Orientador

Prof. Dra.
Gladis Bordin

Prof. Dra.
Laura Callai dos Santos

Porto Alegre

2021

RESUMO

A responsabilidade com o meio ambiente vem sendo palco de discussões em diversos eventos mundiais. Sabendo que um dos setores que mais impacta na emissão de partículas e gases poluentes é o setor de transportes. O mundo já está buscando e aplicando soluções mais sustentáveis e incluindo os veículos elétricos nos transportes público e privados. Tendo em vista que a energia elétrica é considerada por muitos a protagonista no futuro do setor energético, a forma de geração dessa energia é uma pauta importante. Existem muitas discussões e controvérsias a respeito dos impactos ambientais que as fontes atuais dessa energia provocam. Diante desse cenário, esse trabalho apresenta um estudo de viabilidade econômica na utilização de ônibus elétricos na cidade de Porto Alegre - RS e em conjunto propõe-se uma forma sustentável de obter-se parte da energia elétrica necessária para abastecer a frota de veículos, utilizando energia solar fotovoltaica. No decorrer do trabalho foram comparados e analisados impactos financeiros na substituição dos ônibus a combustão por ônibus elétricos. Foi utilizado o Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico da Empresa de Pesquisa Energética, o qual retornou os indicadores financeiros VPL, TIR e *Payback* acerca do investimento. A partir disso os indicadores mostraram que a substituição pode ser financeiramente viável.

Palavras-chave: Viabilidade Financeira. Ônibus Elétrico. Células Fotovoltaicas. Painéis Solares.

ABSTRACT

The responsibility to the environment has been the event stage in several places worldwide. Knowing that one of the sectors that has the wider impact in particles and polluting gases emissions is the transport sector, the world is already seeking and applying more sustainable solutions and including electric vehicles in public and private transportation systems. Given that electricity is considered by many to be the protagonist in the future of the energy sector, the way in which this energy is generated is an important issue. There are many discussions and controversies about the environmental impacts that current sources of this energy cause. Given this scenario, this work presents a feasibility study on the use of electric buses in the city of Porto Alegre - RS and together also proposes a sustainable way to obtain the part of the electricity needed to supply the vehicle fleet, using photovoltaic solar energy. In the course of this work there are many comparisons and financial impacts analysis of replacing combustion buses with electric buses. The Electric Bus Feasibility Simulator of the Energy Research Company was used, which returned the financial indicators VPL, TIR and Payback on the investment. The indicators pointed that the replacement could be financially viable.

Keywords: Solar Bus. Electric Solar Bus. Photovoltaic Cells. Solar Panels.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Ônibus elétricos no Brasil e no mundo	12
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Efeito fotoelétrico	16
2.1.1	Célula fotovoltaica	19
2.1.1.1	Estrutura e associação de uma Célula Fotovoltaica	22
2.1.1.2	Tecnologias Células Fotovoltaicas	25
2.1.2	Irradiação ou insolação	26
2.1.3	Veículo elétrico	29
2.1.3.1	Motor elétrico	30
2.1.3.2	Inversor	32
2.1.3.3	Controlador	33
2.1.4	Baterias	33
2.1.5	Infraestruturas de recarga para veículos elétricos	35
2.1.6	Sistema Tarifário de Energia Elétrica	37
2.1.7	Ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais	40
2.1.8	Sistema de geração solar fotovoltaico	49
3	METODOLOGIA	51
3.1	Avaliação de viabilidade econômica de ônibus elétrico	51
3.2	Análise de viabilidade de geração fotovoltaica para suprimento do consumo dos ônibus elétricos	55
4	ESTUDO DE CASO	56
4.1	Cenário 1	56
4.1.1	Utilização	56

4.1.2	Preço do diesel - Cenário 1	57
4.1.3	Preço da energia elétrica - cenário 1	57
4.1.4	Custos de aquisição - <i>Capital Expenditure</i> /Despesas de Capitais (CAPEX) - cenário 1	58
4.1.5	Custos de operação - Operational Expenditure (OPEX) - cenário 1	60
4.1.6	Financiamentos - cenário 1	61
4.1.7	Fatura de energia elétrica - cenário 1	63
4.1.8	Hipóteses de aumento no preço do diesel e/ou tarifa elétrica	66
4.1.9	Geração sola fotovoltaica - cenário 1	67
4.2	Cenário 2	69
4.2.1	Conta de energia - cenário 2	69
4.2.2	Custo do diesel - cenário 2	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	Simulação	71
5.2	Hipóteses de aumento no preço do diesel e energia elétrica	72
5.3	Custos com energia e diesel	75
5.4	Custos com energia e diesel considerando um sistema solar fotovol- taico	76
6	CONCLUSÃO	78
6.1	Trabalhos futuros	79
	REFERÊNCIAS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Avanço dos ônibus elétricos no mundo em milhões	12
Figura 2 – Novos registros de ônibus elétricos entre 2015 e 2020 nos principais países e conjunto de países do mundo em milhares	13
Figura 3 – Ranking de ônibus elétricos nas cidades brasileiras	14
Figura 4 – Ranking de ônibus elétricos países da América Latina	14
Figura 5 – Representação do Efeito Fotoelétrico	18
Figura 6 – Esquema representativo de um sistema com ligação metálica.	18
Figura 7 – Representação do átomo de silício	19
Figura 8 – Representação da ligação de silício	20
Figura 9 – Representação da dopagem do silício com fósforo	21
Figura 10 – Representação da dopagem do silício com boro	21
Figura 11 – Representação de uma junção P-N	22
Figura 12 – Representação do princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.	23
Figura 13 – Representação da estrutura de uma célula fotovoltaica	23
Figura 14 – Associações de células e módulos fotovoltaicos	24
Figura 15 – Associações de células fotovoltaicas em série	24
Figura 16 – Distribuição da radiação solar	27
Figura 17 – Comparação da Irradiação global horizontal entre Brasil e Alemanha	28
Figura 18 – Medida da Irradiação por hora por mês em Porto Alegre - RS	29
Figura 19 – Esquemático dos componentes de um veículo elétrico	30
Figura 20 – Estrutura de um rotor tipo gaiola de esquilo	31
Figura 21 – Estrutura de um estator de um motor de indução	31
Figura 22 – Estrutura de um estator de dois polos.	32
Figura 23 – Estrutura de um estator de quatro polos.	32
Figura 24 – Esquemático dos componentes e operação de uma bateria	34
Figura 25 – Formas de recargas de veículos elétricos	36
Figura 26 – Tarifas de Energia Elétrica aplicáveis ao Grupo A - 2020	39
Figura 27 – Postos Tarifários CEEE-Distribuidora	40
Figura 28 – Bloco dados de utilização - ferramenta EPE	41

Figura 29 – Bloco preço do diesel - ferramenta EPE	42
Figura 30 – Bloco preço da energia elétrica - ferramenta EPE	42
Figura 31 – Bloco CAPEX - ferramenta EPE	43
Figura 32 – Bloco OPEX - ferramenta EPE	43
Figura 33 – Bloco financiamento diesel - ferramenta EPE	44
Figura 34 – Bloco financiamento elétrico - ferramenta EPE	45
Figura 35 – Bloco redução litros de diesel - ferramenta EPE	47
Figura 36 – Bloco redução toneladas de CO ₂ - <i>equivalente</i> - ferramenta EPE	47
Figura 37 – Bloco poluentes locais - ferramenta EPE	47
Figura 38 – Sundata - Coordenadas Geográficas	49
Figura 39 – Sundata - Irradiação média diária	50
Figura 40 – Metodologia da ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais.	52
Figura 41 – Legenda dos símbolos utilizados na metodologia da ferramenta de avali- ação de ônibus elétricos urbanos municipais.	52
Figura 42 – Diagrama representativo da metodologia do módulos de preços.	53
Figura 43 – Diagrama representativo da metodologia do módulos de utilização.	53
Figura 44 – Diagrama representativo da metodologia do módulos financeiro.	54
Figura 45 – Preço de compra de ônibus de transporte elétrico em comparação com ônibus convencionais a diesel	59
Figura 46 – Histórico de demanda medida - carris - julho/20 a julho/21.	64
Figura 47 – Indicadores Financeiros - cenário 1	71
Figura 48 – Impacto no TIR com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.	73
Figura 49 – Impacto no VPL com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.	74
Figura 50 – Impacto no TCO com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades dos tipos de baterias	35
Tabela 2 – Fatores de emissão dos poluentes CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O	48
Tabela 3 – Dados referentes à utilização - cenário 1	57
Tabela 4 – Dados referentes à utilização - cenário 1	58
Tabela 5 – Dados referentes à utilização - cenário 1	59
Tabela 6 – Dados referentes ao preço de operação - cenário 1	61
Tabela 7 – Dados de Financiamento - cenário 1	63
Tabela 8 – Preços do diesel e tarifa elétrica conforme hipóteses de aumento	67
Tabela 9 – Irradiação solar diária média	68
Tabela 10 – Redução de poluentes e litros de diesel	72
Tabela 11 – Alteração dos indicadores financeiros conforme hipóteses de aumento do preço do diesel e da energia elétrica	73
Tabela 12 – Resultados - custos mensais com energia elétrica e diesel	75

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico o consumo de energia no Brasil e do mundo aumentou significativamente. Segundo o *Our World in Data*¹, entre os anos de 1965 e 2019 o consumo de energia per capita no mundo aumentou em cerca de 62,4%, sendo que no Brasil o aumento foi de cerca de 400% no mesmo período.

Como consequência do avanço tecnológico juntamente com o consumo energético, o aumento da emissão de poluentes também foi bastante expressivo nas últimas décadas. Segundo Data (2019), no Brasil, no mesmo período de 1965 até 2019 houve um aumento de aproximadamente 225% na emissão de dióxido de carbono per capita. O dióxido de carbono é resultante da queima de combustíveis fósseis, ou seja, do carvão mineral, petróleo e gás natural, e também biomassa (SANCHES, 2016). Esse gás proveniente da queima de combustíveis fósseis é a fonte principal das emissões de gases de efeito estufa decorrente de atividades humanas (SERRA T, 2002).

Segundo o Atlas da Eficiência Energética de 2020, emitido pelo Ministério de Minas e Energia e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor de transportes se tornou recentemente o componente mais importante do consumo final de energia do país. Dentro desse setor, o consumo rodoviário é o mais relevante. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2020, também emitido pelo Ministério de Minas e Energia e pela EPE, entre os anos de 2010 até 2019, no Brasil, o setor de transporte respondeu por 81,6% do consumo final energético de óleo diesel. Esses dados podem ser encontrados em EPE (2020).

Diante desse cenário o Brasil e o mundo vem buscando novas formas de produção de energia que sejam limpas e renováveis. Conforme divulgado pela Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) em FIEMG (2019), o Brasil tem uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, atrás apenas da China e dos EUA. Em 2017, cerca de 80% de toda a energia gerada no país foi por meio das fontes renováveis, a maior parte de

¹ Our World in Data, em português, Nosso Mundo em Dados, é uma publicação digital que engloba diversas pesquisas científicas e dados à respeito da qualidade de vida nos diferentes países do mundo. Disponível em www.ourworldindata.org

fonte hídrica.

Sabendo que o setor de transporte é um dos principais consumidores de combustíveis fósseis na atualidade, os veículos elétricos, que utilizam um tipo de energia renovável para funcionar estão sendo cada vez mais estudados e introduzidos nas sociedades.

"O sol é indubitavelmente a fonte de energia inesgotável da Terra." (FILHO J, 2003). A energia solar pode ser convertida em eletricidade de duas maneiras: através do efeito fotovoltaico ou através da concentração da energia solar (PUC-RIO; FERNANDEZ, 2020). Para esse trabalho é relevante apenas o efeito fotovoltaico. Ele decorre da excitação dos elétrons desses materiais na presença de luz. Cada elétron excitado desloca-se deixando uma espécie de "lacuna" no átomo e outros elétrons se movem então para essas lacunas, deixando outras lacunas em seus átomos, e assim sucessivamente (BURATTINI M, 2008). Os materiais que sofrem esse efeito comumente possuem seus átomos naturalmente ordenados e essa agitação causada pela incidência de luz produz uma corrente elétrica.

A partir disso, vem sendo desenvolvidos estudos e pesquisas acerca de veículos elétricos que utilizam a energia solar como parte da fonte total de energia elétrica ou até mesmo suprimento energético total.

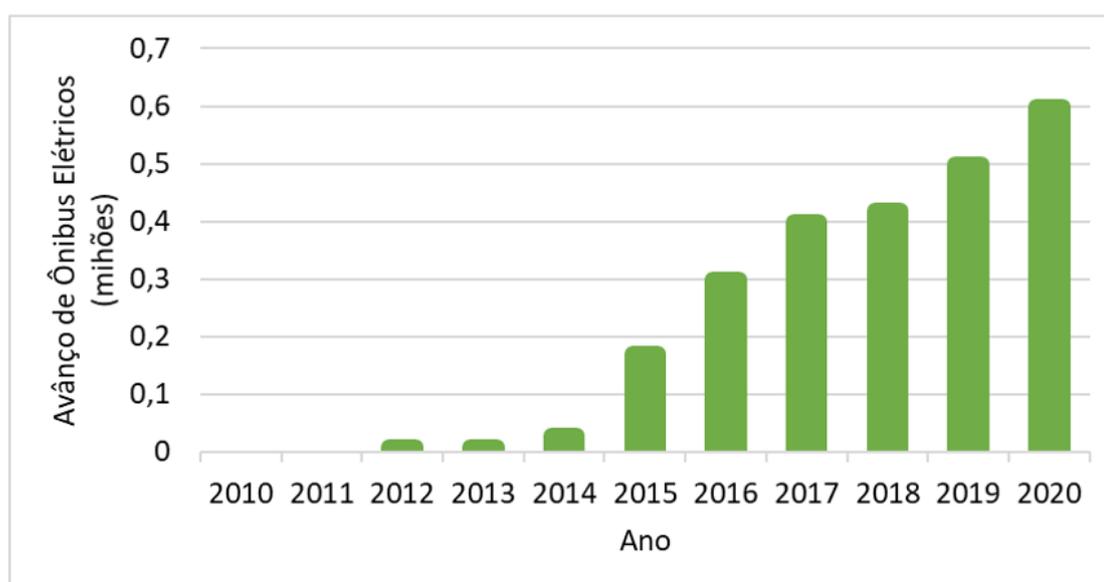
Atualmente, o mundo já sabe que os combustíveis fósseis terão um fim. Segundo Energy (2019), se o consumo desse tipo de combustível seguir no nível atual, estima-se que as reservas acabarão até o ano de 2060. Portanto, mesmo que os países ignorem os fatores ambientais e de saúde, ainda será necessário que esse tipo de fonte energética deixe de ser utilizado.

Tendo isso em vista, esse trabalho tem como objetivo analisar a utilização de veículos elétricos no Brasil como uma possibilidade, saindo da zona utópica. É apresentado um estudo da viabilidade econômica de utilização de ônibus elétricos coletivos urbanos na frota da cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul. Posteriormente, é realizado um estudo de economia de energia elétrica através da aplicação de placas solares fotovoltaicas nas garagens onde os veículos são estacionados durante a noite.

1.1 Ônibus elétricos no Brasil e no mundo

A Agência Internacional de energia, IEA² mostra na revisão global da energia do ano de 2021 a evolução com o passar dos anos do crescimento dos ônibus elétricos no mundo. Na Figura 1 pode ser visualizado o gráfico que mostra essa evolução de 2010 até 2020. O número total de ônibus elétricos no ano de 2020 foi de 600 mil em todo o mundo.

Figura 1 – Avanço dos ônibus elétricos no mundo em milhões



Fonte: Adaptado de IEA (2021a)

Até o momento, a China é o país com o maior número de ônibus elétricos em suas frotas (MOBILIDADE, 2020). De acordo com IEA (2021b), a China registrou o maior número de ônibus elétricos no ano de 2020, 78 mil novos veículos. Segundo a Forbes (2021), a cidade de Shenzhen, na China, com 12 milhões de habitantes, possui 16.000 ônibus elétricos. Shenzhen é a cidade sede da empresa BYD que comercializa ônibus elétricos por todo o mundo inclusive no Brasil. Além dos ônibus elétricos a cidade chinesa também possui cerca de 22.000 táxis elétricos.

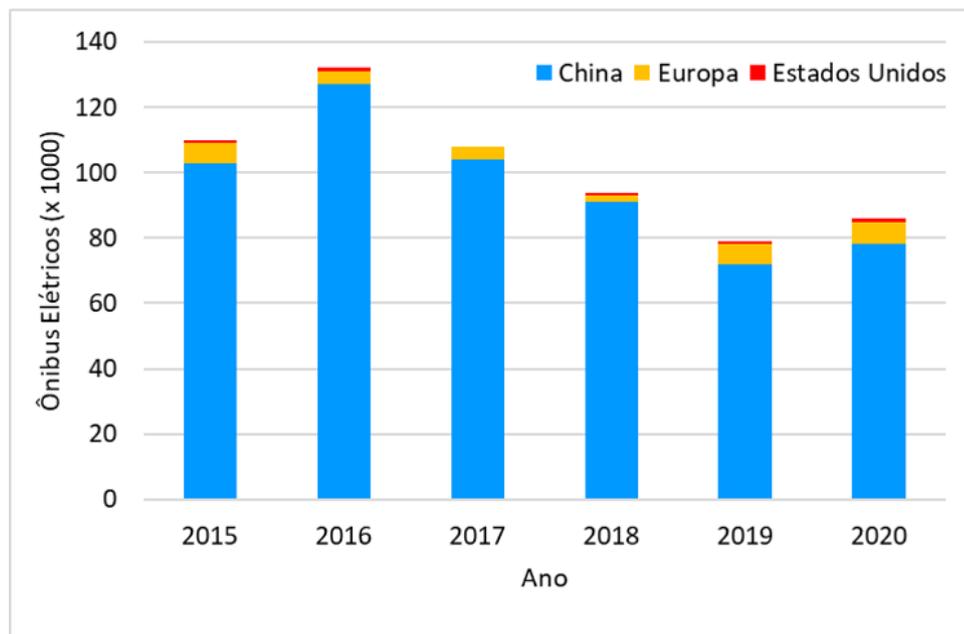
A Europa e os Estados Unidos também vêm realizando aquisições de ônibus elétricos nos últimos anos. Ainda conforme IEA (2021b) em 2020 a Europa registrou 2.100 novos veículos e os Estados Unidos registrou 580.

² A IEA, Agência Internacional de Energia, foi fundada em 1974 com o objetivo de auxiliar nas decisões dos países durante a crise do petróleo. Atualmente a IEA opera como mentora política em assuntos relacionados a energia para 30 países membros.

Na América latina, o Chile teve o maior número de novos ônibus registrados em 2020, 580 veículos.

Na Figura 2 pode ser visualizado um gráfico com os principais países e conjunto de países que realizaram novos registros de ônibus elétricos entre 2015 e 2020.

Figura 2 – Novos registros de ônibus elétricos entre 2015 e 2020 nos principais países e conjunto de países do mundo em milhares

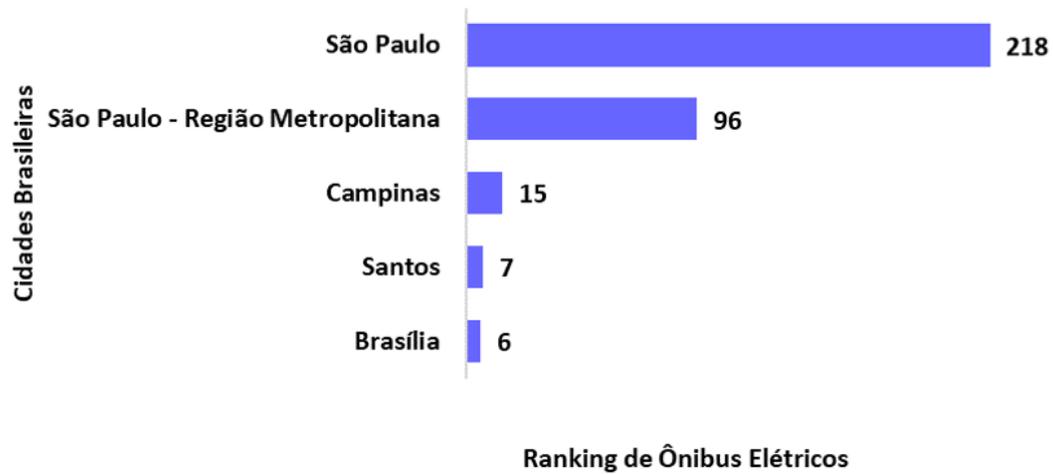


Fonte: Adaptado de (IEA, 2021a)

Segundo o jornal Estadão (2021), o Brasil possui a terceira maior frota de ônibus elétricos da América Latina. São 349 veículos distribuídos em 8 municípios.

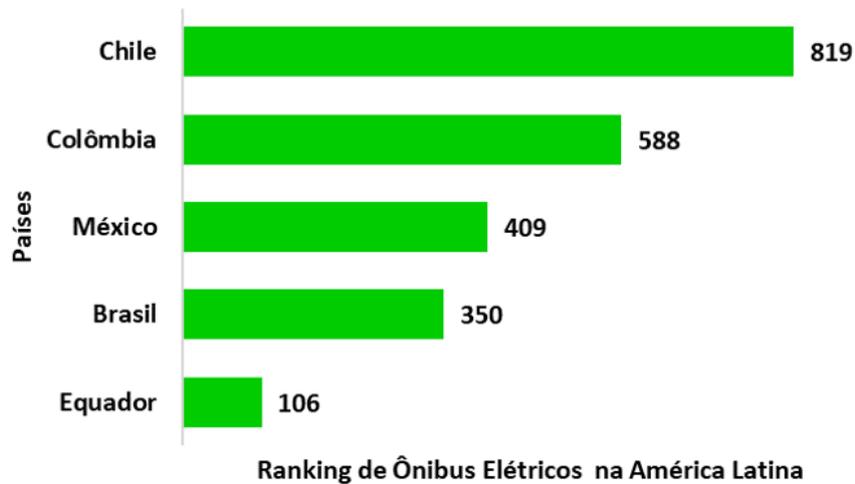
No Brasil existem três empresas que produzem ônibus elétricos, a BYD, Eletra e Volvo. A E-Bus Radar, publicou em Radar (2021) que em julho de 2021 o Brasil possuía 350 ônibus elétricos, sendo grande parte na cidade de São Paulo (218 ônibus elétricos). A distribuição da maioria desses veículos pelas cidades brasileiras pode ser visto na Figura 3. A Figura 4 mostra o ranking de ônibus elétricos na América Latina, esses dados estão datados em julho de 2021.

Figura 3 – Ranking de ônibus elétricos nas cidades brasileiras



Fonte: (RADAR, 2021)

Figura 4 – Ranking de ônibus elétricos países da América Latina



Fonte: (RADAR, 2021)

Dada a situação dos países do mundo e América Latina, o Brasil também é capaz de avançar no investimento em ônibus elétricos. A seção seguinte apresenta os objetivos desse trabalho acerca do tema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é um estudo da viabilidade técnica e econômica da substituição de ônibus movidos a diesel por ônibus elétricos abastecidos por

sistemas fotovoltaicos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Coletar dados a respeito do transporte coletivo urbano na cidade de Porto Alegre;
- Simular a avaliação econômica da substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos utilizando parâmetros de utilização do transporte público para obter os indicadores financeiros TIR, VPL e Payback;
- Avaliar a substituição dos ônibus a diesel por ônibus elétricos levando em conta possíveis aumentos no preço da energia e litro do diesel;
- Verificar de alterações e adequações na conta de energia;
- Validar da possibilidade na utilização de energia solar fotovoltaica para o carregamento parcial ou total da frota de veículos elétricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da proposta inicial desse trabalho que busca estudar alternativas mais sustentáveis para o transporte urbano, é analisada a viabilidade econômica da utilização de ônibus elétricos com o auxílio da energia proveniente do Sol no transporte público da cidade de Porto Alegre. Para isso, é necessário instruir-se à respeito de alguns conceitos importantes que são mencionados no decorrer desse trabalho.

