

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS E HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

Glauco Oliveira Rodrigues

**DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Santa Maria, RS
2023

Glauco Oliveira Rodrigues

**DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Tese de Doutorado apresentada à banca de avaliação, ao Programa de Pós-graduação em Administração, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Administração**.

Orientador: Prof. Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto

Santa Maria, RS
2023

Glauco Oliveira Rodrigues

**DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS**

Tese de Doutorado apresentada à banca de avaliação, ao Programa de Pós-graduação em Administração, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Administração**.

Aprovado em 05 de abril de 2023

Prof. Eugênio de Oliveira Simonetto, Doutor (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Prof. Hélio Castro, Doutor (ISEP-IPP)

Prof. Luiz Cláudio Dalmolin, Doutor (UDESC)

Prof^a. Eliete dos Reis Lehnhart, Doutora (UFSM)

Prof. Roberto de Gregori, Doutor (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

Rodrigues, Glaucio
DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISE DO IMPACTO DA
INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS / Glaucio Rodrigues.- 2023.
223 p.; 30 cm

Orientador: Eugênio Simonetto
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Programa de
Pós-Graduação em Administração, RS, 2023

1. Veículos Elétricos 2. Dinâmica de Sistemas 3. Vensim
I. Simonetto, Eugênio II. Título.

RESUMO

DINÂMICA DE SISTEMAS PARA ANÁLISAR O IMPACTO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

AUTOR: Glauco Oliveira Rodrigues
ORIENTADOR: Eugênio de Oliveira Simonetto

A poluição do ar e os gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis no setor de transporte, é responsável por cerca de 25% das emissões globais de CO₂. Para reduzir essas emissões, a eletrificação da mobilidade urbana é uma tendência emergente, com a inserção de veículos elétricos em cidades brasileiras podendo ter um impacto positivo na redução da poluição do ar e emissão de gases de efeito estufa. A tese tem como objetivo conceber, desenvolver e avaliar modelo(s) de dinâmica de sistemas que sirvam para apoio ao processo decisório envolvendo a inserção de veículos elétricos no sistema elétrico de potência, com foco na viabilidade da implementação de ônibus elétricos em uma cidade. O transporte elétrico é uma alternativa importante para reduzir as emissões de gases poluentes no setor de transportes. Os veículos elétricos também são alternativos para o mundo dos negócios, este estudo reforça a utilização de veículos elétricos no transporte, onde novas estratégias são apresentadas e analisadas. O método utilizado neste estudo é a da dinâmica de sistemas, que é uma abordagem para entender o comportamento de sistemas complexos no tempo. Com a aplicação da metodologia os sistemas dos veículos elétricos poderão ser entendidos e analisados, através das interações entre as variáveis dos modelos. Além disso, novas políticas e estruturas podem ser desenhadas para melhorar o comportamento do sistema atual. Os principais resultados apontam importância da inserção de veículos elétricos. Os resultados mostram que a utilização de veículos elétricos reduz as emissões e os custos de transporte, destacando a importância de sua utilização para combater as emissões de veículos e garantir um futuro sustentável. Algumas limitações são destacadas, como a falta de modelos de alguns veículos elétricos, como o caminhão, que por falta de dados não foram incluídos no estudo. Como trabalhos futuros pretende-se ampliar os modelos de geração de energia através de placas solares e também desenvolver modelos menos amplos e mais focados a diferentes situações.

Palavras-chave: Dinâmica de sistemas; Modelagem Computacional; Veículos Elétricos; Vensim-PLE

ABSTRACT

SYSTEM DYNAMICS TO ANALYZE THE IMPACT OF THE INSERTION OF ELECTRIC VEHICLES IN THE ELECTRICAL POWER SYSTEM

AUTHOR: Glauco Oliveira Rodrigues

ADVISER: Eugênio de Oliveira Rodrigues

Air pollution and greenhouse gases from burning fossil fuels in the transport sector are responsible for around 25% of global CO₂ emissions. To reduce these emissions, the electrification of urban mobility is an emerging trend, with the insertion of electric vehicles in Brazilian cities that can have a positive impact on reducing air pollution and greenhouse gas emissions. The thesis aims to conceive, develop and evaluate model(s) of system dynamics that support the decision-making process involving the insertion of electric vehicles in the electric power system, focusing on the feasibility of implementing electric buses in a city. Electric transport is an important alternative to reduce polluting gas emissions in the transport sector. Electric vehicles are also an alternative for the business world, this study reinforces the use of electric vehicles in transport, where new strategies are presented and analyzed. The method used in this study is that of system dynamics, which is an approach to understand the behavior of complex systems over time. With the application of the methodology, the systems of electric vehicles can be understood and analyzed, through the interactions between the variables of the models. Furthermore, new policies and structures can be designed to improve the behavior of the current system. The main results point out the importance of the insertion of electric vehicles. The results show that the use of electric vehicles reduces emissions and transport costs, highlighting the importance of their use to combat vehicle emissions and ensure a sustainable future. Some limitations are highlighted, such as the lack of models of some electric vehicles, such as trucks, which due to lack of data were not included in the study. As future work, it is intended to expand the models of energy generation through solar panels and also to develop models that are less broad and more focused on different situations.

Keywords: Systems dynamics; Computational modeling; Electric vehicles; Vensim-PLE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Carregamento EVSE.....	30
Figura 2 – Carregamento Wireless	32
Figura 3 – Carregamento Experimental em Rodovia Eletrificada	33
Figura 4 – Tipos de Conectores/Entradas para Recarga dos Ves,.....	33
Figura 5 – Exemplo de conectores	34
Figura 6 – Fabricantes de ônibus elétricos	38
Figura 7 – Ônibus Híbrido.....	40
Figura 8 – Emissões de GEE Brasil.....	44
Figura 9 – Emissões de GEE no setor de transportes	44
Figura 10 – Esquema mostrando os conceitos de G2V, V2G e V2H.....	49
Figura 11 – Modo de operação V4G; (a) produzindo potência reativa, (b) compensando harmônicos na corrente.....	50
Figura 12 – Coleta de Energia Eólica.....	56
Figura 13 – Painel Fotovoltaico	59
Figura 14 – Etapas da revisão de literatura.....	68
Figura 15 – Estágios da metodologia da Dinâmica de Sistemas	70
Figura 16 – Diagrama de Causa e Consequência da População.....	82
Figura 17 – Comportamento de compra carros	82
Figura 18 – Diagrama de Causa e Consequência CO2.....	85
Figura 19 – Emissão CO2 CE	86
Figura 20 – Consumo carros a gasolina	90
Figura 21 – Consumo carros a etanol	90
Figura 22 – Consumo carros a diesel	91
Figura 23 – Custo EVs	94
Figura 24 – Geração CO2 Energia	96
Figura 25 – Procedimentos adotados para estimar as emissões	103
Figura 26 – Diagrama de causa consequencia ambiental	109
Figura 27 – Modelo para análise ambiental.....	110
Figura 28 – Preço de compra de ônibus de transporte elétrico em comparação com ônibus convencionais a diesel	112
Figura 29 – Fluxo Custo Transporte.....	115
Figura 30 – Fluxo Custo Recarga.....	116

Figura 31 – Fluxos Custo Pessoal e Receitas.....	117
Figura 32 – Modelo impacto financeiro ônibus elétrico	118
Figura 33 – Modelo de consumo elétrico.....	119
Figura 34 – Loopcausal distancia entrega.....	122
Figura 35 – Distância Percorrida Diária	122
Figura 36 – Loopcausal total entregador e total motos	123
Figura 37 – Distância Percorrida Diária	124
Figura 38 – Total de motos por nível.....	127
Figura 39 – Consumo das motos.....	129
Figura 40 – Loopcausal custo	130
Figura 41 – Custo Entrega	131
Figura 42 – Loopcausal Emissão	132
Figura 43 – Emissão.....	133
Figura 44 – Total de Placas.....	136
Figura 45 – Modelo de inserção fotovoltaica.....	137
Figura 46 – Exemplo de esquema de GD	142
Figura 47 – Ambiente de simulação	144
Figura 48 – Total de veículos por categoria.....	149
Figura 49 – Consumo dos veículos a combustão interna.....	150
Figura 50 – Carga de energia necessária para locomover os veículos.....	151
Figura 51 – Variáveis que compõem o modelo	152
Figura 52 – Lucro com a energia excedente nas baterias dos veículos elétricos	153
Figura 53 – Emissões simulação capital	159
Figura 54 – Categoria Emissão CO2.....	160
Figura 55 – Emissão de CO2 EVs cidades não capitais	161
Figura 56 – Gasto de consumo simulação capital.....	163
Figura 57 – Custo EVs em cidades não capitais	164
Figura 58 – Distância Percorrida	165
Figura 59 – Redução CO2.....	166
Figura 60 – Profit	168
Figura 61 – Quantidade de motos por cenários.....	170
Figura 62 – Custo entrega	171
Figura 63 – Emissão CO2 sistema entrega por delivery	172
Figura 64 – Energia necessária por modelo simulado	174

Figura 65 – Energia gerada média por Placa.....	175
Figura 66 – Total de Placas	176
Figura 67 – Gastos de energia elétrica.....	177
Figura 68 – População da região estudada	178
Figura 69 – Variação de economia apresentada pelos veículos	179
Figura 70 – Carga Total.....	180
Figura 71 – Custo diário	181
Figura 72 – Lucro da venda da energia acumulada	182
Figura 73 – Lucro da venda da energia acumulada por pessoa	183

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características dos veículos elétricos	27
Quadro 2 – Principais características e diferenças entre os tipos de veículos elétricos	29
Quadro 3 – Equações modelo comportamento compra carro.....	84
Quadro 4 – Equações modelo emissões	87
Quadro 5 – Equações modelo comportamento compra carro.....	91
Quadro 6 – Equações modelo custo	95
Quadro 7 – Modelo Equações Modelo Ambiental	111
Quadro 8 – Modelo Equações Fluxo Custo Transporte	116
Quadro 9 – Modelo Equações Fluxo Custo Recarga.....	117
Quadro 10 – Modelo Equações Fluxo Custo Recarga.....	118
Quadro 11 – Equações Modelo Total Motos.....	125
Quadro 12 – Características das motos utilizadas na simulação	126
Quadro 13 – Equações Modelo Total Motos.....	128
Quadro 14 – Equações Modelo Total Motos.....	129
Quadro 15 – Equações Modelo Custo Entrega.....	132
Quadro 16 – Equações Modelo Emissão	134
Quadro 17 – Equações do modelo de placas	136
Quadro 18 – Dados utilizados para formar o valor do Custo de Demanda.....	138
Quadro 19 – Dados Utilizados para formar o valor do custo médio do kWh Consumido.....	139
Quadro 20 – Irradiação diária solar média	140
Quadro 21 – Modelo de equações	140
Quadro 22 – Modelo de equações	149
Quadro 23 – Modelo de equações	150
Quadro 24 – Modelo de equações	151
Quadro 25 – Modelo de equações	153
Quadro 26 – Modelo de equações	155
Quadro 27 – Apontamentos de diversos pesquisadores do Mundo.....	194

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos veículos elétricos	25
Tabela 2 – Tipos de carregamento de acordo com o nível de recarga.....	30
Tabela 3 – Ônibus elétricos puros disponíveis comercialmente.....	39
Tabela 4 – Participação das fontes na geração elétrica	52
Tabela 5 – Classificação das centrais hidrelétricas quanto à potência e queda de projeto	60
Tabela 6 – Oferta de Energia	79
Tabela 7 – Oferta de Energia	79
Tabela 8 – Consumo de energia por fonte	80
Tabela 9 – Uso de energia por setor	80
Tabela 10 – Dados modelo comportamento compra	85
Tabela 11 – Dados Veículos	88
Tabela 12 – Dados Veículos	88
Tabela 13 – Dados Veículos	89
Tabela 14 – Energia demandada para os modelos de carros elétricos utilizados na simulação	92
Tabela 15 – Tipos de carregamento de acordo com o nível de recarga.....	94
Tabela 16 – Logística Transporte	100
Tabela 17 – Modelos utilizados.....	101
Tabela 18 – Consumo por km.....	104
Tabela 19 – Modelo de ônibus elétrico	105
Tabela 20 – Matriz Elétrica anual.....	107
Tabela 21 – Valores CAPEX.....	113
Tabela 22 – Dados Referentes ao OPEX.....	114
Tabela 23 – A grade elétrica tradicional versus a grade inteligente	185
Tabela 24 – Atributos das Smarts Grids	192

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Geração de energia elétrica: fontes não renováveis	53
Gráfico 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	53
Gráfico 3 – Consumo Final por Fonte	54
Gráfico 4 – Emissões para gerar energia por termoelétrica.....	97
Gráfico 5 – Emissão de CO2 por tipo de geração de energia.....	108
Gráfico 6 – Equivalência de geração de energia	167
Gráfico 7 – Total de leitos de hospitais beneficiados	195
Gráfico 8 – Total de Escolas beneficiadas.....	196
Gráfico 9 – Produção de aço	197
Gráfico 10 – Produção de ferro	198
Gráfico 11 – Produção de cimento	198
Gráfico 12 – Geração de energia elétrica em uma usina a diesel	200

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS	23
2.1.1 Tipos de veículos elétricos	24
2.1.1.1 Carros elétricos e infraestrutura de recarga.....	26
2.1.1.2 Ônibus elétricos e suas características.....	37
2.1.2 O uso dos veículos elétricos no Brasil e no mundo	42
2.1.2.1 Os principais impactos diretos e indiretos resultantes da expansão dos EVs.....	43
2.1.2.2 Impactos da inserção dos veículos elétricos na rede.....	46
2.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO.....	51
2.2.2 Energias renováveis	54
2.3 DINÂMICA DE SISTEMAS E PROCESSO DECISÓRIO.....	61
3 MÉTODO DE PESQUISA	67
3.1 COLETA DE DADOS.....	67
3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS.....	68
3.2.1 Formulação da hipótese dinâmica	72
3.2.2 Modelo de simulação e análise dos resultados	72
3.3 PROJEÇÃO DE CENÁRIOS	73
4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS	78
4.1 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE INSERÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS	78
4.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE URBANO.....	98
4.2.1 Características do transporte urbano	99
4.2.2 Desenvolvimento modelo ambiental da eletrificação do transporte urbano	101
4.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELETRIFICAÇÃO DE ENTREGAS VIA DELIVERY.....	120
4.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	134
4.5 CASAS INTELIGENTES COM VEÍCULOS ELÉTRICOS	141

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	157
5.1 IMPACTO DA INSERÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS	158
5.2 IMPACTO DA INSERÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS.....	165
5.3 IMPACTO DA INSERÇÃO DE MOTOS ELÉTRICOS	170
5.4 ENERGIA RENOVÁVEL	173
5.5 CASA INTELIGENTE COM VEÍCULOS ELÉTRICO	177
5.6 IMPACTOS A SOCIEDADE GERADOS PELA INSERÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	184
5.6.1 REDE ELÉTRICA INTELIGENTE	184
5.6.2 EQUIVALÊNCIA FOCADA NO SETOR PÚBLICO.....	195
5.6.3 EQUIVALÊNCIA FOCADA NO SETOR DE CONSTRUÇÃO CÍVIL	196
5.6.3 EQUIVALÊNCIA FOCADA NA GERAÇÃO DE ENERGIA	199
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	201
6.1 DISCUSSÃO SOBRE O ALCANCE DA QUESTÃO-PROBLEMA E OS OBJETIVOS DA PESQUISA	201
6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA	202
6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	203

1 INTRODUÇÃO

A poluição do ar e os gases de efeito estufa provenientes da queima de combustíveis fósseis levaram à inovação de formas de transporte pessoal menos poluentes e energeticamente mais eficientes, como veículos elétricos (VEs) e utilização/viabilização de outros combustíveis alternativos (CARRANZA et al, 2022). Os esforços para incentivar a adoção desses veículos pelo consumidor incluem melhorias tecnológicas (como o desenvolvimento de carros elétricos com maior alcance e velocidade) e incentivos financeiros para a adoção de veículos alternativos. Essas práticas têm sido usadas em muitos países (China, Índia, Estados Unidos et.c) em diferentes níveis de governo e de diferentes formas, incluindo estacionamento gratuito, acesso a vias movimentadas, combustível subsidiado, incentivos e abatimentos de imposto de renda e isenções fiscais (LIU; IAL, 2020).

O transporte é responsável por aproximadamente 25% das emissões globais de CO₂ provenientes da combustão de combustível (International Energy Agency, IEA, 2020). A tendência emergente atual é a eletrificação da mobilidade urbana. O número total de veículos elétricos aumentou dez vezes apenas nos últimos cinco anos (IEA, 2021). Para Rugeri (2022), parte da razão para esse crescimento é que se espera que um veículo elétrico tenha um impacto ambiental menor do que um veículo convencional.

A poluição do ar é um obstáculo pertinente na sociedade atual. O tráfego urbano, para Du et al (2023), tornou-se um grande empecilho para o desenvolvimento sustentável das futuras metrópoles. O rápido crescimento no uso de veículos levanta grandes preocupações acerca do consumo de energia fóssil e dos efeitos adversos ao ambiente urbano (SONG et al., 2018).

Para Minh et al (2023), o tráfego urbano é considerado a principal causa de poluição do ar. O transporte de pessoas e de mercadorias sempre esteve associado à geração de alguma forma de poluição, seja atmosférica, sonora ou pela intrusão visual nos centros urbanos, independente do modal predominante. Os poluentes globais são gases que são expelidos para a atmosfera e acabam impactando todo o planeta pelo aquecimento global, no caso da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE). O principal poluente nesta categoria é o dióxido de carbono (CO₂), que serve também como unidade de equivalência para os demais GEE (DE CARVALHO, 2021).

Com o crescimento econômico e a urbanização, o setor de transporte tornou-se uma importante força motriz para as emissões de CO₂ (XIAO et al, 2021). O setor emite uma proporção significativa das emissões totais, de 32,9% nos Estados Unidos, 17,7% no Japão e 8,6% na China em 2012 (IEA, 2020). No Brasil no ano de 2019 o setor de transportes emitiu

cerca de 196 Mt de CO₂, um aumento de um por cento se comparado ao ano anterior (SEEG, 2022).

No Brasil segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2022) a média de consumo de combustível fóssil antes do período pandêmico era de 63,8%, e estima-se que em 2023 esse valor se mantenha. Tal valor representa alto volume de emissões prejudiciais ao meio ambiente. Para Orsi et al (2016), é importante achar alternativas para controlar o volume de emissões do setor de transporte.

Para mitigar os efeitos do aquecimento global causado pelos gases do efeito estufa, governos de todo o mundo estão promovendo ativamente o desenvolvimento de energia sustentável e indústrias verdes como forma de promover a redução de emissões de dióxido de carbono (SOCKEEL; SHAHVERDI; MAZZOLA, 2019). Em resposta a esta tendência, os veículos elétricos têm se apresentado como um importante alvo de desenvolvimento da indústria automobilística (CHEN et al; 2019).

Várias estratégias e instrumentos de baixo carbono são projetados e implementados em ônibus com o propósito de mitigar as emissões de CO₂ do transporte urbano como, por exemplo, motor movido a eletricidade (FENG et al., 2013; HAO et al., 2014, JIE; VAN ZUYLEN, 2014; LEHMANN, 2013; LONAN; ARDI, 2020). Veículos Elétricos são considerados boas alternativas para o transporte urbano uma vez que estes reduzem a emissão de gases de efeito estufa, a poluição em centros urbanos, e podem substituir os que utilizam de combustíveis fósseis de reservas limitadas.

Para Lima et al (2019), a associação da utilização do transporte com a substituição de combustíveis fósseis pela eletricidade é uma das alternativas que se apresenta como a mais promissora. Petzhold (2022) afirma que a utilização desses veículos reduz o impacto ambiental causado pelos modais a diesel, já que os modais elétricos praticamente não emitem poluentes (PETZHOLD, 2022). A seguir será apresentado mais dados sobre o problema da pesquisa.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Locais excessivamente urbanizados, como são os das grandes cidades, possuem em seu ambiente muitos gases insalubres ao meio ambiente, boa parte originada dos meios de transporte (FALCO, 2017). Ye et al (2021) definem o transporte como o principal setor responsável pelo consumo de energia e pelas emissões de carbono no mundo. Para Liyang et al (2020), as emissões relacionadas ao tráfego são uma das principais causas da deterioração ambiental em áreas urbanas. Samaranayake et al., (2014) e Wang et al., (2016), mencionam

alguns gases que prejudicam não só o meio ambiente, mas a saúde humana: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarboneto (HC) e óxidos nítricos (NO_x), principalmente NO e NO₂).

Para Quirino (2020), o padrão da qualidade do ar urbano varia conforme a limitação e as prioridades locais. A emissão de gases veiculares pode variar, depende de fatores, como o combustível utilizado, o tipo de motor, regulagem, manutenção e a velocidade aplicada do veículo. Tudo isso interfere na quantidade de poluentes emitidos (VASCONCELOS, 2020). Nos veículos a combustão, a relação combustível/ar não é a ideal para proporcionar a queima completa do combustível, de modo que o consumo de oxigênio é menor que o necessário, levando a um aumento no consumo de combustível e, conseqüentemente, uma maior emissão de poluentes e gases inflamáveis (TORSANI, 2018). A queima do diesel de origem fóssil tem um impacto potencial tóxico, em razão da emissão de outros poluentes, além dos impactos do ponto de vista das mudanças climáticas causados principalmente pelas emissões de CO₂ (BEN, 2020).

Falco (2017) afirma que existem pesquisas epidemiológicas que apresentam em seus resultados estreitas correlações entre a exposição de poluentes atmosféricos e os efeitos de morbidade e mortalidade, ocasionados por problemas respiratórios e cardiovasculares em indivíduos que já possuem doenças respiratórias. Estudos (CÔRTEZ, 2020; DINIZ, 2018, FELIN, 2018; WRI, 2018) indicam que os efeitos sobre a saúde humana incluem: mal-estar, irritação nos olhos e garganta e pele, dor de cabeça, enjoo, bronquite, asma (CETESB, 2019).

Gases podem reagir com a hemoglobina presente no sangue para formar carboxihemoglobina, reduzindo o volume de oxigênio transportado dos pulmões para as células do cérebro, coração e para o resto do corpo, durante a respiração (DIAS, 2018). Em baixa concentração, causa fadiga e dor no peito, e em alta concentração, pode levar a asfixia e morte (MMA, 2020). As elevadas concentrações de CO₂ podem aumentar o risco de doenças cardiovasculares e impedir as funções psicomotoras. Crianças, idosos e doentes cardiovasculares crônicos sofrem com a presença destes poluentes (JEONGYONG; SONG; CHOI, 2015). Além disso, o CO₂ contribui de forma indireta para a formação de ozônio e metano, onde se apresenta o ciclo de formação do CO e sua contribuição para a formação dos derivados indiretos, como possível dissociação do dióxido de carbono em monóxido de carbono e oxigênio (ZIEMANN et al, 2018).

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal produto da combustão completa de motores movidos a combustíveis fósseis (MMA, 2020). Apesar de não ser considerado um poluente e estar presente naturalmente na atmosfera, o CO₂ é um gás gerador do efeito estufa, que

contribuiu para o aquecimento global (IEA, 2020). Além dos danos à saúde e à qualidade de vida, os efeitos da poluição atmosférica acarretam maiores gastos do Estado com a saúde pública (em atendimentos, internações e medicamentos, por exemplo), os quais poderiam ser evitados com a melhoria da qualidade do ar nas cidades (MMA, 2017).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente – MMA (2020), fontes derivadas de petróleo tiveram enorme participação no total de emissões geradas pelos setores de energia e PIUP. A exploração e uso de petróleo ou derivados gerou 296 milhões de toneladas de CO₂, representando 57% das emissões dos setores de energia e PIUP somados. O segmento de Transportes é o maior emissor dentro dos setores analisados (Energia e PIUP), sendo responsável pela emissão de 204 MtCO₂ e em 2016 (39% do total). Isto se deve à utilização de uma malha de transportes baseada no setor de transporte, composto em sua maioria por veículos movidos com motores a combustão. Especificamente no setor de transportes de passageiros, segundo o relatório elaborado pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2020), do total de viagens efetuadas pela população em 2019, 39% foram realizadas através de transporte público, sendo 20% por ônibus municipais (ANTP, 2022) e 13% do transporte urbano.

O transporte desempenha um papel fundamental no desenvolvimento urbano eficiente e sustentável de uma cidade (SCHLIWA et al., 2021). Veículos movidos a combustíveis fósseis são prejudiciais ao meio ambiente e diante disso e a inserção de VEs é uma alternativa que já tem sido utilizada em outras partes do mundo. Portanto o estudo tem a seguinte questão problema: qual o impacto da inserção de veículos elétricos em cidades brasileiras?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo desta tese é conceber, desenvolver e avaliar modelo(s) de dinâmica de sistemas que sirvam para apoio ao processo decisório envolvendo a inserção de veículos elétricos no sistema elétrico de potência.

Para atingir o objetivo principal do projeto, uma série de objetivos específicos deverão ser alcançados:

1. Identificar conceitos relacionados ao objetivo proposto;
2. Compreender o sistema elétrico de potência;
3. Mapear as variáveis necessárias para à construção dos modelos de dinâmica de sistemas;

4. Desenvolver cenários para apoio a simulação; e,
5. Desenvolver modelos de análise da proposta de inserção de veículos elétricos.