A energia solar fotovoltaica, recebe esse nome quando a energia proveniente do Sol é transformada em energia elétrica. Isso é possível devido a um fenômeno chamado de efeito fotoelétrico. Visto que a energia emitida pelo Sol que chega até o planeta Terra é de 3×10^{24} joules por ano, aproximadamente dez mil vezes mais do que a população mundial consome de energia (GRÄTZEL, 2011). Pode-se afirmar que existe um grande potencial para utilização da energia proveniente do Sol.

2.1 Efeito fotoelétrico

A utilização da energia do sol como fonte de energia vem sendo absolutamente atrativa desde a descoberta do efeito fotoelétrico pelo cientista francês Alexandre Edmond Becquerel, em seu artigo publicado em 1839 (GRÄTZEL, 2011).

Sabendo que a geração de energia elétrica era possível devido a luz do Sol, houveram algumas discordâncias entre os cientistas quanto à natureza da luz, entre os séculos XVII e XVIII houve uma disputa acirrada entre as teorias corpuscular e ondulatória, representadas, respectivamente por Isaac Newton (1642-1727) e Christiaan Huygens (1629-1695) (MOURA, 2016).

A teoria corpuscular de Newton é baseada em que a luz é na verdade partículas redondas ou glóbulos de luz que se moviam em meio ao éter (MARTINS; SILVA, 2015). Para Hygens, a luz seria propagada por meio de ondas esféricas, para ele cada ponto de um corpo luminoso, seja do Sol ou de uma lamparina cria suas próprias ondas (A; SILVA, 2009).

A partir dessas duas teorias muitos cientistas fizeram seus experimentos defendendo uma delas até que no início do século XIX, com o advento das concepções de Thomas Young (1773-1829) e Augustin Fresnel (1788-1827) houve a definição de que a teoria ondulatória seria a correta (MOURA, 2016).

Mais tarde, em 1887, Heinrich Hertz descobriu o efeito fotoelétrico ao investigar a natureza eletromagnética da luz, durante seus estudos confirmou que a luz poderia gerar faíscas e chegou à conclusão que o fenômeno deveria ser devido apenas à luz ultravioleta (SANTOS, 2002b). O efeito fotoelétrico comprova que na verdade a luz não é nem onda, nem partícula e sim ambos.

Finalmente, em 1905, Einstein elabora uma explicação para o efeito fotoelétrico e em 1921 ganha o prêmio Nobel para física devido a tal feito.

De acordo com sua teoria, um quantum de luz transfere toda a sua energia a um único elétron, independentemente da existência de outros quanta de luz. Tendo em conta que um elétron ejetado do interior do corpo perde energia até atingir a superfície, Einstein propôs a seguinte equação, que relaciona a energia do elétron ejetado (E) na superfície, à frequência da luz incidente (ν) e à função trabalho do metal (ϕ), que é a energia necessária para escapar do material (SANTOS, 2002a)

Essa teoria de Einstein deu origem a Equação (2.1), e muito utilizada até os dias atuais.

$$E = h.\nu - \phi \quad (2.1)$$

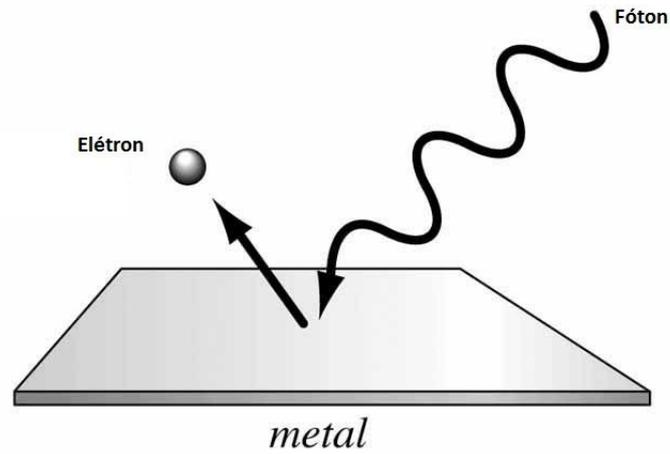
Em que h representa a constante de Plank ($h = 6,57 \times 10^{-27} \text{ erg.s.}$)

Em suma, o efeito fotoelétrico ocorre quando a luz ultravioleta incide em um metal provocando que elétrons sejam ejetados da superfície metálica. (MAHON, 2011). Na Figura 5 está apresentada uma representação desse fenômeno físico.

Nos metais, quando os átomos se ligam, possuem em sua estrutura física o chamado mar de elétrons livres, na Figura 6 pode ser visualizada essa estrutura, esses são os elétrons que saltam da superfície do metal no efeito fotoelétrico.

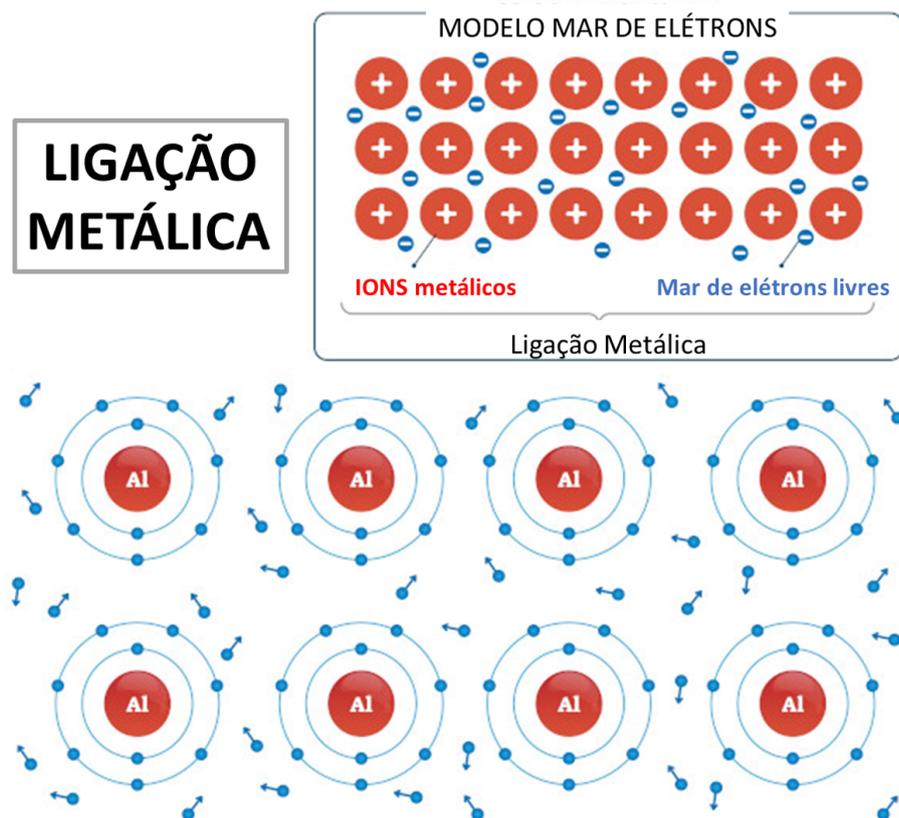
Esse fenômeno é fundamental para que as células fotovoltaicas possam ser utilizadas para a geração de energia elétrica. Esses componentes são apresentados na próxima seção.

Figura 5 – Representação do Efeito Fotoelétrico



Fonte: SILVA (2021)

Figura 6 – Esquema representativo de um sistema com ligação metálica.



Fonte: Adaptado de (LIGAÇÕES..., 2020)

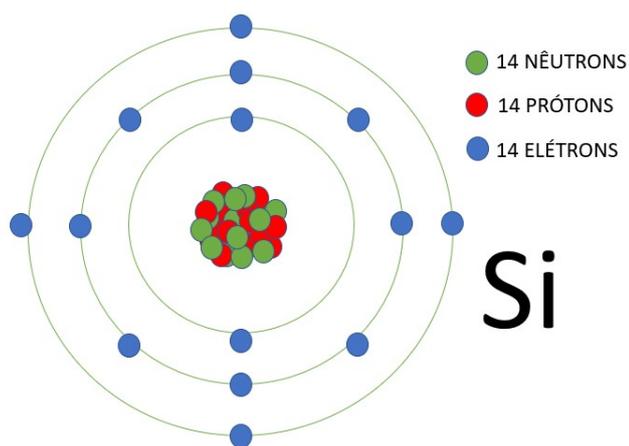
2.1.1 Célula fotovoltaica

Após as descobertas científicas relatadas no Subcapítulo anterior, "[...]em 1956 foram construídas as primeiras células fotovoltaicas industriais."(NASCIMENTO, 2004).

No princípio essas células possuíam um custo muito elevado para utilizações hoje consideradas usuais como em domicílios, empresas e iluminação pública. Ademais, as células principiantes possuíam um baixo rendimento, cerca de 1%. Por esses motivos, esses equipamentos eram, em sua maioria, utilizados em satélites espaciais (NASCIMENTO, 2004). Atualmente, segundo Systems (2020), em laboratório, as células fotovoltaicas podem chegar a uma eficiência de 26,7% como é o caso da célula de silício monocristalino. O estudo ainda indica que, em laboratório, uma alta concentração de células multi-junção podem chegar a até 47,1% de eficiência.

As células fotovoltaicas são feitas de materiais semi-condutores, a matéria mais utilizada atualmente é o silício. Na Figura 7 pode ser visualizado uma representação do átomo de silício, é possível perceber que o átomo possui quatro elétrons de valência, ou seja, quatro elétrons na última camada.

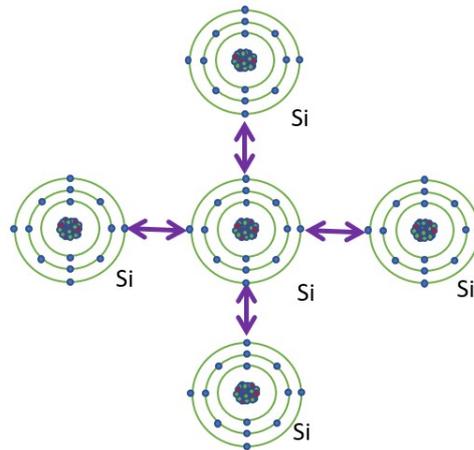
Figura 7 – Representação do átomo de silício



Fonte: Elaboração própria.

Em geral, os átomos tendem a buscar estabilidade e para isso se ligam com outros átomos para atingir oito elétrons na camada de valência. Por essa característica, o silício tende a se ligar com outros quatro átomos de silício formando uma estrutura cristalina. Na Figura 8 pode ser visualizada a representação da ligação de um átomo de silício.

Figura 8 – Representação da ligação de silício



Fonte: Elaboração própria.

"Uma célula fotovoltaica constituída por cristais de silício puro não produziria energia elétrica. Os elétrons passariam para a banda de condução mas acabariam por se recombinar com as lacunas, não dando origem a qualquer corrente elétrica." (CASTRO, 2002).

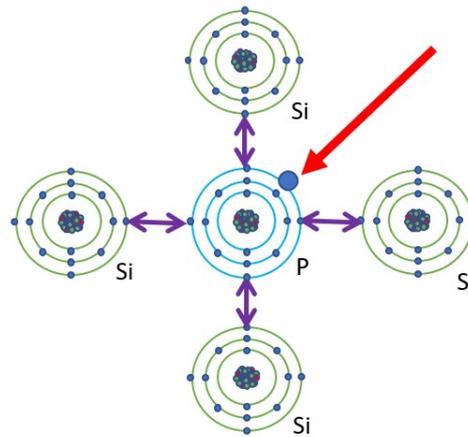
Portanto, para construir uma célula fotovoltaica funcional o material semiconductor deve passar por um processo chamado de dopagem. A dopagem é constituída pela alteração da estrutura cristalina formada pelos átomos de silício onde, ao invés de manter um átomo de silício no centro da estrutura, o qual possui quatro elétrons de valência, coloca-se um átomo que possui três ou cinco elétrons de valência.

Geralmente, faz-se a dopagem do silício com o boro e com o fósforo que respectivamente, possuem três e cinco elétrons de valência.

Na Figura 9 pode-se visualizar a dopagem do átomo de silício utilizando o fósforo. Como pode-se observar, pelo fato de o fósforo possuir cinco elétrons de valência, existe um elétron livre nessa estrutura que pode se movimentar livremente. Quando uma estrutura cristalina de silício possui alguns desses átomos de fósforo, forma-se a chamada região tipo

N, que possui um excesso de cargas negativas. "A razão entre átomos de fósforo e de silício é próxima de 1 para 1.000."(CASTRO, 2002).

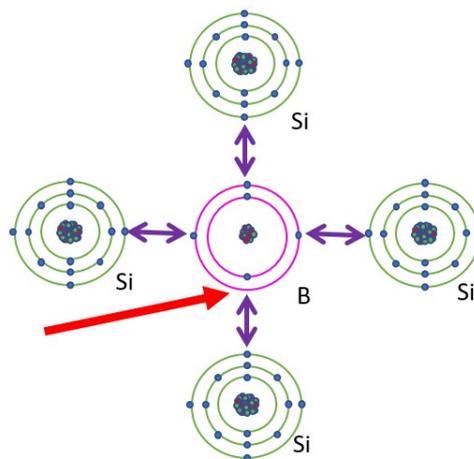
Figura 9 – Representação da dopagem do silício com fósforo



Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma, na Figura 10, pode-se verificar a dopagem do átomo de silício utilizando o boro. O átomo de boro possui três elétrons na camada de valência e portanto, ao se ligar com quatro átomos de silício, uma das ligações covalentes existentes terá apenas um elétron ao invés de dois elétrons. Isso resulta em uma lacuna que, pela falta de elétron, possui um excesso de carga positiva. Quando essa estrutura é adicionada a um arranjo cristalino de silício é chamado de região tipo P. "A razão entre átomos de boro e átomos de silício é normalmente da ordem de 1 para 10 milhões."(CASTRO, 2002).

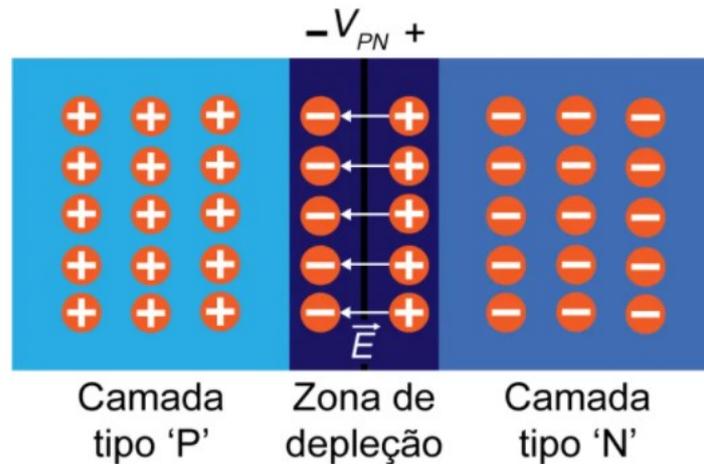
Figura 10 – Representação da dopagem do silício com boro



Fonte: Elaboração própria.

Quando realiza-se a dopagem do silício com o boro e com o fósforo, tem-se uma região tipo P e uma região tipo N na mesma estrutura. Dessa forma, as cargas positivas e cargas negativas tendem a se atrair. Quando as regiões P e N se encontram, surge a chamada junção P-N. Na Figura 11 pode ser visualizada uma junção P-N.

Figura 11 – Representação de uma junção P-N



Fonte: MORAES (2020)

Na zona de depleção representada na Figura 11 a união entre as lacunas e os elétrons é tão forte a ponto de impedir o restante dos elétrons e lacunas excedentes de se encontrarem apesar da atração. Entretanto, quando se fecha um circuito entre a região P e a região N, tem-se o fluxo dos elétrons causando uma corrente elétrica e esse é o princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.

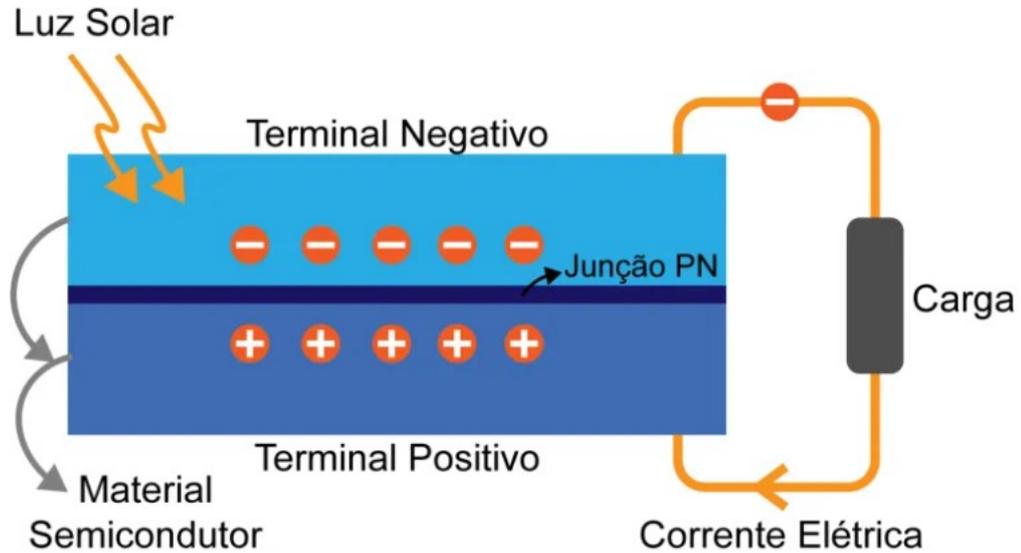
Nas células fotovoltaicas, a energia proveniente do Sol é responsável pela excitação dos elétrons que, em circuito fechado se movimentam gerando uma corrente elétrica. Uma representação desse processo pode ser vista na Figura 12.

Na próxima seção está apresentada a estruturação de uma célula fotovoltaica utilizada para geração a partir de luz solar.

2.1.1.1 Estrutura e associação de uma Célula Fotovoltaica

O material semiconductor dopado é o principal elemento de uma célula fotovoltaica, porém, não é o único. Também são instalados filmes anti-reflexo nessas células que permitem uma maior absorção da luz proveniente do Sol. Esses filmes impedem a reflexão em cerca de 95 podendo chegar até cerca de 98% (CASTRO, 2002).

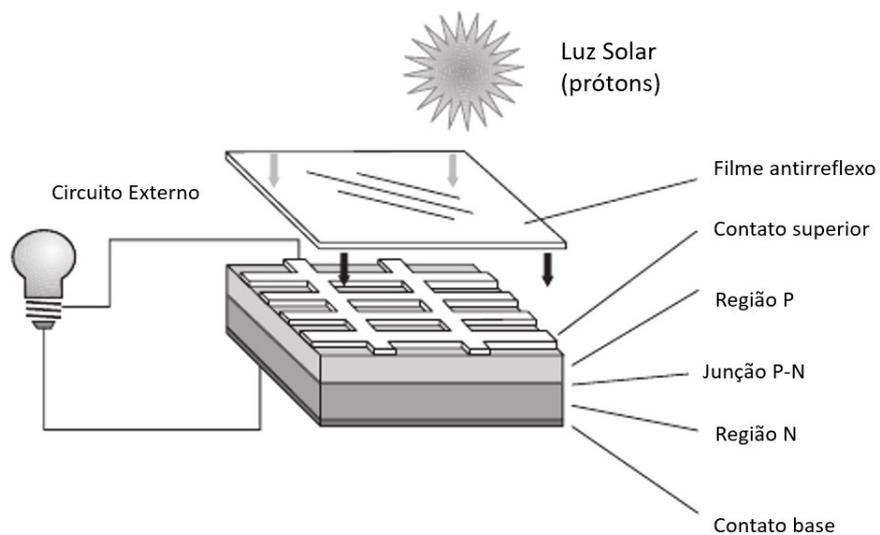
Figura 12 – Representação do princípio de funcionamento de uma célula fotovoltaica.



Fonte: MORAES(2020)

Além disso, também são necessários os contatos. Na parte ligada à região N, tem-se o contato negativo em forma de grelha e ligada à região P, tem-se o contato positivo. Na Figura 13 está representada a estrutura de uma célula fotovoltaica.

Figura 13 – Representação da estrutura de uma célula fotovoltaica

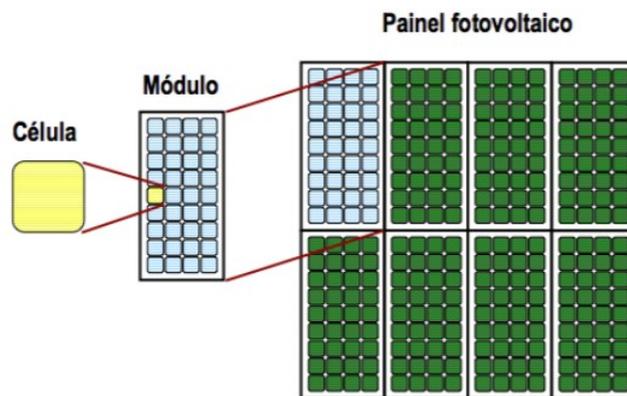


Fonte: Adaptado de JABORANDI (2012)

Como pode-se visualizar na Figura 13 as regiões P e N não possuem o mesmo tamanho. Segundo Castro (2002) a camada tipo N possui cerca de 300 nm enquanto a camada tipo P possui cerca de 250.000 nm.

Em geral, as células fotovoltaicas possuem uma potência elétrica máxima de 3 W e uma tensão elétrica de cerca de 0,5 V o que é insuficiente para a maior parte das utilizações da eletricidade atualmente. Portanto, essas células são associadas formando módulos fotovoltaicos e estes podem ser associados formando os painéis fotovoltaicos. Essas associações podem ser melhor visualizadas na Figura 14.

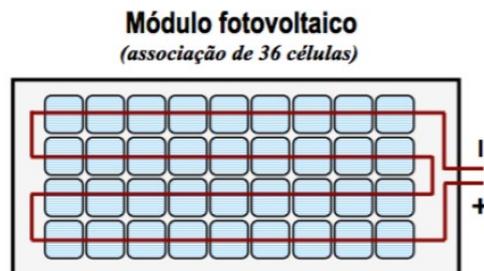
Figura 14 – Associações de células e módulos fotovoltaicos



Fonte: (CARNEIRO, 2010)

Na Figura 15 está apresentada a associação de células fotovoltaicas em série, formando um módulo fotovoltaico.

Figura 15 – Associações de células fotovoltaicas em série



Fonte: (CARNEIRO, 2010)

Após a apresentação da estrutura das células fotovoltaicas são apresentadas na próxima seção algumas tecnologias utilizadas na construção desses dispositivos.

2.1.1.2 Tecnologias Células Fotovoltaicas

- **Silício Cristalino**

O silício cristalino é atualmente o material mais utilizado na fabricação das células fotovoltaicas tendo cerca de 80% do mercado atual (JOYCE, 2011). Dentro da gama dos silícios cristalinos, as células podem ser feitas através do silício monocristalino e policristalino também chamado de multicristalino.

Para a obtenção do silício monocristalino, o cristal pode passar por dois processos diferentes, o processo de Czochralski ou o processo de zona flutuante. O segundo processo necessita de um cristal de silício de extrema pureza e portanto se torna mais caro e produz células um pouco mais eficientes. A eficiência padrão das células de silício Czochralski vai de 15 até 18% (GREENPRO, 2004).

As células monocristalinas podem ser encontradas em formato redondo, semi quadrado ou quadrado. "As células redondas são mais baratas do que as semi quadradas ou as quadradas, uma vez que se perde menos material durante a sua produção. No entanto, raramente são utilizadas em módulos standards devido à sua exploração ineficaz do espaço."(GREENPRO, 2004).

Para a produção das células de silício policristalino, é utilizado o processo de fundição de lingotes. Essas células possuem uma eficiência de 13-15 % com a película antirreflexo e possuem formato quadrado.

- **Películas Finas**

Esse tipo de célula fotovoltaica é baseado no depósito de finas camadas de material semicondutor dopado acima de superfícies como vidro, metal, aço e plástico. Essa técnica permite um gasto menor de matéria prima semicondutora diminuindo os custos de fabricação. Porém, também possuem uma menor eficiência frente às células de silício cristalino com cerca de 5 até 11% dependendo do material. Atualmente as células feitas de películas finas representam entre 15 e 20% do mercado (JOYCE, 2011).

O silício amorfo é um dos materiais utilizado para fabricação das células de películas finas. Por sua peculiaridade de formar uma rede cristalina irregular, o silício amorfo

acaba sendo contaminado facilmente por outros tipos de átomos ocasionando uma menor eficiência de cerca de 5 até 8% em condições estáveis (GREENPRO, 2004).

- **Multijunções**

Esse tipo de célula fotovoltaica utiliza mais de uma junção PN. Arsênio, Gálio, Índio e Fósforo são os materiais que mais se destacam na fabricação dessas células. A mistura dos elementos tem como objetivo elevar a absorção da radiação solar fazendo com que cada junção diferente realize a absorção e conversão de uma parte do espectro da radiação solar (JOYCE, 2011).

- **Concentração Fotovoltaica**

A concentração fotovoltaica se baseia na utilização de lentes e espelhos para aumentar a absorção das células fotovoltaicas. Esse tipo de estrutura aliada a células de boa eficiência pode montar um conjunto com eficiência superior a 25%. (JOYCE, 2010).

As células fotovoltaicas são capazes de converter a energia solar em energia elétrica. Para compreender a respeito de da energia emitida pelo sol que é relevante para as células fotovoltaicas, na próxima seção estão apresentadas a irradiação solar ou insolação.

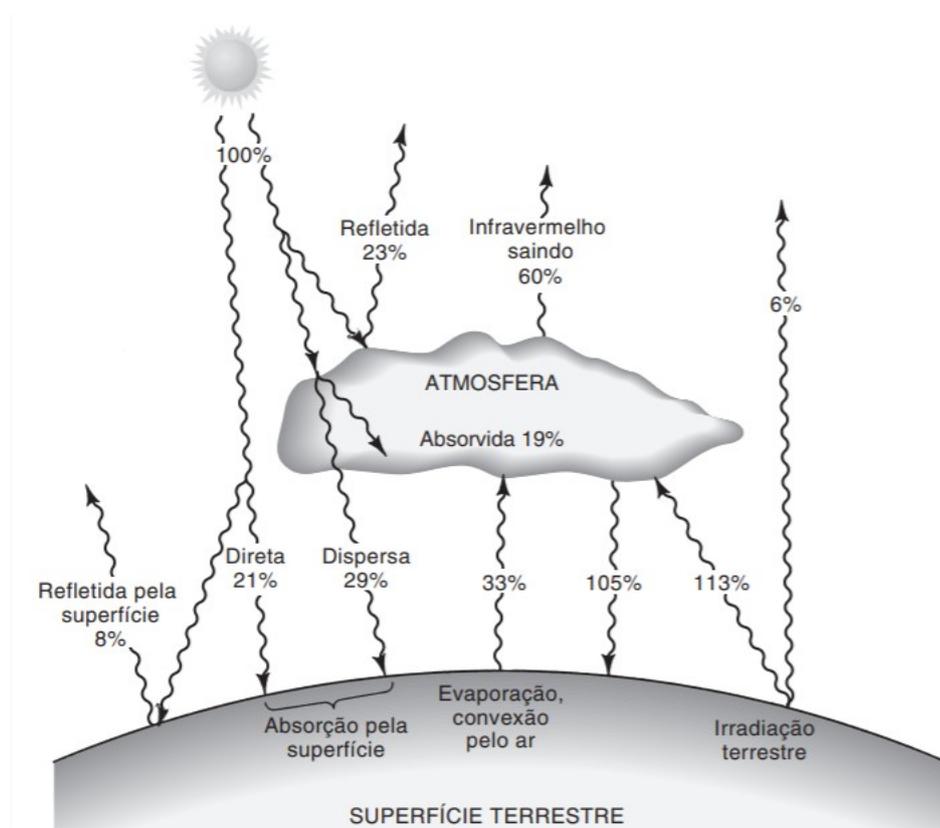
2.1.2 Irradiação ou insolação

Segundo Plana-Fattori e Ceballos (2015) a irradiação é "quantidade de energia radiante que atravessa uma superfície durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área desta." A palavra insolação vem do termo inglês *insolation*, o conceito de *insolation* corresponde ao conceito de irradiação, porém, a palavra insolação é muito utilizada como tradução direta da palavra inglesa na literatura.

Aproximadamente 19% da radiação recebida pela atmosfera do planeta são absorvidos pelas nuvens e por outros gases, e 31% são refletidos de volta para o espaço pelas nuvens e pela atmosfera [...]. Os 50% restantes da energia solar incidente chegam à superfície da Terra e são quase completamente absorvidos (REIS; HINRICHS; KLEINBACH, 2014).

Na Figura 16 pode-se visualizar um esquema da radiação solar incidente.

Figura 16 – Distribuição da radiação solar



Fonte: REIS; HINRICHS; KLEINBACH(2014)

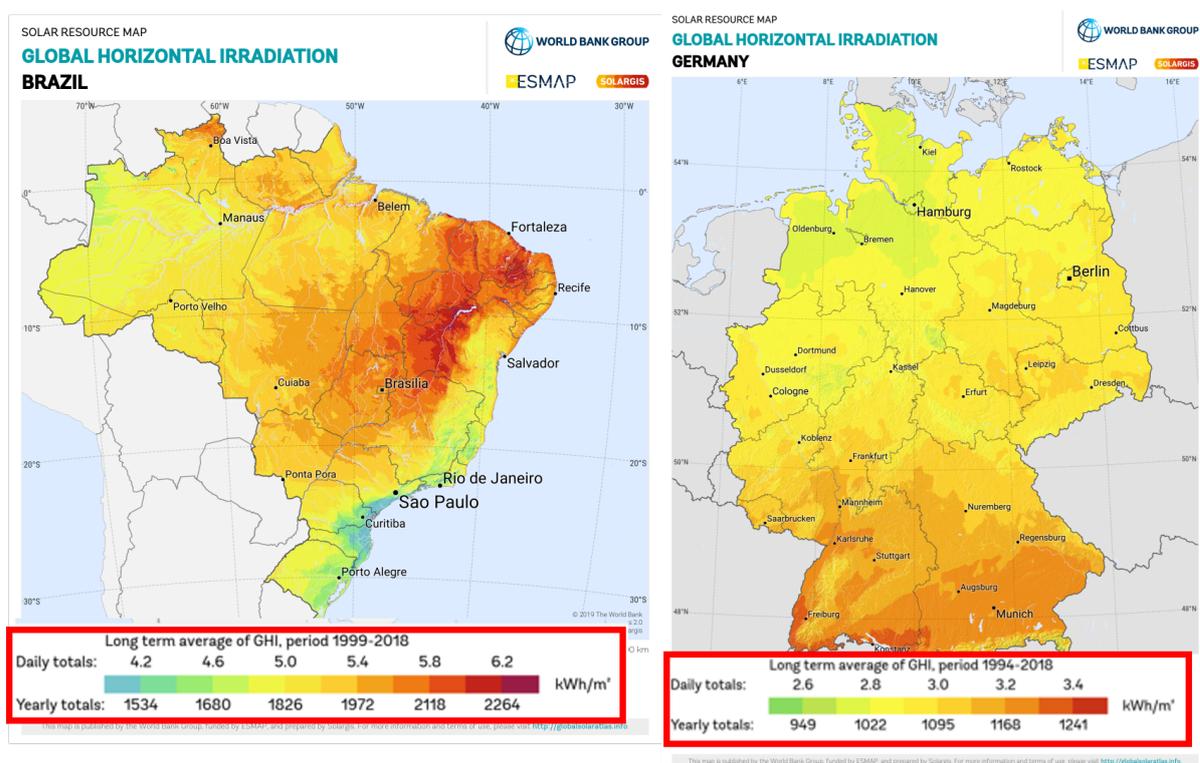
A irradiação direta é aquela que atinge a superfície terrestre diretamente do Sol enquanto a irradiação dispersa ou difusa é aquela que atinge a superfície terrestre após ser espalhada pela atmosfera, como mostra a Figura 16.

Os sistemas fotovoltaicos podem transformar em energia elétrica tanto a irradiação direta como a irradiação dispersa porém a irradiação direta é mais relevante (GLUCHY; KURZ; TRZMIEL, 2014).

A Alemanha está entre os quatro países que mais utilizam sistemas fotovoltaicos como forma de geração de energia elétrica no mundo, juntamente com a Espanha, Estados Unidos e Japão. Em 2007 esses países possuíam cerca de 90% dos sistemas fotovoltaicos do planeta.

A Figura 17 mostra uma comparação entre a irradiação global horizontal entre o Brasil e a Alemanha. A irradiação global horizontal é a soma da irradiação direta e da irradiação difusa.

Figura 17 – Comparação da Irradiação global horizontal entre Brasil e Alemanha



Fonte: SOLARGIS (2019)

Observando os dados apresentados na Figura 17 nota-se que mesmo as regiões de menor irradiação global horizontal recebem mais irradiação do que as regiões de maiores valores de irradiação global total na Alemanha. O que apenas reforça o fato de que o Brasil possui um grande potencial a ser explorado na utilização de sistemas fotovoltaicos.

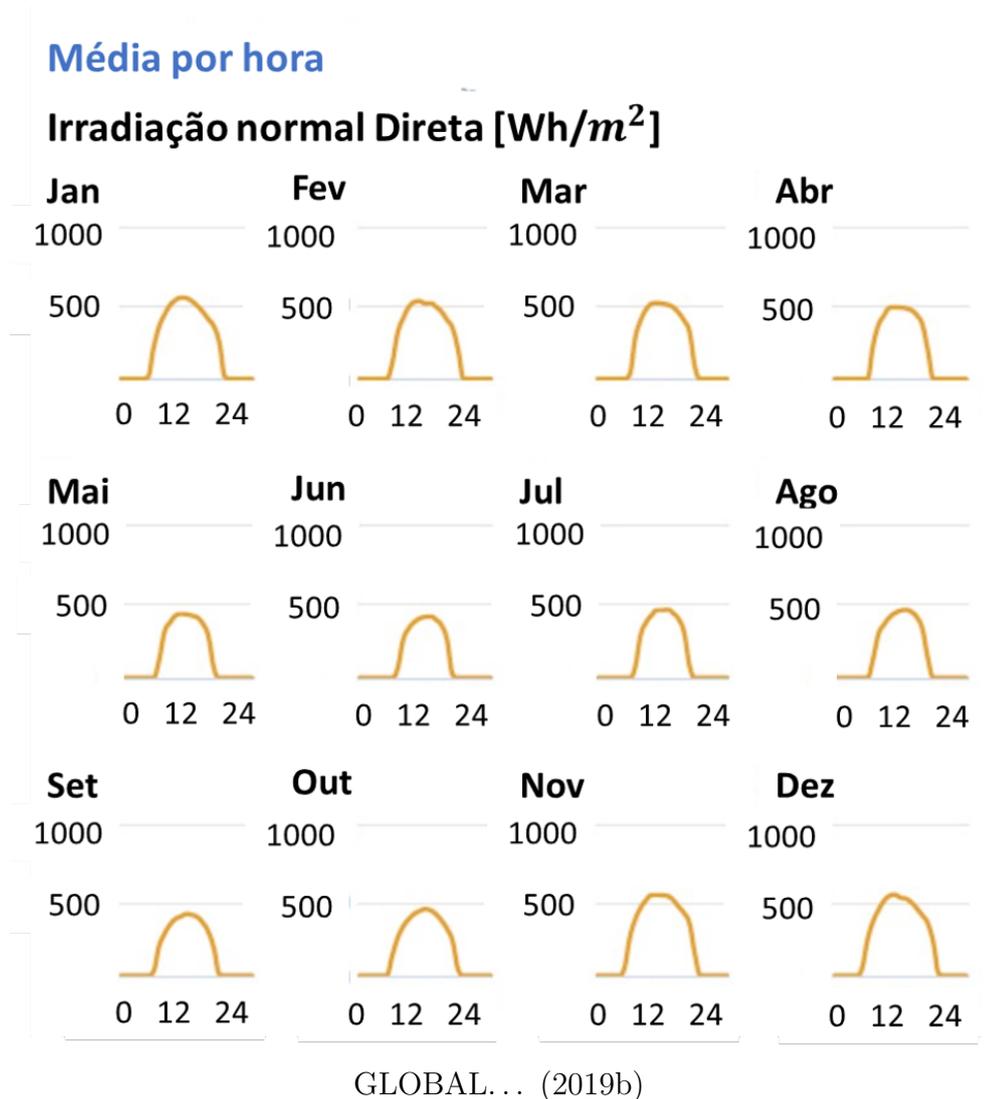
Ao verificar os dados do Rio Grande do Sul, segundo (GLOBAL... , 2019a), a média diária de irradiação global horizontal no estado é de 4,20 até 5,02 kWh/m² que é maior do que o maior valor dessa irradiação encontrada na Alemanha.

Também segundo dados da *globalsolaratlas*, na cidade de Porto Alegre - RS a média anual de irradiação global horizontal é maior do que a maior média encontrada na Alemanha, sendo de 1674 kWh/m².

Na Figura 18 estão apresentados os valores de irradiação direta média em cada horário do dia para cada mês. Como pode-se notar, a irradiação muda com o horário do dia e também com os meses do ano.

Além da irradiação também é importante para esse trabalho entender alguns

Figura 18 – Medida da Irradiação por hora por mês em Porto Alegre - RS



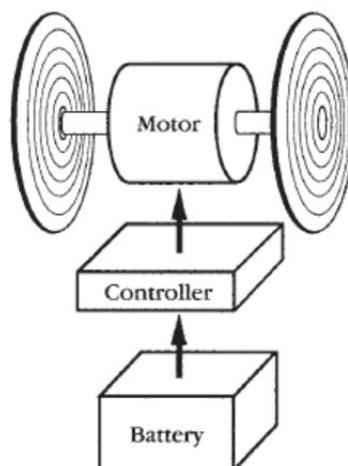
conceitos acerca de veículos elétricos que são apresentados nas seções seguintes.

2.1.3 Veículo elétrico

Na França, Estados Unidos e Reino Unido, por volta de 1880 foram produzidos os primeiros carros elétricos, cerca de 20 anos após o surgimento da primeira bateria, constituída de chumbo e ácido (BARAN; LEGEY, 2011).

Segundo Leitman e Brant (2008) os principais componentes de um veículo elétrico são o motor, a bateria e o controlador. A Figura 19 mostra um diagrama representativo de um veículo elétrico.

Figura 19 – Esquemático dos componentes de um veículo elétrico



Fonte: LEITMAN; BRANT(2008)

Dentre os componentes apresentados na Figura 19 o motor elétrico é o elemento principal, na seção seguinte são apresentados mais detalhes sobre ele.

2.1.3.1 Motor elétrico

O motor elétrico é uma máquina elétrica, "[...]é amplamente usado em indústrias e residências, sendo alimentado por meio de energia elétrica, e disponibiliza energia mecânica, o que possibilita o acionamento de inúmeros outros dispositivos."(SANTOS, 2020).

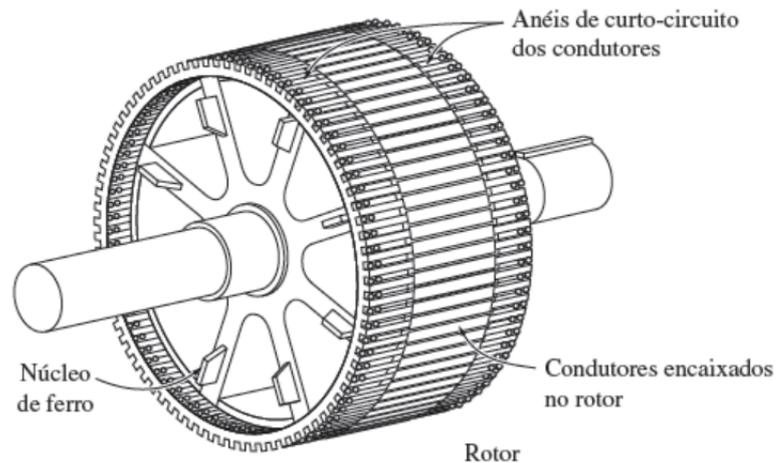
Os motores elétricos, podem ser síncronos ou assíncronos, monofásicos ou trifásico, alimentados por corrente elétrica contínua ou alternada. Para a aplicação em veículos elétricos, o motor mais utilizado é o motor assíncrono, também chamado de motor de indução, trifásico e alimentado por corrente elétrica alternada.

Os motores possuem duas peças principais, o rotor, peça móvel, e o estator, peça fixa. Nos motores de indução o estator é carregado eletricamente por corrente alternada trifásica e a partir disso, surge um campo magnético no estator. Através da indução eletromagnética surge uma tensão no rotor que gera uma corrente no rotor e um campo magnético no rotor. A interação entre os campos magnéticos do rotor e do estator é o que faz o rotor ganhar giro e velocidade.

As Figuras 20 e 21 mostram respectivamente a estrutura de um rotor gaiola de esquilo e um estator de dois polos, ambos de um motor de indução.

Os polos das máquinas elétricas são caracterizados por bobinas de fios enrolados em uma peça de ferro. Os polos são sempre números pares. Nas Figuras 22 e 23 estão apresentados representações de um estator com dois polos e com quatro polos respectivamente.

Figura 20 – Estrutura de um rotor tipo gaiola de esquilo



Fonte: CHAPMAN(2013)

Figura 21 – Estrutura de um estator de um motor de indução



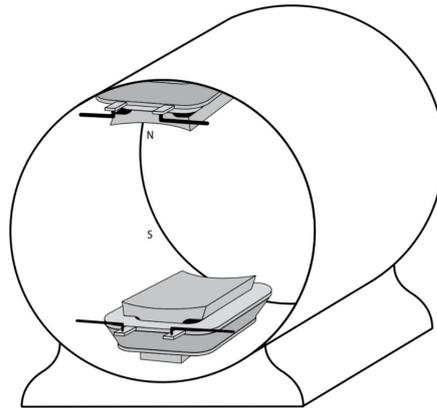
Fonte: CHAPMAN(2013)

A velocidade de giro do motor depende do número de polos do estator e da frequência elétrica da rede de alimentação. Pode ser calculada a partir da Equação (2.2).

$$n_m = \frac{120 * P}{f} \quad (2.2)$$

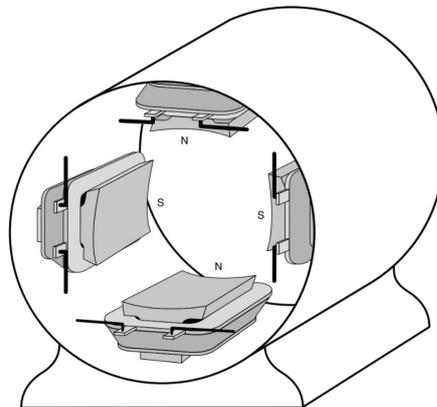
Onde P representa o número de polos e f representa a frequência da rede de alimentação em *Hertz*.

Figura 22 – Estrutura de um estator de dois polos.



Fonte: HAND(2015)

Figura 23 – Estrutura de um estator de quatro polos.



Fonte: HAND(2015)

Além do motor elétrico, outro componente crucial quando se trata de veículos elétricos é o inversor, esse dispositivo tem como missão transformar a corrente elétrica contínua oriunda das baterias para corrente elétrica alternada para alimentar o motor elétrico. Esse elemento é explorado na seção seguinte.

2.1.3.2 Inversor

O inversor realiza a conversão de corrente contínua da bateria para corrente alternada no motor elétrico. Também realiza a conversão oposta no momento do carregamento das baterias. Esse tipo de inversor é chamado de bidirecional.

Outra utilização dos inversores é para controle de velocidade do motor que é função da frequência e da amplitude da tensão aplicada aos terminais do motor (FERNANDES, 2015).

Na próxima seção estão apresentadas mais informações a respeito do controlador, que assim como o inversor, faz parte dos principais elementos de um veículo elétrico.

2.1.3.3 Controlador

O controlador é responsável por administrar o fluxo de energia das baterias, ele reduz ou aumenta a energia passada para o inversor e motor elétrico dependendo da força aplicada no pedal do veículo.

O controlador é composto de um microcontrolador e outros componentes elétricos e sensores que são capazes de regular esse fluxo de energia. Além disso eles são responsáveis também pelos freios ABS e podem ser utilizados para regulagem dos assentos. Os controladores são muito utilizados para permitir a freagem regenerativa.

Além do motor elétrico, inversor e o controlador, outro elemento de suma importância para que se possam haver veículos elétrico atualmente são as baterias. Diversos estudos estão sendo feitos com o objetivo de melhorar a armazenagem das baterias, esse componente é apresentado na seção seguinte.

2.1.4 Baterias

"Uma bateria é um acumulador, que transforma energia química em energia elétrica e vice-versa, normalmente por meio de uma reação de oxirredução."(CASTRO; BARROS; VEIGA, 2013).

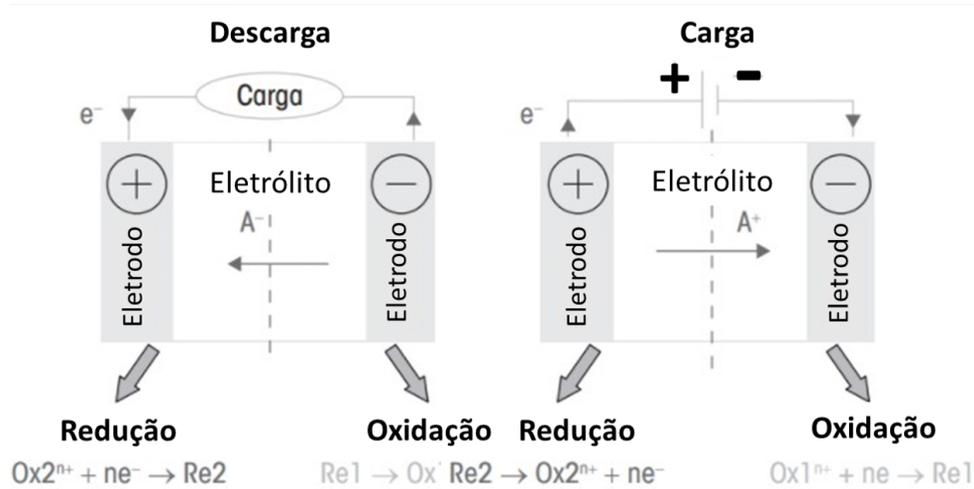
Em veículos elétricos, a bateria tem um papel fundamental pois é a responsável por fornecer energia elétrica para o funcionamento do motor e conseqüentemente dar aceleração e velocidade ao veículo.

As baterias são vastamente utilizadas nos dias atuais, são encarregadas de fornecer e armazenar energia para diversos equipamentos como celulares, *laptops*, fones de ouvido e até carros elétricos.

Esses dispositivos possuem três principais componentes, o eletrodo positivo, eletrodo negativo e o eletrólito. O eletrólito é um líquido químico que pode ser vários compostos diferentes como o chumbo-ácido, o níquel-cádmio e o lítio-ferro. Na Figura 24

pode ser visualizado um esquema que mostra esses componentes e também as formas de operação.

Figura 24 – Esquemático dos componentes e operação de uma bateria



Ao observar a Figura 24 é possível notar que quando o fluxo de elétrons vai do terminal positivo para o negativo ocorre a descarga e quando os elétrons fluem do terminal negativo para o positivo ocorre a carga.

Existem dois tipos de baterias, as primárias e as secundárias. As baterias primárias podem ser utilizadas apenas uma vez, ou seja, não são capazes de serem recarregadas. As baterias secundárias podem ser recarregadas e portanto são mais relevantes para a utilização em veículos elétricos.

Segundo Santos (2020) tipos de materiais secundárias mais comuns são as de níquel-cádmio (NiCd), níquel-zinco (NiZn), níquel-hidreto metálico (NiMH) e íon-lítio (Li-ion).

Conforme Manzetti e Mariasiu (2015) no mercado de veículos elétricos, as baterias mais utilizadas e comercializadas são as seguintes:

- Bateria de Chumbo Ácido (*Pb-acid*)
- Bateria de Níquel Cadmio (*NiCd*)
- Bateria de Níquel-Hidreto Metálico (*NiMH*)

- Bateria de Íon de Lítio (*Li-ion*)
- Bateria de Polímero de Lítio (*Li-PO*)
- Bateria de Níquel Sódio (*NaNiCl*)

A Tabela 1 apresenta dados técnicos referentes às baterias listadas como a tecnologia da bateria, capacidade de armazenamento, a eficiência que representa a energia recebida pela energia utilizada, a vida útil, número de ciclos e o custo por energia.