1.3 JUSTIFICATIVA

A eletrificação do setor dos transportes tem se tornado uma importante solução no desenvolvimento de sistemas de transporte sustentável em áreas urbanas (PIETRZAK; PIETRZAK, 2020). O uso de veículos elétricos é considerado uma das mais importantes ferramentas nas ações que visam limitar a influência negativa do transporte no meio ambiente (XUE et al, 2017).

Eletromobilidade e veículos elétricos possivelmente venham a se tornar fatores-chave para a mobilidade sustentável e ecológica no futuro, contribuindo para redução da poluição do ar e emissão de gases de efeito estufa (JACYNA et al, 2017). A ausência de emissões locais na atmosfera pelos veículos elétricos em regiões urbanas é particularmente importante devido à sua caracterização como sendo de alta densidade populacional (LAH, 2017).

O transporte tem papel importante no consumo de energia (OLABI, 2014). O desenvolvimento do transporte público sem emissões de gases é uma das políticas estratégicas da Europa. O transporte urbano é responsável, atualmente, por 40% do total de CO₂ gerado pelo tráfego rodoviário na Europa (CORREA et al, 2017). Reduzir o consumo de energia no setor de transportes e aumentar o uso de fontes renováveis passa a ser importante (HELBER et al, 2018).

Para reduzir algumas dessas emissões no segmento de transporte coletivo, uma alternativa é o uso do modal elétrico, já adotada no Brasil e em alguns países (FALCO, 2017). Por não possuir emissões de escapamento na fase de uso, o transporte coletivo urbano elétrico tem os aspectos ambientais de seu energético concentrados às plantas de geração, as quais podem ser mais facilmente controladas e monitoradas (FALCO, 2017). A mobilidade elétrica no transporte coletivo vem sendo considerada uma medida importante na busca por um meio ambiente ecologicamente equilibrado, que deve ser considerado no processo decisório das políticas de desenvolvimento urbano (MMA, 2022).

Para Yu et al. (2018), a eletrificação do transporte público pode diminuir a dependência em petróleo e reduzir os níveis de emissões. Dentre os veículos elétricos, os ônibus são uma aplicação atual em países europeus e asiáticos. Lin e Zhang (2019) informam que, apesar do volume de ônibus ser menor que o de veículos particulares, os ônibus consomem quantias consideráveis de combustível por causa dos longos períodos de operação. Para He, Song e Liu

(2019) devido às características do motor e da rotina das rotas, como paradas e arrancadas frequentes e quantidade de passageiros transportados, ocorre alto consumo de combustível.

Os ônibus com motores a diesel emitem mais partículas que veículos com motor a gasolina, agravando a extensão da poluição (BI; KEOLEIAN; ERSAL, 2018). Segundo Lin e Zhang (2019), quando comparado aos ônibus elétrico estima-se que um *e-bus* reduz o consumo de energia em 72,9% comparado ao equivalente a diesel. Os ônibus com acionamento elétrico de emissão zero, como os ônibus elétricos a bateria é uma boa alternativa livre de carbono fóssil para as empresas de transporte coletivo urbano (BI et al, 2015). Para Dallmann (2019), as vendas globais de ônibus elétricos a baterias têm crescido rapidamente. Segundo o New Energy Finance (2018), grande parte das vendas está centrada na China. Para a Asian Development Bank (2018), o mercado chinês é referência nesse setor devido às políticas ambientais e industriais da China, as quais incentivam e aceleram as transições para essa tecnologia.

A eletrificação do transporte urbano não é uma abordagem recente, porém as tecnologias usadas são (DALLMANN, 2019). Vargas et. al. (2016) afirma que os modos de transporte elétricos sem as limitações das pistas de bondes e das linhas elétricas dos trólebus se tornaram uma das mais atrativas soluções em termos de eficiência, cobertura e versatilidade. Por conta disso, em algumas configurações os veículos elétricos se mostram mais baratos que os veículos de combustão interna quando se leva em conta o custo total de propriedade (LIMA et al., 2019; BLOOMBERG NEW FINANCE, 2018).

Os veículos elétricos não geram emissões de escapamento de CO₂ fóssil, MP e NO_x. Os veículos movidos a bateria têm benefícios significativos em termos de eficiência em comparação aos veículos a diesel, GNC ou híbridos. Além disso, devido à alta proporção de eletricidade gerada por fontes hidrelétricas no Brasil, a intensidade de emissões de CO₂ do ciclo de vida para a eletricidade que alimenta esses veículos é relativamente baixa em comparação com regiões com redes elétricas de maior intensidade de carbono (DALLMANN, 2019).

Testes já são desenvolvidos com diferentes modelos de veículos elétricos nas grandes cidades do mundo. Em São Paulo, os testes realizados com o primeiro ônibus elétrico brasileiro movido 100% a baterias, mostram que o veículo consumiu 82% menos energia do que um ônibus movido a diesel utilizado como equivalente. Esse veículo é resultado de uma parceria da montadora brasileira Eletra com as japonesas Mitsubishi Heavy Industries e Mitsubishi Corporation (SIQUEIRA et al., 2019, OMID et al., 2019; ZAK; MAINKA, 2020). Bakker e Konings (2018) afirmam que para o modelo elétrico dar certo é necessário um momento de transição. Cidades como Londres, Lisboa entre outras capitais do mundo já começaram a transição tecnológica de suas frotas de ônibus para veículos elétricos atraídos não só pela

diminuição dos impactos ambientais, mas também pelas economias no custo total de propriedade dos veículos (BAKKER; KONINGS, 2018; PÉREZ et al., 2019).

Algumas alternativas de modelos de negócios reforçam a utilização de veículos elétrico no transporte, onde novas estratégias são apresentadas e as companhias de energia representam um papel mais ativo, funcionando como financiadores das infraestruturas de recarga ou até mesmo das baterias (ORBEA et al., 2019). Li, Castellanos e Maassen (2018) acreditam que essas estratégias são caminhos para reduzir não só os custos iniciais aos operadores e agências de transporte, mas também distribuir adequadamente os riscos da tecnologia elétrica. São exploradas, também, alternativas para modelos contratuais de forma a adaptar a remuneração dos custos operacionais e de capital às particularidades da tecnologia elétrica (ZHANG ET AL 2019).

1.4 ESTRUTURA

A presente tese está dividida em seis capítulos. Inicialmente o capítulo um apresenta a introdução do estudo, abordando alguns pontos importantes para o estudo, além de apresentar o problema de pesquisa, objetivos e a justificativa. O referencial teórico é apresentado na sequência, abordando pontos gerais do estudo. O método de pesquisa é apresentado no capítulo três, neste capítulo além da coleta de dados é apresentado os cenários e ferramentas usadas para o desenvolvimento do modelo de dinâmica de sistemas e como será realizada a análise do estudo. O capítulo quatro apresenta o primeiro capítulo de resultados, o desenvolvimento dos modelos é apresentado neste capítulo, cada modelo é abordado com suas respectivas referências. Os resultados da simulação são apresentados no capítulo cinco e se encerra o estudo com as considerações finais no capítulo seis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo apresentará pontos gerais do estudo, como será tratado diferentes veículos elétricos dados mais precisos serão apresentados no capítulo quatro. Inicialmente será abordado a temática dos veículos elétricos, apresentando diferentes conceitos, alguns tipos de veículos elétricos além de alguns impactos da inserção e uso dos veículos elétricos. Após essa discussão será apresentado dados sobre o sistema elétrico de potência brasileiro e por fim se encerra com o subcapítulo sobre a dinâmica de sistemas.

2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

Segundo Li et al. (2019) os VEs datam de 1834, e as células de combustível tiveram seu início em 1839. Os VEs eram na época comuns na Europa. Eles surgiram praticamente junto com os veículos a combustão interna [VCI]. Os veículos elétricos híbridos [VEH] surgiram em 1898 com seu primeiro modelo desenvolvido pelo alemão Dr. Ferdinand Porsche. Apesar de alguns avanços tecnológicos na época, como o aprimoramento dos modelos e a solução de alguns problemas tais como ruído e odor por Henry Ford em 1904, ambos sofreram grande declínio de interesses devido a barreiras tecnológicas, principalmente relacionadas as baterias e foram considerados inapropriados tecnicamente em torno de 1930 (RIZET; CRUZ; VROMANT, 2016).

Hung e Lim (2020) destacam que com o embargo árabe e a crise do petróleo em 1970, os projetos elétricos e HEV foram aos poucos, mas cada vez mais, revividos e explorados até hoje. As células de combustível tiveram seu apogeu durante o programa Apollo em 1950 e foram introduzidas como uma tecnologia de veículos em 1967, quando a General Motors produziu um veículo com célula de combustível de hidrogênio para uso interno. Em 1997 a Toyota vendeu seu primeiro modelo elétrico no Japão, o Toyota Prius. A busca por essas tecnologias se tornou crescente nas últimas décadas devido as rigorosas legislações europeias sobre emissão de poluentes e utilização de combustíveis fósseis (CASTRO, 2019).

Veículos elétricos (VE) são veículos que são parcialmente ou totalmente movidos por um motor elétrico alimentado por baterias (Iwan et al., 2014). Para Mahesh, Chokkalingam e Mihet (2021) sua carroceria é a mesma dos veículos com motor de combustão interna, portanto visualmente não há diferença entre eles. Em seu funcionamento esta diferença é pontuada pela redução nos ruídos. Esses veículos substituem o tradicional motor de combustão interna e tanque de combustível por um motor elétrico, controlador e bateria recarregável (MAHESH;

CHOKKALINGAM; MIHET, 2021). As baterias armazenam apenas a quantidade necessária de energia elétrica que é enviada ao motor, esse gerenciamento de energia é feito pelo controlador (RACZ; MUNTEAN; STAN, 2015).

Para Agamloh, Von Jouanne e Yokochi (2020) estes veículos utilizam como combustível a eletricidade e sua forma de obtenção é variada podendo ser com conexão direta a fonte externa de eletricidade, por meio de plugs ou cabos aéreos, por sistemas de indução eletromagnética, pela eletrólise do oxigênio com o hidrogênio em uma célula de combustível ou por meio da frenagem regenerativa, ou seja, energia mecânica da frenagem.

Holland et al. (2019) acredita que um veículo elétrico (VE) é capaz de rodar com eletricidade ao longo de pelo menos parte dos quilômetros percorridos. Esses veículos incluem híbridos plug-in (por exemplo, Chevrolet Volt) e veículos totalmente elétricos (por exemplo, Tesla Model S), mas excluem veículos híbridos convencionais (por exemplo, Toyota Prius).

Os pesquisadores Xing, Benjamin e Shanjun (2021) frisam que desde a introdução dos primeiros modelos de mercado de massa nos Estados Unidos no final de 2010, as vendas de EV cresceram rapidamente para cerca de dois por cento do mercado de veículos novos. Para incentivar a adoção, o governo federal oferece um crédito de imposto de renda federal para novos compradores de VEs com base na capacidade da bateria de cada veículo e na classificação de peso bruto do veículo, com valor variando de US\$ 2.500 a US\$ 7.500.

2.1.1 Tipos de veículos elétricos

Segundo Rajper e Albrecht (2020) em termos de fonte de energia, os VEs podem ser subdivididos em veículos puramente elétricos [VPEs], veículos elétricos híbridos [VEHs], veículos de célula de combustível [VCC] e veículos solares. Nos veículos puramente elétricos esta fonte é a bateria, nos híbridos a energia elétrica vem da bateria, e esta por sua vez, é carregada por um motor de combustão interna. Nas opções plug in ela pode também ser carregada diretamente por uma tomada, nos veículos de célula de combustível a hidrogênio a energia provém da célula de combustível pela reação do hidrogênio com oxigênio e nos solares a energia do sol é captada e convertida em energia elétrica por placas fotovoltaicas (IWAN et al., 2014).

Os VPEs e os VCCs não geram gás carbônico durante sua operação, enquanto os VEHs possuem uma emissão de gás carbônico, sendo esta inferior a emissão gerada por VCIs, entretanto, os VEHs possuem uma autonomia maior que os VPEs e VCCs e contam com uma infraestrutura melhor por poderem ser abastecidos com combustíveis fósseis (VASSILEVA;

CAMPILLO, 2017). A Tabela 1 apresenta uma breve comparação entre estas três alternativas de veículos elétricos que serão mais bem discutidas nas próximas seções.

Tabela 1 – Características dos veículos elétricos

Tipo	Características	Vantagem	Limitações
VPEs	Propulsão: Motor Elétrico Armazenamento de Energia: Bateria, supercapacitor Infraestrutura: Pontos de recarga	Zero emissões locais Alta eficiência energética Independência de combustíveis fósseis Disponibilidade comercial	Baixa autonomia Elevado custo inicial Infraestrutura de recarga insuficiente
VEHs	Propulsão: Motor Elétrico e maquinário de combustão interno Armazenamento de Energia: Bateria, supercapacitor, combustíveis fósseis ou combustíveis alternativos. Infraestrutura: Postos de Gasolina	Baixas emissões locais Elevada eficiência Elevada autonomia Disponibilidade comercial	Dependência de combustíveis fósseis Elevado custo inicial Necessita controle, otimização e gerenciamento de múltiplas fontes de energia Infraestrutura de recarga para plugin insuficiente
VCCs	Propulsão: Motor Elétrico Armazenamento de Energia: Tanque de hidrogênio Infraestrutura: Estações de reposição de hidrogênio	Zero emissões locais Alta eficiência energética Independência de combustíveis fósseis Autonomia satisfatória	Elevado custo do combustível Dificuldade em armazenar e transportar o hidrogênio Infraestrutura de recarga insuficiente

Fonte: Adaptado de Wang et al (2018).

Os veículos do tipo ‘VPEs’ são tracionados por um motor elétrico, é provido de energia por baterias que podem ser abastecidas de duas formas diferentes, via cabo e tomada, enquanto estão desligados e os que por cabos externos enquanto estão em movimento (BRENNAN et al, 2020). Os cabos podem estar acima dos veículos como no caso dos trólebus ou abaixo dos mesmos, como no caso de veículos sob trilhos (D’AGOSTO, 2015). A vantagem destes veículos é o fato de não emitirem nenhum poluente durante seu funcionamento e sua maior desvantagem é a autonomia limitada, que varia de acordo com sua bateria (WANG et al., 2018). As baterias utilizadas nestes veículos são equipamentos capazes de gerar energia elétrica por meio de reações químicas (RACZ; MUNTEAN; STAN, 2015).

Segundo Brenna et al (2020) VEHs são movidos por eletricidade ou uma combinação de eletricidade e combustíveis fósseis. Com isso, se alcança uma redução nos níveis de emissão de gás carbônico, aumento da autonomia do veículo e redução no custo do transporte (RACZ; MUNTEAN; STAN, 2015). Eles possuem melhor eficiência energética pois a assistência entre motores acarreta em menor perda de energia, o motor pode ser completamente desligado nas

paradas do veículo, possibilita o sistema de frenagem regenerativa que converte a energia térmica gerada na frenagem em energia elétrica para carregamento das baterias e pela otimização no sistema de transmissão (WANG et al., 2018). Estes veículos distinguem-se dos puramente elétricos no que diz respeito ao tamanho da bateria e a autonomia. Eles possuem autonomia superior porque possuem o auxílio dos motores a combustão (WANG et al., 2018).

Veículos elétricos de célula de combustível são veículos que obtêm sua energia elétrica a partir de células de combustível, também conhecidas como células de energia. Estas células, quando alimentadas com hidrogênio líquido e oxigênio do ar, promovem uma reação eletrolítica e geram eletricidade. Os subprodutos deste tipo de geração de energia são vapor de água e calor, ou seja, estes modelos de veículo não geram gases de escape (WANG et al., 2018). Em relação a sua autonomia, estes veículos conseguem percorrer distâncias similares aos veículos movidos a gasolina ou diesel e por isso são indicados para viagens de maiores alcances ou transportes de carga, entretanto o hidrogênio como combustível requer o uso de cilindros de alta pressão para seu armazenamento, não possui uma produção e distribuição suficientes para uma demanda de frota veicular, os cilindros são pesados e ocupam um espaço significativo do veículo diminuindo muito sua capacidade interna. Além disso, o hidrogênio é inflamável e explosivo, aumento a periculosidade de seu transporte, além de possuir uma chama incolor que aumenta os riscos de ferimentos em casos de acidentes (WANG et al., 2018).

Para Langer e Lemoine (2018) a difusão de veículos híbridos plug-in e totalmente elétricos, juntamente com a geração de eletricidade mais limpa, oferece um caminho promissor para reduzir a poluição do ar causada por veículos rodoviários e fortalecer a segurança energética. Ao contrário dos veículos a gasolina convencionais com motores de combustão interna, os veículos elétricos usam eletricidade armazenada em baterias recarregáveis para alimentar o motor. Para Springel (2020) quando operados no modo totalmente elétrico, os EVs não consomem gasolina e produzem zero emissões de escapamento. A seguir serão apresentadas algumas categorias de veículos elétricos e outros apontamentos importantes para a aplicação do estudo.

2.1.1.1 Carros elétricos e infraestrutura de recarga

Os primeiros protótipos dos carros elétricos surgiram por volta de 1830 aproximadamente. Mais tarde, por volta de 1900, algumas frotas de táxi elétrico já operavam em New York. No entanto, com o surgimento do carro com o motor de combustão interna ser

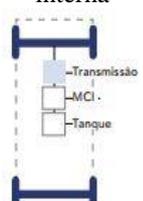
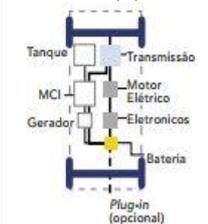
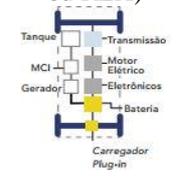
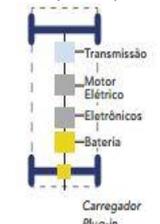
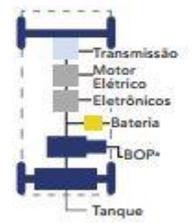
mais barato, devido às linhas de produção em massa de Henry Ford, o veículo elétrico perdeu espaço no mercado (SEED, 2014).

Essa ideia permaneceu guardada por muito tempo, devido às vantagens proporcionadas pelos motores à combustão, pelos incentivos do governo, baixo valor do barril de petróleo e pouca preocupação com o meio ambiente (BALEN, 2014). Entretanto, esse cenário mudou nos últimos anos e a ideia do carro elétrico tem-se tornado realidade com o surgimento de bateria de Lithium-ion e conversores de potência mais baratos e eficientes. Renomadas montadoras de automóveis estão investindo nessa tecnologia, proporcionando diferentes combinações entre motores a combustão e elétricos ou apenas elétricos na nova geração de veículos (O GLOBO, 2018).

Para Delgado (2017), a maioria dos carros elétricos possui baterias químicas para armazenar a eletricidade necessária para acionar o motor e mover o veículo. A autonomia (distância percorrida por recarga) de cada carro depende do tipo e modelo em questão. Os carros mais antigos utilizavam baterias de ácido de chumbo (NiMH), enquanto que os mais modernos utilizam baterias de íons de lítio (li-ion). O quadro 1 apresenta as características dos carros elétricos.

Quadro 1 – Características dos veículos elétricos

(continua)

	VCI é a fonte primária De propulsão		Motor elétrico é a fonte primária de propulsão		
Tipo de veículo	<p>Veículo à combustão interna</p> 	<p>VE (plug in) híbrido (P)HEV</p>  <p>Plug-in (opcional)</p>	<p>VE com autonomia estendida (E-VER ou REX)</p>  <p>Carregador Plug-in</p>	<p>VE à bateria (BEV)</p>  <p>Carregador Plug-in</p>	<p>VE à célula de combustível</p> 
Tipo de motor	<p>Motor à combustão interna</p>	<p>Motores à combustão interna e elétrico dispostos em paralelo; sistema plug in opcional. Motor à combustão é o principal para mover o veículo, com auxílio de um pequeno motor elétrico</p>	<p>Motores à combustão interna e elétrico dispostos em série. Motor elétrico é o principal para mover o veículo, com o motor à combustão interna gerando eletricidade para o elétrico.</p>	<p>100% elétrico</p>	<p>Sistema de célula de combustível e motor elétrico, que propulsiona o veículo, dispostos em série.</p>

Quadro 1 – Características dos veículos elétricos

(conclusão)

	VCI é a fonte primária De propulsão		Motor elétrico é a fonte primária de propulsão		
Tipo de Combustível	Fóssil, biocombustível Alto consumo de combustíveis e emissões de escape	Fóssil, biocombustível ou eletricidade. Melhor economia de combustível se comparado a um modelo similar à combustão interna	Eletricidade	Eletricidade	Hidrogênio ou etanol
Tipo de armazenamento elétrico	Bateria que não depende de infraestrutura elétrica	Bateria carregada através do motor à combustão interna ou por eletricidade (para híbridos plug-in)	Bateria é recarregada como no híbrido. Além disso, costuma ter uma bateria com menor capacidade do que o BEV	Bateria de íons de lítio com grande capacidade, recarregada por fonte externa elétrica	Célula de combustível de hidrogênio baseada na tecnologia PEM19 (Proton Exchange Membrane); célula de combustível de etanol de óxido sólido (SOFC)
Autonomia	Grande autonomia proporcionada pelo combustível fóssil/biocombustível	Pouca autonomia elétrica, que é complementada pela autonomia proporcionada pelo combustível fóssil/biocombustível	Autonomia elétrica média, complementada pela autonomia proporcionada pelo combustível fóssil/biocombustível	Autonomia elétrica de pequena a média (comparada aos VCI)	Autonomia elétrica de média a alta
Emissões	0,23 kg CO2/Km	0,062 kg CO2/Km	0,060 kg CO2/Km	Zero	Zero

Fonte: Adaptado de FGV (2017).

Legenda:  Transmissão de potência a partir de um motor à combustão;  Transmissão de potência a partir de uma célula de combustível (MCI);  bateria  Transmissão de potência a partir de um motor elétrico.

O quadro 2 foi adaptado de Fernandes (2017) e mostra as principais características e diferenças entre os tipos de carros elétricos.

Quadro 2 – Principais características e diferenças entre os tipos de veículos elétricos

	Veículo Elétrico a bateria	Veículo Elétrico híbrido	Veículo Elétrico a célula a combustível
Propulsão	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Motor elétrico 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Motor elétrico ▪ Motor de combustão Interna 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Motor elétrico
Sistema de Energia	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bateria ▪ Ultracapacitor 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bateria ▪ Ultracapacitor ▪ Um de geração do motor de combustão interna 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Célula a combustível
Fonte de Energia e Infraestrutura	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instalações de carregamento da rede elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Postos de abastecimento convencionais ▪ Instalações de carregamento da rede elétrica 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hidrogênio e produção do transporte do hidrogênio
Características	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emissão zero de poluentes ▪ Alta eficiência energética ▪ Alto custo inicial ▪ Comercialmente disponível ▪ Independente de derivados do petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baixa emissão de poluentes ▪ Alta economia de combustível comparado aos veículos de combustão interna ▪ Comercialmente disponível ▪ Dependente de derivados do petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Emissão zero ▪ Alta eficiência de energia ▪ Alto custo ▪ Ainda em desenvolvimento ▪ Independente de derivados do petróleo
Maiores desafios	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Baterias e gerenciar energia das baterias ▪ Instalações para carregamento ▪ Alto Custo 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controle de múltiplas fontes de energia ▪ Tamanho e gerenciamento da bateria 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Custo da célula de combustível ▪ Infraestrutura para hidrogênio

Fonte: Adaptado de Fernandes (2017).

Para que a mobilidade elétrica se consolide no Brasil, necessita-se investir em infraestrutura de recarga ao cliente, o que viabilizaria a expansão do número de eletropostos pelo país e estimularia o aumento de usuários de carros elétricos. Para Delgado et al (2017) e *Global EV Outlook* (2016), os pontos fornecedores de energia elétrica para abastecimento dos carros elétricos é chamado de estação de recarga. Nelas, através de um ponto conectado à uma fonte de energia, é possível recarregar as baterias dos carros elétricos. Estes pontos de recarga se distribuem em áreas públicas e privadas.

Os *Electric Vehicle Supply Equipment* (EVSE) incluem os conectores, condutores (fios), acessórios e outros equipamentos associados, que são plugados na entrada dos carros elétricos, fornecendo energia elétrica para carregar sua bateria, conforme a figura 1 (GLOBAL EV OUTLOOK, 2013).

Figura 1 – Carregamento EVSE



Fonte: U.S. Department of Energy (2015).

A classificação do carregamento dos carros elétricos é determinada pelo montante máximo de eletricidade disponibilizado pelo carregador, já que o mesmo afetará a velocidade da recarga. O tipo, uso e capacidade da bateria também afetam a velocidade de recarga, que varia entre 30 minutos a 20 horas. Segundo a *International Energy Agency (IEA, 2022)*, é preciso distinguir os tipos de recargas considerando o nível de tensão e de corrente (contínua ou alternada). A tabela 2 define os tipos de carregamento de acordo com o nível de recarga.

Tabela 2 – Tipos de carregamento de acordo com o nível de recarga

Nível	Uso típico	Tensão/voltagem e tipo de corrente	Autonomia por hora de recarga
Nível 1	Residências e locais de trabalho	127 V Corrente alternada	3km a 8km
Nível 2	Residências, locais de trabalho e locais públicos	220-240 V Corrente alternada	10km a 96km
Nível 3	Locais públicos	Pode atingir até 600 V Corrente alternada ou contínua	96km a 160km

Fonte: Adaptado de FGV Energia (2017).

Os veículos híbridos plug-in, por possuírem baterias com menor capacidades de armazenamento, são suficientes para os carregamentos de nível 1, onde o reabastecimento acontece em menos tempo, já que a energia a ser recarregada normalmente não é muito elevada.

Para os carros 100% elétricos, é recomendado o reabastecimento de nível II e em locais residenciais, já que o mesmo possui mais baterias e demanda mais tempo para sua recarga (FGV, 2017).

O nível II permite a recarga completa tanto de veículos híbridos como *all-electric* em um tempo razoável e, por este motivo, tem sido considerado o nível de recarga padrão (IEA, 2016). Para o carregamento rápido (*fast charger*) é necessário a implementação de uma infraestrutura com custos elevados, apesar da comodidade de carregar a bateria dos veículos elétricos em um tempo muito menor do que os demais níveis. Os custos necessários na adoção desta infraestrutura afastam seu uso em larga escala (FGV, 2017).

O custo elevado no carregamento rápido dos carros elétricos obriga os próprios fabricantes dos carros 100% elétricos (BEVs) a investirem em postos de recargas rápidos. Um exemplo acontece no Japão, onde os BEVs predominam o mercado de carros elétricos e os investimentos em postos de recargas com níveis mais lentos são deixados de lado (IEA, 2016). Em contrapartida, nos Estados Unidos, os postos de recarga lenta receberam maior investimento, devido à predominância dos PHEVs no mercado de carros elétricos e, também, pela preferência em estações de recarga residenciais. Cada país opta pela rede de EVSE que melhor atenda às suas especificidades locais, sem haver, portanto, um caminho específico e que deva ser seguido por todos (IEA, 2013).

Os carregadores de “Nível III” são os que possuem ambas as portas de carregamento para os Níveis I e II separadamente. Além disso, eles também fornecem corrente contínua para a bateria através de um adaptador especial, enquanto que carregadores Nível I e Nível II fornecem apenas corrente alternada para o veículo.

Além dos níveis de carregamentos, onde o carregamento é realizado por fio, existe o carregamento por indução ou wireless, neste caso o carregamento é realizado sem fio, utilizando um campo eletromagnético que não envolve conexão física entre o carro e o eletroposto. Para Hanley (2017), existem dois tipos de carregamento wireless: o WPT (*Wireless Power Transfer*), onde o carregamento ocorre com o veículo estacionado, e as rodovias eletrificadas, que carregam enquanto o veículo está em movimento. A figura 2 representa como é realizada a recarga por carregamento *wireless*.

Figura 2 – Carregamento Wireless

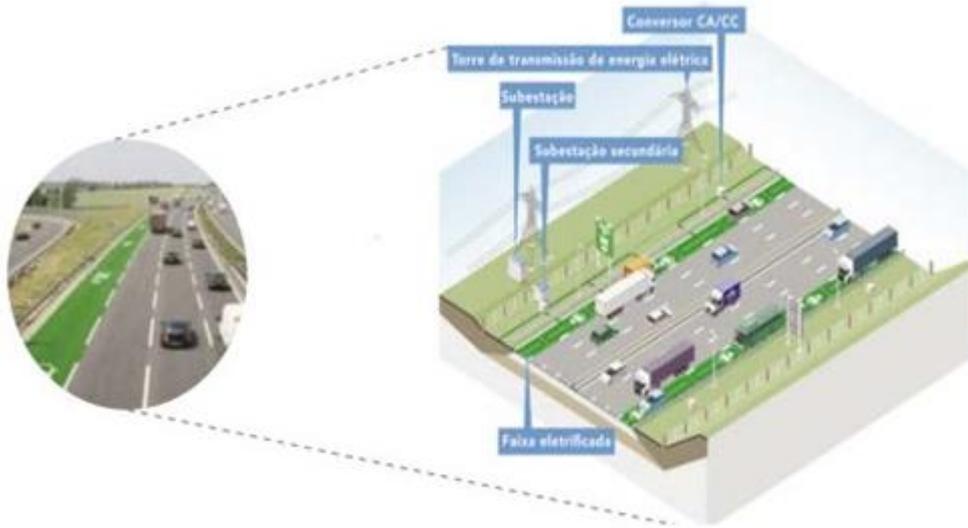


Fonte: Adaptado de Shahan, 2015.

Sem utilização em larga escala em nenhuma parte do mundo, as rodovias eletrificadas possuem algumas iniciativas, como a *Highways England*, que anunciou em 2015 a realização de testes de carregamento wireless em estradas do Reino Unido como forma de incentivar o aumento da frota de veículos elétricos em circulação (uma vez que este tipo de carregamento permite que sejam percorridas longas distâncias sem a necessidade de interromper a viagem para carregamento da bateria) (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015).

O objetivo do carregamento wireless é permitir aos motoristas simplesmente estacionarem seus carros em um local designado para que estes se recarreguem automaticamente, sem necessidade de conectá-los a um cabo de recarga. Ainda mais os *driveless cars*, de um futuro próximo, poderão estacionar sozinhos em um local de carregamento sem fio e retornar à estrada quando a recarga estiver completa (HANLEY, 2017). A figura 3 representa este tipo de carregamento.

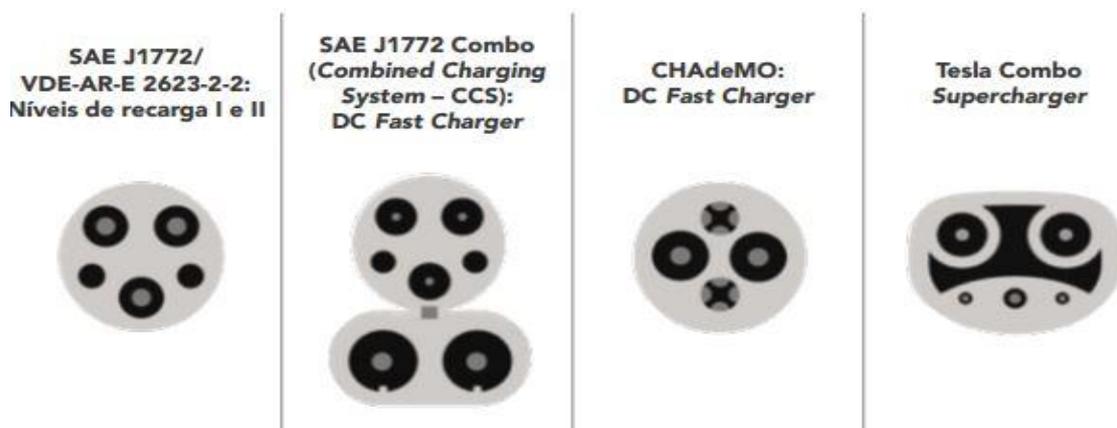
Figura 3 – Carregamento Experimental em Rodovia Eletrificada



Fonte: Highways England e Jones, 2015.

Segundo a FGV Energia (2017), o tipo de carregamento realizado também dependerá da entrada (receptor) existente no veículo. Carregamentos Níveis I e II são compatíveis com todos os veículos com conector e receptor padrões: tipo 1 (SAE J1772, ou conector Yazaki), utilizado nos EUA e Japão; e tipo 2 (VDE-AR-E 2623-2-2, ou conector Mennekes), utilizado na Europa e China. Um terceiro tipo de conector, tipo 3, ou EV Plug, está sendo criado por alguns países europeus. A figura 4 representa este tipo de conectores.

Figura 4 – Tipos de Conectores/Entradas para Recarga dos Ves,



Fonte: Adaptado de FJV Energia (2017).

Para o carregamento rápido (ou *fast chargers*) não existe um padrão para os conectores/receptores de nível I e II de recarga. Os mesmos possuem três tipos diferentes de conectores/receptores:

- SAE Combo, ou CCS, da SAE *International*: adaptador para o padrão SAE J1772, de modo que a mesma entrada possa ser utilizada para todos os níveis de carga (disponível em modelos como o BEV Chevrolet Spark EV);
- CHAdeMO (disponível nos BEVs Nissan Leaf e Mitsubishi i-MiEV, por exemplo): neste padrão, o sistema de controle de carga do carregador recebe informações do automóvel via CAN bus. Então, o carregador rápido configura a corrente conforme requisitado pelo veículo. Com esse mecanismo, é possível um carregamento otimizado e mais rápido em resposta ao desempenho da bateria e das condições ambientais; e,
- Tesla *Supercharger* (disponível apenas em veículos Tesla).

A figura 5 apresenta os tipos diferentes de conectores/receptores. Na figura o carro elétrico possui ambas as entradas: SAE J1772 para recarga nível 1 e 2 (à direita); e CHAdeMO para recarga *fast charger* (esquerda).

Figura 5 – Exemplo de conectores



Fonte: U.S. Department of Energy.

As baterias dos carros elétricos são recarregadas ao se conectar o veículo a uma fonte de eletricidade externa. Os carros elétricos também são recarregados, em parte, por meio de energia mecânica regenerativa, também conhecida como frenagem. A recarga rápida é uma das opções utilizadas para possibilitar viagens mais longas que 150 km, em média. Esses sistemas estão disponíveis em pequeno número na Europa, EUA e Ásia. No Brasil, ainda não existe nenhum modelo desenvolvido para atender os proprietários de automóveis elétricos. Poucas patentes estão registradas para um equipamento inteiro que faça a comunicação, o controle e o carregamento rápido das baterias dos automóveis. Os registros existentes são para versões antigas de baterias, conectores e potências reduzidas.

A bateria do veículo elétrico necessita de uma forma adequada de carregamento para evitar que se deteriore ou percam capacidade de recarga. Os principais fatores para a queda na capacidade da bateria são as tensões e a alta temperatura. Outro fator é o carregamento desigual das células que compõem a bateria. Nos novos carros elétricos, a unidade de gerenciamento da bateria (BGU) está sempre monitorando a tensão e temperatura de cada célula, além do conjunto como um todo. Isso evita que seja excedido o limite de tensão (BERNARDON, 2015).

Diferentes tipos de baterias podem ser considerados, dependendo apenas do tipo do carro elétricos. A seguir, são expostos alguns tipos de baterias para carros elétricos:

- Hidreto metálico de níquel – Ni-MH: disponível em modelos híbridos que utilizam tecnologia *start-stop* e micro-híbridos;
- Íons de lítio – Li-ion: disponível em modelos de BEV e híbridos; e,
- Cloreto de sódio e níquel – Na-NiCl₂: disponível em modelos de veículos elétricos pesados (caminhões, ônibus etc.) e PHEVs⁴².

Devido a seu custo reduzido e melhor desempenho, as baterias de íons de lítio têm sido mais adotadas por fabricantes de carros elétricos. Observa-se que, geralmente, para BEVs, quanto maior a capacidade da bateria, maior a autonomia do carro. No caso dos PHEVs, essa relação não é tão forte (DELGADO et al., 2017).

Na sequência serão apresentados os principais termos referentes a baterias, o funcionamento e as vantagens das baterias de Íon Lítio comparadas com outras baterias, segundo Fernandes (2017):

- Capacidade: A capacidade de uma bateria é **definida** como a quantidade de ampères hora (Ah) que pode ser retirada da mesma quando está em plena carga. A unidade de capacidade também pode ser expressa em watts-hora (Wh);
- Densidade de energia: capacidade nominal de uma bateria normalizada em unidade de massa (Wh/kg) ou em unidade de volume (Wh/L). Este parâmetro significa que quanto maior a densidade de energia de uma bateria, menor será a massa e o volume necessários para se retirar ou armazenar uma determinada quantidade de energia;
- Estado de carga: é definido como a capacidade disponível em uma bateria em um determinado momento, e é expresso em percentagem da capacidade nominal. Exemplificando, se 25 Ah fossem retirados de uma bateria com capacidade nominal de 100 Ah, o estado de carga seria de 75%. O estado de carga é complementar à profundidade de descarga, e sua sigla em Inglês é SoC (State of Charge);
- Profundidade de descarga: indica em percentagem da capacidade nominal, o quanto foi retirado da bateria em um determinado momento, e é complementar ao estado de carga. Exemplificando, se 25 Ah fossem retirados de uma bateria com capacidade nominal de 100 Ah, a profundidade de descarga seria de 25%, e sua sigla em Inglês é DoD (Depth of Discharge);
- Taxa de carga e descarga: é o valor da corrente elétrica aplicada em uma bateria durante o processo de carga ou descarga. Por exemplo, uma bateria com capacidade nominal de 200 Ah, com um intervalo de carga de 10 h a corrente constante, apresenta uma taxa de carga de: $Capacidade\ Nominal\ Intervalo\ de\ carga = 200\ Ah\ 10\ h = 20\ A = taxa\ C\ 10\ (1)\ 24;$ e,
- Ciclo: A sequência de carga-descarga de uma bateria até atingir uma determinada profundidade de descarga é denominada de ciclo.

Alguns requisitos para as baterias são solicitados por governos, fabricantes de automóveis e motoristas. As mesmas devem durar mais tempo, carregar mais rápido, ter maior densidade e ser mais baratas e leves (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2015). Elas também devem ser seguras, tecnicamente confiáveis e facilmente recicláveis (EUROBAT, 2015). Para tornar carros elétricos acessíveis para os consumidores, o valor frequentemente citado coloca os custos das baterias abaixo de US\$ 100 por quilowatt/hora (PYPER, 2016). A Tesla, por exemplo, visa atingir esse valor por meio do aumento da produção de baterias de íons de lítio

na *Gigafactory* (mega fábrica de baterias da Tesla e Panasonic) que está sendo construída no deserto de Nevada (WESOFF, 2016).

2.1.1.2 Ônibus elétricos e suas características

Os ônibus elétricos ou ônibus elétricos puros são os veículos tracionados por um motor elétrico cuja única fonte de energia é um banco de baterias, instalado a bordo do veículo ou um conjunto de motores elétricos. Nestes veículos, as baterias são responsáveis pelo armazenamento de energia a bordo, sendo recarregados por conexões diretas a rede elétrica, painéis solares, ou sistemas indutivos (SISTRAN ENGENHARIA INECO E INECO DO BRASIL, 2014). Sua operação e seus componentes são semelhantes aos dos trólebus, diferenciando-se apenas em sua forma de alimentação. Diferente dos trólebus os ônibus elétricos não dependem de uma conexão permanente a rede elétrica, eliminando a necessidade de infraestrutura de redes elétricas aéreas ao longo do trajeto (PERUMAL; LUSBY; LARSEN, 2022)

As tecnologias para a fabricação dos ônibus elétricos variam conforme a configuração da localidade, a configuração elétrica varia muito por país (WANG; KANG; LIU, 2020). A nível mundial existem muitos fabricantes, distribuídos em locais distintos, o que faz com que cada desenvolvedor adapte os seus produtos as necessidades locais, gerando diferentes sistemas de tração, controle, armazenamento e recarga (ZIVANOVIC e MISANOVIC, 2014). Para Gallo, Rubin e Tomic (2014) alguns desses modelos já tem sua produção em escala comercial, diferente de alguns que se limitam a protótipos. Na figura 6, são apresentados alguns exemplos de fabricantes de ônibus elétricos, bem como a sua localização no planeta.

Seus sistemas de recarga variam, podendo ser do tipo lento, onde o veículo fica em repouso por várias horas até completar a recarga total das baterias, ou do tipo rápido, onde durante paradas nas estações de embarque e desembarque é inserida no veículo uma quantidade de energia suficiente para o deslocamento até o próximo ponto de recarga (SEBASTIAN 2014).

Figura 6 – Fabricantes de ônibus elétricos



Fonte: Bonato (2020).

Os modelos comerciais disponíveis atualmente oferecem opções com capacidade de 15 passageiros até 150 (LI et al, 2021). Para Pelletier et al (2019) existem mais de “20” modelos de ônibus elétricos, esta gama de modelos demonstra o aumento da indústria de ônibus elétricos puros. Os autores consideram o setor de fabricação de ônibus elétrico dinâmico, com fabricantes consolidados distribuídos em vários locais do mundo e com tecnologias em constante aperfeiçoamento. Na Tabela 3 são apresentados alguns exemplos de modelos disponíveis comercialmente e suas principais características.

Os ônibus elétricos são divididos em modelos híbridos ou puramente elétricos. Para Olegario e Rodrigues (2019) um ônibus elétrico híbrido consiste na união de dois aspectos distintos para gerar a energia necessária para mover o veículo. Sua tração é proveniente de motor elétrico, alimentado por um conjunto de baterias com manutenção energética proveniente de um motor comumente alimentado a diesel ou etanol (MURATORI 2018). Guenther e Padilha (2016) destacam que os ônibus híbridos são modelos movidos por duas ou mais diferentes formas de energia para alimentação do seu motor de propulsão. O motor elétrico e o a combustão interna executam sua função de forma conjunta, no qual no qual alternam a produção de energia para o motor de tração (BONATO, 2020).

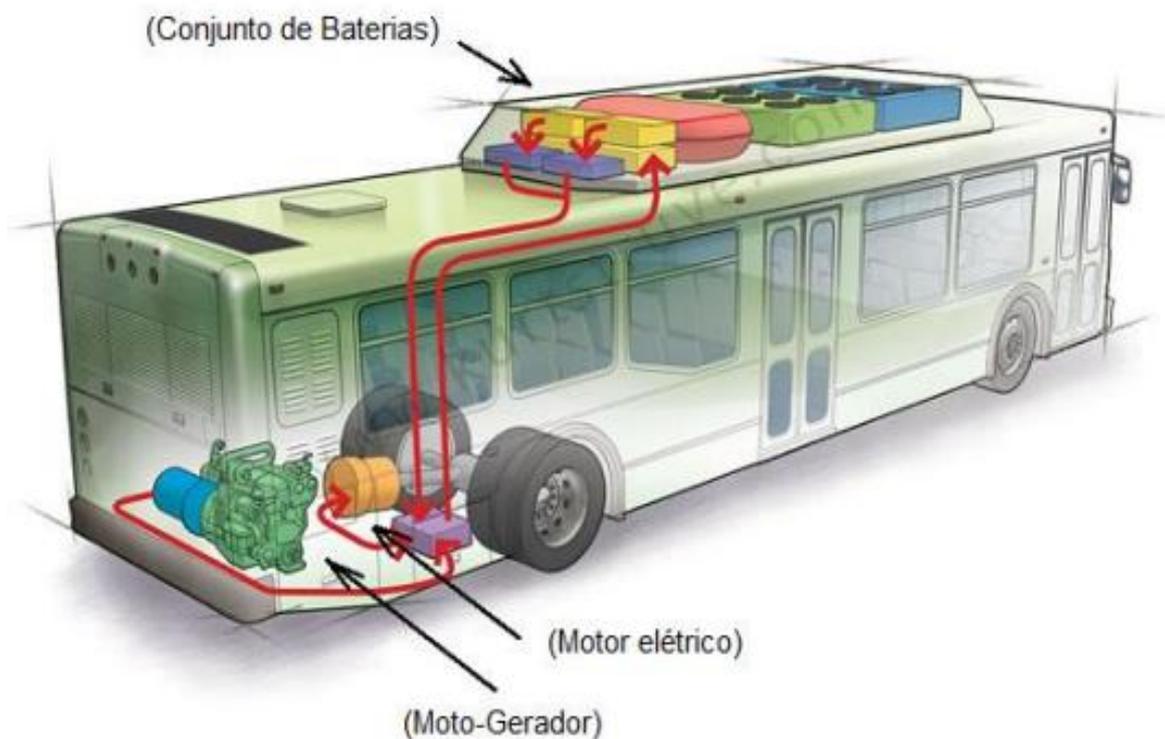
Tabela 3 – Ônibus elétricos puros disponíveis comercialmente

MODELO	PARÂMETRO	ESPECIFICAÇÕES
BYD K9	Comprimento	12,25 m
	Capacidade	40 passageiros sentados
	Tipo de bateria	Lítio Fosfato de Ferro
	Tipo de motor	Síncrono com imã permanente
	Capacidade de bateria	324 kWh
	Tipos de recarga	Recarga lenta (4h)
	Potência de recarga	80 kW
	Autonomia/Rendimento médio	> 250km / 1,24 kWh por km
	País de fabricação	Brasil e vários países do mundo
E-BUS ELETRA	Comprimento	18 m
	Capacidade	150 passageiros
	Tipo de bateria	Ions de lítio
	Tipo de motor	Assíncrono CA
	Tipos de recarga	Recarga lenta (3h) e rápida (5 min)
	Autonomia/Rendimento médio	200 km
	País de fabricação	Brasil
IRIZAR I2E	Comprimento	12m
	Capacidade	24 passageiros sentados
	Tipo de bateria	Sódio Níquel + supercapacitores
	Tipo de motor	Síncrono
	Capacidade de bateria	376 kWh
	Tipos de recarga	Recarga Lenta (6h)
	Potência de recarga	50 kW
	Autonomia/Rendimento médio	150 km / 1,50 kWh/km
NEWFLYERXE40	País de fabricação	Espanha
	Comprimento	12,5m
	Capacidade	> 43 passageiros
	Tipo de bateria	Íons de lítio
	Tipo de motor	Motor com ímãs permanentes
	Capacidade de bateria	200 kWh
	Tipos de recarga	Lenta (1,6h) e rápida (10 min)
	Potência de recarga	100 kWh lenta, 300-500 Kw rápida
	Autonomia/Rendimento médio	> 128 km / 1,56 kWh/km
OPTARE VERSA	País de fabricação	Canadá
	Comprimento	11,7 m
	Capacidade	60 passageiros / 44 sentados
	Tipo de bateria	Fosfato de ferro-lítio magnésio
	Capacidade da bateria	92 kWh
	Tipos de recarga	Lenta-On (6h) / off (2 h)
	Potência de recarga	On (2x7,5 kwh) / off board (50 kWh)
	Autonomia/Rendimento médio	150 km / 0,61 kWh/km
PROTERRA XR40	País de fabricação	Inglaterra
	Comprimento	12,2 m
	Capacidade	40 passageiros
	Tipo de bateria	NMC(Níquel-Manganês-Cobaldo)
	Tipo de motor	Motor com ímãs permanentes
	Tipo de bateria	321 kWh
	Tipos de recarga	Lenta (1,5h) e rápida (10min)
	Potência de recarga	50-90kW(lenta) e 500 kw(rápida)
	Autonomia/Rendimento médio	322 km / 0,99 kWh / Km
País de fabricação	Estados Unidos	

Fonte: Adaptado de Bonato (2020).

Do ponto de vista ambiental de She et al (2020) os ônibus elétricos híbridos são capazes de reduzir a emissão de gases poluentes em cerca de 20%. Para Olegario e Rodrigues (2019) a concepção dos sistemas híbridos pode ser desenvolvida e implementados de diversas formas, sendo este um panorama geral de seu funcionamento, tendo como representação a figura 7.

Figura 7 – Ônibus Híbrido



Fonte: Olegario e Rodrigues (2019).

Para D’Agosto (2015) são dois tipos de automóveis híbridos, descritos a seguir:

- Modelo “paralelo “: é muito utilizado em veículos de pequeno porte, nesses modelos o motor elétrico serve como auxílio para melhorar o desempenho do motor a diesel; e,
- Modelo do tipo “série” é utilizado em ônibus de grande porte este modelo possui motor elétrico responsável por locomover o veículo e motor de explosão utilizado para carregar as baterias e também movimentar um gerador, o qual gera energia para o motor elétrico movimentar o veículo.

Estes veículos possuem a característica de não utilizar o motor a combustão interna durante todo o tempo, possibilitando ao motorista escolher o motor durante seu percurso, isso só é possível pelo fato dos veículos híbridos possuírem motor elétrico e baterias como fontes de energia alternativa (GUENTHER; PADILHA, 2016).

Os ônibus movidos a célula de hidrogênio são ônibus de tração elétrica que sua energia provém de um gerador de eletricidade do qual tem sua operação proveniente de células a combustível. A produção da eletricidade origina-se da reação química nas células de combustível, as quais utilizam-se de hidrogênio líquido e, como resíduo desta reação: água. Esta, por sua vez, é eliminada pelo cano do escapamento, o sistema conta também com um conjunto de baterias para tração complementar (RUPP et al, 2020).

Para Gao (2017) é o modelo mais utilizado dentre os tipos de ônibus elétricos existentes, estes possuem sistemas de baterias alimentando o motor de tração do ônibus. Guenther e Padilha (2016) afirmam que a evolução deste modelo se projeta de forma adjunta a evolução das baterias, onde pode-se citar as mais utilizadas nos modelos atuais sendo de chumbo-ácido, íons-lítio e ferro-fosfato com uma grande capacidade de carga. Liu e Song (2017) afirmam que a China é o país referência de disseminação e aplicação desse modelo.

Os ônibus a bateria são veículos movidos somente com a utilização de motores elétricos, os quais são alimentados por um conjunto de baterias normalmente alocadas no teto do veículo (GUENTHER; PADILHA, 2016). Gao et al (2017) acreditam que além do sistema de frenagem regenerativa, os modelos de ônibus movidos a bateria podem ser recarregados durante em diferentes momentos, como nos terminais, ou até mesmo em recargas relâmpago durante o embarque e desembarque de passageiros no meio do trajeto. Rupp et al (2019) acrescentam que esse modelo por não apresentar motor a combustão é um exemplo de aplicação de modelos ambientalmente corretos, com emissão zero de poluentes além de apresentarem baixo ruído.

A utilização de modais elétricos no transporte urbano irá ofertar diferentes vantagens, pelo lado ambiental, o ônibus elétrico é uma ótima solução para combater as emissões de poluentes já que é considerado um veículo abastecido por energia limpa, também apresenta menos ruídos quando comparados ao motor a combustão interna (KUKKONEN et al, 2014). Para Bonatto (2020) com o avanço tecnológico das baterias atualmente é possível a utilização de ônibus elétricos com autonomias elevadas, podendo alguns modelos operar durante um dia inteiro sem a necessidade de paradas para recarga.