Tabela 1 – Propriedades dos tipos de baterias

Tipo de Bateria	Capacidade máxima [MWh]	Eficiência [%]	Vida Útil [anos]	Ciclos	Custo da energia [US\$/kWh]
Chumbo Ácido	150	70-85	5-15	500-1000	150-450
Níquel Cadmio	30	60-70	10-20	1500-2500	600-900
Níquel-Hidreto Metálico	50	60-75	10-15	1500-1800	700-950
Íon de Lítio	30	95-98	10-15	1500-3500	230-450
Polímero de Lítio	30	95-98	10-15	1200-3500	250-500
Níquel Sódio	200	86-88	12-15	2500-3000	200-400

Fonte: Adaptado de (MANZETTI; MARIASIU, 2015)

As baterias de íons de lítio são as mais utilizadas em veículos elétricos (ICLO-DEAN *et al.*, 2017). Na seção seguinte podem ser vistas informações acerca de algumas infraestruturas de carregamento das baterias dos veículos elétricos.

2.1.5 Infraestruturas de recarga para veículos elétricos

As formas de recarga de veículos elétricos, podem ser categorizadas em três principais tipos e tecnologias. Carregamento *plug-in*, carregamento sem fio e carregamento pantográfico (BLOOMBERG... , 2021). Na Figura 25 podem ser vistas as representações de cada tipo citado.

A forma mais comum de recarga encontrada atualmente é a recarga *plug-in* (GÖNÜL; DUMAN; GÜLER, 2021). Também é a forma mais barata de se recarregar a bateria do veículo. O carregamento *plug-in*, pode ser trifásico ou monofásico, (BOON-RAKSA *et al.*, 2019), a recarga ocorre via um conector que é ligado ao veículo fisicamente e

Figura 25 – Formas de recargas de veículos elétricos



Fonte: Adaptado de (GÖNÜL; DUMAN; GÜLER, 2021).

removido ao final da recarga. Existem três modalidades, o carregamento lento, geralmente com potência de 15 até 22 kW, que pode levar até 10 horas, a recarga rápida, com potência de 22 até 50 kW e a recarga acelerada com potência de 50 até 120 kW, essas duas últimas possuem um tempo de recarga de 2 até 6 horas (BLOOMBERG... , 2021).

O carregamento sem fio, também conhecido por, carregamento por indução. Existem dois tipos, o dinâmico e o estacionário. O carregamento sem fio dinâmico ainda está em fase de testes e não existe comercialmente. Enquanto o carregamento sem fio estacionário já está disponível comercialmente com potência de até 200 kW (BLOOMBERG... , 2021). O carregamento ocorre via indução, transferência de potência via indução ocorre através de um campo magnético variante gerado em uma bobina, no veículo deve existir outra bobina onde é induzido outro campo magnético e corrente elétrica que é capaz de carregar as baterias.

Para o carregamento pantográfico, o qual é utilizado apenas em ônibus elétricos, segundo Vector (2020), é necessário que haja uma estrutura na parte superior do veículo que se move até a infraestrutura de recarga, o peso e tamanho dessa estrutura impede que esse tipo de carregamento seja utilizado em veículos de pequeno porte. Também existe o carregamento pantográfico invertido, onde a estrutura que se move está na infraestrutura de recarga e não no veículo. A grande vantagem desse tipo de carregamento é velocidade, segundo ABB (2021) o carregamento pantográfico pode levar minutos.

Atualmente, a China possui mais da metade dos carregadores lentos do mundo. Com cerca de 500.000 infraestruturas de recarga públicas (CAZZOLA *et al.*, 2016)

2.1.6 Sistema Tarifário de Energia Elétrica

Para melhor compreensão desse trabalho, é importante a aquisição de alguns conhecimentos acerca da forma como são aplicadas as tarifas de energia elétrica no Brasil.

O preço que se paga pela energia elétrica no Brasil depende do grupo tarifário. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em ANEEL (2020b) os grupos tarifários são formados de acordo com o consumo e a demanda de potência ativa. Existem os grupos A e B e também demais acessantes. As tarifas podem ser monômias ou binômias. Nas tarifas monômias, é cobrado apenas pelo consumo, já as tarifas binômias, o consumo e a demanda são cobrados.

No grupo A, encaixam-se as unidades consumidoras de alta tensão, média tensão e sistemas subterrâneos. Dentro da unidade consumidora de alta tensão existem 3 subgrupos, A1, com tensão de fornecimento igual ou superior a 230kV, A2, com tensão de fornecimento entre 88kV e 138kV e A3, com tensão de fornecimento de 69kV. Para a unidade de média tensão os subgrupos são A3a, com tensão de fornecimento de 30kV e 44kV, e A4, com tensão de fornecimento entre 2,3kV e 25kV, e para os sistemas subterrâneos existe o subgrupo AS.

Segundo EPE *et al.* (2020), para os carregadores utilizados em ônibus elétricos, o consumo pode ser enquadrado no subgrupo A4, que se trata do grupo de alta tensão que varia entre 2,3 kV e 25 kV, conforme Resolução 414 da (ANEEL) 2010.

Para o grupo A, há duas modalidades tarifárias que apresentam tarifas personalizadas de consumo de energia e demanda de potência, ou seja, aplica-se a tarifa binômia. Nos contratos realizados com consumidores do grupo A, existe uma demanda contratada, a qual deve ser paga independente da utilização total ou não. A demanda contratada serve para a distribuidora de energia elétrica saber a necessidade de demanda para a unidade consumidora.

Segundo a resolução 414 da ANEEL, a medida da demanda ocorre em medições de 15 minutos. O maior valor médio medido dentro desse tempo é o valor de demanda considerado para esse período, o valor de demanda considerado na conta de energia do mês é o maior dos valores médios. Caso a demanda medida seja maior do que a demanda

contratada é aplicada uma multa onde é cobrado o valor ultrapassado vezes a tarifa da demanda duplicada.

Existe a modalidade horária azul e a modalidade horária verde, essas modalidades são consideradas horo-sazonais, ou seja, a tarifa se altera dependendo da época do ano e/ou horário do dia.

Observando a Figura 26, que representa a tabela de tarifa para o grupo A divulgado pela CEEE-Distribuição Equatorial Energia, é possível verificar que na modalidade tarifária azul, existem dois preços diferentes de demanda para ponta e fora de ponta, enquanto na modalidade verde existe um valor fixo para a demanda. Nota-se que o preço da demanda de ponta para a modalidade azul é mais alto do que para a modalidade verde, porém o preço da energia é mais baixo no horário de ponta comparado a modalidade verde. Isso indica que a contratação da modalidade tarifária azul, deve ser realizada quando se é necessário um grande consumo no horário de ponta.

A modalidade horária verde, por possuir um preço fixo da demanda e um preço mais baixo do consumo fora de ponta acaba incentivando o consumo de energia fora dos horários de maior demanda.

No grupo B, cuja tensão de fornecimento é inferior a 2,3kV, estão as unidades de baixa tensão onde está a classe residencial, subgrupo B1, a classe rural, subgrupo B2, as demais classes, subgrupo B3, e a iluminação pública, subgrupo B4.

Para o grupo B as modalidades tarifárias são a convencional monômnia e a horária branca. Na modalidade convencional monômnia a tarifa cobrada independe das horas de utilização e do dia. Já na modalidade horária branca, a tarifa muda dependendo dos postos tarifários.

Segundo ANEEL (2020a) os postos tarifários são definidos por distribuidora, os postos da CEEE distribuidora, que realiza a distribuição de energia elétrica na cidade de Porto Alegre, pode ser visualizado na Figura 27. Como padrão, o posto de ponta é um período de três horas consecutivas e aplicado apenas em dias úteis. O posto intermediário, utilizado apenas para o grupo B, são períodos que podem variar de uma até uma hora e meia, antes e depois do horário de ponta. Por fim o posto fora de ponta são as horas

Figura 26 – Tarifas de Energia Elétrica aplicáveis ao Grupo A - 2020

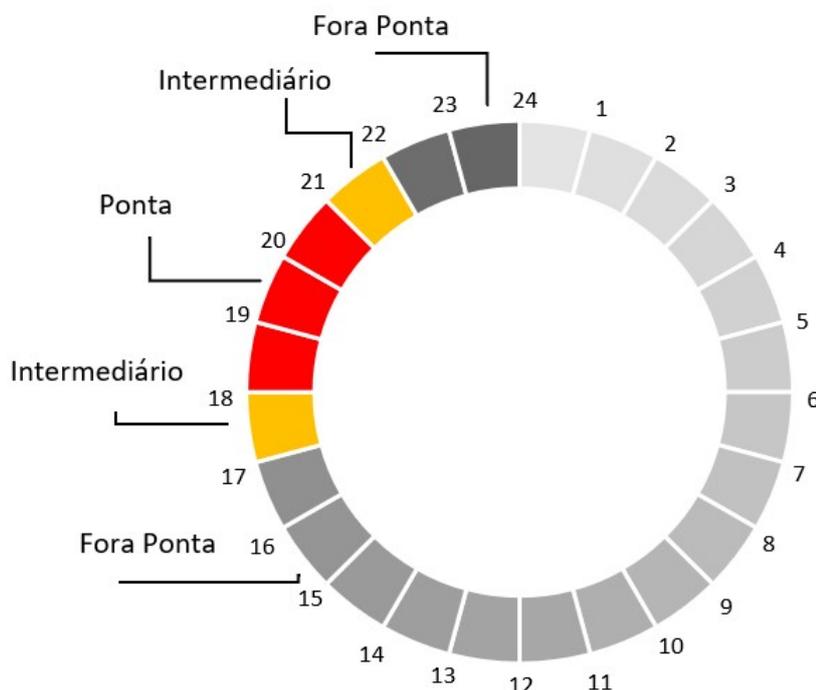
Tarifas de Energia Elétrica aplicáveis ao Grupo A - Em R\$ sem impostos						
			A2 (138 kV)	A3 (69 kV)	A4 (13,8/25 kV)	AS (220/217 V)
Modalidade Tarifária Horária Azul	Demanda Ponta	R\$/kW	18,84	18,47	45,72	59,54
	Demada Fora Ponta	R\$/kW	15,77	11,84	21,93	17,16
	Energia Ponta	R\$/kWh	0,48098	0,47924	0,4982	0,52302
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,325	0,32326	0,34222	0,36704
			A4 (13,8/25 kV)	AS (220/217 V)		
Modalidade Tarifária Horária Verde	Demanda	R\$/kW	21,93		17,16	
	Energia Ponta	R\$/kWh	1,61014		1,9716	
	Energia Fora Ponta	R\$/kWh	0,34222		0,36704	
Adicionais Sistema de Bandeiras Tarifárias						
Adicional Bandeira Amarela			0,01343 R\$/kWh			
Adicional Bandeira Vermelha - Patamar 1			0,04169 R\$/kWh			
Adicional Bandeira Vermelha - Patamar 2			0,06243 R\$/kWh			
Descontos Percentuais Aplicáveis ao Grupo A						
Classe		Demanda (kW)		Energia (kWh)		
Rural		6%		6%		
Serviço Público - Água, Esgoto e Saneamento		9%		9%		
Irrigante e Agricultor em horário especial (Art.53-L de REN 414)		-		70%		
Composição do Preço a ser Aplicado						
$Preço\ Final(R\$) = \frac{Preço\ Homologado(R\$)}{1 - PIS(\%) - COFINS(\%) - ICMS(\%)}$					Até 30/04/2021	
$Preço\ Final(R\$) = \frac{Preço\ Homologado(R\$)}{1 - PIS(\%) - COFINS(\%)}$					A partir de 01/05/2021	
Aliquotas de ICMS			VRERE - Valor de referência faturamento da energia reativa excedente por unidade registrada. Art. 96 e 97 da REN ANEEL 414/2010			
30%	Residencial (acima de 50kWh), Comercial, Poderes Públicos, Serviços Públicos, Rural (sem CPR)		0,26549			
17,50%	Industrial (reconhecido pela SEFAZ)					
12%	Residencial (até 50 kWh) Rural com CPR (sobre 100 kWh + diferimento)					

Fonte: Adaptado de (CEEE, 2020).

complementares aos postos de ponta e intermediários.

Além desses postos existe o horário especial, este pode ser utilizado por subclasses rurais irrigantes ou de agricultura. Segundo ANEEL (2020a), esse horário é um período de oito horas e meia que abrange a madrugada enquanto a energia elétrica consumida é

Figura 27 – Postos Tarifários CEEE-Distribuidora



* Finais de Semana e Feriados Nacionais: Aplica-se somente Horário Fora Ponta

Adaptado de Agência Nacional de Energia Elétrica.

destinada à irrigação ou agricultura. Esses consumidores recebem um desconto na tarifa de acordo com a região e o grupo tarifário.

2.1.7 Ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais

Para realizar a avaliação de viabilidade é utilizada a ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais desenvolvida pela EPE, portanto essa seção trata de apresentar a ferramenta e fornecer algumas explicações acerca da simulação.

A ferramenta utiliza uma modelagem *bottom-up* paramétrica.(EPE *et al.*, 2020). A estimativa *bottom-up*, também conhecida como ascendente, busca descrever e analisar os custos de cada etapa individual do projeto. Já a modelagem paramétrica é fortemente fundamentada nos dados informados pelo usuário. Essa estimativa é baseada em comparações de projetos e custos anteriores correlacionados ao projeto que se deseja estimar os custos.

Os dados necessários para a modelagem do problema junto ao *software* são: quantidade de ônibus na frota, distância média diária percorrida por veículo, dias de

operação, rendimento, preço do litro do diesel, preço de aquisição do ônibus, custo de manutenção e alguns outros dados à respeito das condições de financiamento. Para os ônibus elétricos também são necessários esses mesmos dados.

A ferramenta separa esses dados em alguns blocos com conjuntos de dados compatíveis. O primeiro bloco diz respeito aos dados de utilização onde são preenchidos a distância média anual em quilômetros por ano, dias de operação no ano e a quantidade de ônibus elétricos. Nesse bloco é calculada automaticamente a distância média diária em quilômetros por dia. O bloco de dados de utilização pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 – Bloco dados de utilização - ferramenta EPE

DADOS DE UTILIZAÇÃO	
Distância média anual [km/ano]	72842
Dias de operação/ano [dias/ano]	365
Distância diária média [km/dia]	200
Qtde. ônibus elétricos [unidade]	1320

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

O próximo parâmetro refere-se ao preço do diesel, sendo este informado na ferramenta conforme o respectivo estado. A ferramenta disponibiliza diversos valores médios de revenda de diesel por unidade federativa com base no ano de 2019 para serem consultados. A Figura 29 ilustra a tela onde o valor é informado. Cabe destacar que os preços disponibilizados baseiam-se nos preços médios disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

Também deve ser preenchido o bloco relativo aos custos com energia elétrica. Nesse bloco, deve ser dada a potência do carregador utilizado nos ônibus em quilowatts, a duração da recarga em horas e a tarifa de energia elétrica em reais por quilowatt-hora. Da mesma forma como no bloco referente ao preço do diesel, a ferramenta disponibiliza alguns valores de tarifas elétricas por distribuidoras e regiões para consultas baseadas no ano de 2018.

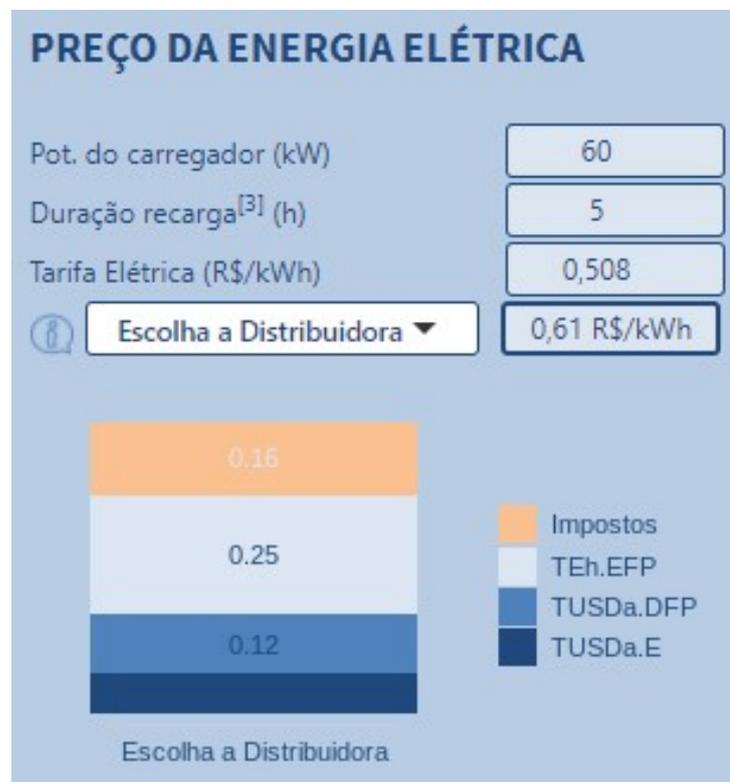
Na Figura 30 podem ser visualizados o bloco do preço da energia elétrica.

Figura 29 – Bloco preço do diesel - ferramenta EPE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Figura 30 – Bloco preço da energia elétrica - ferramenta EPE

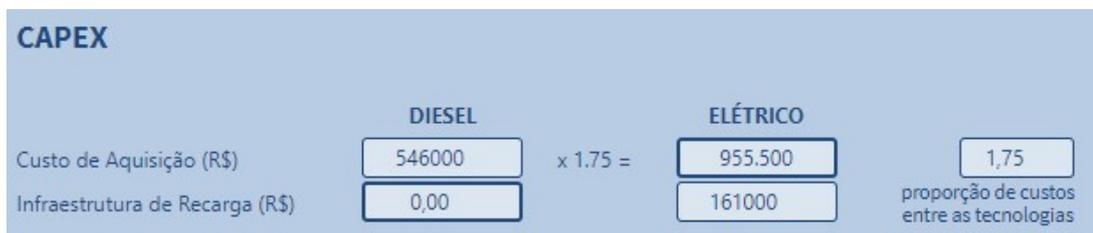


Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Além desses blocos também existem os blocos de aquisição chamado de CAPEX e o bloco de operação chamado de OPEX.

A sigla CAPEX vem do termo em inglês *Capital Expenditure* e significa Despesas de Capitais. Nesse bloco deve ser dado o preço de aquisição do ônibus diesel, o preço da infraestrutura de recarga, ambos em reais, e quantas vezes o preço do veículo diesel é mais barato do que o preço do veículo elétrico. Esse bloco pode ser visualizado na Figura 31.

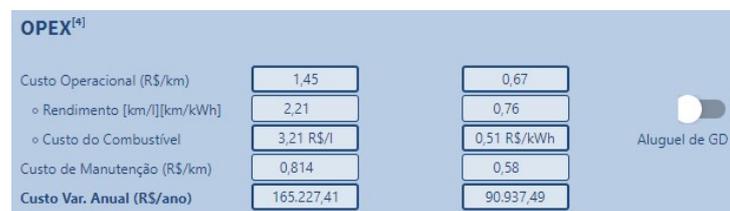
Figura 31 – Bloco CAPEX - ferramenta EPE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

A sigla OPEX, do termo em inglês *Operational Expenditure* representa as despesas operacionais. Os itens que devem ser preenchidos nesse bloco são o rendimento dos ônibus diesel e elétrico em km/l e em km/kWh, o custo de manutenção de ambos os ônibus em R\$/km e o preço pago pelo diesel e pela energia elétrica que já foram preenchidos nos blocos do preço do diesel e preço da energia elétrica. O bloco de OPEX pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 – Bloco OPEX - ferramenta EPE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

A ferramenta considera a possibilidade de aluguel de algum tipo de geração distribuída e considera um desconto de 10% se a opção for selecionada. Essa opção aparece dentro do bloco de OPEX. Desde 2012 com a resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL, os consumidores podem gerar a sua própria energia elétrica, desde que seja por fontes renováveis ou cogeração qualificada. Também permite que a geração excedente possa ser enviado para a rede de distribuição (ANEEL, 2015).

Conforme Altoé *et al.* (2017) a resolução 482 foi atualizada através da resolução normativa nº 687/2015. Dentre as modificações a nova resolução dita o período de compensação da geração excedente é de 60 meses, o limite de potência instalada alimentado por usina passou de 3 MW para fonte hídrica e 5 MW para as demais fontes renováveis.

Os dois últimos blocos que devem ser preenchidos na ferramenta para a realização da simulação se referem as condições de financiamento. Os blocos são separados por diesel e elétrico mas os mesmos dados devem ser preenchidos. A primeira informação é o custo de capital próprio, esse número representa o percentual da rentabilidade que a empresa abre mão ao reinvestir na compra dos ônibus, tanto a diesel como elétricos. Também devem ser disponibilizados os custos percentuais do financiamento, o percentual financiado, o custo ponderado percentual de capital, o prazo de financiamento em anos e o valor percentual de revenda dos veículos. Esses dois últimos blocos podem ser vistos nas Figuras 33 e 34.

Figura 33 – Bloco financiamento diesel - ferramenta EPE

FINANCIAMENTO-DIESEL	
Custo Capital Próprio (%)	12,5
Custo Financiamento (%)	9,189
Percentual financiado (%)	100
Custo Pond. de Capital (%)	6,06
Prazo financiamento (anos)	7
Valor de revenda (%)	5

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Além dos blocos que devem ser preenchidos com os dados da simulação a ferramenta também possui outros blocos que trazem alguns resultados e informações importantes a respeito da simulação. À medida que os valores são alterados nos blocos os resultados também se alteram automaticamente.

Após a inserção dos dados, a ferramenta realiza uma simulação utilizando um tempo de dez anos avaliando a troca de ônibus à diesel por ônibus elétricos através de alguns indicadores financeiros, são eles:

Figura 34 – Bloco financiamento elétrico - ferramenta EPE

FINANCIAMENTO-ELÉTRICO	
Custo Capital Próprio (%)	12,5
Custo Financiamento (%)	8,889
Percentual financiado (%)	100
Custo Pond. de Capital (%)	5,87
Prazo financiamento (anos)	7
Valor de revenda (%)	5

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

- TIR - taxa interna de retorno;
- TCO - total cost of ownership, em português: custo total de propriedade;
- VPL - valor presente líquido;
- PAYBACK - tempo de retorno do investimento.

São apresentados a seguir algumas explicações sobre sobre esses indicadores financeiros com base em uma nota técnica divulgada pela EPE à respeito da ferramenta desenvolvida. O Valor presente líquido (VPL) é calculado à partir da Equação (2.3).

$$VLP = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+k)^j} \quad (2.3)$$

Em que FC_j representa o fluxo líquido de caixa no instante j , k representa a taxa de desconto aplicável aos fluxos de caixa no período j e n representa o número de períodos.

Segundo Fonseca e Bruni (2010) o VPL é o critério mais recomendado por especialistas financeiros no momento de uma decisão acerca de um investimento. O VPL representa a diferença de todas as receitas e custos do projeto em questão (SILVA; FONTES, 2005). Isso implica que avaliação leva em conta o valor temporal do dinheiro.

Conforme Fonseca e Bruni (2010) o VPL positivo indica que investir no projeto vale a pena uma vez que o retorno a ser recebido será equivalente ao valor do VPL.

A Taxa Interna de Retorno (TIR), depende apenas dos fluxos de caixa. Representa o valor de taxa que leva o VPL dos fluxos de caixa a zero (FONSECA; BRUNI, 2010). Ou seja, é a taxa representada por k na Equação (2.3) que torna o VPL nulo. O processo para obtenção da TIR é iterativo, e por vezes pode não encontrar um valor que torne o valor presente líquido nulo.

O critério para o aceite ou não de um investimento utilizando a TIR é a seguinte comparação: o investimento deve ser aceite se a TIR for maior que o custo de capital (taxa mínima de atratividade) e deve ser rejeitado se for menor (SVIECH; MANTOVAN, 2013).