Enquanto, a utilização de ônibus elétricos torna possível a implantação em locais com demandas de passageiros reduzidas, com itinerários variáveis, e não necessitem de complexas infraestruturas, ao contrário das demais opções atuais, com ônibus precários e muitas das vezes

sem manutenção (CARTER, L.; VARGHESE, J., 2017). Além disso, devido aos perfis de carga nestes veículos ser conhecidos, a otimização do dimensionamento das baterias, bem como o planejamento ideal dos sistemas elétricos se faz possível, reduzindo os custos de operação e eliminando as possíveis falhas nestes sistemas.

Outra vantagem na utilização dos ônibus elétricos no transporte público está relacionada redução dos custos operacionais, já que os motores elétricos apresentam maior eficiência e possuem um menor número de componentes expostos ao desgaste, o que faz com que um dos maiores custos de operação destes veículos, se desconsiderada a energia consumida, sejam as despesas relacionadas aos recursos humanos (PIHLATIE, KUKKOMEN, et al, 2014).

Porém, os grandes limitadores da popularização destes ônibus elétricos puros estão relacionados aos seus custos de aquisição e a oferta de energia elétrica. Embora subsídios governamentais possam incentivar a substituição dos veículos convencionais a diesel por modelos elétricos, isso pode não ser o suficiente para convencer as empresas de transportes públicos a substituírem suas frotas de uma forma significativa (TOPON e HISASHI, 2014). Além disso, características como a autonomia reduzida destes veículos faz com que sejam necessárias paradas frequentes para a recarga das baterias ou criam em determinadas situações a necessidade de um alto investimento em baterias maiores, fator que eleva mais ainda o custo final dos veículos.

Também segundo Jang e Ko (2012, p.1058) a bateria é uma das partes mais caras deste tipo de veículos, em alguns casos representando mais de um terço do valor total do veículo, desta forma, considerando que estes componentes possuem uma vida útil reduzida, a substituição destas baterias ao final de sua vida útil pode elevar ainda mais o custo final, necessitando assim de uma análise cuidadosa em uma migração de tecnologias, pois isto muitas vezes pode inviabilizar o uso desta tecnologia ou reduzir o custo benefício de forma considerável.

2.1.2 O uso dos veículos elétricos no Brasil e no mundo

A transição para modais elétricos continua concentrada em áreas específicas, por políticas em diferentes níveis. Quase todos os ônibus elétricos, até hoje, foram vendidos na China, Europa, Japão e Estados Unidos, onde as regulamentações impulsionam a indústria e a combinação com programas locais supera as barreiras de custo, de conveniência e de conscientização. Nos principais mercados de eletricidade, certas áreas metropolitanas

exemplificam a abordagem privilegiada para promover a mobilidade elétrica e implementar políticas em vários níveis (LUTSEV et al, 2018).

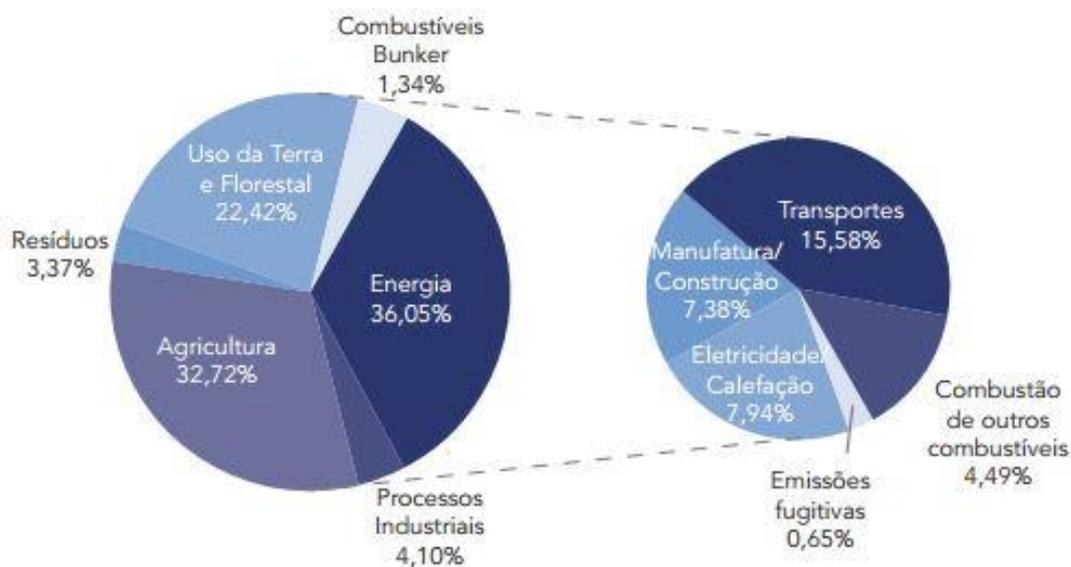
De modo geral, a utilização dos ônibus elétricos puros a nível mundial ainda é relativamente pequena, pois corresponde a apenas pequenas frotas, as quais representam uma reduzida parcela do total dos ônibus existentes (ZIVANOVIC; MISANOVIC, 2014). Nos EUA, por exemplo, existem pouco mais de 10 cidades com modelos elétricos em operação, tendo como destaque a Califórnia, onde existe um mandato desde 2011 para que 15% dos ônibus comprados novos sejam elétricos. Porém, mesmo assim, sua utilização quando comparada as frotas compostas por ônibus a diesel é insignificante. Já na Europa, existe uma diretiva que ordena a compra destes veículos, resultando em uma implantação de frotas elétricas em países como a Itália (mais de 30 cidades com cerca de 400 ônibus em operação), França (17 cidades com cerca de 100 veículos), Alemanha, Dinamarca, Holanda e Espanha (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014).

Em outros países como a China, Japão, Singapura, Hong Kong e Israel os ônibus elétricos também se fazem presentes. Na cidade de Shenzhen na China, por exemplo, em 2011 foi elaborado um plano para substituição de toda sua frota (cerca de 10000 ônibus) por modelos elétricos em 5 anos (SISTRAN ENGENHARIA, INECO E INECO DO BRASIL, 2014). No Brasil, os ônibus elétricos vêm recentemente aparecendo em várias cidades, porém na maioria das vezes em fase de testes, como o modelo E-BUS bi-articulado de 18 metros fabricado pela empresa Eletra, o qual está em circulação em São Paulo, sendo operado pela empresa de transportes Metra (ELETRA INDUSTRIAL LTDA, 2015). Além do modelo nacional, a empresa chinesa BYD, possui seu modelo de ônibus elétrico puro BYD K9 circulando em várias cidades brasileiras, o qual possui garantia em sua bateria de 12 anos e é produzida em larga escala, sendo o mesmo montado em sua fábrica no Brasil (BYD, 2016).

2.1.2.1 Os principais impactos diretos e indiretos resultantes da expansão dos EVs

Os VEs são vistos como uma maneira de descarbonizar o setor de transportes mundial. As emissões de gases maléficos ao meio ambiente possuem parte considerável originada pelo setor energético, como exposto na figura 8. No Brasil, o setor energético que mais gera gases é o setor de transportes.

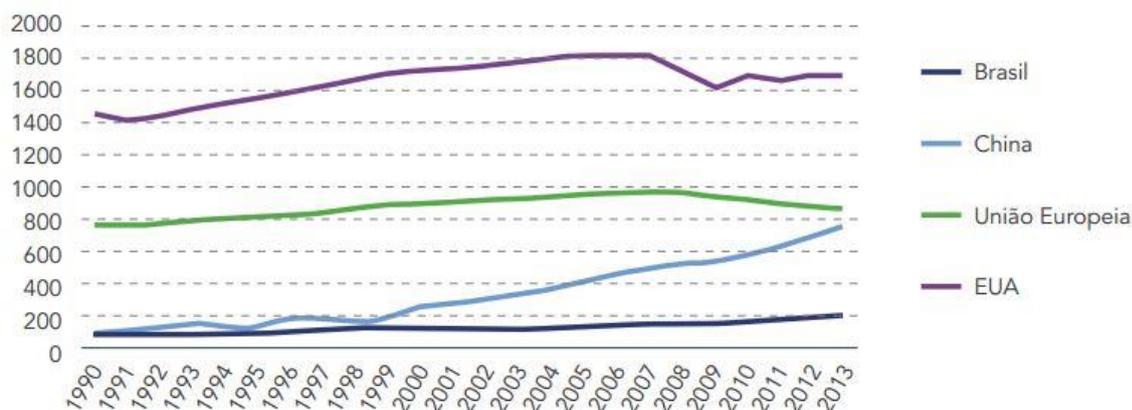
Figura 8 – Emissões de GEE Brasil



Fonte: Delgado et al (2017).

Nos EUA, o setor de transportes ultrapassou o setor elétrico em emissões de GEE no início de 2016 e vem se mantendo na dianteira desde então devido à expansão das fontes renováveis na geração elétrica. Na China, embora não seja parte significativa das emissões totais do país, o setor de transportes vem emitindo cada vez mais poluentes, como visto na Figura 9. Essa tendência ascendente também é observada no Brasil, enquanto que a União Européia já vem conseguindo reduzir as emissões ligadas a esse setor (FGV, 2017).

Figura 9 – Emissões de GEE no setor de transportes



Fonte: FGV Energia (2017).

Em relação à saúde da população, as reduções da poluição oriundas de escape dos veículos movidos por combustíveis fósseis poderão diminuir as mortes prematuras por ano. Segundo Yim e Barrett (2012), nos EUA em 2013, foram registradas cerca de 58 mil mortes geradas pela poluição ambiental relacionada a queima de combustíveis fósseis. Dessa forma, veículos de emissão zero potencialmente evitariam todas essas mortes. Entretanto, é necessário que a geração da eletricidade que abastece os veículos elétricos também deve emitir zero poluentes, ou o mínimo possível, para que o efeito dos VEs sobre a emissão de GEE seja, de fato, significativo.

Com as possibilidades de avanços tecnológicos futuros, o mercado de íons de lítio ganha força e espaço. As baterias de lítio são as mais indicadas para veículos elétricos leves e menos poluidores. Como consequência, o mercado extrativista do lítio tem se desenvolvido rapidamente nos últimos anos. Comparando-se a preços de 2014, o preço do lítio cresceu, em 2015, entre 10% e 15%, esperando-se crescimento de 75% no decênio até 2025 (CRABTREE, 2016).

O lítio apesar de ser menos danoso ao meio ambiente, possui certo nível de poluição. O lítio é um metal raro, cuja exploração libera toxinas que são danosas à saúde dos mineradores e ao meio ambiente. Sua extração ocorre em pequenas quantidades e em locais de difícil acesso, sendo necessário um grande esforço de mineração para se conseguir pequenas quantidades do metal. Os resíduos da extração são, geralmente, liberados na natureza (WADE, 2016).

Em relação as baterias utilizadas nos veículos elétricos, os seus componentes podem ser reciclados no final da vida útil dos veículos, processo que vem, cada vez mais, se desenvolvendo à medida que o mercado de carros elétricos evolui (WADE, 2016; URBAN FORESIGHT LIMITED, 2014). Além disso, a bateria como um todo pode ser reutilizada em outros veículos elétricos ou como recurso energético distribuído de armazenamento de energia em residências e na rede elétrica, uma vertente que pode, inclusive, dar desenvolvimento a novas oportunidades de negócios (NEALER et al, 2015).

Tendo em vista que são utilizados diariamente eletrodomésticos como geladeiras, carregadores de celular, etc., os carros elétricos são apenas mais um eletrodoméstico a consumir energia eletricidade da rede elétrica. Para Barnard (2016), se 10% dos carros nas estradas da Califórnia, Noruega e Japão, fossem elétricos, o impacto na demanda da rede seria respectivamente de 8%, 2% e 3,4%. Entretanto, dependendo de onde e como os carros elétricos são recarregados, os impactos podem ser mais expressivos. Se vários consumidores em um mesmo bairro instalarem sistemas de recarga rápida em suas residências, por exemplo, a demanda de eletricidade crescerá significativamente naquela região (DELGADO, 2017). O

sistema elétrico deve, portanto, estar preparado para suprir a demanda destes “*clusters*” de VEs, dimensionando a rede para atender à essa maior potência, sendo este um impacto muito mais significativo do que o crescimento da demanda agregada de eletricidade (FGV, 2017).

A variável principal para estabilizar a rede e fazer com que o sistema elétrico de potência consiga suprir a energia elétrica necessária para a inserção de novos *clusters* de carros elétricos, é a infraestrutura de redes inteligentes. Através das *Smarts Grids*, o próprio sistema poderá avisar o usuário sobre o melhor momento para recarregar seu carro, buscando não sobrecarregar a rede nos momentos de alta demanda. As redes inteligentes também possibilitarão a utilização dos veículos elétricos em sistemas *vehicle to grid* (V2G), no qual o veículo injeta a energia armazenada nas suas baterias na rede elétrica, contraponto-se ao sistema *grid to vehicle* (G2V), que consiste no mero carregamento dos veículos a partir da rede elétrica (GESEL, 2018).

Com uma infraestrutura desenvolvida, os carros elétricos podem servir como distribuidores de energia elétrica, fazendo papel de um recurso energético distribuído ao armazenar a eletricidade gerada por fontes externas nas suas baterias. Nos momentos de pico ou falta de energia, os mesmos retornam esta energia para o sistema elétrico de potência (BULLIS, 2013). Combinada à tarifação dinâmica e redes inteligentes, a energia armazenada nas baterias também pode ser utilizada em mecanismos de resposta da demanda (FGV, 2017). Ademais, a associação dos carros elétricos ao grid elétrico pode auxiliar a compensar a variabilidade de fontes renováveis intermitentes (BERNARD, 2016).

A adesão ao carro elétrico impacta também no setor de combustíveis fósseis. A *International Energy Agency* (IEA) estimou em 2016 que os carros elétricos poderão causar uma nova crise do petróleo, fazendo com que os EVs substituam cerca de dois milhões de barris de petróleo em 2027 (IEA, 2016). Caso os custos dos carros elétricos baixem, a tendência era que em 2020 o mercado do petróleo já tenha uma diminuição na sua venda (DELGADO, 2017).

2.1.2.2 Impactos da inserção dos veículos elétricos na rede

Conforme a ABVE (2017), o ano de 2016 apresentou um aumento significativo de veículos elétricos no Brasil, (cerca de 3.567 veículos elétricos) entre elétricos e híbridos. Este aumento representa 1,9% nas vendas de veículos no mercado total – uma porcentagem recorde para o setor (ABVE, 2017). O aumento da frota de veículos elétricos proporciona diversos benefícios, entre os quais podemos citar a diminuição na emissão de poluentes (que intensificam o aquecimento global) A diminuição na dependência de combustíveis fósseis e do petróleo (FERNANDES, 2017).

A rede elétrica atual brasileira não foi projetada para suportar o carregamento de uma frota de carros elétricos. Portanto o aumento nas vendas e na utilização de carros elétricos provocaria impactos na rede elétrica. Segundo Monteiro, Pinto e Afonso a qualidade de energia e a estabilidade da rede são os parâmetros mais prejudicados pelo carregamento não controlado de carros elétricos, para Fernandes (2017) um carregamento desordenado, sem um horário e período específicos que levem em consideração os momentos de pico de demanda da rede, poderia causar queda de energia elétrica entre outros problemas.

Caso possua uma infraestrutura adequada, quando comparado aos carros movidos à combustão interna, os carros elétricos teriam maior liberdade em relação à infraestrutura pública de abastecimento, já que eles podem ser recarregados na residência ou local de trabalho do usuário. Porém, o desenvolvimento de infraestrutura de recarga em áreas públicas depende da estratégia de cada país ou organização. Como já mencionado, os EUA estão priorizando a ampliação da sua infraestrutura de carregadores lentos (*slow chargers*) não residenciais, enquanto que o Japão vem investindo mais em carregadores rápidos (*fast chargers*), focados para o público em geral (IEA, 2016).

Alterar o modo de abastecimento dos carros poderá ser um problema, já que os motoristas de veículos à combustão interna estão habituados a abastecerem seus veículos em diferentes postos de combustíveis, espalhados em diferentes pontos dos países. Além disso, contam com a disponibilidade de uma vasta rede de abastecimento, ao contrário dos pontos de recarga elétrica, que não possuem tal estrutura. Portanto, mudar esse padrão de abastecimento, (do espaço público para a residência), poderá levar tempo e deverá ocorrer de maneira gradativa (IEA, 2016).

Em relação à autonomia, embora seja um campo que ainda precisam progredir, melhorias na densidade energética das baterias podem ser solucionadas pela difusão da infraestrutura de recarga. O aumento da autonomia das baterias e a redução do tempo de recarga também contribuirão para a redução ou eliminação desse problema.

O alto preço dos carros elétricos é o fator que mais impede sua disseminação em todo o mundo. Para solucionar este problema, diferentes estudos pesquisam como economizar no custo elevado das baterias, já que as mesmas compõem aproximadamente 1/3 do valor de um carro elétrico. Desde 2015, nota-se uma diminuição do preço de um carro elétrico, em 2015 dois modelos de BEVs, Chevrolet Bolt e Tesla Model 3. Já possuem autonomia elevada e preço reduzido, o que pode indicar o início de uma era de carros elétricos mais eficientes e acessíveis (PLUGINCARS, 2017).

O investimento em redes elétricas inteligentes e carros elétricos ofertariam ao usuário o acesso a informações sobre a demanda da carga em tempo real, isto será possível caso haja interação entre o carro elétrico e a rede elétrica (FERNANDES, 2017).

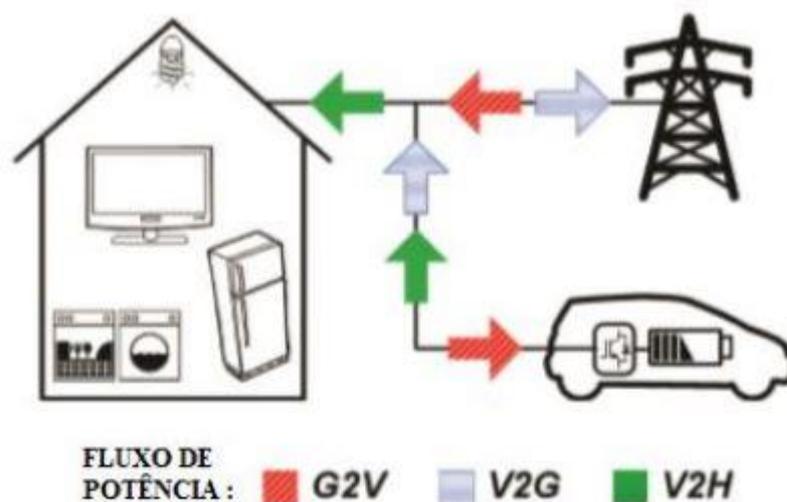
As baterias dos carros elétricos abrem a possibilidade de o usuário armazenar energia elétrica na sua própria residência, já que grande parcela deles fica estacionados entre 93% a 96% do seu tempo de vida (MONTEIRO, 2016). Isso significa que eles estão, na maioria do tempo, com energia disponível para ser usada pela rede em momentos de pico de demanda. Essa nova proposta de interação é conhecida como “*Vehicle to Grid*” (V2G), onde o veículo elétrico disponibiliza energia para a rede elétrica (FERNANDES, 2017). Porém, segundo Monteiro (2016), boa parte dos carros elétricos é projetada com carregador unidirecional que permite apenas o fluxo de potência convencional, que é a rede elétrica carregando o carro elétrico, conhecido como “*Grid to Vehicle*” (G2V).

V2G é uma tecnologia na quais carros elétricos, PHEVs ou carros elétricos de célula de combustível se comunicam com a rede elétrica para fornecer energia de pico e reserva de fiação, armazenamento de energia renovável e backup (YIYUN et al, 2011). A utilização de V2G pode suavizar drasticamente a flutuação nos perfis de carga de energia (JIAN et al., 2015). O conceito V2G pode melhorar a eficiência, estabilidade e confiabilidade da rede (YILMAZ; KREIN, 2012). Os custos do proprietário do veículo são aproximadamente reduzidos pela metade com o uso de Evs. Em termos de perdas do sistema de distribuição e regulação de tensão, os EVs têm apenas um pequeno impacto na rede (MMA et al., 2012). A comunicação em tempo real, a medição inteligente e as redes de área local (HANs) podem aprimorar a capacidade de V2G para carga e descarga coordenadas da frota de EVs em um alimentador de distribuição (GHOFRANI, 2012). Ota et al. (2010) propuseram um esquema que considera a solicitação de carga para o próximo acionamento e condição da bateria. Um estudo de caso em Portugal mostrou boa correspondência entre os perfis de carregamento inteligente EV e de produção PV (NUNES; FARIAS; BRITO, 2015).

Com a aplicação do V2G, os carros elétricos deixam de ser um elemento passivo da rede para tornarem-se um elemento ativo com capacidade de armazenar, consumir e distribuir energia elétrica (FERNANDES, 2017). Para a implantação do conceito V2G, alguns estudos foram desenvolvidos, principalmente para a criação de carregadores bidirecionais, que permitem a interação do carro elétrico com a rede elétrica, disponibilizando energia não apenas para a rede elétrica, mas também para a residência ou estabelecimento em que ele se encontra conectado (PINTO, 2013).

Além do V2G, outros conceitos de interação estão sendo sugeridos, como o “*Vehicle to Home*” (V2H), que apresenta uma possibilidade de criar um fluxo bidirecional entre o veículo e a residência, isso torna o carro elétrico um *backup* de geração de energia, minimizando perdas na transmissão de energia e reduzindo custo (MONTEIRO, 2016). Para Fernandes (2017) uma das utilidades do V2H é sua utilização em casos de interrupção da rede elétrica. Nessas situações o carro elétrico poderá injetar energia elétrica na residência, poupando os usuários da falta dos serviços que dependem de energia elétrica. Outro conceito também desenvolvido e baseado na proposta bidirecional do fluxo de potência é o “*Vehicle to Building*” (V2B). Semelhante ao V2H permite que a energia armazenada na bateria seja usada como um sistema de backup em escala comercial (FERNANDES, 2017). A figura 10 mostra a direção do fluxo de potência nos conceitos V2G, V2H e G2V.

Figura 10 – Esquema mostrando os conceitos de G2V, V2G e V2H

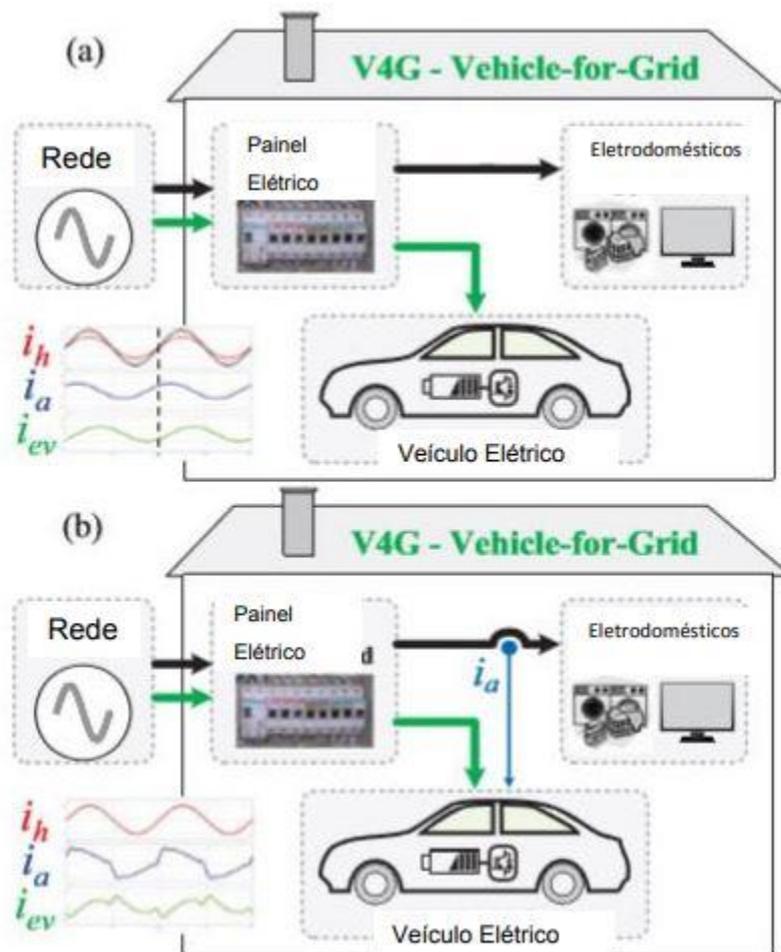


Fonte: Fernandes (2017).

Além das interações citadas, existe o V4G (*Vehicle for Grid*), onde o carro elétrico poderá produzir potência reativa na rede nos dois modos de operação (G2V e V2G). O V4G estabelece que o carro injete reativo na rede ou atue como um filtro de potência ativo para compensar os harmônicos da corrente gerados por equipamentos elétricos não lineares presentes em grande parcela das residências (MONTEIRO; PINTO; AFONSO, 2016). Uma ótima vantagem desse modo de operação é que a bateria do VE não é utilizada, logo não contribui para o seu envelhecimento (FERNANDES, 2017). A figura 8 apresenta o modo operação V4G, onde as correntes i_h , i_a e i_{ev} representam respectivamente as correntes da

residência, dos equipamentos elétricos e do VE. As duas situações que definem o V4G são mostradas na figura 7. O VE, na figura 11 a está injetando potência reativa na rede elétrica e na figura 7-b o VE está compensando os harmônicos gerados pelos equipamentos elétricos (FERNANDES, 2017).

Figura 11 – Modo de operação V4G; (a) produzindo potência reativa, (b) compensando harmônicos na corrente



Fonte: Monteiro, Pinto e Afonso (2016).

Dentre os modos de interação com a rede elétrica apresentadas, o modo de operação V2G pode se tornar um sistema de armazenamento de energia que permite a interação e ligação com fontes renováveis, como a fotovoltaica. Este tipo de energia é intermitente, ou seja, depende de situações climáticas favoráveis, acarretando em picos de produção em horários diferentes aos picos de demanda. Com o modo de operação V2G, é possível ao EV armazenar a produção de energia excedente e utilizá-la posteriormente (MONTEIRO, 2012). Para

Fernandes (2017), o V2G poderá servir como um modelo de negócio, beneficiando o usuário e a concessionária de distribuição de energia. Dentre as vantagens do V2G podem ser destacadas:

- O EV pode servir como energia de emergência por longas interrupções;
- Pode interagir com as fontes renováveis para armazenar a energia excessiva e retornar à rede em momentos de necessidade;
- Pode armazenar eletricidade e fornecer rápida resposta de geração para a rede elétrica;
- Pode contribuir na qualidade de energia, produzindo potência reativa na rede e compensando harmônicos na corrente como um filtro ativo; e,
- Pode contribuir na estabilidade da tensão e frequência da rede.

2.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA BRASILEIRO

Devido à abundância de recursos de hídricos no Brasil, a hidroeletricidade foi escolhida como a principal fonte de energia elétrica do país, respondendo por cerca de 80% da capacidade instalada do país (SOUZA; FERREIRA; NETO, 2022). Atualmente, existem 3.739 empreendimentos Hidrelétricas operando no Sistema Interligado Nacional (BEN, 2022). Essas usinas hidrelétricas, que possuem potências instaladas que variam de 28 a 8.370 Megawatts e estão espalhadas por todas as regiões do país, podem servir tanto como reservatórios quanto como reservatórios de água (EPE, 2022). A fonte hidráulica (composta por UHE, PCH e CGH) gerou 55,3% da energia elétrica em 2021, enquanto as demais fontes energéticas geraram 44,7%. Dentre essas fontes, os destaques foram a energia eólica e a geração termelétrica a gás natural e à biomassa. A tabela 4 apresentam as outras participações das fontes de energia na geração elétrica no ano de 2021.

Segundo dados do Balanço Nacional de Energia (BEN) publicado em 2022 a geração de energia elétrica no Brasil em centrais de serviço público e autoprodutores atingiu 656,1 TWh em 2021, resultado 4% acima de 2020. As centrais elétricas de serviço público, participaram com 82,6% da geração total. A geração hídrica, principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil, reduziu -8,6% na comparação com o ano anterior.

Tabela 4 – Participação das fontes na geração elétrica

Tipo de geração	Geração	%
Gás natural	86.862 GWh	13,20
Eólica	72.286 GWh	11,00
Biomassa	51.711 GWh	7,90
Derivados de Petróleo	18.244 GWh	2,80
Carvão	17.585 GWh	2,70
Solar	16.752 GWh	2,60
Outras	15.146 GWh	2,30
Nuclear	14.705 GWh	2,20

Fonte: EPE (2022).

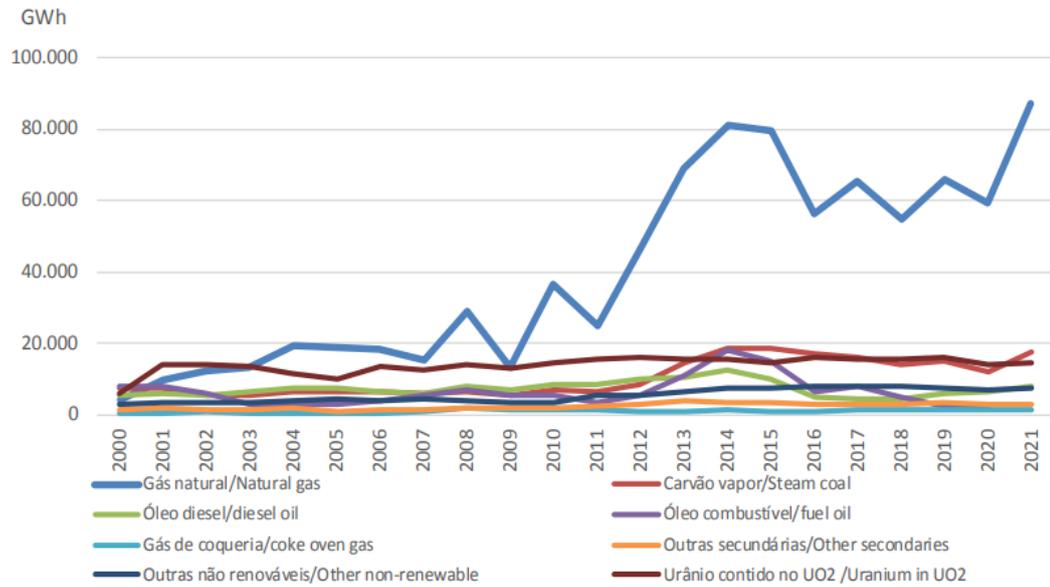
A autoprodução (APE) em 2021 participou com 17,4% do total produzido, considerando o agregado de todas as fontes utilizadas, atingindo um montante de 114 TWh. Desse total, 65,9 TWh não foram injetados na rede, ou seja, produzidos e consumidos pela própria instalação geradora, usualmente denominada como APE clássica. A autoprodução clássica agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, a exemplo dos setores de Papel e Celulose, Siderurgia, Açúcar e Álcool, Química, entre outros, além do Setor Energético.

A geração elétrica a partir de não renováveis representou 22,6% do total nacional, contra 16,8% em 2020. Entretanto é importante destacar a evolução do gás natural que ao longo dos últimos dez anos ao deslocar o óleo combustível e o diesel, contribuiu para minimizar as emissões provenientes da geração de eletricidade a partir de fontes não renováveis (BEN, 2022).

Importações líquidas de 23,1 TWh, somadas à geração nacional, asseguraram uma oferta interna de energia elétrica de 679,2 TWh, montante 0,3% superior a 2020. O consumo final foi de 570,8 TWh, representando uma expansão de 5,7% em comparação ao ano anterior. O gráfico 1 a seguir apresenta a geração de energia por fontes não renováveis (EPE, 2023).

Segundo dados do ministério de minas e energia o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 53,4% da oferta interna. Considerando que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica atinge em torno de 57%. As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. Do lado do consumo final, houve um aumento de 5,7%, atingindo um total de 570,8 TWh, com destaque para os setores industrial e residencial, que participaram com 37% e 26% respectivamente.

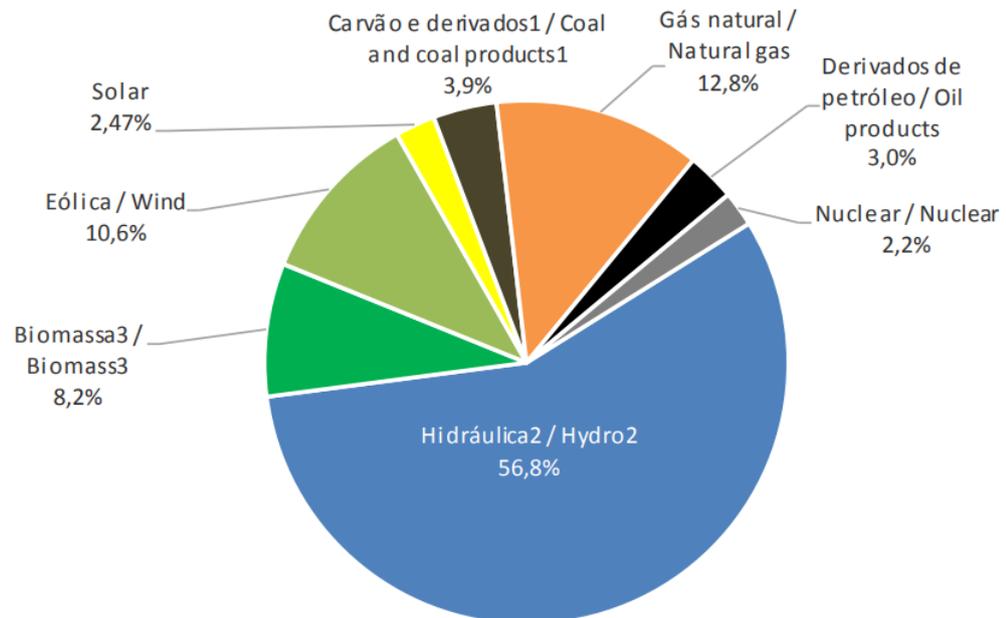
Gráfico 1 – Geração de energia elétrica: fontes não renováveis



Fonte: BEN (2022).

O gráfico 2 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2021.

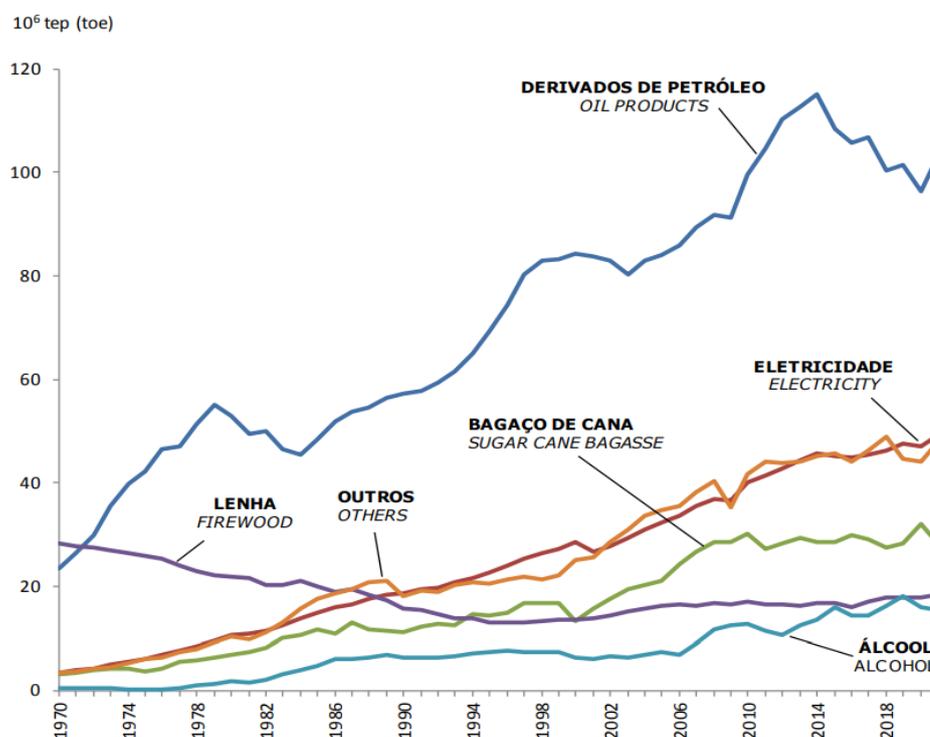
Gráfico 2 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: BEN (2022).

Em relação ao petróleo e seus derivados, a EPE (2022) destaca que a produção nacional de petróleo retraiu -1,6% em 2021, atingindo a média de 2,9 milhões de barris diários, dos quais 97% são de origem marítima. Em relação aos estados produtores, o Rio de Janeiro foi responsável pela maior parcela: 80,6% do montante anual. Já a produção terrestre, continua sendo liderada pelo Estado do Rio Grande do Norte, com 37,1% do total *onshore*. Pelo lado do consumo foram registrados aumentos de 9% de óleo diesel fóssil e de 9,8% de gasolina automotiva. O setor de transporte respondeu por 71% do consumo total energético de óleo diesel fóssil. O Gráfico 3 apresenta o comportamento do consumo final por fonte, percebe-se o domínio do consumo dos derivados do petróleo.

Gráfico 3 – Consumo Final por Fonte



Fonte: BEN (2022).

2.2.2 Energias renováveis

Para Thorin (2014), a energia e a sua potencialidade são vitais para toda a vida no mundo. Diferentes processos podem gerar novas energias, como, por exemplo, a água, o vento e o sol. Durante este processo, a energia pode ser transformada em várias formas diferentes, oriundas de energias não renováveis ou renováveis. As energias mais utilizadas são oriundas de

energias não renováveis geradas pela queima de combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e carvão. O consumo de combustíveis fósseis foi quase o dobro de 630.000 a 121.000 TW h e a queima de carvão e gás natural também aumentou entre os anos de 1973 e 2010. No entanto, o uso de energia nuclear é inferior aos combustíveis fósseis.

Para Samad e Annaswamy (2011), existem muitas fontes de energia renováveis disponíveis no mundo e a parte básica deste tipo de fontes de energia é gratuita e está disponível. Para os autores, embora muitos estudos de energia renovável tenham sido realizados para explorar fontes adicionais de energia limpa, a integração de fontes de energia renovável no sistema de energia é um dos desafios na modernização e otimização da rede elétrica.

Para Rizzetti (2018) algumas redes já estão altamente congestionadas e a transferência de energia dos parques eólicos para o consumo pode ser difícil. Fontes de energia renováveis são intermitentes e inerentemente variáveis. Tradicionalmente, a eletricidade fluía de uma central para um cliente. Com fontes adicionais provenientes de fontes alternativas, a eletricidade precisa entrar na rede a partir de vários locais. Segundo Gaviano, Weber e Dirmeier (2011), a automação da rede, o fluxo de energia bidirecional e os controles modernos são necessários para trazer a energia de fontes alternativas para a rede de distribuição e movê-la para seus destinos. São necessários esforços coordenados para adaptar as energias solar fotovoltaica e eólica e os novos dispositivos nos sistemas Smart Grid devem poder integrar-se com os equipamentos existentes (GAVIANO; WEBER; DIRMEIER, 2011).

Para Bernardon et al (2014) a geração de energia elétrica a partir do vento é considerada uma das mais promissoras fontes naturais de energia elétrica, principalmente no Brasil, onde existe um dos maiores potenciais eólicos do planeta. Um dos trabalhos pioneiros de geração de energia a partir do vento é o de Warne e Calnan (WARNE; CALNAN, 1977). Os autores apresentam uma revisão histórica no período de 1890 a 1977 e destacam que a crise internacional do petróleo de 1973 serviu para mostrar a natureza finita dos combustíveis fósseis e também para alertar quanto à necessidade de geração de eletricidade por novos meios, impulsionando o interesse de investimentos em escalas comerciais da energia eólica.

A ANEEL define Energia Eólica como a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (ANEEL, 2020). O aproveitamento da fonte eólica ocorre a partir da conversão da energia cinética pelo movimento de translação em energia cinética de rotação, utilizando para geração de eletricidade uma turba eólica ou um aerogerador (BERNARDON et al, 2014). A figura 12 representa o modo de coleta de energia eólica.

Figura 12 – Coleta de Energia Eólica



Fonte: Revista Veja (2016).

Para Hossain et al (2014), o rotor é responsável pela transformação da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina, que por sua vez são ligadas a um eixo interconectado ao gerador através de uma caixa multiplicadora de velocidades. A nacelle é o componente que abriga os mecanismos do gerador para permitir seu funcionamento (por exemplo, o controle de giro, sistema de freio, sensores de vento, entre outros). Por fim temos a torre base de sustentação e posicionamento para o rotor e a nacelle, posicionada a uma altura que permita o funcionamento do aerogerador (HOSSAIN et al, 2014).

A energia solar utiliza a luz solar para sua conversão. Esta energia é captada por painéis solares, formados por células fotovoltaicas e transformada em energia elétrica ou mecânica. Essa energia solar ainda é pouco utilizada no mundo, pois o custo de fabricação e instalação dos painéis solares ainda é muito elevado. Outro problema é a dificuldade de armazenamento da energia solar (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). O Brasil é um dos países com maior potencial do mundo no tocante à geração de energia proveniente dos raios solares. Isto é explicado pelo fato de termos um vasto território com grande incidência dos raios do Sol (STEPHEN, 2011).

A utilização de energia solar é hoje prontamente associada a propostas de “energia limpa”, juntamente com outras soluções que pretendem reduzir o impacto da geração de energia elétrica sobre o meio ambiente. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica surge como uma fonte de energia alternativa e renovável, pois utiliza a radiação solar para a geração de energia elétrica. De acordo com Hinrichs, Kleinbach e Reis (2014), as fontes renováveis de energia representam 8% da energia produzida no mundo, e essa porcentagem vem aumentando rapidamente, sendo a energia fotovoltaica a segunda fonte renovável com maior crescimento mundial, com 35% de crescimento por ano. Ainda, segundo Hinrichs, Kleinbach e Reis (2014), os recursos energéticos renováveis apresentam vantagens em um mundo onde as fontes de

energia estão cada vez mais limitadas, podendo ser utilizados em várias atividades, através de tecnologias apropriadas e com diminuição dos danos ambientais.

De acordo com Machado e Miranda (2015), produzir eletricidade através da energia solar não é algo novo, pois já em 1839 foi observado pelo físico francês Edmond Becquerelo o efeito fotovoltaico, no qual duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido produziam eletricidade quando expostas à luz solar. Em 1883 foi construída a primeira bateria solar feita com folhas de selênio. Apesar de ter uma eficiência de conversão elétrica de apenas 1%, seu dispositivo teve muita repercussão, pois as pessoas não acreditavam que se poderia gerar energia sem a queima de combustíveis. Já a primeira célula solar fotovoltaica foi desenvolvida em 1954 por uma empresa norte-americana (MACHADO; MIRANDA, 2015; BRAUN-GRABOLLE, 2010).

Conforme Rüther (2004), através do efeito fotovoltaico, células solares convertem diretamente a energia do sol em energia elétrica de forma estática, silenciosa, não poluente e renovável. Este processo consiste em um efeito fotoelétrico caracterizado pela produção de uma corrente elétrica entre duas partes de material diferente, que estão em contato e expostas à luz, o que proporciona a conversão da energia solar em energia elétrica (PALZ, 2002).

O funcionamento das células solares para a conversão direta da luz solar em energia elétrica é obtido através do uso de placas solares, constituídas de células solares, conforme explica Palz (2002). As células fotovoltaicas são agrupadas em um painel solar com o intuito de obter proteção e durabilidade, o qual será conectado em outros painéis em um sistema solar fotovoltaico. Este sistema é composto por elementos como os painéis solares, o inversor solar, o sistema de fixação das placas solares, os cabeamentos, os conectores e outros materiais elétricos padrões (PORTAL SOLAR, 2018).

Silva (2008) argumenta que uma desvantagem deste modo de geração de energia é o alto investimento. Com isso, o retorno sobre o investimento é de longo prazo, o que provoca um certo desinteresse em sua utilização. Inicialmente as células solares fotovoltaicas tinham um custo elevado e eram utilizadas para a geração de energia para os satélites. Com o passar do tempo a tecnologia evoluiu e tornou-se viável economicamente para aplicações terrestres (RÜDTHER, 2004).

De acordo com Silva (2008), para tornar economicamente viável o uso de energia fotovoltaica, diversos avanços científicos foram necessários, como, por exemplo, a utilização de novos materiais que elevaram a eficiência das células. De fato, ocorreram tantos avanços no desenvolvimento de geração de energia fotovoltaica que já existem células com eficiências superiores a 40%, mesmo ainda não estando disponíveis no mercado.

Albadó (2002) afirma que, embora sejam utilizados na produção de células voltaicas diversos materiais, o silício é atualmente o mais utilizado. Tanto pelo domínio tecnológico que se tem sobre este material quanto pela sua abundância na natureza. Os custos, conforme descrevem Hinrichs, Kleinbach e Reis (2014), vêm se tornando cada vez menores, o que tem causado a redução significativa nos custos de produção e por consequência dos investimentos necessários para implementação de sistemas solares fotovoltaicos. Os autores também destacam a variedade de aplicações que a tecnologia de geração de energia tem como, por exemplo: em centrais de geração elétrica, em residências, em iluminação externa, em comunicações, em bombeamento de água, em carregamento de baterias e em refrigeração.

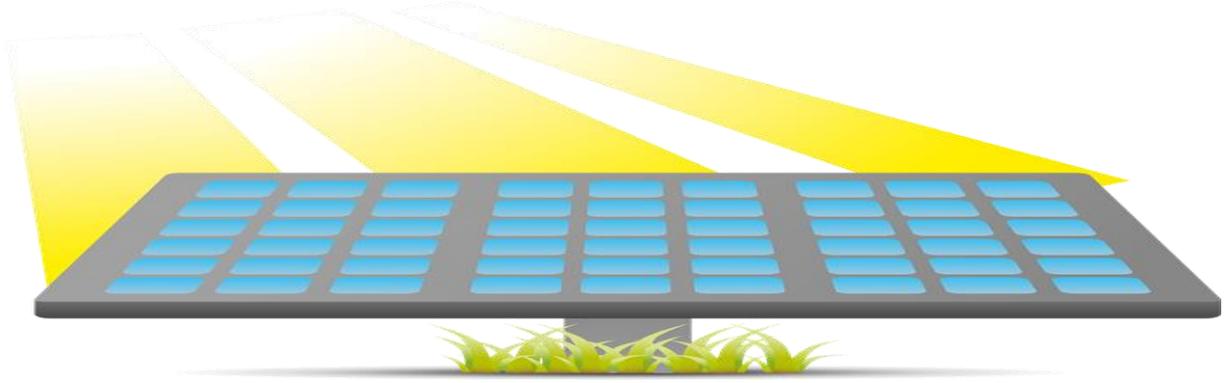
O sol é um dos elementos mais abundantes na natureza e essencial para a sobrevivência humana. Neste aspecto, conforme Santos e Jabbour (2013), o Brasil está em posição privilegiada para explorar essa riqueza natural. Por ter muito do seu território entre os trópicos, o uso de células fotovoltaicas é favorecido devido a maior incidência de irradiação solar diária por metro quadrado.

A utilização de células que convertem energia solar em energia elétrica é uma ótima alternativa de geração de energia, principalmente por ser uma fonte limpa causando menos danos ambientais. Conforme Rütther (2004), a viabilidade econômica do uso de painéis fotovoltaicos só se tornou possível devido à evolução das tecnologias de produção das células solares. A aplicação da energia solar fotovoltaica pode proporcionar benefícios aos usuários em geral, ao sistema elétrico nacional e à sociedade (RÜTHER, 2004).

A geração fotovoltaica faz uso de elementos semicondutores, capazes de gerar eletricidade a partir da conversão direta de energia solar em energia elétrica através de células solares (fotovoltaicas). Embora possa ser simples, este processo de conversão depende das características de cada semicondutor e da qualidade dos materiais empregados na tecnologia de fabricação.

Um sistema fotovoltaico é composto basicamente por arranjos de células fotovoltaicas na configuração série e/ou paralelo. Uma vez que cada célula é capaz de gerar tipicamente entre 1W a 3W de potência, faz-se necessário a combinação de células quando se deseja aumentar o nível de potência gerada. A estrutura resultante desta combinação é denominada módulo fotovoltaico, comercialmente encontrado com valores de potência que variam tipicamente de 5W a 245W (KYOERA SOLAR, 2017). Dependendo da potência, nível de tensão e corrente desejados no projeto, os módulos fotovoltaicos também podem ser associados em série ou paralelo, constituindo-se por fim um painel fotovoltaico, conforme pode ser observado na figura 13.

Figura 13 – Pannel Fotovoltaico



Fonte: Aneel (2016).

Um dos aspectos fundamentais para a implantação de sistemas fotovoltaicos é o conhecimento das características de radiação solar do local onde se deseja realizar a instalação. Esses dados podem ser obtidos através de informações da base de dados de estações meteorológicas. A norma ABNT NBR 10899:2013 define os principais termos técnicos relativos à conversão fotovoltaica de energia solar, e estabelece a seguinte definição para radiação solar “Densidade de fluxo de energia da radiação solar, normalmente medida em KW/m^2 ou em mW/cm^2 ” (ABNT, 2013).

A radiação solar é a principal variável que afeta a potência gerada através das células fotovoltaicas. Além da radiação solar, a temperatura de operação das células também influencia na quantidade de potência gerada, uma vez que a tensão de saída da célula fotovoltaica é alterada em função da temperatura do ambiente. O efeito da variação da temperatura de operação sobre a potência pode ser observado nas curvas características de tensão e corrente (curvas I-v) da saída de um módulo fotovoltaico (BERNARDON et al, 2014).

Segundo Bernardon et al (2014) a geração de energia através do aproveitamento do potencial hidráulico existente em um rio pode se caracterizar de diferentes formas: quando existe desnível concentrado em uma queda d’água, caracterizando um aproveitamento natural, através de desvio do rio de seu leito natural. A água é conduzida através de canais, túneis ou condutos forçados e transformada em energia cinética através do giro das pás das turbinas, este movimento produz a energia elétrica a partir do acionamento do eixo de um gerador.

As pequenas centrais Hidrelétricas (PCHs) e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs) representam, atualmente, uma forma rápida e eficiente de promover a expansão da oferta de energia elétrica. Este tipo de empreendimento possibilita um melhor atendimento às necessidades de carga de pequenos centros urbanos e regiões rurais, complementando o fornecimento de energia realizado pelo sistema convencional. A atratividade destas usinas

fundamenta-se em suas características de menos impacto ambiental. Quando vistas isoladamente, menor volume de investimento e maior incentivo legal, uma vez que as CGHs e PCHs são dispensadas de licitação para obtenção da concessão, necessitando apenas de autorização da ANEEL, no caso de PCH, e de um simples registro, no caso de CGHs (ANEEL, 2003).