O Total Cost of Ownership, traduzido como Custo Total de Propriedade (TCO) representa o valor da soma de todos os custos para adquirir, manter e operar os veículos no período determinado, no caso da ferramenta da EPE o tempo é de 10 anos.

O *PAYBACK*, tempo de retorno do investimento, nessa ferramenta, foi calculado baseado no número de anos que decorrerão até os fluxos de caixa estimáveis igualarem o montante do investimento inicial.

Para realizar todos os cálculos necessários nas simulações a ferramenta leva em conta algumas premissas do projeto. Uma delas é que a vida útil dos ônibus a diesel é considerada de 5 anos e 10 anos para os modelos elétricos.

A ferramenta considera que o investidor realizará a aquisição dos veículos à vista e o restante será financiado através de um Sistema de Amortização Constante (SAC), onde as parcelas permanecem iguais até o fim do contrato. O ciclo de avaliação do projeto é de 10 anos. O valor de revenda dos veículos é contabilizado no fluxo de caixa como um valor positivo no final da vida útil.

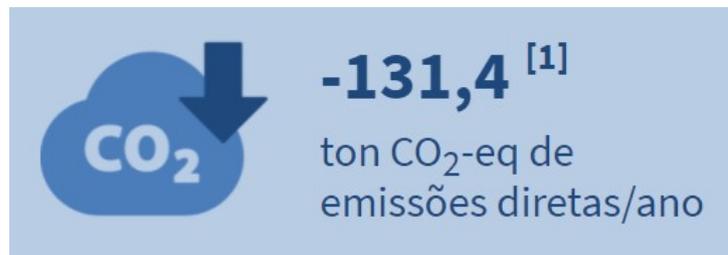
Além dos indicadores financeiros e dados referentes ao transporte, existem três blocos referentes a quantidade de poluentes evitados, esses blocos mostram a quantidade em mil litros de diesel por ano, a quantidade em toneladas de CO_2 -equivalente por ano e os poluentes locais, CO (monóxido de carbono), MP (material particulado), NO_x (nitróxidos), em quilogramas por ano. Esses três blocos, podem ser visualizados respectivamente nas Figuras 35, 36, 37

Figura 35 – Bloco redução litros de diesel - ferramenta EPE



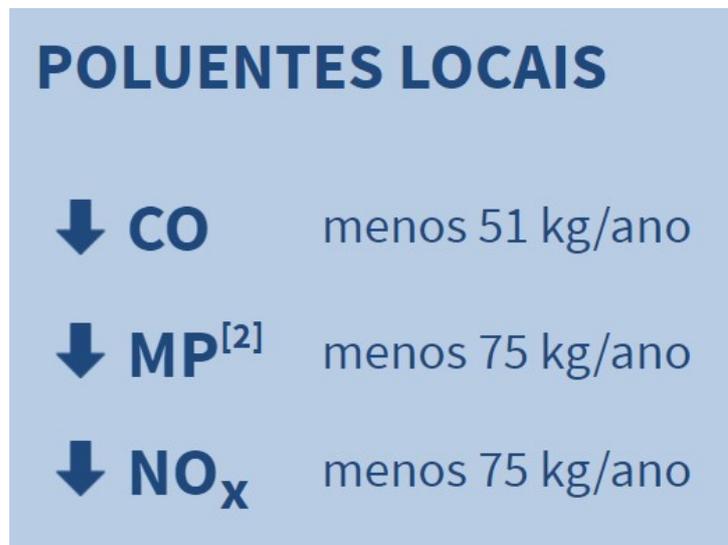
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Figura 36 – Bloco redução toneladas de CO₂-equivalente - ferramenta EPE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Figura 37 – Bloco poluentes locais - ferramenta EPE



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Para o cálculo dos litros de diesel economizados a EPE se baseia em três elementos, a distância média anual por veículo, a quantidade de ônibus elétricos e o rendimento dos ônibus a diesel. O cálculo realizado para a obtenção desse valor em 10^3 litros de diesel por ano pode ser visualizado na Equação (2.4).

$$\text{Diesel Evitado por Ano} = \frac{\text{Distância média anual} \times \text{Quantidade de ônibus elétricos}}{\text{Rendimento do ônibus diesel} \times 1000} \quad (2.4)$$

O cálculo da quantidade de toneladas de CO_2 – *equivalente* por ano baseia-se no fator de emissão de gás carbônico (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) e também na densidade energética do diesel. Segundo a EPE, são considerados os valores dispostos na Tabela 2 para essas grandezas na ferramenta. Esses dados foram divulgados através da ferramenta governamental de acesso a informação *falabr* disponível em gov (2021).

Tabela 2 – Fatores de emissão dos poluentes CO_2 , CH_4 e N_2O

Poluente	Fator de emissão [tCO _{2-equivalente}]/10 ³ tep
CO ₂	3.070
CH ₄	2,638
N ₂ O	7,788

Fonte: Adaptado de (EPE, 2021)

*A unidade tCO_{2-equivalente}/10³tep representa as toneladas de CO_{2-equivalente} por tonelada de energia consumida.

Segundo a EPE, o fator de emissão do CO_{2-equivalente} é igual a soma dos fatores de emissão dos poluentes CO₂, CH₄ e N₂O. Portanto o fator de emissão do CO_{2-equivalente} é 3.080,43 tCO_{2-equivalente}/10³tep. De posse desse valor e sabendo que a densidade energética do diesel é 0,848 tep/m³, também informado pela EPE, é realizado o cálculo mostrado na Equação (2.5) para o as toneladas de CO₂ a menos por ano.

$$\text{Toneladas de CO}_2 \text{ a menos por ano} = \frac{\text{Litros de diesel evitado por ano} \times \text{Fator de emissão de CO}_{2-eg} [\text{tCO}_{2-eg}/10^3\text{tep}] \times \text{Densidade energética Diesel} [\text{tep}/\text{m}^3]}{10^6} \quad (2.5)$$

Também são calculadas as reduções de poluentes locais, quilogramas de CO por ano, quilogramas de material particulado por ano, e quilogramas de NO_x (óxidos de nitrogênio) por ano. Para o calculo do material particulado a ferramenta considera a emissão pelos pneus, freios e pista somado com a emissão através da combustão.

A EPE informa que esses valores são calculados utilizando os fatores de emissão de cada um dos poluentes locais juntamente com a quantidade de litros de diesel evitados ao ano.

Além da ferramenta da EPE também é importante conhecer o software, os conceitos

e equações utilizadas no trabalho na fração trata do sistema de geração solar fotovoltaico, esse assunto é tratado na seção seguinte.

2.1.8 Sistema de geração solar fotovoltaico

Conforme o trabalho de Xavier *et al.* (2019), a Equação (2.6) deve retornar a potência do sistema fotovoltaico que deve ser instalado para suprir um consumo específico.

$$\text{Potência do sistema fotovoltaico [kWp]} = \frac{\text{Energia a ser suprida pelo sistema fotovoltaico [kWh]}}{\text{Taxa de desempenho} \times \text{Horas de sol pleno por dia [h]} \times \text{Dias correspondentes a energia a ser suprida}} \quad (2.6)$$

A taxa de desempenho é o valor percentual que considera as perdas, ocorrência de sombras e dias nublados.

Segundo o Solar (2015), horas de sol pleno representa quantas horas por dia a irradiância solar de um local é igual a 1000 W/m^2 . Para obter a irradiância solar é utilizado o programa SunData v 3.0 disponibilizado em, CRESESB (2018) pelo Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito CRESESB com o intuito de apoiar o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

Para utilizar o programa, basta informar a latitude e longitude do local onde se deseja saber a irradiância, conforme ilustrado pela Figura 38.

Figura 38 – Sundata - Coordenadas Geográficas

Coordenada Geográfica

Latitude	<input type="text" value="30.058055102"/>	<input type="text" value="Sul"/> ▼	Longitude	<input type="text" value="51.16523391"/>	<input type="text" value="Oeste"/>
Norte:					
<input checked="" type="radio"/> graus decimais (00.00°)					
<input type="radio"/> graus, minutos e segundos (00°00'00")					
<input type="button" value="Buscar"/>		<input type="button" value="Limpar"/>			

Fonte: CRESESB (2018).

A partir das coordenadas geográficas, o Sundata disponibiliza as irradiações médias diárias em kWh/m² para todos os meses do ano para 3 localidades próximas às coordenadas imputadas pelo usuário. Esses valores são disponibilizados em formato de tabela e gráfico, conforme pode ser visto Figura 39.

Figura 39 – Sundata - Irradiação média diária

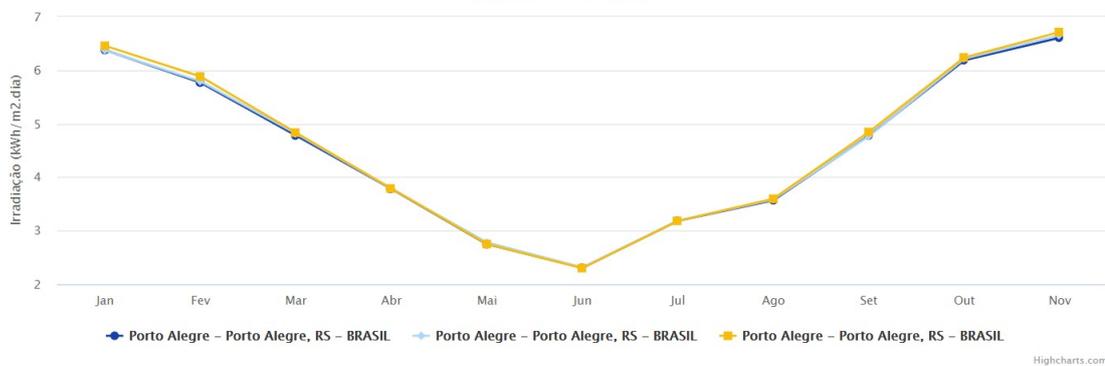
Localidades próximas

Latitude: 30,058055° S
Longitude: 51,165234° O

#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]																
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média	Delta
✓	Porto Alegre	Porto Alegre	RS	BRASIL	30,101° S	51,149° O	5,0	6,38	5,77	4,78	3,78	2,75	2,31	2,51	3,18	3,57	4,78	6,19	6,61	4,38	4,30
✓	Porto Alegre	Porto Alegre	RS	BRASIL	30° S	51,149° O	6,6	6,37	5,79	4,81	3,78	2,78	2,32	2,52	3,19	3,58	4,77	6,22	6,65	4,40	4,34
✓	Porto Alegre	Porto Alegre	RS	BRASIL	30,101° S	51,249° O	9,4	6,46	5,88	4,83	3,79	2,75	2,30	2,52	3,18	3,60	4,84	6,24	6,71	4,43	4,41

Irradiação Solar no Plano Horizontal para Localidades próximas

30,058055° S; 51,165234° O



Fonte: (CRESESB, 2018).

Segundo Ferreira e Rosa (2019), de posse da potência do sistema fotovoltaico pode-se calcular a quantidade de painéis necessários para suprir a potência calculada e também a produção de energia diária do sistema fotovoltaico. Esses valores são obtidos, respectivamente, através das Equações 2.7 e 2.8

$$\text{Número de painéis} = \frac{\text{Potência do sistema fotovoltaico [W]}}{\text{Potência de cada placa fotovoltaica [W]}} \quad (2.7)$$

$$\text{Produção diária do sistema fotovoltaico [kWh]} = \frac{\text{Potência do sistema fotovoltaico [kW]}}{\text{Potência do sistema fotovoltaico [kW]}} \times \text{Horas de sol pleno por dia [h]} \times \text{Taxa de desempenho} \quad (2.8)$$

Nesse capítulo foram apresentados diversos conceitos e a apresentação dos softwares utilizados nesse trabalho e tem o objetivo de auxiliar na compreensão desse estudo.

3 METODOLOGIA

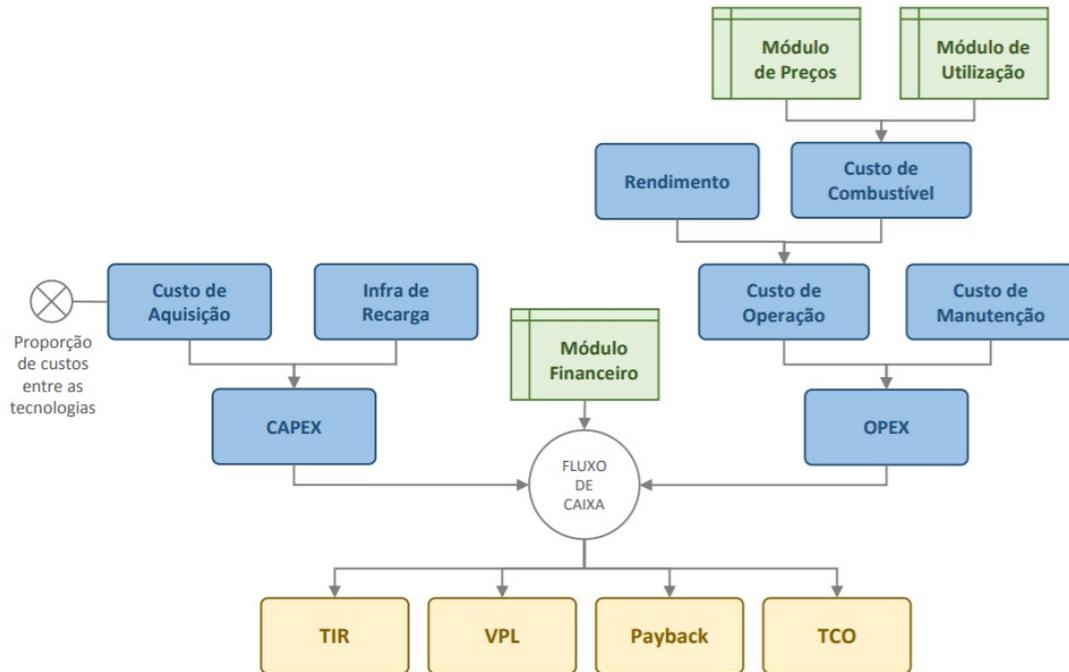
Esse trabalho propõe discutir e analisar a utilização de ônibus elétricos juntamente com sistemas fotovoltaicos para substituir os ônibus a combustão no transporte público rodoviário na cidade de Porto Alegre. O modelo é avaliado analisando a viabilidade econômica da utilização dos ônibus elétricos na cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul. Primeiramente é validada a substituição dos ônibus que utilizam motor a combustão para ônibus com motores elétricos, para isso é utilizada a ferramenta para avaliação de viabilidade de ônibus elétrico disponibilizada pela EPE. Após a análise dos resultado da simulação, é investigada a quantidade de energia elétrica necessária para abastecer a frota e qual a porção dessa energia que pode ser gerada de forma sustentável a partir da placas solares fotovoltaicas. Dentro desse contexto são avaliados diversos custos envolvidos na substituição da frota. Além do custo de aquisição dos veículos, o custo da energia e demanda elétrica e o custo dos sistemas de geração fotovoltaica também são estimados.

3.1 Avaliação de viabilidade econômica de ônibus elétrico

Para essa etapa é utilizada a ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais desenvolvida pela EPE. Para a utilização dessa ferramenta é preciso parametrizar a mesma com diversas informações à respeito do transporte na cidade em que é simulada a substituição. A ferramenta utiliza fundamentalmente dados a respeito da quantidade de ônibus necessária, qual o preço da tecnologia de motorização e a forma de pagamento dos veículos.

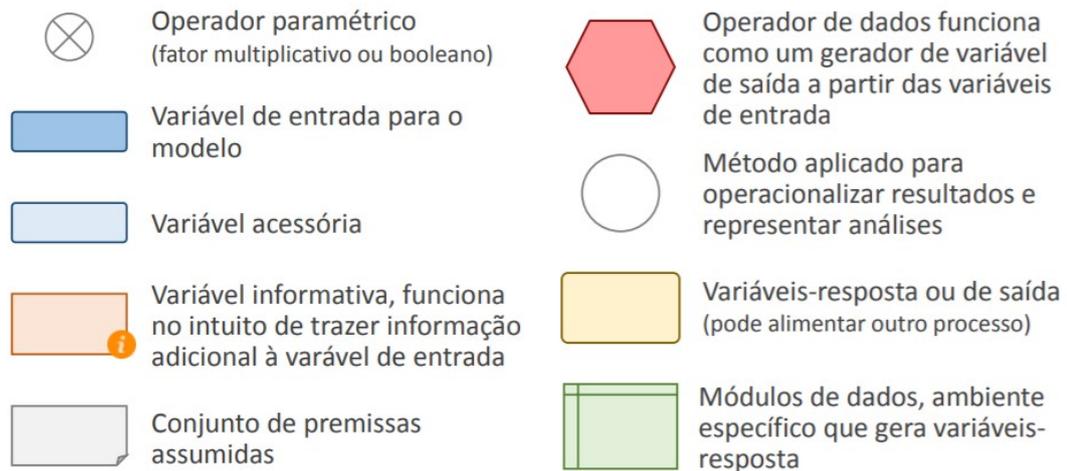
A Figura 40 ilustra o diagrama com a metodologia utilizada pela ferramenta, enquanto que a Figura 41 apresenta a legenda dos símbolos usados no diagrama de blocos da Figura 40.

Figura 40 – Metodologia da ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

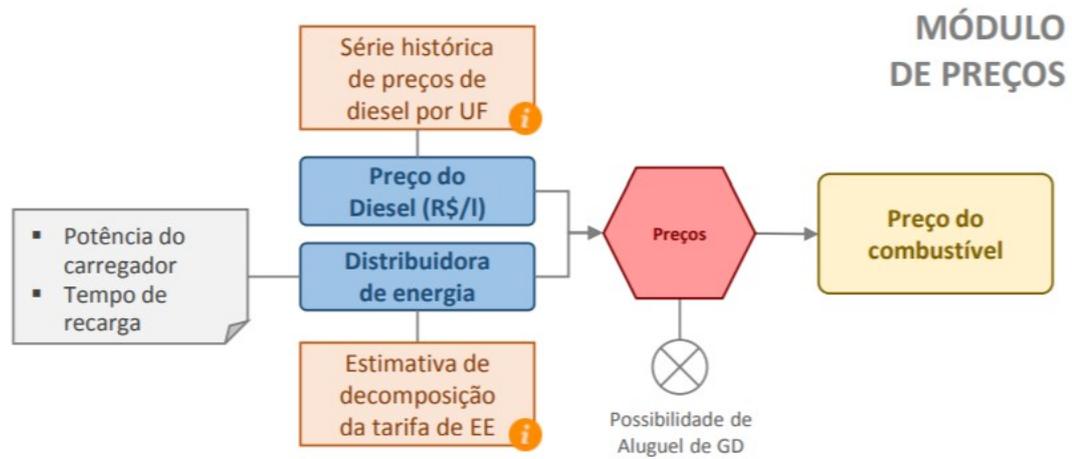
Figura 41 – Legenda dos símbolos utilizados na metodologia da ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

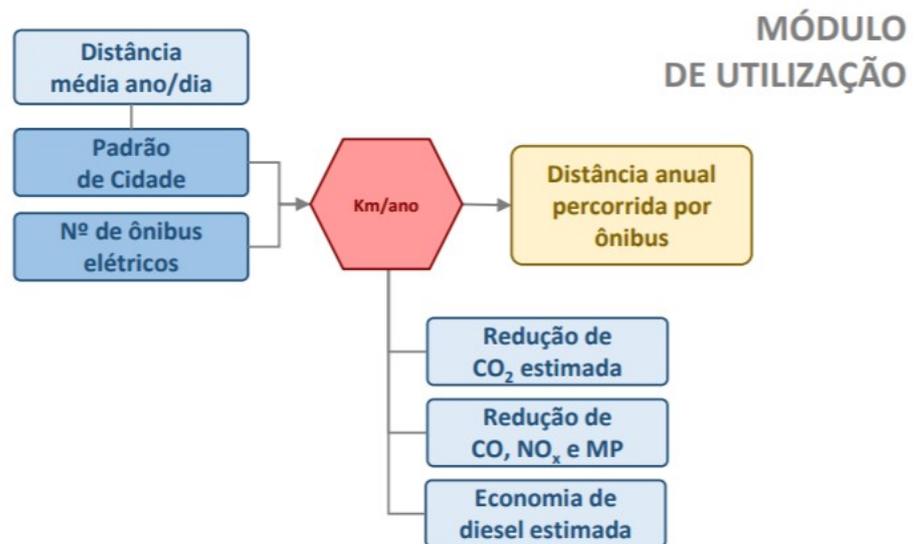
Nas Figuras 42, 43 e 44 estão apresentados os diagramas dos módulos exibidos em blocos verdes na Figura 40.

Figura 42 – Diagrama representativo da metodologia do módulos de preços.



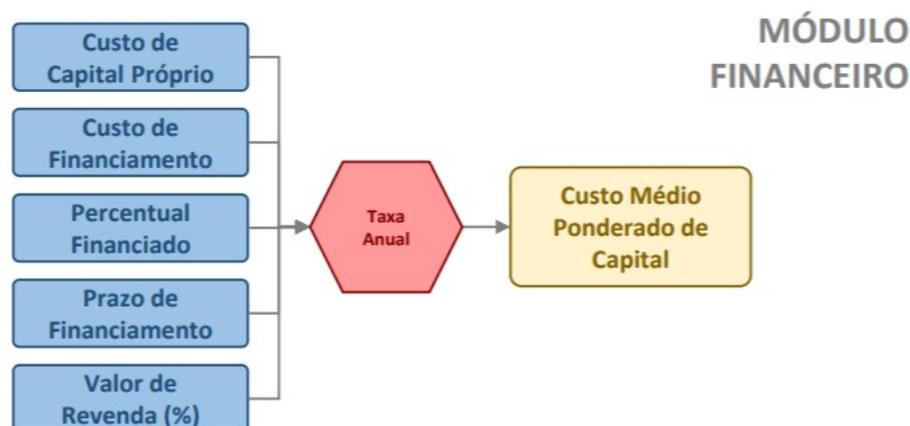
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Figura 43 – Diagrama representativo da metodologia do módulos de utilização.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Figura 44 – Diagrama representativo da metodologia do módulos financeiro.



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2021).

Os dados referentes ao sistema de transporte público e aos ônibus a diesel utilizados em todas as simulações descritas nos subcapítulos seguintes foram disponibilizados pela EPTC ou Carris, tanto via solicitações na plataforma de serviço de informações ao cidadão, e-sic, disponível em SMTTC (2021), como via e-mail e sites públicos onde foram divulgados. Dados que não foram obtidos dessa forma estão separadamente discriminados à medida que foram utilizados nas simulações. A Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC) é responsável por fiscalizar e regularizar as operações pertinentes ao trânsito e aos transportes na Cidade de Porto Alegre (Prefeitura de Porto Alegre, 2021b). A Carris, é a empresa de transporte coletivo mais antiga do Brasil em atividade. Iniciou seu trabalho no ano de 1908 operando bondes puxados a mula. Atualmente possui 347 veículos em 24 linhas na cidade de Porto Alegre (Prefeitura de Porto Alegre, 2021a).

Os dados referentes a ônibus elétricos foram obtidos através da revisão de diversas pesquisas, artigos e sites. Como esse trabalho trata de um estudo no Brasil, houve uma preferência por dados adquiridos em cidades brasileiras no lugar de estrangeiras, uma vez que as condições climáticas e de mobilidade possuem uma semelhança maior.

Como mostram as Figuras 40 e 43, os dados iniciais preenchidos na ferramenta da EPE dizem respeito a utilização. São estes: distância média anual em quilômetros por ano, dias de operação por ano, distância diária média em quilômetros por dia e a quantidade de ônibus elétricos.

Em seguida conforme as Figuras 40 e 42, foi preenchido o preço do diesel e da mesma forma foram colocados os dados que se referem ao preço da energia elétrica que são: a potência do carregador em quilowatt, a duração da recarga em horas e a tarifa elétrica em reais por quilowatt hora.

Depois disso, como mostra a Figura 40, foram preenchidos os dados referentes ao CAPEX e OPEX. E por fim foram preenchidos os dados acerca do financiamento, como pode ser visto mais detalhadamente na Figura 44.

Após a simulação utilizando a ferramenta da EPE foram realizados novos cálculos e simulações para obter a análise da viabilidade de geração fotovoltaica para suprimento total ou parcial do consumo de energia elétrica da frota de ônibus. Esse assunto é tratado na seção seguinte.

3.2 Análise de viabilidade de geração fotovoltaica para suprimento do consumo dos ônibus elétricos

Ao realizar a troca dos ônibus movidos a diesel por ônibus movidos a energia elétrica um fator importante se torna presente. A demanda por energia elétrica sofre um aumento significativo. Dentro desse contexto, é importante explorar uma forma de se obter essa energia de maneira sustentável.

Por isso, nessa etapa é avaliada a efetividade do suprimento da energia elétrica consumida pelos ônibus elétricos através de geração solar fotovoltaica. Para essa análise, alguns cálculos são realizados.

Primeiramente foi utilizado o Software Sundata apresentado na seção 2.1.8 para obter a irradiação solar diária média ou horas de sol pleno da localização da garagem da empresa Carris.

Posteriormente foram aplicadas as Equações 2.6 e 2.7 para obter a potência necessária para abastecer a frota e o número de painéis necessários para a potência obtida na Equação (2.6) respectivamente.

4 ESTUDO DE CASO

Nessa etapa do trabalho, é utilizada a ferramenta disponibilizada pela EPE, Ferramenta de Avaliação Técnico-Econômica para ônibus elétricos urbanos municipais, para investigar a viabilidade econômica na substituição dos ônibus à diesel utilizados no transporte público municipal da cidade de Porto Alegre, para ônibus movidos à energia elétrica. São avaliados alguns cenários e hipóteses nesse contexto.

Conforme mencionado no Capítulo 3 onde está descrita a metodologia aplicada a esse trabalho, diversos dados diferentes foram coletados para a análise dos cenários descritos. A seguir, são detalhadas as motivações e princípios que foram utilizados para as escolhas dos dados em cada etapa discriminada.

4.1 Cenário 1

O primeiro cenário a ser avaliado contempla a eletrificação integral da frota de ônibus. Onde todas as unidades de ônibus movidos à diesel são substituídas por ônibus elétricos.

4.1.1 Utilização

Para esse primeiro cenário os dados utilizados podem ser visualizados na Tabela 3, onde a distância média anual e diária e os dias de operação são referentes ao ano de 2019. A quantidade de ônibus elétricos foi de 1.320 veículos, esse é o número médio de veículos pesados convencionais utilizados em 2020 no transporte público de Porto Alegre. Vale ressaltar que o número total da frota, informado pela EPTC, foi de 1480 veículos, sendo eles 1320 pesados convencionais, 9 leves convencionais e 151 pesados especiais. Para esse trabalho, as comparações consideram apenas veículos pesados convencionais, ou seja 1320 veículos. Esse valor considera todos os veículos na cidade de Porto Alegre.

Tabela 3 – Dados referentes à utilização - cenário 1

Distância Média Anual [km/ano]	72.842
Dias de Operação [dias/ano]	365
Distância Média Diária [km/dia]	200
Quantidade de Ônibus Elétricos	1.369

Fonte: Adaptado de EPTC.

4.1.2 Preço do diesel - Cenário 1

O preço do diesel disponível na ferramenta para o Rio Grande do Sul, baseado no ano de 2019 é de R\$ 3,37 pelo litro de diesel. Porém, a EPTC disponibilizou o valor gasto pelo litro do diesel atualmente, cotado em 2 de julho de 2021, esse valor foi de 3,2142 reais por litro e esse foi o valor utilizado na ferramenta para a avaliação.

4.1.3 Preço da energia elétrica - cenário 1

Nesse trabalho, para o preço de aquisição do ônibus é considerado o ônibus modelo k9 da marca BYD. A marca chinesa informa em BYD (2019) que o carregamento pode levar 2 horas a uma potência de 80 kW. Portanto, esses valores de potência e tempo de carregamento são considerados. Sabendo que a recarga do tipo *plug-in* é a mais barata, esta é considerada.

Ao ajustar os valores de potência e tempo de carregamento, o valor da tarifa elétrica para a região Sul e Sudeste disponível na ferramenta foi de R\$ 0,89 por quilowatt hora. Para a tarifa de energia, considerou-se os dados de tarifas do grupo A disponibilizados pela CEEE-D em CEEE (2020). Esse documento mostra as tarifas de energia do grupo A sem impostos e como calcular o preço final. Como mostra a Figura 26.

Para calcular o preço final conforme mostra a fórmula da Figura 26 foi utilizado o valor de 30% para o ICMS e 0,342220 para o preço homologado, como mostra na Figura 26. Já para os valores de PIS e COFINS foram utilizados os valores disponibilizados pela CEEE em CEEE (2021), 0,6878% para PIS e 3,125 % para COFINS, esses valores são a média dos valores de PIS e COFINS entre os meses de setembro de 2020 até agosto de 2021.

O valor do preço final encontrado foi de R\$/kWh 0,5082, o cálculo pode ser visto na Equação (4.1).

$$\text{Preço Final Tarifa(R\$/kWh)} = \frac{\frac{0,342220}{1-0,006878-0,03125}}{1-0,3} = 0,50824 \quad (4.1)$$

Os valores do preço da energia elétrica podem ser visualizados de forma mais evidente, na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados referentes à utilização - cenário 1

Potência do Carregador [kW]	80
Duração da Recarga [horas]	2
Tarifa de Energia Elétrica [R\$/kWh]	0,508

Fonte: Elaboração própria

*A tarifa de energia elétrica foi calculada conforme divulgado pela CEEE-D.

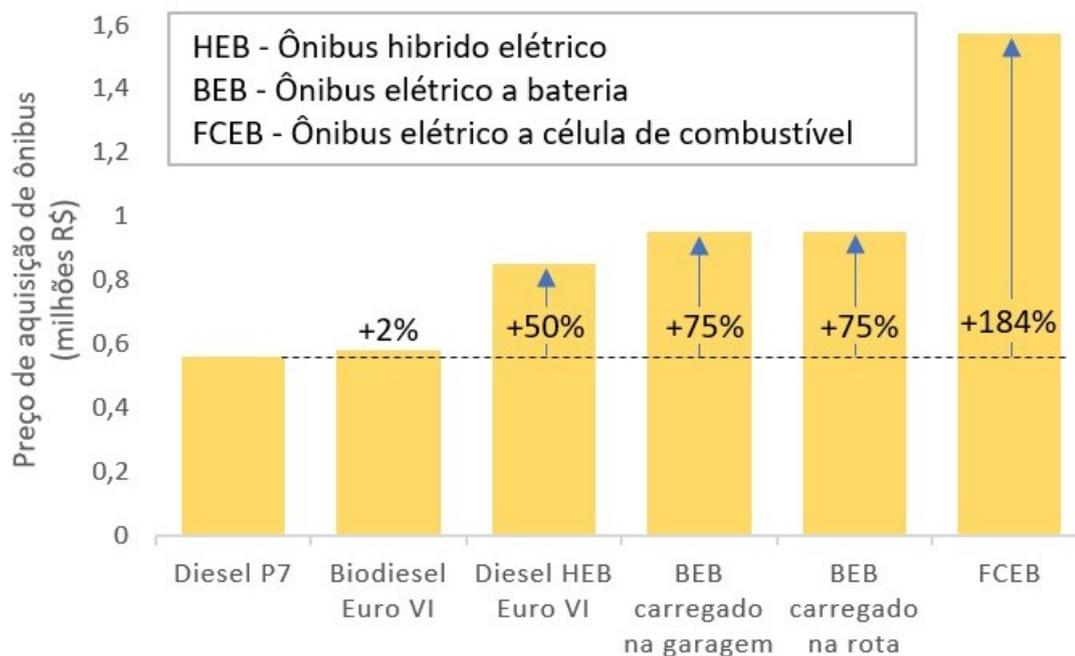
Após a aquisição dos preços da energia elétrica foram obtidos os dados relacionados ao CAPEX os quais estão detalhados na seção seguinte.

4.1.4 Custos de aquisição - *Capital Expenditure*/Despesas de Capitais (CAPEX) - cenário 1

A EPTC forneceu o valor do custo médio dos ônibus a diesel, já com o reajuste do ano de 2021 para os veículos pesados. O preço médio pago foi cerca de R\$ 564.600,00. Portanto, esse valor é utilizado na simulação.

Com relação ao preço do ônibus elétrico, o estudo GREENPEACE BRASIL (2016) mostra o custo de aquisição dos ônibus elétricos de duas empresas que já comercializam no Brasil, Eletra e BYD. Segundo o estudo, o custo do ônibus, modelo "E-bus" da empresa Eletra é de R\$ 850.000,00 e o custo do ônibus modelo "K9" da empresa BYD é de R\$ 1.000.000,00. O estudo de Slowik *et al.* (2018) onde, foram comparados os preços de aquisição de ônibus a diesel e ônibus elétricos, mostra que o valor de compra para ônibus elétricos a bateria é de cerca de R\$ 1.000.000,00, como mostra a Figura 45 adaptada de (SLOWIK *et al.*, 2018).

Figura 45 – Preço de compra de ônibus de transporte elétrico em comparação com ônibus convencionais a diesel



Fonte: Adaptado de (SLOWIK *et al.*, 2018).

Com base nesses estudos, para esse primeiro cenário de simulação foi utilizado o valor de R\$ 1.000.000,00. Dado o valor de aquisição do ônibus a diesel, verifica-se um multiplicador de 1,77 para o valor do ônibus elétrico.

O estudo apresentado por Slowik *et al.* (2018), informa que alguns fabricantes de ônibus elétricos como a BYD incorporam o preço dos carregadores de garagem no valor do veículo. O valor informado no estudo é de R\$ 161.000,00 por veículo. Com base nisso e sabendo que a simulação separa os custos de aquisição, o valor colocado na ferramenta para o custo de infraestrutura é de R\$ 161.000 e valor de aquisição do ônibus é de R\$ 839.000. Somando os dois valores chega-se a R\$ 1.000.000. Na Tabela 5 é possível visualizar os valores utilizados referentes ao CAPEX.

Tabela 5 – Dados referentes à utilização - cenário 1

Custo de Aquisição Diesel [R\$]	564.600,00
Custo de Aquisição Elétrico [R\$]	839.000,00
Custo da Infraestrutura de Recarga [R\$]	161.000,00

Fonte: Adaptado de (SLOWIK *et al.*, 2018) e EPTC.

Os valores de aquisição dos ônibus elétricos embora superiores aos valores de aquisição dos ônibus à diesel podem sofrer uma diminuição relevante caso seja utilizado um recurso conhecido como *leasing* onde a empresa fabricante dos ônibus arrenda as baterias presentes nos ônibus. Nesse tipo de operação financeira as baterias podem ser utilizadas pela empresa de ônibus por um período estipulado em um contrato. Após o fim do período a empresa de ônibus poderá optar por adquirir as baterias ou não.

Após a apresentação dos dados de aquisição, a seção seguinte apresenta informações a respeito dos dados operacionais dentro do estudo de caso.

4.1.5 Custos de operação - Operational Expenditure (OPEX) - cenário 1

O primeiro dado relacionado aos custos operacionais imputado na ferramenta, foi o rendimento dos ônibus, tanto a diesel como elétricos. Foram verificados estudos distintos realizados em três capitais brasileiras. O estudo realizado por Wilson *et al.* (2014) realizado na cidade do Rio de Janeiro indica que o rendimento de um ônibus diesel em uma rota específica foi de 2,62 km/l. Segundo outro estudo da Dullius *et al.* (2017) realizado na cidade de Curitiba, um ônibus a diesel modelo BR7 da VOLVO obteve um rendimento de 2,03 km/l. O terceiro estudo, realizado por Costa (2018) informa um rendimento de 2,94 km/l para uma empresa de ônibus na cidade de Brasília.

Para esse trabalho, foram utilizados os dados disponibilizados pela EPTC referentes aos rendimento dos ônibus a diesel. Não foi informado o ano nem a forma como foram calculados os valores. A EPTC disponibilizou através da plataforma e-sic, uma tabela contendo o rendimento de diversos tipos de ônibus utilizados na frota de Porto Alegre, foi feita uma média e o desvio padrão entre todos os rendimentos de veículos pesados e foram obtidos os valores de aproximadamente R\$ $2,21 \pm 0,27$ quilômetros/litro. Portanto, esse foi o valor utilizado na ferramenta.

Para o rendimento dos ônibus elétricos, foi utilizado como base o trabalho de D'agosto, Gonçaves e Almeida (2017), que após analisar cinco trabalhos nacionais a respeito de ônibus elétricos informa que os estudos constatam que o consumo de energia elétrica dos ônibus elétricos estudados está entre 1,04 kWh/km e 1,58 kWh/km. Para esse trabalho é utilizado o valor médio de 1,31 kWh/km, ou seja, um rendimento de

aproximadamente 0,76 km/kWh.

Para os dados de manutenção de ônibus a diesel, foram utilizados alguns dados disponibilizados pela Carris, segundo a empresa, no ano de 2020, foram gastos R\$ 36.913,99 em média por veículo para 347 veículos. A quilometragem realizada por esses veículos, também disponibilizada pela Carris, foi de 45.351,09 em média, por veículo. Em posse desses dados, foi possível calcular um gasto aproximado de 0,814 R\$/km em manutenção. Esse foi o valor utilizado na simulação.

Segundo Dallmann (2019) o valor para a manutenção de ônibus elétricos, cerca de R\$ 0,58 por quilômetro rodado. Esse estudo foi realizado a partir de dados obtidos na cidade de São Paulo. A partir desses dados pode-se verificar que os ônibus elétricos custam quase 30% menos do que os ônibus movidos a diesel em termos de manutenção. Todos os dados referentes à operação dos ônibus podem ser verificados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados referentes ao preço de operação - cenário 1

	Diesel	Elétrico
Custo Operacional [R\$/km]	1,45	0,67
Rendimento [km/l][km/kWh]	2,21	0,76
Custo do Combustível [R\$/l][R\$/kWh]	3,21	0,51
Custo de Manutenção [R\$/km]	0,814	0,58
Custo Var. Anual [R\$/ano]	165.227,41	90.937,49

Fonte: Adaptado de (D'AGOSTO; GONÇALVES; ALMEIDA, 2017), (DALLMANN, 2019), EPTC e Carris

Mostrados os dados referentes a operação dos ônibus elétricos utilizados na simulação, os dados referentes ao financiamento são mostrados na seção seguinte.

4.1.6 Financiamentos - cenário 1

Com relação aos financiamentos, segundo BNDES (2020a), tanto para os ônibus elétricos quanto para os ônibus movidos a diesel o BNDES possui Agência Especial de Financiamento Industrial (FINAME), que tem como objetivo o incentivo através de financiamento da produção e aquisição de máquinas e equipamentos nacionais credenciados no BNDES, a partir do FINAME é possível financiar tanto ônibus elétricos quanto ônibus a diesel. É possível financiar até 100% dos veículos em um prazo máximo de 7 anos. A

taxa de juros total inclui o custo financeiro, a remuneração do BNDES e a taxa do agente financeiro quando houver.

Nesse trabalho é considerado que não há agente financeiro. Segundo BNDES (2020b), tanto para ônibus elétricos quanto movidos a diesel, o BNDES permite a utilização da TFB, taxa fixa do BNDES, essa taxa muda diariamente mas não possui grandes variações. No dia 01 de julho de 2021 o valor da TFB para um financiamento de 7 a 10 anos era de 7,939315% a.a, esse é o valor utilizado nesse trabalho.

A taxa do BNDES sofre uma alteração quando compara-se ônibus a diesel com ônibus elétrico. BNDES (2020a) mostra que a taxa é de 1,25% para grandes empresas e 0,95% para energia renovável e máquinas 4.0. Portanto, é considerado para a taxa do BNDES de 1,25% para ônibus a diesel e 0,95% para o financiamento dos ônibus elétricos.

Segundo ANTP (2017), o valor residual para a revenda de ônibus a diesel do tipo Padron (80 passageiros) e ônibus básico (70 passageiros) é de 10% considerando uma vida útil se 10 anos e 8 anos respectivamente.

Segundo a Carris, no último leilão da revenda dos ônibus diesel, o valor mínimo foi de R\$22.500,00 que representa cerca de 3,5% do valor de R\$ 564.600. Portanto, levando em conta que esse é o valor mínimo, é considerado para a simulação um valor de revenda de 5%.

Para o valor de revenda de ônibus elétricos ainda existe muitas indeterminações sobre a depreciação desses veículos. Portanto, é utilizado o mesmo valor residual utilizado para os ônibus movidos a diesel.

O último valor a ser preenchido é o custo de capital próprio. Nesse trabalho, é utilizado o mesmo valor utilizado pela EPE em EPE *et al.* (2020) de 12,5% para ônibus a diesel e também para ônibus elétricos.

Na Tabela 7 podem ser visualizados todos os dados utilizados nesse cenário, a respeito do financiamento dos ônibus a diesel e elétricos.

Após a apresentação dos dados referentes ao financiamento utilizados na ferra-

Tabela 7 – Dados de Financiamento - cenário 1

	Diesel	Elétrico
Custo Capital Próprio [%]	12,5	12,5
Custo Financiamento [%]	9,189	8,889
Percentual Financiado [%]	100	100
Custo Pond. de Capital [%]	6,06	5,87
Prazo Financiamento [anos]	7	7
Valor Revenda [%]	5	5

Fonte: Adaptado de (BNDES, 2020a), (ANTP, 2017) e (BNDES, 2020b)

menta, a seguir estão mostrados os dados, cálculos e informações obtidas para a fatura de energia elétrica.

4.1.7 Fatura de energia elétrica - cenário 1

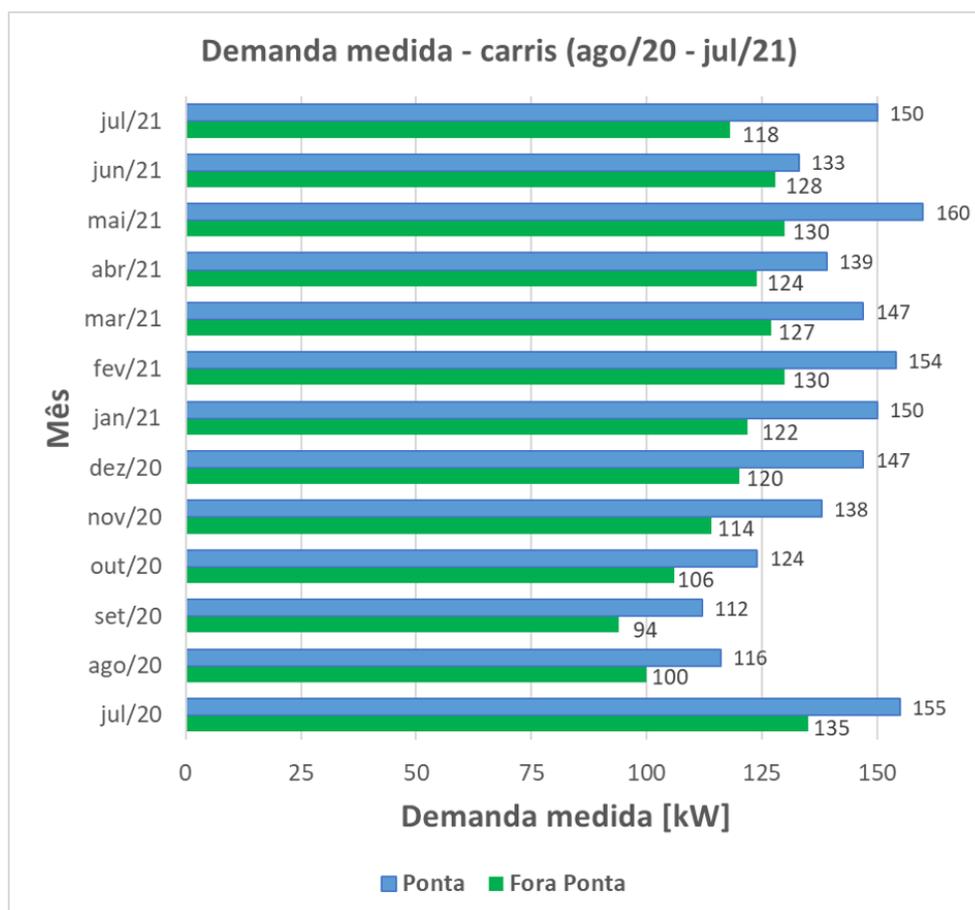
Além de observar os indicadores financeiros disponibilizados pela ferramenta, também é importante analisar a viabilidade em termos do sistema de energia elétrica contratado pelas empresas. Conforme seção 2.1.6 as empresas do grupo A possuem uma contratação de demanda com as distribuidoras de energia que deve ser respeitado, caso contrário uma multa é aplicada a empresa. Como esse trabalho trata da viabilidade econômica da utilização de ônibus elétricos na cidade de Porto Alegre, é realizada a análise da conta de energia da empresa Carris.

A Carris disponibilizou uma fatura de energia referente ao mês de julho de 2021. Nessa conta, foi possível validar que a Carris pertence ao subgrupo de tensão A4, possui uma demanda contratada de 13,8 kV de tensão e 220 kW de potência e o tipo de tarifa contratada é horária verde.

O documento também informa o histórico de demanda de potência medido pela distribuidora. Esse histórico mostra todas as demandas medidas em horários de ponta e fora ponta dos 12 meses anteriores a julho de 2021. A Figura 46, mostra esses valores aproximados.

Como pode-se visualizar na Figura 46 as maiores demanda são observadas no horário fora ponta. A partir disso, foi realizada a média dos valores de demanda no horário fora ponta e foi obtido o valor aproximado de 140 ± 15 kW.

Figura 46 – Histórico de demanda medida - carris - julho/20 a julho/21.



Fonte: Elaboração própria.

Conforme seção 4.1.3 o valor de potência considerado nesse trabalho para as infraestruturas de recarga é de 80 kW. Levando em conta que a Carris possui uma frota de 347 ônibus, se para cada ônibus for instalada uma estação de recarga noturna, o aumento de demanda seria de aproximadamente 27.760 kW de potência. Esse aumento na demanda ocasiona uma inviabilidade para colocar em prática o projeto uma vez que se faz necessária uma subestação de alta tensão para atender a demanda e os custos adicionais para a construção da infraestrutura necessária inviabilizam o investimento.

Portanto, com o objetivo de reduzir essa demanda, é considerado que os ônibus são carregados em grupos. Assim, os ônibus foram separados em cinco grupos de 70 veículos. Logo, tendo 70 carregadores operando simultaneamente a demanda passa de 27.760 kW para 5.600 kW. Dessa forma, são carregados 70 ônibus por vez a cada 2 horas, totalizando dez horas para o carregamento total da frota.

Vale ressaltar que uma demanda de 5,6 MW pode ser atendida em média tensão

porém, é possível avaliar se a alteração da subestação de alta tensão é uma vantagem econômica para a empresa. Apesar dos custos extras para adequar a infraestrutura, a tarifa de energia e de demanda se tornam mais baratas como mostra a Figura 26.

Considerando o valor médio de 140 ± 15 kW mais o acréscimo de 5.600 kW ocasionado pelas infraestruturas de recarga. Tendo isso em vista, o valor de demanda contratada de 220 kW não é suficiente para suprir a demanda extra.

Adquirido o valor de 5.600 kW e considerando o valor apresentado na seção 4.1.3 de R\$ 0,508 por kWh para a tarifa elétrica, foi calculada a diferença mensal na conta de energia gerada pelo carregamento dos ônibus elétricos.