A resolução nº 394, revogada pela Resolução nº 652 de 2003, define Pequena Central Hidrelétrica (PCH) como todo o aproveitamento hidrelétrico com potência superior a 1000kW, e igual ou inferior a 30000kW, destinado à produção independente, autoprodução ou produção autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 Km². O aproveitamento hidrelétrico caracterizado com potência igual ou inferior a 1000 kW é definido como Central Geradora Hidrelétrica (CGH) (ELÉTROBRAS, 1985).

A operação das PCHs e CGHs poderá ocorrer com: potência em função de estudos hidroenergéticos, considerando limitações hidráulicas e limites elétricos de equipamentos, desassistida, quando a potência montante é diretamente relacionada ao nível montante, sendo que em um nível mínimo admissível pode-se retirar alguns grupos de operação, entre outros fotovoltaico (BERNARDON et al, 2014).

Conforme o Manual de Diretrizes para Estudos e Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas, publicado pela ELETROBRÁS, a exploração das centrais é classificada em micro, mini e pequena central em relação à potência instalada e à queda de projeto, conforme indicação na tabela 5. Da mesma forma, a ANEEL, através da Resolução Normativa nº 482 de 2012, expandiu o termo centrais geradoras de energia elétrica em micro e mini geração, para outras fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, compreendendo a micro geração até 100 kW de potência e mini geração de 100kW a 1000 kW (ANNEEL, 2017).

Tabela 5 – Classificação das centrais hidrelétricas quanto à potência e queda de projeto

	Potência (kw)	Queda de projeto (m)		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	Menos de 15	15 a 50	Mais de 50
Mini	$100 < P < 1000$	Menos de 20	20 a 100	Mais de 100
Pequena	$1000 < P < 30000$	Menos de 25	25 a 130	Mais de 130

Fonte: Bernardon (2015).

No futuro, para o sistema “Smart Grid”, a energia hidrelétrica poderia ser um recurso de armazenamento importante e isso é uma parte da energia renovável que será um bom

mercado no semicondutor de energia (JOHN, 2013). Na tecnologia fotovoltaica, a célula solar pode ser descrita como um dispositivo que produz, corrente contínua e potência flutuando com o fluxo da luz do sol. Praticamente, isso normalmente exige mudança para qualquer voltagem ou corrente similar (AC) usando conversores. Dentro dos módulos solares, a célula solar está colaborando, eles estão conectados para formar séries a um inversor. Além disso, um inversor produz energia CA usando uma tensão desejada após mudar a frequência e fase (TORRES, 2012).

2.3 DINÂMICA DE SISTEMAS E PROCESSO DECISÓRIO

Para Rebs, Brandenburg e Seuring (2019) conceitos empregados às palavras “dinâmica” e “sistemas” podem ser variados quando se leva em conta a área de aplicação, adicionado a isto, se considerada a expressão “dinâmica de sistemas”, a mesma também pode ser utilizada em várias áreas da ciência. Este contexto vem ao encontro da área de aplicação com enfoque no estudo de sistemas dinâmicos sóciotecnológico-econômicos, isto é, sistemas constituídos por componentes humanos, técnicos e econômicos. Esta área ficou conhecida como dinâmica de sistemas e originou-se a partir da adaptação da engenharia de controle clássica, do Professor Jay W. Forrester do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que, nos anos 50, interessou-se em estudar processos de negócio dinâmicos e seus impactos no sucesso ou fracasso das organizações (MALCZYNSKI; LANE, 2022).

Com base em sua experiência na área de controle e realimentação, o Prof. Forrester evidenciou que diversos fenômenos de realimentação dos sistemas de controle físicos, também eram encontrados em problemas de produção e operações, especialmente no que se refere à realimentação de informações para o ajuste e balanceamento do sistema de produção (STERMAN et al., 2015).

Como resultado de seus estudos, o Prof. Forrester publicou um artigo em 1958, com resultados e aceitação positivos, de tal forma que, anos mais tarde, ele publicou um livro, intitulado “*Industrial Dynamics*”, no qual explicava com detalhes cada uma das fases do modelo de cadeia de suprimentos que foi implantada na *General Electric* (FORRESTER, 1958; 1961).

Após a publicação de tal obra, a área, que originalmente denominou-se “*Industrial Dynamics*”, passou por uma evolução, objetivando englobar outros tipos de sistemas e problemas sócio-tecnológico-econômicos, além daqueles contidos no ambiente industrial tais como: problemas ambientais, problemas de planejamento urbano e econômicos. Tal evolução

ocasionou a alteração da nomenclatura, passando a se chamar “*System Dynamics*” ou dinâmica de sistemas. Desde então, a aplicação de Dinâmica de Sistemas cresceu substancialmente, abrangendo soluções a problemas de gestão de negócios e economia, indo até ecologia, fenômenos sociais e de educação. Todavia, a sua utilização ainda não é massiva na área de gestão em geral, inclusive no Brasil. A razão, está relacionada à pouca disseminação do campo nos canais de publicação científicos no País (VAZ, C.R.; MALDONADO, M.U., 2016).

Dinâmica de sistemas (DS) é uma abordagem baseada na teoria de controle e da dinâmica não linear (HAFEZI et al., 2021). Essa abordagem permite aos analistas e modeladores contabilizarem as interações entre os sistemas inter-relacionados e que conduzem os comportamentos dinâmicos de um sistema ao longo do tempo (BARLET; FLETCHER, 2017). Baseia-se no pressuposto de que não linearidades, feedbacks de sistema e relacionamentos entre os elementos de um sistema podem ser mais significativos na determinação do comportamento do sistema agregado do que os próprios componentes individuais (FORRESTER, 1970). A capacidade de incorporar atrasos de tempo, amplificações, relações casuais e estruturais e feedbacks do sistema no procedimento de modelagem tornaram a DS popular para analisar e compreender sistemas temporais complexos (STERMAN, 2018).

Domingos et al. (2019) destacam que a Dinâmica de Sistemas é um método de modelagem e simulação do comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo, possibilitando assim a avaliação de mudanças em partes do sistema de forma que tais alterações afetem o comportamento do todo. Portanto, a aplicação da metodologia de dinâmica de sistema torna possível examinar a interação entre as forças presentes no sistema e, com isso, possibilitar uma visão holística do processo em questão (FORRESTER, 1961).

Reddy, Rao e Krishnanand (2020) afirmam, em seu estudo, que a Dinâmica de Sistemas é uma abordagem para analisar e resolver problemas complexos com uma ênfase na análise e desenho de políticas. Segundo Kunc et al (2018) a DS foi inicialmente desenvolvida pela engenharia de controle e gerenciamento; após esse desenvolvimento suas aplicações se difundiram por vários campos e diferentes níveis de pesquisa, mas com o objetivo de solucionar questões estratégicas e de formulação de políticas. Para Susnik et al. (2018) a modelagem e simulação de Dinâmica de Sistemas adotam uma abordagem de sistema integral e um processo de aprendizagem social, que é amplamente considerada uma metodologia eficiente para abordar uma gama de problemas dinamicamente complexos, incluindo mobilidade urbana e sustentabilidade ambiental (PLUCHINOTTA et al., 2018, 2021).

Para Kim, Kim e Suh (2021) dinâmica de sistemas é a combinação de teorias, métodos e filosofias, objetivando a análise do comportamento dos sistemas. Já, para Bueno (2013) a

dinâmica de sistemas consiste num método desenvolvido para a análise das relações de causa e efeito de determinadas variáveis de um sistema, sendo ele organizacional ou social.

De acordo com Jia (2023) a adição de informações ocasiona ações (fluxos), alterando o estado (nível) de um sistema, quando decorrido um período de tempo, gerando dois tipos de ciclos de *feedback*: o negativo (ou de equilíbrio) – no qual ocorre uma reação do sistema frente as mudanças, compensando-as; e o positivo (ou de autorreforço) – no qual o sistema amplia eventuais perturbações.

Para Vaz e Maldonado (2016) a principal premissa da dinâmica de sistemas refere-se à importância da estrutura do sistema, ou seja, dos elementos físicos, das regras de decisão e de suas inter-relações, para explicar o comportamento do sistema em estudo. A segunda premissa da dinâmica de sistemas, de acordo com os autores anteriormente citados, está relacionada com as respostas do sistema às ações dos tomadores de decisão apresentando-se na forma da acumulação ou da redução (de matéria, energia ou informação). Por outro lado, conforme defendem Vaz e Maldonado (2016), a dinâmica de sistemas assume que existem vários estoques dentro de sistemas sócio-tecno-econômicos, influenciando-os uns aos outros por meio dos seus fluxos e de forma dinâmica, tal afirmação refere-se à terceira premissa da dinâmica de sistemas: os processos de realimentação ou feedback, isto é, toda ação ou decisão eventualmente produz uma reação do sistema, alterando, portanto, o estado do sistema em estudo, sendo que os sistemas sócio-tecno-econômicos são formados por mais de uma malha de realimentação, tanto positivas quanto negativas. Por fim, a quarta e última premissa da dinâmica de sistemas, para Vaz & Maldonado (2016), diz respeito ao efeito da defasagem temporal, ou *delay*, quer dizer, a existência de uma defasagem entre as decisões e os respectivos resultados gerados pelas mesmas, influenciando de maneira dinâmica o comportamento do sistema.

De acordo com o procedimento de modelagem de dinâmica de sistemas (STERMAN, 2000) a modelagem é iniciada a partir do desenvolvimento de uma hipótese dinâmica, geralmente baseado de um diagrama de causa e consequência (ZARE et. al., 2019). Esse diagrama por sua vez é então convertido para as equações matemáticas que buscarão responder a hipótese dinâmica (ZARE et al., 2019).

A abordagem de DS possibilita a conceituação das preocupações ambientais da comunidade e as incertezas associadas na interface entre ciência e sociedade (SUPRUN et al, (2019). A utilização de modelos de DS facilitam a colaboração entre pesquisadores e gestores interessados em solucionar problemas complexos, além de integrar seus conhecimentos e percepções locais do problema investigado e suas soluções potenciais (PLUCHINOTTA, 2021). O uso de DS é adequado para a análise de problemas cujo comportamento é governado

por relações de feedback em um horizonte de longo prazo (STERMAN, 2018). Para Solangi et al (2019) o modelo estabelece um estado normal de negócios do sistema e, em seguida, gera cenários baseados em dados hipotéticos específicos, como futuras intervenções de políticas. Os cenários gerados poderão fornecer informações sobre as mudanças nas variáveis chaves do sistema com base em cada intervenção.

Os modelos de dinâmica de sistemas descrevem o comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo usando ciclos de feedback, estoques, fluxos e modificadores (SAHIN et al, 2018). Os estoques caracterizam o estado do sistema em um determinado momento e mantêm uma memória dele para que seu status possa ser descrito (THOMPSON; HOWICK; BELTON, 2016). Os fluxos afetam os estoques via entrada ou saída e interligar os estoques dentro de um sistema. Os fluxos correspondem à mudança por período de tempo que aumenta ou diminui os níveis no sistema.

Em relação ao processo decisório Löbler (2005) desta que o processo de tomada de decisão torna-se quase um recorte de quebra-cabeças, dados os diversos recortes na literatura sobre o assunto. Assim, para embasar este trabalho buscou-se conhecer a pedra fundamental do assunto, neste caso as ideias de Herbert Simon, para estabelecer um conceito apropriado de decisão para o entendimento inicial do tema e em seguida demonstrar a importância da informação para o agente decisor. Simon (1965) considerou que, embora qualquer atividade prática – relacionada à sua definição “administração é a arte de conseguir realizar as coisas” – envolva tanto “decidir” como “fazer”, não se costumava reconhecer que uma teoria de administração ocupar-se-ia dos processos de decisão e de ação simultaneamente, salvo exceções. Ambas as tarefas, “decisórias e “executórias”, permeiam as organizações e estão intimamente ligadas entre si.

Para Simon (1995), as tarefas de decisão ou seleção não se limitavam à formulação da política geral da organização, mas ocorriam em todos os níveis, tendo em vista que todo o comportamento envolve a escolha, consciente ou inconsciente, de determinadas ações entre aquelas fisicamente possíveis para o agente. O que se observa é que uma decisão é tomada por uma pessoa, que possui os seus próprios níveis de aspirações e de satisfações, que têm suas influências em vários níveis na decisão, como Simon (1996) bem observou em seu trabalho, e que, num mundo real de complexidades, quaisquer procedimentos implantados pelas organizações para encontrar respostas boas o suficiente para um problema (cujas respostas ótimas são desconhecidas) são impossíveis, com ou sem o uso de computadores. Para Clemen (1996), a o processo de decisão conta com um conjunto incompleto de informações para

subsidiar a decisão. Neste sentido, o decisor, consciente dessa possibilidade, deve procurar se utilizar de informações com qualidade para mitigar os efeitos de uma escolha prejudicial.

3 MÉTODO DE PESQUISA

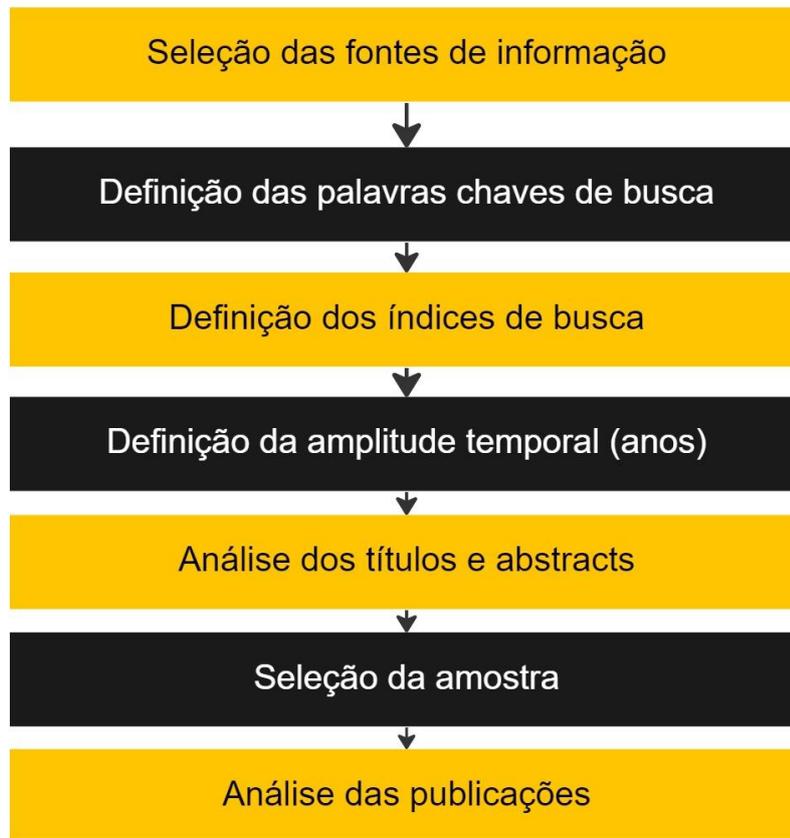
Este capítulo tem como escopo apresentar o método utilizado para atingir os objetivos propostos. O capítulo está dividido em: a) Coleta de dados; b) desenvolvimento dos modelos de dinâmica de sistema; c) projeção dos cenários.

3.1 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada em dois momentos. No primeiro foi feita a revisão sistemática da literatura. No segundo momento, foram coletadas percepções gerais dos especialistas em pesquisa na engenharia de produção do Brasil. Para a revisão sistemática da literatura foi utilizado o método desenvolvido por Lacerda (2009), que é um método sistemático para realização de pesquisas em bases de periódicos. Os passos lógicos propostos por este método estão representados na Figura 15.

Neste estudo do estado da arte, coletamos dados bibliométricos de dois dos repositórios mais referenciados: Web of Science (WoS) e Scopus com os artigos publicados nos últimos cinco anos (2017-2023). Portanto, os resultados desses dois bancos de dados são comparados para todas as diferentes consultas de crescimento de produção científica. Foram utilizados dois dos índices padrão mais usados na ciência da computação e foram considerados os índices da comunidade de engenharia, que são: Índice de Citação em Ciências Expandido (SCI-E) e Índice de Citação em Ciências Sociais (SSCI). Do WoS e do Scopus, recuperamos várias tags, tais como: autor, título, resumo, país, registro de citação, afiliação de autores etc.

Figura 14 – Etapas da revisão de literatura



Fonte: Adaptado de Lacerda (2009).

Em relação a base Scopus foi utilizado os artigos da área “*Business Management and Accounting*” e na *Web of Science* as áreas “*business*”, “*Public Administration*” e “*management*”. Foram utilizadas as palavras chaves “*Electric Vehicles*”, “*renewable energy*”, “*energy management*”, “*environmental sustainability*” entre outras.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Para esta tese foi utilizado o método de dinâmica de sistemas através da modelagem computacional. Foi utilizado o conceito e etapas definidos por Stermann (2000). O objetivo da modelagem é encontrar políticas de gerenciamento e estruturas organizacionais que levem a um maior sucesso. Para isso a modelagem deve evidenciar as questões importantes para resolver problemas nos quais sua aplicação trará benefícios e auxiliará o processo decisório.

A modelagem não ocorre em um esplêndido isolamento, a mesma está incorporada em uma organização e contexto social. Seus clientes são pessoas que influenciam o processo decisório. Para ser eficaz, o processo de modelagem deverá focar nas necessidades dos clientes.

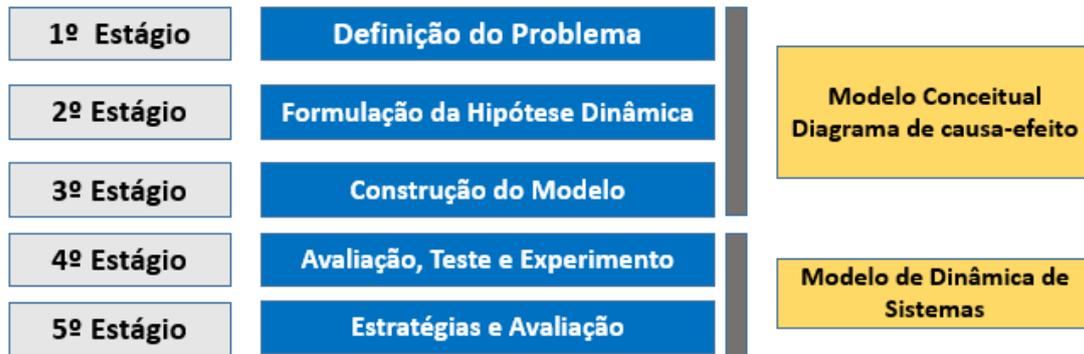
Quando aplicada tem o propósito de auxiliar o decisor e, não para o benefício do modelador. O contexto do decisor e o problema do mundo real determinam a natureza do modelo. O processo de modelagem deve ser consistente com as habilidades, capacidades e objetivos do cliente. O objetivo é ajudar os clientes a resolver seus problemas (STERMAN, 2000). Partindo desse pensamento, a seguir será detalhado as etapas do processo de modelagem utilizado nesse estudo

A utilização de Dinâmica de Sistemas auxilia o decisor a adotar e recomendar as soluções de políticas simuladas no(s) modelo(s) de dinâmica de sistemas (THOMPSON; HOWICK; BELTON, 2016). O modelo pode ser enriquecido pelo conhecimento local das partes interessadas e também desenvolverão uma compreensão detalhada de como o sistema funciona e evolui (SCOTT; CAVANA; CAMERON, 2016).

A dinâmica do sistema foi escolhida para modelar a dinâmica não linear dos processos críticos de feedback. O comportamento dinâmico do modelo poderá ser capturado através de diagramas de causa-consequência (SAHIN et al., 2019). O diagrama de causa-consequência facilita a identificação dos principais fatores das variáveis e suas correspondentes relações causais (LU et al., 2017). Para Navid, Ghaffarzaghan e Rahmanda (2020) a dinâmica de sistemas pode ser entendida como uma ferramenta para o pensamento sistêmico e é utilizada para investigar, analisar e prever o comportamento de um sistema e superar as complexidades na explicação de problemas e soluções.

A DS permite o decisor modelar detalhadamente as inter-relações entre diferentes fatores do sistema e fatores externos. Esse método se concentra no desenvolvimento de modelos qualitativos e quantitativos de situações complexas, além de estudar a dinamicidade no comportamento dos sistemas ao longo do tempo (JIAO et al, 2015). Sterman (2000) separa em cinco estágios a aplicação desta metodologia

Figura 15 – Estágios da metodologia da Dinâmica de Sistemas



Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

A primeira etapa consiste na identificação do problema, visa definir objetivamente o problema a ser resolvido e os objetivos do modelo. Os modelos de dinâmica de sistema envolvem resolver os problemas atualizando todas as variáveis com *feedback* positivo e negativo e atrasos de tempo que estruturam as interações e o controle em pequenos intervalos de tempo. O problema foi estruturado através de um diagrama de causa consequência, este diagrama é um mapa básico da estrutura do problema com todos os seus componentes e sua interação. Para Reddy et al (2019) este diagrama é usado para analisar o empirismo do modelo através de simulação computacional.

Para Kirkwood (2013) é necessário o desenvolvimento do diagrama de causa consequência para possibilitar ao modelador descrever com eficiência os elementos essenciais do sistema e as interações entre eles, integrando duas formas de feedback, ou seja, loops de feedback negativo (equilíbrio) e positivo (reforço). Para o desenvolvimento do diagrama, as variáveis a serem consideradas precisam ser identificadas. Uma vez que os modelos de DS são desenvolvidos para comparar sistemas fixos e dinâmicos, os modelos são restritos a visão simples do sistema inbreeding em uma instituição de ensino superior.

A segunda etapa, a formulação da hipótese dinâmica é importante para explicar a(s) causa(s) do problema. É necessário utilizar o diagrama de causa e consequência (loop causal), criado na etapa anterior. O Loop causal destaca as variáveis do sistema, ligações entre essas variáveis e polaridade associada a ligações causais para distinguir entre loops de feedback positivo e loops de feedback negativo (STERMAN, 2000). Lane, Munro e Husemann (2016) afirmam que para descrever a hipótese dinâmica é necessário realizar testes de avaliação do modelo, neste estudo este teste foi utilizado para verificar a aderência da hipótese dinâmica ao comportamento real do transporte urbano da cidade estudada.

A etapa de teste e verificação do modelo é necessária antes de usar o modelo para análise de cenário e tomada de decisão (STERMAN, 2000). A abordagem implementada para avaliar o modelo é composta por dimensões de tarefas de análise, calibração e verificação. Inicialmente, o dimensional a análise foi conduzida usando a função de verificação de unidade do software *Vensim*. A segunda etapa a de avaliação foi cumprida a partir da calibração do modelo, para Zare et al (2019) esta etapa se refere ao procedimento de comparar, ajustar e avaliar os resultados da modelagem para obter uma correspondência entre dados observados ou reais e comportamentos e estruturas simulados.

A terceira etapa avalia o horizonte de tempo de planejamento e aspectos de incerteza do modelo, os resultados da modelagem foram usados para estimar a precisão do desempenho do modelo. A quarta etapa consiste em garantir que o modelo seja adequado para a tarefa por meio da validação do modelo. Normalmente, esta etapa envolve uma série de testes para obter confiança no modelo com base na consistência interna e externa (MARTIS, 2006) e discussões com as partes interessadas envolvidas no processo de modelagem.

Para Ford (2019) a avaliação é a comparação dos resultados alcançados pelo estudo através da concordância do modelo com o sistema real. Para Darabi e Hosseinichimeh (2020) a avaliação tem o intuito de confirmar ou não que a modelagem simulada foi capaz de replicar o comportamento de uma ação real, conferindo assim credibilidade no uso do modelo para simular políticas, contribuir para as tomadas de decisões, sempre no caminho da melhoria do sistema. O processo de avaliação por meio das simulações estimulou a evolução crescente das análises, permitindo a percepção de questões que não seriam observadas de outra forma. Após a conclusão da avaliação do modelo, os níveis de confiança sobre o modelo aumentam, possibilitando assim a avaliação dos resultados obtidos e a escolha do melhor cenário para determinada estratégia a ser aplicada.

A quinta etapa consiste em relacionar a formulação de estratégias potenciais e à avaliação dos resultados simulados. Requer a identificação de cenários, ou seja, estratégias alternativas, e a análise e discussão dos resultados simulados gerados pelo modelo para cada cenário ao longo do tempo (BERARD, 2010). O processo de desenvolvimento de modelo entre especialistas e partes interessadas por meio de cinco estágios permite a melhoria do desempenho do modelo DS. Assim, o modelo de simulação visa comparar diferentes cenários de ações “fictícias”, prever os comportamentos futuros do sistema em consideração e fazer recomendações (STERMAN, 2000).

3.2.1 Formulação da hipótese dinâmica

Uma vez que o problema tenha sido identificado e caracterizado em um horizonte temporal apropriado, foi desenvolvida a hipótese dinâmica com o intuito de, explicar o comportamento problemático. A hipótese é dinâmica porque deve fornecer uma explicação da dinâmica que caracteriza o problema em termos de *feedback* subjacente e estrutura de estoque e fluxo do modelo. É uma hipótese porque é sempre provisória, sujeita a revisão ou abandono à medida que se altera o processo de modelagem com o mundo real.