O valor gasto com o aumento da demanda é calculado utilizando a Equação mostrada na Figura 26 com a qual também foi calculado o valor da tarifa de energia. O valor final obtido para o kW de demanda adicional por mês foi de R\$ 32,57 conforme mostra a Equação 4.2. Para os valores de PIS e COFINS, foi utilizada média dos meses de set/20 até ago/21.

$$\text{Preço Final Demanda [R\$]} = \frac{\frac{21,93}{1-0,006878-0,03125}}{1-0,3} = 32,57 \quad (4.2)$$

Em seguida foi obtido o preço adicional na demanda considerando a utilização de 70 carregadores de 80 kW partir da multiplicação do preço final da demanda obtido na Equação (4.2) pelos 5.600 kW conforme mostra a Equação (4.3).

$$\text{Custo adicional devido ao aumento de demanda [R\$]} = 5.600 \times 32,57 \approx \text{R\$}182.392,00 \quad (4.3)$$

Após isso foi calculado o custo mensal adicional no consumo. Para isso foi considerado o carregamento durante 2 horas em infraestruturas de recarga de 80 kW de potência no horário fora ponta e tarifa horária verde. O cálculo realizado está apresentado na Equação (4.4) e os valores utilizados bem como o resultado estão apresentados na Equação (4.5).

$$\text{Custo mensal para o carregamento da frota [R\$]} = \text{Potência do carregador [kW]} \times \text{Número de veículos} \times \text{Horas de carregamento} \times \text{Tarifa de energia elétrica} \times \frac{\text{Dias no mês}}{\text{mês}} \quad (4.4)$$

$$\text{Custo devido ao aumento de consumo [R\$]} = 80 \times 350 \times 2 \times 0,508 \times 30 \approx 853.440,00 \quad (4.5)$$

Logo, somando os resultado das Equações 4.3 e 4.4 foi obtido o valor aproximado de R\$ 1.036.000,00 que representa o aumento mensal no custo da energia elétrica.

Porém, a substituição total da frota faz com que os custos com o diesel sejam interrompidos. Para realizar uma comparação dos custos com energia e combustível, foi calculado o valor gasto em diesel para uma frota de 350 ônibus considerando o preço do litro do diesel em R\$ 3,21, um rendimento de 2,208 km/l e uma distância percorrida de 200 km por dia. O cálculo realizado pode ser visualizado na Equação (4.6)

$$\text{Valor mensal economizado com o diesel [R\$]} = \frac{3,21 \times 200}{2,208} \times 350 \times 30 \approx 3.053.000,00 \quad (4.6)$$

Portanto, ao trocar o diesel por energia elétrica, obtém-se uma economia mensal aproximada de R\$ 2.017.000,00 nos custos com combustível.

Os preços da energia elétrica e do diesel são de suma importância no resultado da simulação, tendo isso em vista a próxima seção apresenta algumas hipóteses de aumento no preço do diesel e energia elétrica.

4.1.8 Hipóteses de aumento no preço do diesel e/ou tarifa elétrica

Os preços de operação que foram analisados até o momento, são extremamente relevantes nos resultados dessa simulação. O preço pago pelo diesel e pela energia elétrica fazem ou podem fazer parte do cotidiano das empresas de transporte público e grandes alterações podem resultar em grandes mudanças na receita das empresas, preço das passagens e a compensação ou não da utilização de ônibus elétricos.

Nessa seção são exploradas algumas hipóteses de aumentos no preço do diesel e da energia elétrica e quais os impactos a respeito dos ônibus elétricos. As hipóteses propostas são as seguintes:

- Aumento de 5% no preço do litro do diesel;

- Aumento de 5% no preço do litro do diesel e 5% no preço da tarifa elétrica;
- Aumento de 5% no preço da tarifa elétrica;
- Aumento de 10% no preço do litro do diesel;
- Aumento de 10% no preço do litro do diesel e 10% no preço da tarifa elétrica;
- Aumento de 10% no preço da tarifa elétrica;
- Aumento de 15% no preço do litro do diesel;
- Aumento de 15% no preço do litro do diesel e 5% no preço da tarifa elétrica;
- Aumento de 15% no preço da tarifa elétrica;

Os preços que são considerados para o diesel e energia elétrica podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8 – Preços do diesel e tarifa elétrica conforme hipóteses de aumento

	Preço do diesel	Preço da tarifa de energia elétrica
Atual	R\$ 3,21	R\$ 0,508
Aumento de 5%	R\$ 3,37	R\$ 0,533
Aumento de 10%	R\$ 3,54	R\$ 0,559
Aumento de 15%	R\$ 3,70	R\$ 0,584

Fonte: Elaboração própria

A simulação foi repetida para todos os valores das hipóteses citadas anteriormente e os resultados podem ser verificados na seção 5.2. Depois disso, foi realizada a da possibilidade e viabilidade de suprir a necessidade de energia elétrica ocasionada pelos ônibus elétricos através de uma energia limpa. A seção seguinte aborda esse tema dentro do estudo de caso.

4.1.9 Geração sola fotovoltaica - cenário 1

Novamente é considerada a empresa Carris e uma frota de 347 veículos, o valor é arredondado para 350. Primeiramente é calculado o consumo de energia elétrica levando em consideração um sistema de recarga de 80 kW de potência que leva 2 horas para proporcionar uma carga completa.

O consumo total diário da frota é o resultado da Equação (4.7)

$$\text{Consumo total diário de energia elétrica [kWh]} = 80 \times 2 \times 70 \times 5 = 56.000 \quad (4.7)$$

Após a determinação do consumo, pode-se calcular através da Equação (2.6) a potência necessária para o sistema fotovoltaico suprir os 56.000 kWh de energia. O valor para a irradiação diária utilizado foi obtido através do programa SunData v 3.0. Ao colocar as coordenadas geográficas da empresa Carris na entrada do programa, foram disponibilizados os valores para três localidades próximas e as coordenadas mais próximas ao endereço da Carris foi escolhida. Os dados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Irradiação solar diária média

Irradiação solar diária média [kWh/m ² .dia]												
Latitude [°]						Longitude [°]						
30 Sul						51,15 Oeste						
Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
6,37	5,79	4,81	3,78	2,78	2,32	2,52	3,19	3,58	4,77	6,22	6,65	4,40

Fonte: Elaboração própria

O cálculo realizado está mostrado na Equação (4.8)

$$\text{Potência do sistema fotovoltaico [kWp]} = \frac{56.000}{0,8 \times 4,4 \times 1} \approx 15.909 \quad (4.8)$$

De posse da potência do sistema, pode-se calcular a quantidade necessária do painéis fotovoltaicos. Para isso é utilizada como base a potência do painel Tiger Pro72HC-TV que possui 530 Wp. O calculo foi realizado utilizando a Equação (2.7) e pode ser visualizado na Equação (4.9).

$$\text{Número de painéis} = \frac{15.909.000}{530} \approx 30.017 \quad (4.9)$$

4.2 Cenário 2

O cenário 2 representa a eletrificação de metade da frota de ônibus. Onde metade dos veículos são elétricos e a outra metade são veículos a combustão.

Ao repetir a simulação admitindo apenas metade da frota de 1.320 ônibus, ou seja, 660 veículos, os únicos valores que sofrem alterações são aqueles relacionados aos poluentes. O restante dos dados e indicadores são calculados por veículo, por quilômetro, por litro ou por quilowatt-hora.

Nesse cenário, como existem em operação tanto ônibus a diesel como ônibus elétricos, foi realizada uma análise dos custos diários tanto com o diesel como com a energia elétrica. Os cálculos realizados são detalhados nas próximas seções. Embora a frota de Porto Alegre possua 1320 ônibus, os estudos foram feitos somente com a empresa Carris devido a disponibilidade de dados. Ao substituir apenas metade da frota com veículos elétricos há cerca de 175 veículos movidos a energia elétrica e 175 veículos movidos a diesel.

4.2.1 Conta de energia - cenário 2

Da mesma forma como apresentado na seção 4.1.7, se todos os veículos elétricos forem carregados ao mesmo tempo durante a noite, seria provocado um aumento de 5600 kW à demanda atual da empresa. Logo, para metade da frota, o aumento provocado é de 2800 kW. Utilizando o preço da demanda calculado na Equação (4.2) de R\$ 32,57 obtém-se um custo adicional para a demanda de cerca de R\$ 91.200,00. O custo adicional para a energia, considerando um carregamento de 2 horas a 80 kW de potência, é de aproximadamente R\$ 426.800,00 Os cálculos para o aumento do custo da demanda e energia foram realizados da mesma forma como nas Equações 4.3 e 4.4 respectivamente.

Ao somar os valores de aumento de demanda e de energia mensais, tem-se um custo aproximado de R\$ 518.000,00 para 175 ônibus elétricos.

4.2.2 Custo do diesel - cenário 2

O consumo de diesel foi calculado a partir da Equação (4.10) considerando uma frota de 175 ônibus, um rendimento de 2,208 km/l, uma distância diária de 200km e R\$

3,214 para o preço do litro do diesel.

$$\text{Custo mensal diesel} = \frac{\text{distância média diária}}{\text{rendimento do diesel}} \times \text{preço do litro do diesel} \times \text{veículos da frota} \times 30 \text{ dias} \quad (4.10)$$

Dessa forma foi obtido o custo em diesel para uma frota de 175 veículos no valor aproximado de R\$ 1.528.400,00.

Sendo assim, obtém-se uma diferença de R\$ 1.010.400,00 ao mês entre os custos dos ônibus a diesel e ônibus elétricos. Esse valor é obtido da subtração do resultado da Equação (4.10) pelos R\$ 518.000,00 que representam o custo mensal em energia e demanda elétrica para carregar 175 veículos. O custo total mensal para carregar e abastecer 350 ônibus, sendo metade elétricos e a outra metade a diesel, é de cerca de R\$ 2.046.400, esse valor foi obtido somando os R\$ 518.000,00 referente aos ônibus elétricos com os R\$ 1.528.400,00 referente aos ônibus a diesel.

Nesse capítulo foram apresentadas informações, pesquisas, simulações e cálculos acerca do estudo de caso. A seguir serão apresentados os resultados e as discussões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos cálculos e simulações realizados no capítulo 4. A seção seguinte apresenta os resultados da simulação.

5.1 Simulação

Após a obtenção e preenchimento de todos os dados descritos no Capítulo 4.1 foi realizada a simulação. Os indicadores financeiros foram apresentados, conforme mostra a Figura 47. Vale ressaltar que esses indicadores financeiros valem tanto para o cenário 1 como para o cenário 2 uma vez que os valores são calculados por veículo. Logo, são independentes do tamanho da frota considerada.

Figura 47 – Indicadores Financeiros - cenário 1



Fonte: Adaptado de (EPE, 2019)

Como pode ser visto na Figura 47 o VPL foi positivo no valor de R\$ 193.992,00 e a TIR foi de 18,71%. Ambos os indicadores indicam que o investimento é válido. Além disso, com os dados do primeiro cenário foi obtido uma estimativa de *payback* de 7 anos.

Como pode-se verificar através da Figura 47, a ferramenta não considera o valor da infraestrutura de recarga dentro do financiamento, portanto é o primeiro valor de despesa no fluxo de caixa.

Vale ressaltar que esses resultados levam em conta apenas um ônibus no tempo de 10 anos.

Considerando 1.320 veículos na frota, a substituição dos ônibus a diesel por ônibus elétricos ocasiona uma redução no uso de diesel de $43.507,4 \times 10^3$ litros por ano. E, uma redução na emissão de CO₂-equivalente de 113.650,2 toneladas por ano, considerando apenas a emissão direta ocasionada pelo motor do veículo.

Entre os poluentes locais, a redução, para uma frota de 1320 veículos, é de cerca de 44.000 kg por anos de CO, 65.000 kg por ano de material particulado e 65.000 kg por ano de NO_x.

Conforme seção 5.1 os resultados da simulação são dados para 1 veículo. Portanto, os únicos valores que sofrem alteração na ferramenta são os valores relacionados aos poluentes, que são calculados com base no número total de veículos da frota. Tendo isso em vista os valores obtidos para os poluentes locais nos cenários 1 e 2 podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Redução de poluentes e litros de diesel

Cenário	Litros de diesel [$\times 10^6$ /ano]	Toneladas de CO ₂ – eq/ano	CO [kg/ano]	MP [kg/ano]	NO _x [kg/ano]
1	43,51	113.650	44.000	65.000	65.000
2	21,75	56.830	22.000	32.400	32.400

Fonte: Elaboração própria

Na seção seguinte são apresentados os resultados das simulações realizadas de acordo com as hipóteses de aumento no preço da energia elétrica e do litro do diesel.

5.2 Hipóteses de aumento no preço do diesel e energia elétrica

O resultado dos indicadores financeiros podem ser visualizados na Tabela 11.

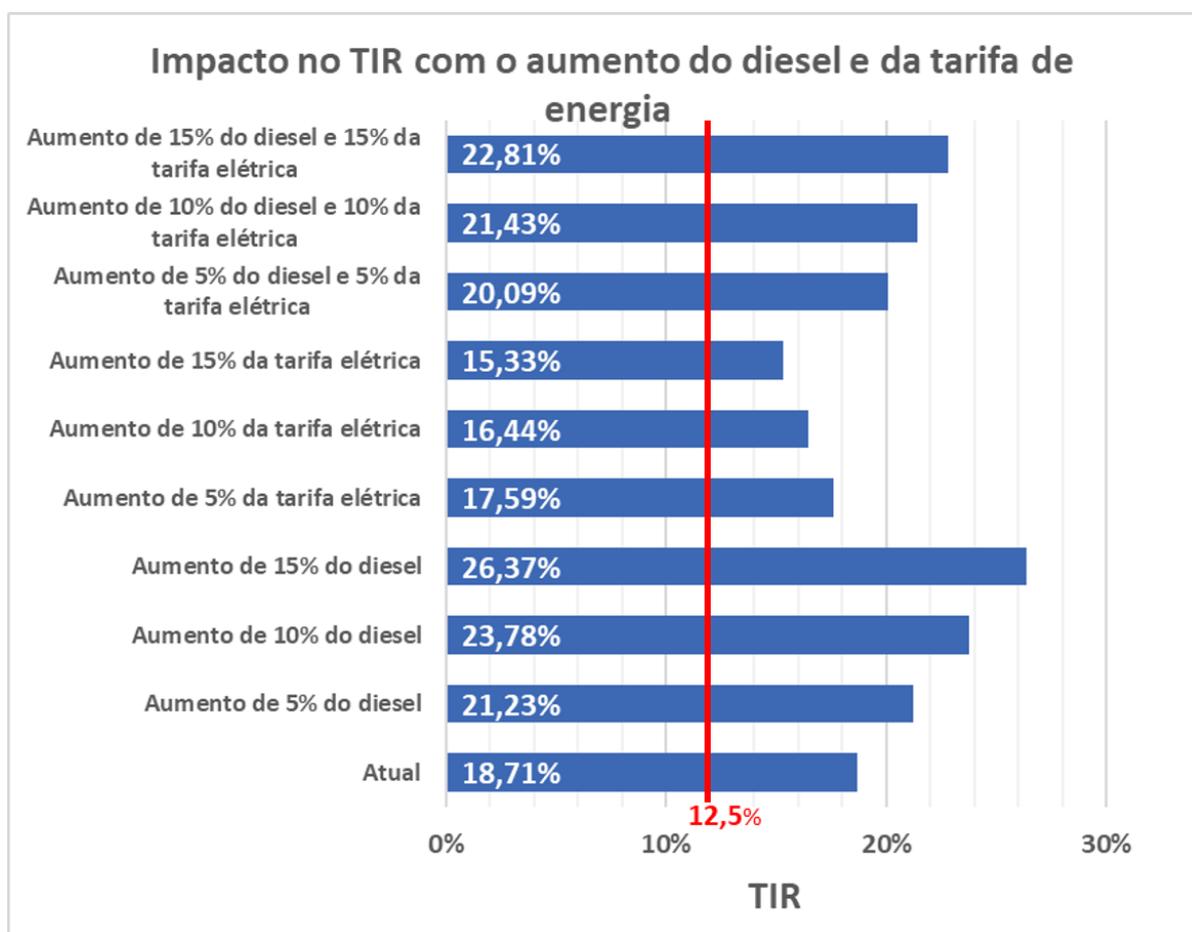
Nas Figuras 48, 49 e 50 podem ser visualizados os resultados dos valores de TIR, VPL e TCO respectivamente, conforme os impactos das alterações nos preços do diesel e tarifa elétrica conforme as hipóteses propostas.

Tabela 11 – Alteração dos indicadores financeiros conforme hipóteses de aumento do preço do diesel e da energia elétrica

Aumento no preço da tarifa de energia elétrica	Aumento no preço do litro do diesel	Preço do diesel [R\$/l]	Preço da energia elétrica [R\$/kWh]	VLP ($\times 10^3$)	TIR	PAYBACK	TCO ($\times 10^3$)
-	-	3,214	0,508	R\$ 194,0	18,71%	7 anos	R\$ 307,5
-	5%	3,375	0,508	R\$ 232,9	21,23%	7 anos	R\$ 360,6
-	10%	3,536	0,508	R\$ 271,9	23,78%	7 anos	R\$ 413,6
-	15%	3,696	0,508	R\$ 310,6	26,37%	6 anos	R\$ 466,4
5%	-	3,214	0,533	R\$ 176,2	17,59%	7 anos	R\$ 283,5
10%	-	3,214	0,559	R\$ 157,8	16,44%	8 anos	R\$ 258,6
15%	-	3,214	0,584	R\$ 140,0	15,33%	8 anos	R\$ 234,6
5%	5%	3,375	0,533	R\$ 215,2	20,09%	7 anos	R\$ 336,6
10%	10%	3,536	0,559	R\$ 234,7	21,43%	7 anos	R\$ 364,7
15%	15%	3,696	0,584	R\$ 256,6	22,81%	7 anos	R\$ 393,5

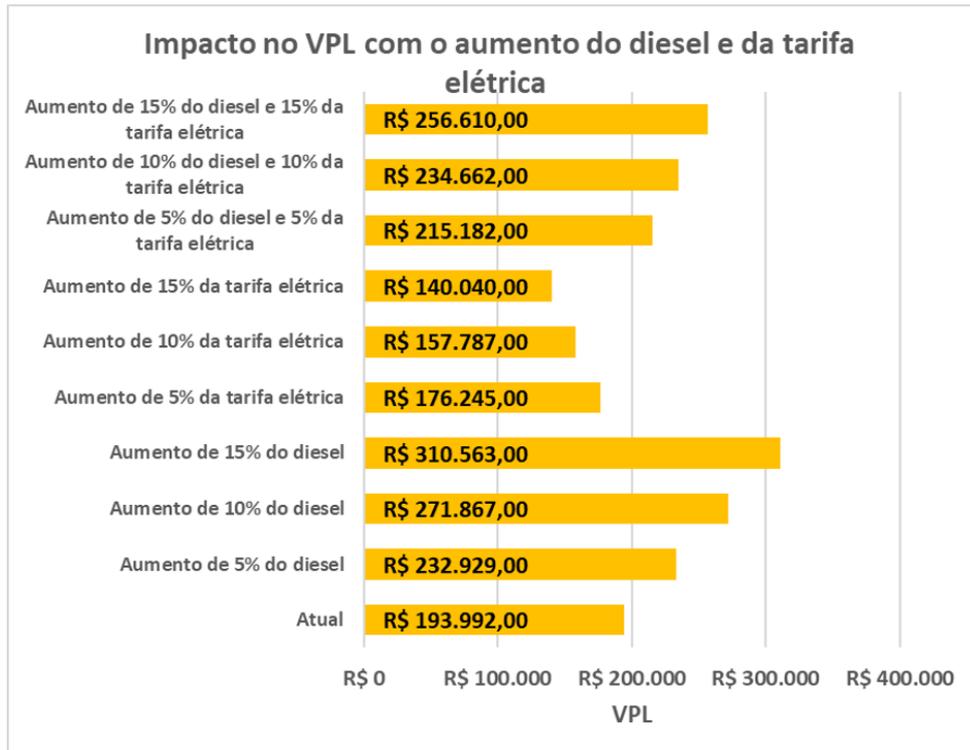
Fonte: Elaboração própria

Figura 48 – Impacto no TIR com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.



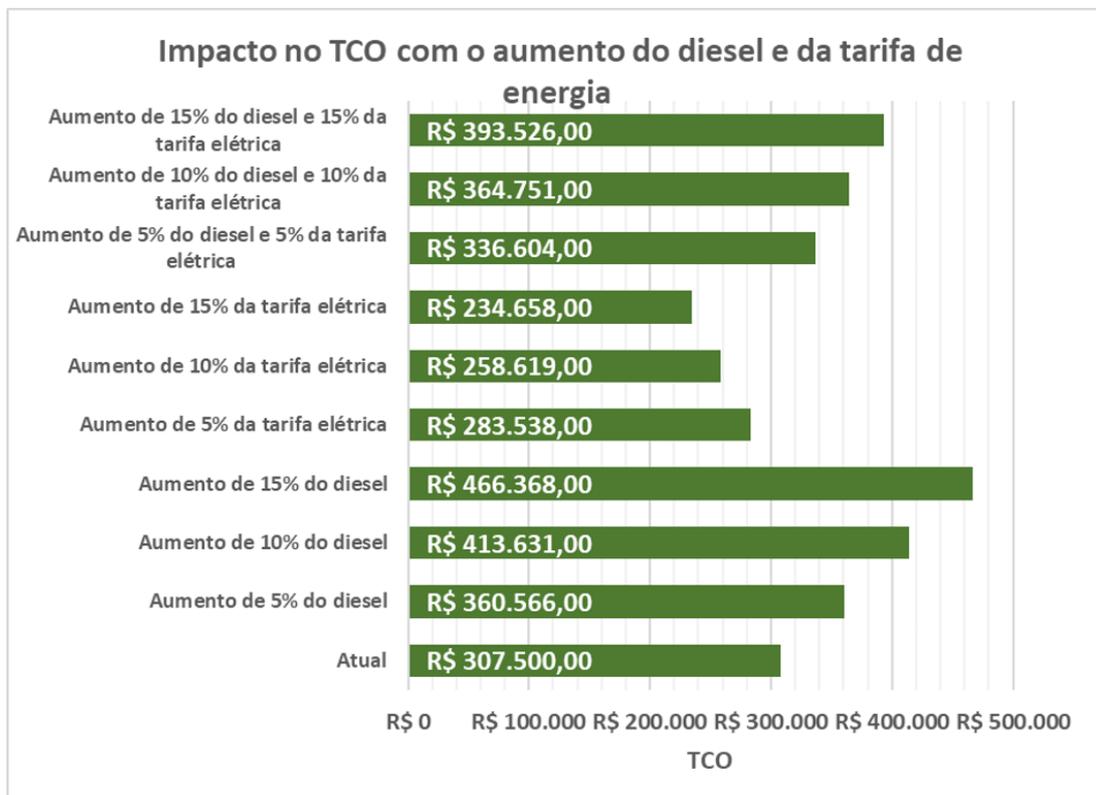
Fonte: Elaboração própria.

Figura 49 – Impacto no VPL com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 50 – Impacto no TCO com o aumento do preço do diesel e tarifa elétrica.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode-se verificar na Tabela 11 e nas Figuras 48, 49 e 50, o aumento do diesel favorece o investimento em ônibus elétricos em todos os casos analisados, mesmo junto a um aumento de tarifa igual ao do diesel percentualmente. Ou seja, o aumento do preço da tarifa elétrica é prejudicial ao investimento apenas se não houver um aumento proporcional no preço do diesel.

Mantendo o valor do preço do diesel inalterado o valor limite da tarifa de energia elétrica que torna o investimento em ônibus elétricos incompensável é de R\$ 0,815 por quilowatt-hora, apenas um dos indicadores financeiros mostra que o investimento não vale a pena, o TIR, que se iguala ao custo de capital próprio de 12,5% que foi colocado na seção 4.1.6. Lembrando que o valor da tarifa elétrica calculado na seção 4.1.3 foi de R\$/kWh 0,508, seria necessário um aumento de cerca de 60,4% no preço da tarifa elétrica para tornar o investimento incompensável através da TIR.

O valor da tarifa elétrica, mantendo o preço do diesel, que torna o investimento incompensável através do VPL é de R\$/kWh 0,946, esse valor de tarifa também torna o tempo de PAYBACK inviável, de 10 anos. Para a tarifa elétrica chegar nesse valor seria necessário um aumento 86,2%.

Após a apresentação dos resultados referentes às hipóteses, a próxima seção apresenta os resultados do cenários 1 e 2 acerca dos custos com energia elétrica e litros de diesel.