Uma hipótese dinâmica é uma teoria operacional de como o problema surgiu. Ela serviu para orientar os esforços de modelagem. Grande parte do processo de modelagem ajuda a testar a hipótese dinâmica, tanto com o modelo de simulação quanto por experimentos e coleta de dados no mundo real. Com isso desenvolveu-se a seguinte hipótese dinâmica: “*A inserção de veículos elétricos reduzirá emissões de gases oriundos do setor de transporte assim como a redução de custos relativos à compra de combustível*”

3.2.2 Modelo de simulação e análise dos resultados

Como o processo de modelagem é algo complexo, interativo e gradual, à medida que se inicia um modelo de dinâmica de sistemas, novos elementos podem ser inseridos ou retirados, permitindo que relações sejam estabelecidas e descobertas ao longo da modelagem, fazendo com que o modelo evolua. Não é possível atingir um modelo perfeito, pois se assim fosse, seriam altamente complexos, o que os aproximariam demasiadamente do caso real de tal forma que os tornariam inúteis. Sendo assim, buscou-se manter iterações que representassem o caso real, mas que ao mesmo tempo fossem simples e com qualidade suficiente para atingir resultados positivos que pudessem ser analisados e comparados com dados históricos para avaliação do entendimento.

O modelo DS foi desenvolvido com base nas interações entre lógicas matemáticas e dados atuais sobre o transporte urbano municipal. As dimensões foram determinadas de acordo com as equações matemáticas fornecidas. Previamente a construção do modelo computacional, foi desenvolvido os diagramas de causa e consequência ou diagramas de loop causal. Eles foram utilizados para modelar os comportamentos complexos e dinâmicos, incluindo atrasos, não linearidades e feedback de diferentes variáveis transdisciplinares. Após finalizado a construção do(a) diagrama(s) desenvolve-se o modelo de dinâmica de sistemas. Foram utilizadas variáveis baseadas na lógica de estoque e fluxo. Os estoques, também conhecidos como níveis, devem

gerar comportamento por meio de fluxos ou taxas vinculadas a estoques que causam variações nos estoques. As variáveis de estoque mostram a condição do sistema em todos os momentos. As variáveis de fluxo refletem os fluxos (ou seja, taxa de saída, taxa de envio, taxa de pedido e taxa de atendimento de pedido) ou taxa de câmbio que decide as variações de estoque.

Para realizar a análise dos resultados da simulação computacional, será utilizado o software Vensim. O software fornece um recurso de cálculo dimensional robusto ajudou a verificar a precisão dimensional do modelo, registrando suas medições conceituais como cálculos realizados. O Vensim possui as características de melhorar os sistemas reais, sendo muito utilizado para desenvolver e analisar modelos de dinâmica de sistemas. Através das ferramentas e suas extensões, apresenta para o usuário uma análise de alta qualidade, com dimensões que absorvem e checam a realidade. Podem-se interligar diferentes variáveis, atribuindo diferentes pesos além de fornecer ao usuário um ambiente para criação de modelos flexíveis. Outro benefício do software é ser gratuito, podendo ser utilizado em salas de aula ou em outros ambientes educacionais.

3.3 PROJEÇÃO DE CENÁRIOS

O Planejamento por Cenários promove a aprendizagem e o desafio aos modelos mentais por meio da visualização de futuros possíveis. Para construir cenários devemos, primeiramente, definir a decisão central a ser tomado, o problema ou situação de interesse a ser avaliada. Depois, devemos identificar as principais forças motrizes, as quais, segundo Schwartz (2009), são aquelas forças que atuam estruturalmente na realidade e que são importantes para (e impactam sobre) as nossas decisões e seus desdobramentos no futuro. As forças motrizes são de dois tipos:

- (1) *elementos predeterminados* (ou tendências), que são forças sobre as quais, do ponto de vista estrutural, tem-se uma visão muito clara de como elas se desdobrarão no futuro; e,
- (2) *incertezas críticas*, que são forças para as quais não temos uma ideia muito clara sobre seus desdobramentos no futuro.

O planejamento por cenários apresenta-se como uma ferramenta que possibilitará avaliar alternativas futuras relacionadas aos veículos elétricos. Para Marcial e Grumbach (2020), os cenários propiciam um ambiente que enriquece o debate sobre questões críticas

relacionadas ao futuro do transporte e permitem que a população tome decisões de risco com mais clareza. Permitem, ainda, a identificação de alternativas para políticas públicas relacionadas ao tema ambiental, promovendo o desenvolvimento e a análise de novas opções perante as mudanças no setor energético e de transporte.

Para Andrade (2006) sob a perspectiva sistêmica, as forças motrizes são as representadas pelos múltiplos enlaces de reforço e balanceadores de um mapa sistêmico da realidade atual. Enlaces são forças motrizes porque estão sistemicamente estruturados. Pode-se então afirmar que esses enlaces são os elementos que predeterminamos, porque esta estrutura geraria certo padrão de comportamento se modelada e simulada em um *software* de dinâmica de sistemas. Se tivermos uma variável incerta, o padrão de comportamento é incerto. Nesse caso, essa variável ou o conjunto de relações de causa e efeito as quais ela pertence seria uma incerteza crítica. Teríamos assim vários cenários de ação de desdobramento (ANDRADE, 2006).

É relevante admitir que um modelo da realidade atual nunca contém todos os potenciais fatores e enlaces possíveis. Por isso, a construção dos cenários passa por listar novas forças motrizes e classificá-las em elementos predeterminados e incertezas críticas, dentro do horizonte de tempo definido. Neste estudo foi utilizado as etapas destacadas por Andrade (2006), para o autor a projeção de cenários sistêmicos obedece aos seguintes passos:

- 1. Identificar a questão ou decisão central:** Estabelece-se a decisão ou o foco interno de interesse. O processo é realizado de "dentro para fora", a partir de uma demanda da própria organização.
- 2. Identificar os fatores-chave no ambiente local:** Listam-se os fatores-chave ou os indicadores que indiquem o sucesso ou fracasso da decisão.
- 3. Avaliar o estado atual por meio do Pensamento Sistêmico:** Buscar em referências bibliográficas o estado atual do problema a ser estudado.
- 4. Identificar as forças motrizes fundamentais no ambiente local e global e o inter-relacionamento sistêmico dessas forças:** Listam-se as forças motrizes capazes de influenciar os fatores-chaves. Alguns terão uma tendência predeterminada, outras incertezas críticas. Esse processo de indicação leva à construção de panoramas relevantes de análise, bem como à identificação dos sinais sistêmicos de tendências predeterminadas ou de incertezas críticas.
- 5. Hierarquizar por grau de importância e incerteza:** O objetivo desta etapa é hierarquizar as forças motrizes de modo a identificar os dois ou três fatores mais importantes e incertos.

6. **Selecionar e presenciar as lógicas dos cenários:** A definição das forças motrizes principais transforma essas em eixos com valores-limite que, uma vez cruzados, geram um pequeno número de possíveis cenários. Esses cenários estarão representados em um espectro (um eixo), uma matriz (dois eixos) ou em um cubo (três eixos). Em cada célula um enredo será desenvolvido, que caracteriza "de que mundo trata um cenário como esse".
7. **Encorpar os cenários:** Identificar o que ocorre com os fatores-chave e com as forças motrizes em cada um dos cenários
8. **Selecionar indicadores e sinalizados de cenários:** Estabelecer graus de probabilidade para ocorrência dos diferentes cenários e definir quais indicadores ou sinalizadores mostrará de maneira mais eficaz o curso da história, para que decisões rápidas e efetivas sejam tomadas.
9. **Construir modelos computacionais e experienciar os cenários:** Englobar todo o conhecimento adquirido nas etapas anteriores e migrar para um modelo computacional, onde seja representada a realidade a ser vivida.
10. **Promover a visão do futuro:** Projetar a solução em um horizonte de tempo a ser definido pelo modulador.
11. **Determinar implicações, construir estratégias e decidir ações do presente:** Com aplicação de tal método, o produto principal será o ganho de aprendizagem fundamental para necessidades como tomada de decisões estratégicas.

Neste estudo foram desenvolvidos cinco subcapítulos de análise. Cada subcapítulo possui cenários projetados para determinada simulação. Inicialmente o subcapítulo 5.1 analisou a inserção de carros elétricos, para isso foi gerado os seguintes cenários:

- Cenário CEV0, este cenário representará o comportamento atual dos carros emplacados pelo DENATRAN, no caso menos de um por cento dos carros totais são elétricos. Para inserir e possibilitar a análise do comportamento da inserção dos carros elétricos foram gerados dois cenários.
- O cenário CEV10 irá inserir dez por cento de carros elétricos nos sessenta meses, o comportamento é baseado na compra dos carros por categoria, o objetivo é inserir o comportamento equivalente de consumo de veículos da população estudada. O cenário mais otimista, que insere vinte por cento de carros elétricos foi gerado com a mesma proposta, buscando trazer ao modelo, equivalência do comportamento

real, apresentando maior validade para os resultados da simulação de dinâmica de sistemas.

Em relação ao subcapítulo 5.2, foi projetado cenários de inserção de ônibus elétricos no sistema de transporte urbano de uma cidade da região sul do país. Os cenários deste capítulo são os seguintes:

- Cenário Atual: Responsável por inserir no modelo computacional o comportamento atual do transporte urbano da cidade estudada sem o uso de ônibus elétricos;
- Cenário Híbrido02: Primeira proposta do estudo, neste cenário analisa a inserção de ônibus elétricos com baterias com capacidade de suprir até 30 por cento da energia total do motor;
- Cenário Híbrido: Desenvolvido para verificar o impacto da inserção de ônibus elétricos com baterias capazes de suprir 50 por cento da energia total do motor;
- Cenário Puro: Cenário que irá verificar a inserção de ônibus puramente elétricos

O subcapítulo 5.3 simulou a inserção de motos elétricas na entrega de produtos alimentícios via delivery, para isso gerou-se os seguintes cenários:

- Cenário Atual: Responsável por inserir no modelo computacional o comportamento atual das entregas oriundas das plataformas de pedidos online;
- Cenário ME01: Primeira proposta do estudo, neste cenário analisa a inserção de motos elétricas com capacidade de suprir até 30 por cento da energia total do motor;
- Cenário ME02: Segunda proposta do estudo, neste cenário analisa a inserção de motos elétricas com capacidade de suprir até 50 por cento da energia total do motor;
- Cenário ME03: Terceira proposta do estudo, neste cenário analisa a inserção de motos elétricas com capacidade de suprir até 80 por cento da energia total do motor;

O subcapítulo 5.5 simulou a inserção de carros no cotiado de qualquer pessoa, neste capítulo simulou-se a ideia dos cidadãos possuírem seu carro elétrico/moto elétrica em sua residência, verificando os impactos deste caso estudo, os cenários estudos são:

- Cenário Proposta 01: Simulou a venda de energia com os seguintes parâmetros, Venda demanda baixa 20%, Venda demanda media 20% e Venda Pico 60%;
- Cenário Proposta 02: Simulou a venda de energia com os seguintes parâmetros, Venda demanda baixa 10%, Venda demanda media 10% e Venda Pico 80%;

- Cenário Proposta 03: Simulou a venda de energia com os seguintes parâmetros, Venda demanda baixa 0%, Venda demanda media 0% e Venda Pico 100%.

A seguir será apresentado como foi realizada a análise dos dados.

4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o desenvolvimento dos modelos computacionais que serão simulados no capítulo a seguir. O capítulo está dividido em: a) desenvolvimento do modelo de inserção de carros elétricos; b) desenvolvimento do modelo de inserção de ônibus elétricos; c) desenvolvimento do modelo de inserção de motos elétricas; d) desenvolvimento do modelo de geração de energia sustentável e desenvolvimento do modelo de casas inteligentes com veículos elétricos.

4.1 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE INSERÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS

O crescimento no interesse relacionado ao transporte elétrico fica evidenciado, seja no setor privado ou público (CAMPATELLI et al, 2014). Segundo o Ipea (2016), cerca de 85% da população brasileira vive em centros urbanos, sendo que somente 36 cidades possuem mais de meio milhão de habitantes, além de 40 regiões metropolitanas consolidadas, nas quais vivem mais de 80 milhões de pessoas. Dado este cenário de rápida urbanização e metropolização, a pressão sobre as infraestruturas urbanas é cada vez maior (CICIOLA et al, 2016). Portanto, deverão passar por consideráveis transformações para criarem condições de vida sustentáveis para seus habitantes.

Rogge, Wollny e Sauer (2015) afirmam que com a evolução tecnológica constante tornou viável a tecnologia dos carros elétricos puros, sendo considerada uma das mais indicadas quando se refere ao transporte elétrico devido a sua versatilidade e adaptabilidade as vias existentes. Sebastini (2014) acrescenta que tem crescido o número de fábricas especializadas na fabricação de veículos elétricos em larga escala. Porém, como cada região possui determinada tecnologia, necessita-se de fábricas para realizar as adaptações da tecnologia local.

O total de energia interna disponibilizada no Brasil cresceu 1,4% atingindo 294 Mtep. O aumento está associado ao avanço da oferta de energia renovável, tais como a eólica e a solar. A oferta de energia elétrica avançou 2,3% alcançando o valor de 14,9 TWh (BEN, 2021, p. 7). A Tabela 6 apresenta o comparativo de oferta de energia dos dois últimos anos.

Tabela 6 – Oferta de Energia

Valores em Mtep	2018	2019
Oferta interna de energia	289,9	294
Consumo Final	257,4	259,4
Perdas	32,4	34,6
Perdas (%)	11,2%	11,8%

Fonte: Adaptado de BEN (p.7, 2021).

No Brasil, são utilizados diferentes modos de geração de energia. A repartição interna de energia está exposta na Tabela 7. O modo que lidera o ranking é a baseada em petróleo e derivados. Entre os três primeiros tipos de geração, estão dois modos renováveis (Biomassa da cana e hidráulica).

Tabela 7 – Oferta de Energia

Tipo de geração	Repartição (%)	Tipo
Petróleo e derivados	34,4	Não renovável
Biomassa da cana	18	Renovável
Hidráulica	12,4	Renovável
Gás Natural	12,2	Não renovável
Lenha e Carvão Vegetal	8,7	Renovável
Outras Renováveis	7	Renovável
Carvão Mineral	5,3	Não renovável
Urânio	1,4	Não renovável
Outras não Renováveis	0,6	Não renovável

Fonte: Adaptado de BEN (p.20, 2020).

O consumo final no Brasil em 2019 apresentou uma queda de 0,8% quando comparado ao ano de 2018. A partir do Balanço Energético Nacional, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), pode-se observar, na Tabela 3, a matriz do consumo de energia por fonte, o ano base é o de 2019. O óleo diesel no ano de 2018 foi o principal combustível consumido, representando 17,2% do total de energia consumida, porém teve uma queda na participação da matriz/no total de 0,4% no ano de 2019, perdendo o primeiro posto para a eletricidade, que no ano de 2019 representou 18,1% do consumo energético. Environmental Protection Agency (EPA, 2016) destacam que o diesel é o combustível capaz de provocar níveis de poluição mais elevados, caracterizando-se como danoso ao meio ambiente. Os principais consumos de energia por fonte estão expostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Consumo de energia por fonte

	2018	2019
Óleo Diesel	17,2%	16,8%
Eletricidade	16,6%	18,1%
Bagaço da Cana	12,5%	12,9%
Lenha	7,1%	6,9%
Gás Natural	7,0%	6,9%
Gasolina	7,3%	6,9%
Etanol	5,2%	7,0%

Fonte: Adaptado de BEN (p.22, 2020).

O aumento da produção de etanol de 5,2% para 7,0% em 2019 está associado a política de preço final na bomba da gasolina (EPE, 2020). A gasolina reduziu sua participação em 0,4% do total. De acordo com a EPE (2020), a redução do consumo de gasolina deve-se à queda da atividade econômica brasileira e o aumento do consumo de etanol se justificou por preços mais competitivos deste combustível.

Em relação à distribuição/divisão do consumo de energia por atividade, na Tabela 9 podem ser observados os setores responsáveis pelo maior consumo de energia no Brasil. O setor de transporte consome 32,7% da energia gerada no país, seguido pelo setor industrial, representando 30,4%. É o segundo ano consecutivo que o setor de transportes supera a indústria em consumo de energia, somando esses dois setores respondem por aproximadamente 63% do consumo de energia do país.

Tabela 9 – Uso de energia por setor

Setor	Quantidade(Mtep)	%
Transporte	82,88	32,7
Indústria	77,70	30,4
Setor Energético	28,49	11,2
Residências	25,90	10,3
Uso não energético	14,24	5,5
Serviços	13,21	5,1
Agropecuária	12,69	4,9

Fonte: Adaptado de BEN (p.25, 2020).

Quando comparado ao ano de 2018, o setor que mais variou no consumo de energia foi o setor de serviços, com +3,4%, seguido do setor de transportes (+3,3%) e agropecuário (+2,8%). Quem reduziu seu consumo foi o setor de indústrias (-2,7%). Tendo sido feita essa breve contextualização do consumo energético no Brasil, a próxima seção apresentará o desenvolvimento dos modelos de inserção de carros elétricos.

Com o crescimento econômico e a urbanização, o setor de transporte tornou-se uma importante força motriz para as emissões de CO₂ (XIAO et al, 2017). O setor é responsável por uma proporção significativa das emissões totais – de 32,9% nos Estados Unidos, 17,7% no Japão e 8,6% na China em 2012 (IEA, 2020). No Brasil, no ano de 2019, o setor de transportes emitiu cerca de 196 Mt de CO₂, um aumento de um por cento se comparado ao ano anterior (SEEG, 2020).

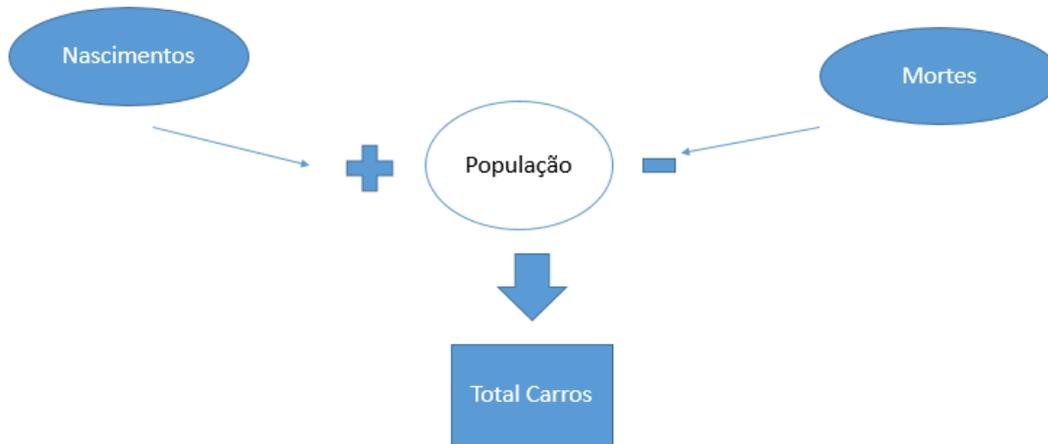
Isto se deve a utilização de uma malha de transportes composta em sua maioria por veículos movidos com motores a combustão. Mais especificamente, no setor de transportes de passageiros, segundo o relatório elaborado pela Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) têm-se, no ano de 2016, do total de viagens efetuadas pela população, 29% foram realizadas através do setor de transporte público, das quais, 20% utilizaram ônibus municipais como meio de transporte (ANTP, 2018).

A emissão de CO₂ é originada pela queima de combustíveis fósseis (MISKOLCZI et al, 2021). Várias estratégias e instrumentos para redução da emissão de carbono são projetados e implementados em ônibus, com o propósito de mitigar as emissões de CO₂ do transporte urbano, como por exemplos motores movidos a eletricidade (LONAN; ARDI, 2020; NEMOTO et al.,2021; ZHANG et al, 2021; JUVVALA; SARMAH, 2021; HU et al, 2021).

Para Lima et al (2019), a associação da utilização do transporte coletivo com a substituição de combustíveis fósseis pela eletricidade é uma das alternativas que se apresenta como a mais promissora. Petzhold (2013) afirma que a utilização desses veículos reduz o impacto ambiental causado pelos modais à combustão interna, já que o modal elétrico praticamente não emite poluentes (PETZHOLD, 2013). A eletrificação do transporte urbano é utilizada há décadas, porém as tecnologias usadas atualmente acrescentam novas características ao modal (GHORBANZADEH et al, 2018).

Os modelos desenvolvidos poderão ser aplicados a qualquer cidade do Brasil. Sabendo-se que existe diferença de comportamento de compra de carros em cidades capitais e não capitais (SILVESTRE, 2021), optou-se por desenvolver duas lógicas de modelagem. A primeira lógica é aplicada a cidades capitais, enquanto a segunda lógica para cidades não capitais. Para simular o comportamento de compra da população foi necessário desenvolver o Diagrama de causa de consequência apresentado na Figura 17, onde as principais variáveis foram mapeadas.

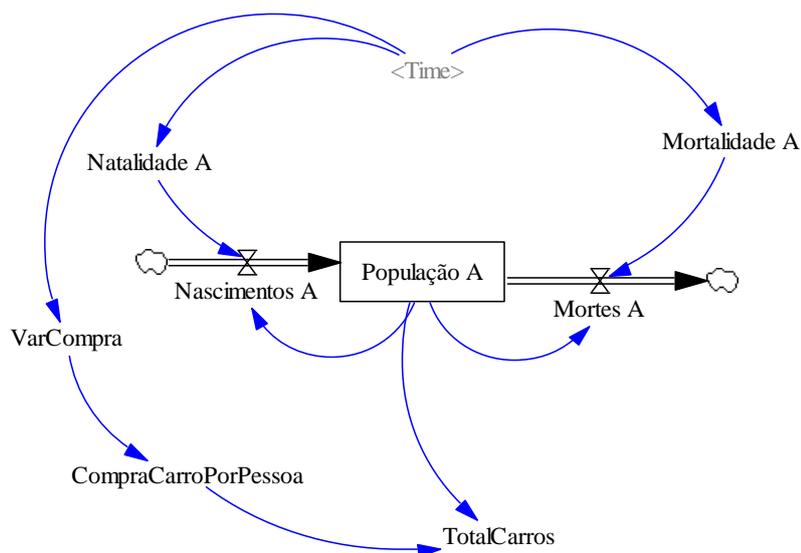
Figura 16 – Diagrama de Causa e Consequência da População



Fonte: Autor (2022).

Com o diagrama construído desenvolveu-se o modelo apresentado na Figura 18. Ele é um modelo baseado na lógica de estoque e fluxo, onde é possível prever o crescimento populacional de qualquer região brasileira.

Figura 17 – Comportamento de compra carros



Fonte: Autor (2022).

*Desenvolvido no software VENSIM-PLE

A variável de estoque chamada “*População A*” recebe valor pela interação entre os fluxos “*Nascimentos A*” e “*Mortes A*”. Por sua vez os fluxos são alimentados pelas informações vindas das variáveis auxiliares “*Natalidade A*” e “*Mortalidade A*”, que são as taxas de natalidade e mortalidade estipuladas pelo IBGE. Calculada a população da região simulada, gerou-se a variável para armazenar a quantidade total de carros emplacados. Essa variável é chamada de “*TotalCarros*”. A interação da variação de compra mensal com a compra por pessoa resulta na soma total de carros usados na simulação. As equações desenvolvidas nesse modelo estão expostas no Quadro 5.

Quadro 3 – Equações modelo comportamento compra carro

1. Natalidade A = $([(0,0)-(60,10)],(0,0.001069),(11,0.001),(12,0.000988),(24,0.00098),(25,0.000973),(35,0.00096),(36,0.000958),(47,0.00095),(48,0.000948),(60,0.000944))$
2. Mortalidade A = $([(0,0)-(60,10)],(0,0.000621),(11,0.000627),(12,0.000628),(24,0.000638),(25,0.000639),(35,0.000647),(36,0.000648),(47,0.000656),(48,0.000658),(60,0.000663))$
3. Nascimentos A = População A*Natalidade A
4. Mortes A = População A*Mortalidade A
5. População A = Nascimentos A-Mortes A ; Initial Value = 283677
6. VarCompra = 0.00125% ao mês
7. CompraCarroPorPessoa = $0.25 + (VarCompra*0.25)$
8. TotalCarros = População A*CompraCarroPorPessoa

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Para analisar o comportamento do crescimento populacional da região, é necessário compreender a quantidade de nascimento e de mortes anuais. Para amparar os dados inseridos nestas duas taxas, foi utilizada a plataforma de projeções do IBGE. As projeções das taxas que envolvem o tamanho da População do Brasil e das Unidades da Federação são elaboradas com base nas informações sobre as componentes da dinâmica demográfica oriundas dos censos demográficos, das pesquisas domiciliares por amostragem e dos registros administrativos de nascimentos e óbitos investigados pelo IBGE. Os valores da projeção das taxas que influenciam os habitantes e também nas variáveis do modelo citado anteriormente estão expostos na Tabela 10.