5.3 Custos com energia e diesel

Conforme os cálculos descrito nas seções 4.1.7, 4.2.1 e 4.2.2 os resultados foram agrupados e podem ser visualizados na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados - custos mensais com energia elétrica e diesel

Cenário	Frota elétricos	Frota diesel	Custo com energia elétrica	Custo com diesel	Custo por veículo
Atual	0	350	0	R\$ 3.048.000	R\$ 8.708,57
Cenário 1	350	0	R\$ 1.360.000,00	0	R\$ 2.960,00
Cenário 2	175	175	R\$ 518.000,00	R\$ 1.528.400,00	R\$ 5.846,86

Como pode ser verificado através da Tabela 12 o custo mensal por veículo,

comparado ao cenário 2 e o cenário atual, é menor no cenário 1, onde a frota é puramente elétrica. A seguir são apresentados os resultados dos custos com energia e diesel utilizando um sistema de geração fotovoltaica.

5.4 Custos com energia e diesel considerando um sistema solar fotovoltaico

Considerando que são necessários cerca de 30.017 painéis, conforme Equação (4.9) e sabendo que o painel solar Sinosola modelo SA330-72P possui 2,274m por 1,134m de dimensões, isso implica uma área de 2,58 m². Seria necessária uma área de cerca de 77.405 m². A garagem Carris possui um total de 30.000 m², logo o suprimento total de energia não é possível nesse cenário já que na área não é possível alocar todos os painéis necessários.

Pode-se então, calcular qual o máximo de energia que se pode obter através de painéis solares com uma área de 30.000 m².

Através da Equação (5.1) pode-se obter o número máximo de painéis que cabem dentro de 30.000 m².

$$\text{Número máximo de painéis} = \frac{30.000}{2.58} \approx 11.633 \quad (5.1)$$

Utilizando as Equações 2.8 e 2.7 obtém-se a produção diária de energia. Logo o cálculo presente na Equação (5.2) foi realizado para obter a energia elétrica máxima produzida a partir de placas solares de 2,58 m², 530 W de potência e 4,4 de irradiação diária.

$$\text{Produção diária do sistema fotovoltaico [kWh]} = \frac{11.633 \times 530 \times 0,8 \times 4,4}{1000} \approx 21.700 \quad (5.2)$$

Conforme a Equação (5.2) cerca de 21.700 kWh de energia podem ser gerados diariamente nas condições consideradas. Isso representa cerca de 39 % do consumo total da frota de 350 ônibus elétricos. Uma economia de 21.700 kWh de energia por dia, ocasionaria

uma economia de cerca de R\$ 330.770,00 por mês na conta de energia elétrica. Conforme mostra a Equação (5.3).

$$\text{Economia mensal na geração de energia } \frac{21.700 \text{ kWh por dia}}{[\text{kWh}]} = 21.700 \times 0,5081 \times 30 \approx R\$330.770,00 \quad (5.3)$$

De posse dos valores estimados para a economia mensal devido aos painéis solares foi realizada uma simulação no site Aldo Solar para estimar o investimento necessário para a instalação do sistema solar. Foi utilizado o gerador de energia SMA LAJE SOLAR GROUP ALDO SOLAR ON GRID que possui uma potência pico de 1.431 kWp e custa aproximadamente R\$ 5.200.000,00.

Para a área da Carris, onde podem ser gerados cerca de 21.700 kWh por dia, é necessário um sistema fotovoltaico de aproximadamente 6.165 kWp. Logo, para suprir essa geração diária são necessários cerca de 4 sistemas de 1.431 kWp que tem um custo aproximado de R\$ 20.000.000,00. Considerando que mensalmente tem-se uma economia mensal de cerca de R\$ 330.770,00. Seriam necessários 5 anos para o investimento realmente começar a gerar essa economia mensal.

Nesse capítulo foram apresentados os resultados obtidos através das simulações, cálculos e pesquisas realizadas. A seguir estão apresentadas as conclusões finais do trabalho.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho tratou da avaliação da viabilidade econômica na utilização de ônibus elétricos no transporte público da cidade de Porto Alegre no Rio Grande do Sul, propondo substituir total ou parcialmente a atual frota onde são utilizados veículos à diesel. A análise levou em conta alguns cenários e diferentes condições onde foram avaliados aumento de custos em energia elétrica e e preço do litro do diesel, a possibilidade de utilização de energia solar fotovoltaica para a contribuição na geração de energia elétrica para o carregamento dos ônibus e a substituição parcial da frota. Para esse estudo foram utilizadas diversas informações disponibilizadas pela EPTC e pela Carris.

Dentro desse contexto foram avaliados os fatores econômicos e ambientais que sofrem impacto com as alterações propostas. Para tal avaliação foi utilizado a ferramenta de avaliação de ônibus elétricos urbanos municipais desenvolvida e disponibilizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

O estudo de caso avaliado, com o auxílio da ferramenta, mostrou que o transporte público rodoviário possui diversos aspectos que tem influência direta na forma como o setor de transportes funciona no Brasil.

Na análise dos resultados dos indicadores financeiros VPL, TIR, TCO e *PAYBACK* dentro das hipóteses avaliadas foi possível verificar que mesmo quando aumenta-se o preço da energia elétrica em 15% ainda existe vantagem financeira na utilização dos ônibus elétricos. Através das simulações realizadas com a ferramenta, foi possível verificar que apenas quando o preço da tarifa de energia elétrica aumenta em 60% o investimento na tecnologia se torna financeiramente inviável em um dos indicadores. Os veículos a diesel apesar de possuírem um custo de aquisição consideravelmente menor comparado aos veículos elétricos, possuem um menor rendimento e custos mais elevados quando se trata de manutenção e combustível. Além disso são prejudiciais ao meio ambiente devido ao uso de combustíveis fósseis.

Analisando os resultados dos cenários avaliados foi possível verificar que no cenário

1, onde todos os ônibus são elétricos, o custo mensal com energia elétrica para manter a frota em operação é 66% menor do que o custo com diesel. No cenário 2, onde metade da frota é eletrificada o custo mensal com energia e combustível é 33% menor comparado a frota diesel. Logo, nesse aspecto pode-se concluir que uma frota totalmente eletrificada possui um vantagem financeira nos custos mensais para manter a frota em atividade.

Avaliando os resultados obtidos nos cenários e hipóteses propostos foi possível verificar que os custos para a operação de ônibus elétricos é o principal fator de vantagem econômica na utilização desses veículos além da vantagem no âmbito ambiental, que é crucial no momento atual.

Ao verificar a possibilidade de utilização de energia solar fotovoltaica foi possível constatar que o custo de aquisição é elevado porém através da economia financeira proveniente da geração de energia elétrica obtém-se um *payback* de 5 anos para o investimento para o caso avaliado. Nesse estudo foi possível uma geração de 39% da energia total necessária para o carregamento total da frota da empresa avaliada para uma área de 30.000 m².

Por fim, após as análises de todos os resultados obtidos durante o desenvolvimento do trabalho, conclui-se que a utilização dos ônibus elétricos pode ser vantajosa financeiramente para as empresas de ônibus. A maior desvantagem se encontra na aquisição uma vez que os ônibus elétricos ainda não estão difundidos no Brasil e os custos de compra são elevados. Por outro lado os custos de operação dos ônibus elétricos se mostra consideravelmente menor comparado aos veículos a combustão. O uso de um sistema solar fotovoltaico se mostrou um investimento que pode ter vantagem econômica a longo prazo uma vez que pode auxiliar na geração de energia elétrica para abastecimento da frota. Outra principal vantagem está no aspecto ambiental, a utilização dos ônibus elétricos elimina totalmente as emissões de gases estufa e partículas poluentes oriundas da combustão evitando centenas de toneladas de gases e partículas poluentes na atmosfera.

6.1 Trabalhos futuros

Nessa seção são apresentados sugestões de trabalhos futuros que complementam esse trabalho.

- Estudo para compreensão do impacto da substituição de ônibus movidos a diesel por ônibus elétricos no sistema elétrico de potência;
- Estudo do impacto que a substituição das tecnologias provoca na saúde respiratória dos moradores de zonas urbanas.

REFERÊNCIAS

- ABB. *Electric Vehicle Infrastructure HVC-PD UL opportunity charging for electric buses*. 2021. Disponível em: <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107991A0428&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Acesso em: 14 julho. 2021.
- ALTOÉ, L. *et al.* Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. *Estudos Avançados*, SciELO Brasil, v. 31, p. 285–297, 2017.
- ANEEL. *Geração Distribuída*. 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/geracao-distribuida>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.
- ANEEL, A. N. d. E. E. *Postos Tarifários*. 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>. Acesso em: 07 julho. 2021.
- ANEEL, A. N. d. E. E. *Tarifas Consumidores - Modalidades tarifárias*. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores/-/asset_publisher/zNaRBjCLDgbE/content/modalidade/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 07 julho. 2021.
- (ANEEL), A. N. de E. E. *RESOLUÇÃO NORMATIVA N^o 414*. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>>. Acesso em: 20 julho. 2021.
- ANTP. *Custo dos serviços de transporte público por ônibus. Instruções Práticas*. 2017. Disponível em: <<http://files.antp.org.br/2017/8/21/2.-instrucoes-praticas--final-impresso.pdf>>. Acesso em: 01 de julho. 2021.
- A, S. M. A.; SILVA, F. A. W. O. d. A teoria ondulatória de Huygens em livros diáticos para cursos superiores. *Ciã Educaã&ã(Bauru)*, scielo, v. 15, p. 323 – 341, 00 2009. ISSN 1516-7313. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-73132009000200006&nrm=iso>.
- BARAN, R.; LEGEY, L. F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011.*, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2011.
- BLOOMBERG Finance L.M. *Electric Buses in Cities. Driving Towards Cleaner Air and Lower CO2*. 2021. Disponível em: <<https://bit.ly/325cmi9>>. Acesso em: 22 de junho.
- BNDES. *Máquinas e equipamentos Todas as condições para financiar a produção, compra e modernização de máquinas e equipamentos*. 2020. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/eae0f84e-7d11-4ec4-a5d3-8d4cc9a311a3/Folheto_Maq_Equip_130320_spreads.pdf?MOD=AJPERES&CVID=n4es0xv>. Acesso em: 30 de junho. 2021.
- BNDES. *TFB - Taxa Fixa do BNDES*. 2020. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tfb-taxa-fixa-bndes>>. Acesso em: 01 de julho. 2021.

BOONRAKSA, T. *et al.* Impact of electric bus charging on the power distribution system a case study ieee 33 bus test system. In: IEEE. *2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia)*. [S.l.], 2019. p. 819–823.

BURATTINI M, P. T. C. *Energia uma abordagem multidisciplinar*. LIVRARIA DA FISICA, 2008. ISBN 9788588325999. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=e71C1bInDocC>>.

BYD. *The BYD K9*. 2019. Disponível em: <https://en.byd.com/wp-content/uploads/2019/07/4504-byd-transit-cut-sheets_k9-40_lr.pdf>. Acesso em: 18 agosto. 2021.

CARNEIRO, J. A. Módulos fotovoltaicos: Características e associações. 2010.

CASTRO, B. H. R. d.; BARROS, D. C.; VEIGA, S. G. d. Baterias automotivas: panorama da indústria no brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. *BNDES Setorial*, n. 37, mar. 2013, p. 443-496, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2013.

CASTRO, R. M. Introdução à energia fotovoltaica. *DEEC/Seção de Energia Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico*, 2002.

CAZZOLA, P. *et al.* Global ev outlook 2016. *International Energy Agency, France*, 2016.

CEEE, D. *Folder Grupo A 2020 - Alteração Base de Cálculo*. 2020. Disponível em: <https://www.cee.com.br/a-cee/distribuicao-arquivos/folder-grupo-a_2020/view>. Acesso em: 07 julho. 2021.

CEEE, D. *Tarifas e Custos*. 2021. Disponível em: <<https://www.cee.com.br/a-cee/tarifas-e-custos>>. Acesso em: 07 julho. 2021.

CHAPMAN, S. *Fundamentos de Máquinas Elétricas - 5ed.* AMGH Editora, 2013. ISBN 9788580552072. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Fyg6AgAAQBAJ>>.

COSTA, F. E. d. Proposta de um plano de manutenção contínua para uma empresa de transporte coletivo. 2018.

CRESESB, C. de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. B. *Potencial Solar - SunData v 3.0*. 2018. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/>>. Acesso em: 02 setembro. 2021.

DALLMANN, T. Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em são paulo. *The International Council on Clean Transportation (ICCT): relatório técnico*. São Paulo. Washington, DC ICCT, 2019 Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/beneficios-de-tecnologias-de-onibus-em-terminosde-emissoes-de-poluente-do-ar-e-do-clima>. Acesso em, v. 6, 2019.

DATA, O. W. in. *Brazil: CO2 Country Profile*. 2019. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2/country/brazil?country=~BRA>>. Acesso em: 03 junho. 2021.

DULLIUS, A. *et al.* Urban sustainability by analysis of renewable technologies in the public transport of the city of Curitiba/sustentabilidade urbana por meio de análise de tecnologias renováveis no transporte público da cidade de Curitiba/sostenibilidad urbana por medio de analisis de tecnologias renovables en el transporte público de la ciudad de Curitiba. *Revista de Gestão Ambiental e da Sustentabilidade*, Universidade Nove de Julho, v. 6, n. 2, p. 73–89, 2017.

D'AGOSTO, M.; GONÇALVES, D.; ALMEIDA, I. Ônibus elétricos a bateria (plug-in): Uma primeira avaliação da viabilidade econômica e do impacto na tarifa para o uso nas cidades brasileiras. *Transportation Engineering-PET/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*, 2017.

ENERGY, O. *When will fossil fuels run out?* 2019. Disponível em: <<https://octopus.energy/blog/when-will-fossil-fuels-run-out>>. Acesso em: 30 junho. 2021.

EPE. *Simulador para Avaliação de Viabilidade de Ônibus Elétrico*. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/simulador-para-avaliacao-de-viabilidade-de-onibus-eletrico>>. Acesso em: 10 fevereiro. 2021.

EPE, A. O. d. C. *et al.* Avaliação técnico-econômica de Ônibus elétrico no Brasil, nota técnica. 2020.

EPE, E. D. P. E. *Ferramenta de Avaliação Técnico-Econômica para Ônibus elétricos urbanos municipais*. 2019. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/simulador_onibus/Onibusv3/>. Acesso em: 12 julho. 2021.

EPE, E. d. P. E. *Balanco Energético Nacional*. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 21 fevereiro. 2021.

EPE, G. V. M. *et al.* Estudo de caso para a introdução de ônibus elétricos no município do Rio de Janeiro. 2020.

ESTADÃO. *Frotas de ônibus elétricos podem ser ampliadas no Brasil*. 2021. Disponível em: <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/sustentabilidade/frotas-de-onibus-eletricos-podem-ser-ampliadas-no-brasil/>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.

FERNANDES, C. B. Inversores para veículos elétricos: Aplicação do controle vetorial sem sensor para um motor de indução. *Monografia (Engenharia Elétrica) UFR. Rio de Janeiro*, 2015.

FERREIRA, A. F.; ROSA, G. P. Geração de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos para consumidores comerciais de pequeno porte. *Revista Eletrônica TECCEN*, v. 12, n. 2, p. 83–93, 2019.

FIEMG, F. d. I. d. M. G. *Energia limpa no Brasil*. 2019. Disponível em: <<https://www7.fiemg.com.br/noticias/detalhe/energia-limpa-e-matriz-energetica>>. Acesso em: 21 fevereiro. 2021.

FILHO J, A. *Matriz energética brasileira: da crise à grande esperança*. Mauad, 2003. ISBN 9788574781006. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=FLy9iv5daicC>>.

FONSECA, Y. D. d.; BRUNI, A. L. Técnicas de avaliação de investimentos: uma breve revisão da literatura. 2010.

FORBES. *This Chinese City Has 16,000 Electric Buses And 22,000 Electric Taxis*. 2021. Disponível em: <<https://www.revistaautobus.com.br/artigo/o-onibus-eletrico-e-o-brasil>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.

GLOBAL Solar Atlas. 2019. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info>>. Acesso em: 13 Março. 2021.

GLOBAL Solar Atlas. 2019. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/map?c=-29.520891,-50.949097,8&s=-30.040566,-51.201782&m=site>>. Acesso em: 13 Março. 2021.

GŁUCHY, D.; KURZ, D.; TRZMIEL, G. Analysis of the influence of shading by horizon of pv cells on the operational parameters of a photovoltaic system. *Przełqd Elektrotechniczny*, v. 90, n. 4, p. 78–80, 2014.

GOV. *Fala.Br*. 2021. Disponível em: <<https://falabr.cgu.gov.br>>. Acesso em: 14 julho. 2021.

GREENPEACE BRASIL. *DossiÊ ônibus limpo. Benefícios de uma transição para combustíveis renováveis na frota de São Paulo*. 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2Wchzkl>>. Acesso em: 30 de junho. 2021.

GREENPRO, A. P. C. Energia fotovoltaica-manual sobre tecnologias, projecto e instalação. *Europa: Comissão Europeia*, p. 43, 2004.

GRÄTZEL, M. Photoelectrochemical cells. In: *Materials For Sustainable Energy: A Collection of Peer-Reviewed Research and Review Articles from Nature Publishing Group*. [S.l.]: World Scientific, 2011. p. 26–32.

GÖNÜL, ; DUMAN, A. C.; GÜLER, Electric vehicles and charging infrastructure in turkey: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 143, p. 110913, 2021.

HAND, A. *Motores elétricos - 2.Ed.: Manutenção e solução de problemas*. Bookman Editora, 2015. (Tekne). ISBN 9788582602676. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Z9C1BAAQBAJ>>.

ICLODEAN, C. *et al*. Comparison of different battery types for electric vehicles. In: IOP PUBLISHING. *IOP conference series: materials science and engineering*. [S.l.], 2017. v. 252, n. 1, p. 012058.

IEA, I. E. A. *Global EV Outlook 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021?mode=overview>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.

IEA, I. E. A. *Global EV Outlook 2021*. 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.

JABORANDI, F. *Celulas Fotovoltaicas*. 2012. Disponível em: <<http://fisicanodiaadia.blogspot.com/2012/02/celulas-fotovoltaicas.html>>. Acesso em: 10 Março. 2021.

JOYCE, A. O solar fotovoltaico de concentração. *renováveis magazine*, p. 24–29, 2010.

- JOYCE, A. As tecnologias fotovoltaicas. *Renováveis Magazine*, p. 40–44, 2011.
- LEITMAN, S.; BRANT, B. *Build Your Own Electric Vehicle*. McGraw-Hill Education, 2008. (McGraw Hill professional). ISBN 9780071643511. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=jf4jrFJtH7cC>>.
- LIGAÇÕES químicas no Enem. 2020. Disponível em: <<https://www.preparaenem.com/enem/ligacoes-quimicas-no-enem.htm>>. Acesso em: 10 Março. 2021.
- MAHON, J. *Mecânica Quântica - Desenvolvimento Contemporâneo*. LTC, 2011. ISBN 9788521618867. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xflsLwEACAAJ>>.
- MANZETTI, S.; MARIASIU, F. Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 51, p. 1004–1012, 2015.
- MARTINS, R. d. A.; SILVA, C. C. As pesquisas de Newton sobre a luz: : Uma visão histórica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 37, p. 4202–1 – 4202–32, 12 2015. ISSN 1806-1117. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172015000400202&nrm=iso>.
- MOBILIDADE, A. F. C. *O ônibus elétrico e o Brasil*. 2020. Disponível em: <<https://www.revistaautobus.com.br/artigo/o-onibus-eletrico-e-o-brasil>>. Acesso em: 21 agosto. 2021.
- MORAES, C. *Celula Fotovoltaica: Tudo que você precisa saber*. 2020. Disponível em: <<https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>>. Acesso em: 9 Março. 2021.
- MOURA, B. Newton versus Huygens: como (não) ocorreu a disputa entre suas teorias para a luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, p. 111–141, 2016. ISSN 2175-7941. Disponível em: <<https://antigo.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2016v33n1p111>>.
- NASCIMENTO, C. A. D. Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica. *Diss. Universidade Federal de Lavras*, 2004.
- PLANA-FATTORI, A.; CEBALLOS, J. *Glossário de termos técnicos em radiação atmosférica-versão 2.0*. [S.l.]: IAG/USP–CPTEC/INPE, São Paulo, 2005. Disponível em: <<http://pyata.cptec> . . . , 2015.
- Prefeitura de Porto Alegre. *Carris - Apresentação*. 2021. Disponível em: <http://www.carris.com.br/default.php?p_secao=59>. Acesso em: 12 julho. 2021.
- Prefeitura de Porto Alegre. *EPTC - Apresentação*. 2021. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/eptc/default.php?p_secao=142>. Acesso em: 12 julho. 2021.
- PUC-RIO, I. Energia da; FERNANDEZ, E. *O sol vai voltar amanhã: um espectro de análises sobre a energia fotovoltaica*. LEXIKON Editora Digital Ltda, 2020. ISBN 9786588871010. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=GNQPEAAAQBAJ>>.

- RADAR eBus. *Ônibus Elétricos América Latina*. 2021. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>. Acesso em: 23 setembro. 2021.
- REIS, L. D.; HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. *Energia E Meio Ambiente*. CENGAGE DO BRASIL, 2014. ISBN 9788522116171. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=5DeetAEACAAJ>>.
- SANCHES, F. B. G. *Controle De Natalidade Pode Evitar Que O Aquecimento Global Destrua O Mundo*. [s.n.], 2016. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=CQpyDwAAQBAJ>>.
- SANTOS, C. dos. *A Equação de Einstein para o Efeito Fotoelétrico*. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/einstein/efeitofotoeletricoequation.html>>. Acesso em: 9 Março. 2021.
- SANTOS, C. dos. *O Prêmio Nobel de Einstein*. 2002. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/einstein/efeitofotoeletricopremionobel.html>>. Acesso em: 9 Março. 2021.
- SANTOS, M. M. D. *Veículos elétricos e Híbridos: Fundamentos, Características e Aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2020.
- SERRA T, C. *Mudanças climáticas guia de informação*. Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, 2002. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=R7hcAAAAMAAJ>>.
- SILVA, C. O. da. *Física Quântica: entenda o contexto que foi base para criação dessa incrível (e estranha) teoria | 360 Explica*. 2021. Disponível em: <<https://engenharia360.com/motivacao-para-desenvolvimento-da-teoria-fisica-quantica/>>. Acesso em: 10 Março. 2021.
- SILVA, M. L. d.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (vpl), valor anual equivalente (vae) e valor esperado da terra. *Revista Árvore*, SciELO Brasil, v. 29, p. 931–936, 2005.
- SLOWIK, P. *et al.* Avaliação internacional de políticas públicas para eletromobilidade em frotas urbanas. ministério da indústria. *Comércio Exterior e Serviços, Brasília, DF*, 2018.
- SMTC, S. M. de Transparência e C. *Serviço de Informações ao Cidadão*. 2021. Disponível em: <https://sicpoa.procempa.com.br/sicpoaweb/?redirect_fragment=%2FconsultaSolicitacoes#>. Acesso em: 02 julho. 2021.
- SOLAR, P. *Simulador de Energia Solar*. 2015. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/calculo-solar>>. Acesso em: 30 agosto. 2021.
- SOLARGIS. 2019. Disponível em: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/tech-specs>>. Acesso em: 13 Março. 2021.
- SVIECH, V.; MANTOVAN, E. A. Análise de investimentos: controvérsias na utilização da tir e vpl na comparação de projetos. *Percurso*, v. 1, n. 13, p. 270–298, 2013.
- SYSTEMS, I. w. s. o. P. P. G. Fraunhofer Institute for S. E. Photovoltaics report. 2020.

VECTOR. *Short Charging Break for Electric Commercial Vehicles*. 2020. Disponível em: <https://www.vector.com/int/en/download/?tx_vectorproducts_productdownloaddetail%5Bdownload%5D=59768&tx_vectorproducts_productdownloaddetail%5Baction%5D=show&tx_vectorproducts_productdownloaddetail%5Bcontroller%5D=Productdownload&cHash=593457d20ea9334999a5e426ea1609cd>. Acesso em: 14 julho. 2021.

WILSON, G. *et al.* Resultados do teste com o Ônibus elétrico na cidade do rio de janeiro. *FETRANSPOR, Rio de Janeiro*, 2014.

XAVIER, N. F. *et al.* Dimensionamento de potência de geração fotovoltaica visando consumidores do grupo a. Insitituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2019.