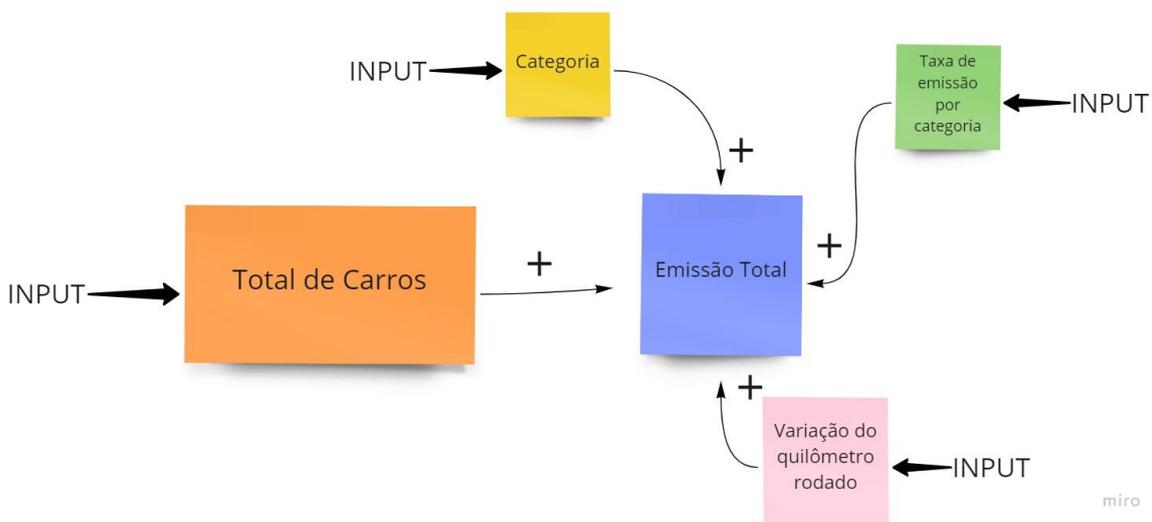
Tabela 10 – Dados modelo comportamento compra

Variável	0-11	12-24	25-37	38-49	50-60
Natalidade	0,001069	0,00988	0,00973	0,00958	0,0094
Mortalidade	0,000621	0,000628	0,000638	0,000647	0,000656
Var Compra	0,00125% ao mês				
CompraPorPessoa	Aumento de 0,021% ao mês				

Fonte: Adaptado de DENATRAN (2021), IBGE (2022) e INMETRO (2022).

Em relação ao impacto ambiental, os fatores de emissão devem ser calculados de forma a avaliar o nível de emissões de CO₂. O fator de emissão de cada veículo é calculado a partir da quilometragem feita por cada carro. Para entender a lógica da emissão veicular, foi necessário desenvolver um diagrama de causa e consequência que está exposto na Figura 19.

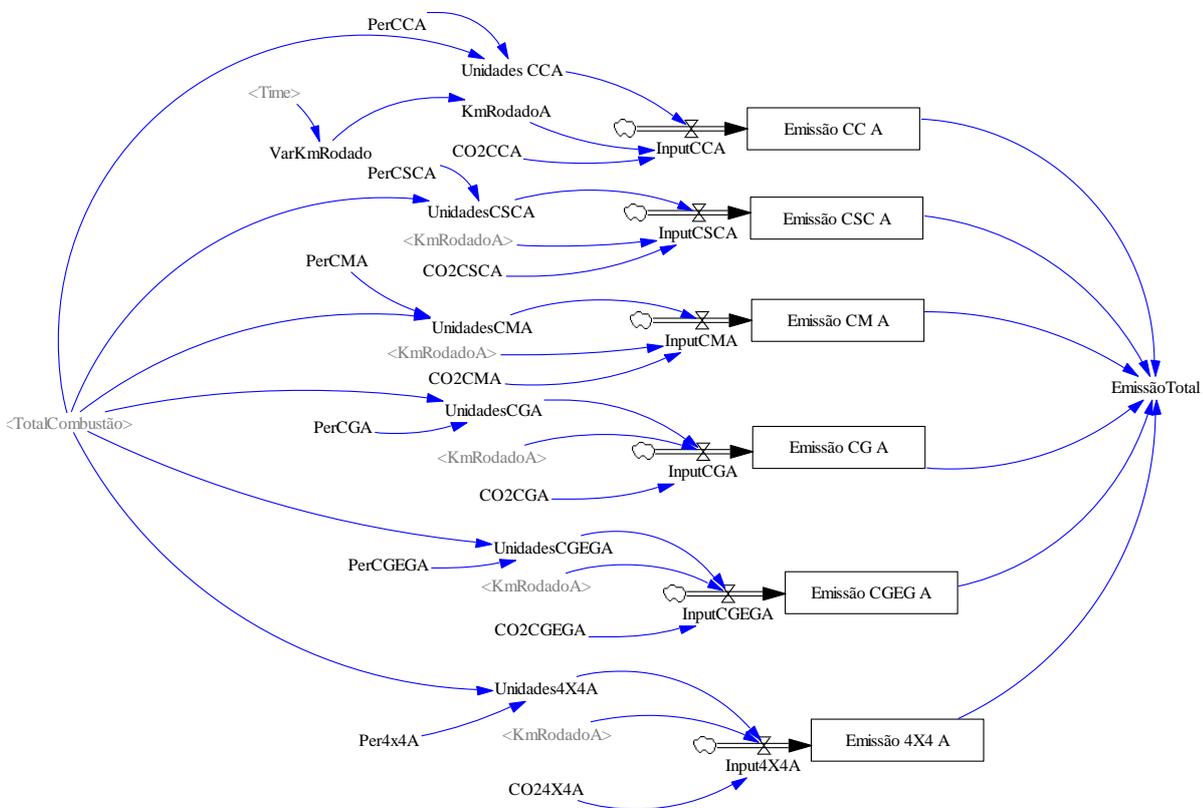
Figura 18 – Diagrama de Causa e Consequência CO₂



Fonte: Autor (2022).

A Figura 20 apresenta o modelo que será utilizado para simular a inserção de carros elétricos. O modelo desenvolvido é baseado na lógica de estoque e fluxo e possui valores de entrada do modelo anteriormente apresentado. Para isso, foi usada a variável do tipo *shadow* “**TotalCombustão**”, que passou ao modelo o valor de carros a combustão interna. O modelo ambiental possui 6 submodelos de estoque e cada submodelo apresenta o acúmulo de emissão por categoria. O acúmulo de emissão das categorias é somado na variável chamada “**EmissãoTotal**”. Os dados usados nas variáveis serão expostos a seguir.

Figura 19 – Emissão CO2 CE



Fonte: Autor (2022).

*Desenvolvido no software VENSIM-PLE

Para o desenvolvimento do modelo computacional que simulará o consumo dos carros, foram utilizados dados do Anuário Estatístico de Transportes versão 2010-2020, Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG).

Os dados das emissões relativos ao setor de transporte foram apresentados no começo deste capítulo. Os dados também foram utilizados para quantificar as variáveis do modelo. Em relação aos carros utilizados inicialmente, foram separados por categorias definidas nas tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) disponibilizado no site do INMETRO (2021). Dentre as categorias existem diversos modelos, por exemplo, a categoria com maior diversidade de modelos é a dos veículos 4x4, com tração nas quatro rodas, seguida dos veículos médios.

As equações do modelo ambiental estão expostas no Quadro 6.

Quadro 4 – Equações modelo emissões

1. Emissão CC A = InputCCA ; Initial Value = 0
2. InputCCA = (Unidades CCA*KmRodadoA)*CO2CCA
3. PerCCA = 0.3
4. Unidades CCA = TotalCarros*PerCCA
5. CO2CCA = 0.104 t/km
6. Emissão CSC A = InputCSCA ; Initial Value = 0
7. InputCSCA = (UnidadesCSCA*KmRodadoA)*CO2CSCA
8. UnidadesCSCA = TotalCarros*PerCSCA
9. PerCSCA = 0.25
10. CO2CSA = 0.096 t/km
11. Emissão CSC A = InputCMA ; Initial Value = 0
12. InputCMA = (UnidadesCMA*KmRodadoA)*CO2CMA
13. UnidadesCMA = TotalCarros*PerCMA
14. PerCSCA = 0.12
15. CO2CCA = 0.108 t/km
16. Emissão CG A = InputCGA ; Initial Value = 0
17. InputCGA = (UnidadesCGA*KmRodadoA)*CO2CGA
18. UnidadesCGA = TotalCarros*PerCGA
19. PerCGA = 0.10
20. CO2CCA = 0.127 t/km
21. Emissão CGEG A = InputCGEGA ; Initial Value = 0
22. InputCGEGA = (UnidadesCGEGA*KmRodadoA)*CO2CGEGA
23. UnidadesCGEGA = TotalCarros*PerCGEGA
24. PerCGEGA = 0.5
25. CO2GEGA = 0.149 t/km
26. Emissão CGEG A = InputC4X4A ; Initial Value = 0
27. InputC4X4A = (Unidades4X4A*KmRodadoA)*CO24X4A
28. Unidades4X4A = TotalCarros*Per4X4A
29. Per4X4A = 0.18
30. CO24X4A = 0.175 t/km

Fonte: Autor (2022).

Na Tabela 11 estão descritos as categorias utilizadas e os dados que foram utilizados para quantificar o modelo. Percebe-se que a categoria que mais emite gás carbônico é a “4x4” sendo que com menor impacto ao meio ambiente está a categoria “subcompacto”.

Tabela 11 – Dados Veículos

Categoria	Qt	CO2 G/D	Km/l C_E	Km/l C_GD
Compacto	73	104 g/km	8,7	12,7
SubCompacto	21	96 g/km	9,2	13,1
Médio	91	108 g/km	7,9	12,4
Grande	61	127 g/km	7,5	8,8
Extra Grande	88	149 g/km	6,7	8,9
4x4	129	175 g/km	11	15,4

Fonte: Adaptado de DENATRAN (2020) e INMETRO (2020).

Para buscar compreender o comportamento das cidades no Brasil, foi utilizado como modelo a capital do Rio Grande do Sul, que possui 1,409 milhões de habitantes e a cidade de Santa Maria que é habitada por 277.309 habitantes (IBGE, 2020). A idéia de utilizar essas duas cidades distintas é buscar compreender o comportamento do tráfego urbano de uma grande cidade ou capital e também de uma cidade comum brasileira. A Tabela 12 apresenta os dados dos veículos das duas cidades.

Tabela 12 – Dados Veículos

TIPO	PORTO ALEGRE	SANTA MARIA
Automóvel	628422	112983
Caminhão	16838	2012
Camionete	45678	14623
Camioneta	56858	8099
Moto	99061	27910
Motoneta	12015	5664
Total	890467	171426

Fonte: DENATRAN (2022).

No estudo foram utilizados apenas os carros. A tabela 8 representa a quantidade por categoria de cada cidade. Para executar a divisão por categoria, foi utilizado dados do DENATRAN (2022) e INMETRO (2020). Cada categoria recebeu um peso (em percentual) conforme o registro de veículos nas bases do governo. Os dados são proximidades já que para saber o valor exato seria necessário ter acesso ao emplacamento de todos os veículos das cidades estudadas, porém esse dado ainda não está disponível para livre acesso.

Tabela 13 – Dados Veículos

Categoria	SANTA MARIA	PORTO ALEGRE
Compacto	28835	170470
SubCompacto	7208	42617
Médio	42223	249617
Grande	24715	146117
Extra Grande	13703	46678
4x4	55828	7669

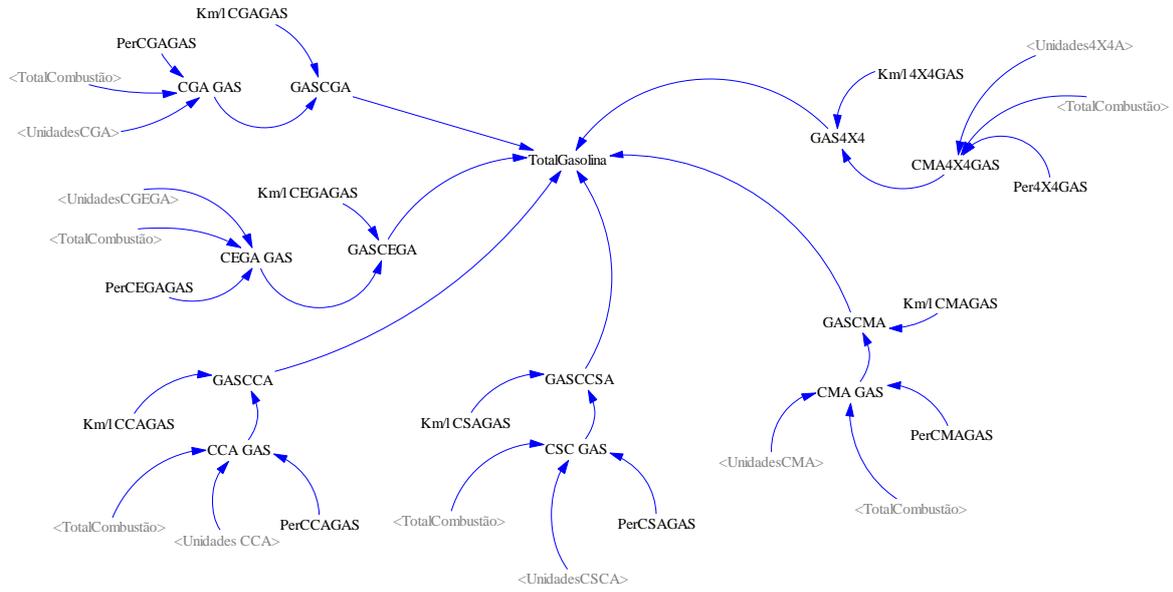
Fonte: Adaptado de DENATRAN (2022) e INMETRO (2022).

O valor utilizado para a quilometragem percorrida anualmente foi baseado no relatório divulgado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2022), que indica que um veículo na cidade de São Paulo roda, em média, 15 mil km por ano. Para a simulação, definiu-se o valor total da cidade de São Paulo para Porto Alegre e 50% desse valor para a cidade de Santa Maria. Os valores referentes a quilometragem média poderão ser alterados caso seja publicado um estudo mais preciso sobre mobilidade urbana nas cidades.

Em relação ao modelo financeiro, inicialmente mapeou-se os combustíveis utilizados pelos carros selecionados na simulação. Foi constatado que três tipos de combustível abastecem os carros: a gasolina, etanol e o diesel.

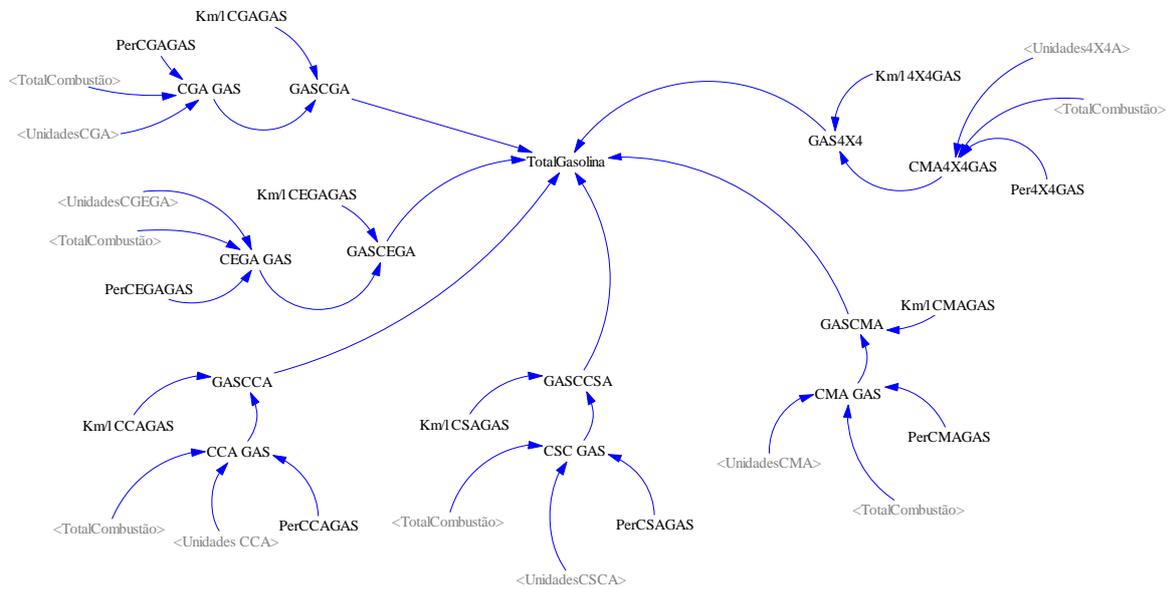
A Figura 21, 22 e 23 apresentam os submodelos de consumo, o modelo é baseado na interação entre variáveis *shadow* e auxiliares. As variáveis “**TotalGasolina**”, “**TotalEtanol**” e “**TotalDiesel**” armazenam a quantidade de combustível usado mensalmente. Cada submodelo apresentam o consumo de combustível por cada categoria. As variáveis com o prefixo “**PER**” armazenam o percentual de carros do respectivo combustível. Por exemplo: a variável “**PerCGAGAS**” informa o percentual de carros grandes a gasolina. O prefixo “**Km/l**” armazenam o consumo por quilometro de cada tipo de categoria. Esses dados foram coletados diretamente da base da ANFAVEA e INMETRO. Foram usadas as variáveis *shadow* “**TotalCombustão**” e “**UnidadesXX**”, já apresentados neste estudo.

Figura 20 – Consumo carros a gasolina



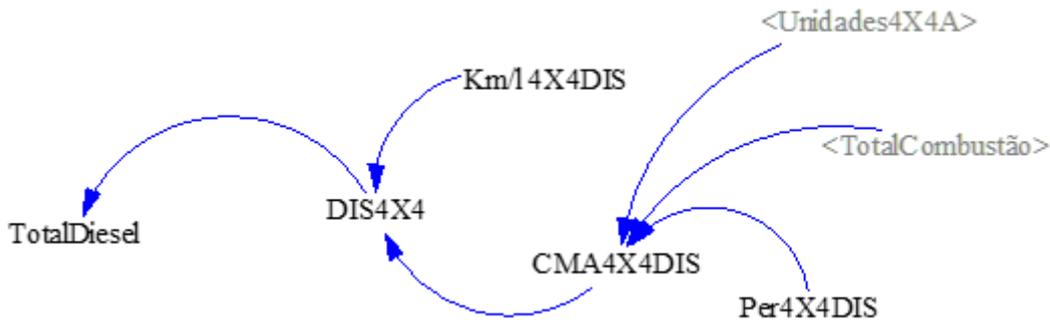
Fonte: Autor (2022)
 *Desenvolvido no software VENSIM-PLE

Figura 21 – Consumo carros a etanol



Fonte: Autor (2022)
 *Desenvolvido no software VENSIM-PLE

Figura 22 – Consumo carros a diesel



Fonte: Autor (2022)

*Desenvolvido no *software* VENSIM-PLE

As equações desenvolvidas para este submodelo estão expostas no Quadro 7.

Quadro 5 – Equações modelo comportamento compra carro

1. TotalGasolina = GAS4X4+GASCCA+GASCCSA+GASCEGA+GASCGA+GASCMA
2. GASCCA = CCA GAS*"Km/l CCAGAS"
3. CCA GAS = (TotalCombustão*PerCCAGAS)*Unidades CCA
4. GASCCSA = CSCA GAS*"Km/l CSCAGAS"
5. CSCA GAS = (TotalCombustão*PerCSCAGAS)*Unidades CSCA
6. GASCMA = CMA GAS*"Km/l CMAGAS"
7. CMA GAS = (TotalCombustão*PerCMAGAS)*Unidades CMA
8. GASCGA = CGA GAS*"Km/l CGAGAS"
9. CGA GAS = (TotalCombustão*PerCGAGAS)*Unidades CGA
10. GASCEGA = CCA GAS*"Km/l CEGAGAS"
11. CEGA GAS = (TotalCombustão*PerCEGAGAS)*Unidades CEGA
12. GAS4X4 = 4X4A GAS*"Km/l 4X4GAS"
13. 4X4 GAS = (TotalCombustão*Per4X4GAS)*Unidades 4X4
14. GASCCA = CCA GAS*"Km/l CCAGAS"
15. CCA GAS = (TotalCombustão*PerCCAGAS)*Unidades CCA
16. TotalEtanol = ETA4X4+ ETA CCA+ ETACCSA+ ETACEGA+ ETACGA+ ETA CMA + ETA4X4
17. ETA CCA = CCA ETA *"Km/l CCA ETA "
18. CCA ETA = (TotalCombustão*PerCCA ETA)*Unidades CCA
19. ETA CSCA = CSCA ETA*"Km/l CSCAETA"
20. CSCA ETA = (TotalCombustão*PerCSCAETA)*Unidades CSCA
21. ETACMA = CMA ETA*"Km/l CMAETA"
22. CMA ETA = (TotalCombustão*PerCMAETA)*Unidades CMA
23. ETA CGA = CGA ETA*"Km/l CGAETA"
24. CGA ETA = (TotalCombustão*PerCGAETA)*Unidades CGA
25. ETACEGA = CCA ETA*"Km/l CEGAETA"
26. CEGA ETA = (TotalCombustão*PerCEGAETA)*Unidades CEGA
27. ETA4X4 = 4X4A ETA*"Km/l 4X4ETA "
28. 4X4 ETA = (TotalCombustão*Per4X4ETA)*Unidades 4X4
29. TotalDiesel = DIS4X4
30. DIS4X4 = CMA4X4DIS*"Km/l 4X4DIS"

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os dados usados nos submodelos de consumo veicular foram apresentados nas Tabelas 14, 15 e 16. Após apresentar o consumo dos carros a combustão interna, será apresentado o consumo dos carros elétricos. Foram selecionados quatro tipos de carros elétricos que se assemelham aos carros a combustão interna. Os carros elétricos utilizados estão expostos na Tabela 14.

Para o estudo das emissões equivalentes de CO₂ para veículos elétricos, levantou-se a eficiência de diferentes categorias, como por exemplo: Subcompactos, Compactos, Sedan e SUV. A partir disso, calculou-se, com as mesmas considerações utilizadas para veículos a combustão, a energia demandada por tais modelos para percorrer 15000 km/ano durante uma vida útil de 10 anos.

Além da emissão equivalente, devido ao consumo de energia das fontes citadas, é importante considerar as emissões ocasionadas pela produção das baterias de VEs. Estimando que tal produção gere cerca de 254 kg de CO₂/kWh (ROMARE M; DAHLLÖF L, 2017), é possível calcular a emissão total equivalente. Com isso, para esses modelos a emissão devido a produção de baterias varia entre 4 e 24 Toneladas de CO₂ dependendo da autonomia do veículo

Tabela 14 – Energia demandada para os modelos de carros elétricos utilizados na simulação

Carro Elétrico	Categoria	Eficiência [kWh km]	Bateria [kWh]	Energia Necessária [kWh]
Chery Eq	Subcompacto	0.13	32	19123
Renault Zoe R110	Compacto	0.16	41	23653
VM E-Up	Compacto	0.17	16	25263
Nissan Leaf	Compacto	0.16	36	24545
VM E-Golf	Médio	0.17	32	25263
Tesla Model X	Médio	0.22	95	33529
Tesla Model S	Grande	0.22	95	29687

Fonte: PARENTE et al (2020); BENTO (2021).

Com os valores da Tabela 10, é possível identificar, para cada veículo, a proximidade dos valores numéricos da quantidade de emissões de poluentes entre as fontes de energia, com exceção da geração termelétrica, a qual possui valores muito superiores as demais fontes. Além disso, vale ressaltar que veículos de mesma eficiência, de acordo com a Tabela 11, como VME-Up! e VME-Golf, por exemplo, porém, com capacidades de baterias diferentes, possuem níveis de emissão bem distintos, o que pode ser justificado pela proporção direta entre a capacidade da bateria e a quantidade de CO₂ emitido em sua fabricação.

Para definir/estabelecer a quantidade de carros elétricos na simulação, foi gerada a variável “*PerElétrica*”. Por sua vez a variável “*PerCombustão*” representará a quantidade total de carros movidos a combustão interna. Os valores de ambas as variáveis poderão variar

conforme vontade do responsável pela simulação. Ela é utilizada para modificar cada cenário simulado. Após separado os percentuais, a totalidade de cada tipo de veículos será armazenado nas variáveis auxiliares “**TotalCombustão**” e “**TotalElétrico**”

A variável “**ConsumoCarroElétrico**” armazena a quantidade de energia média utilizada para rodar um quilômetro. Calculada a média de GW por quilometro, seu valor é conectado à variável “**QuantidadeRecarga**”. Esta variável, por sua vez, recebe valor de entrada através da multiplicação da variável “**ConsumoCarroElétrico**” pelo “**KmRodadoA**”. Com isso, já é possível verificar a quantidade de energia consumida pelos carros elétricos simulados. A variável auxiliar “**EnergiaConsumida**” armazena o total de GW utilizado.

Para calcular o custo das recargas, foi necessário compreender o custo de energia de ponta e fora de ponta. No período de consumo ponta, o valor da tarifa de energia e demanda chega a três vezes o valor da tarifa cobrada nas demais horas do dia. Esse aumento nas tarifas ocorre, principalmente, como argumento de incentivo ao não consumo de energia elétrica em um momento de pico. Este comportamento é armazenado nas variáveis “**VarCustoGWhPonta**” e “**CustoGWhPonta**”. O período fora ponta compreende o período do dia onde o consumo de energia elétrica é mais baixo, ou seja, a capacidade máxima das linhas de transmissão de energia está longe de ser atingida. Durante este período, as tarifas de energia elétrica e demanda não sofrem nenhum acréscimo. O comportamento do consumo fora de ponta é armazenado nas seguintes variáveis: “**VarCustoGWhForaPonta**” e “**CustoGWhForaPonta**”. Assim, o custo da recarga é armazenado na variável “**CustoRecarga**” através da interação das variáveis citadas anteriormente.

Para medir o custo do combustível dos carros movidos a combustão interna desenvolveu-se a variável “**CustoAbastecimento**”, onde é simulado a interação entre as variáveis: “**TotalGasolina**”, “**CustoGasolina**”, “**TotalEtanol**”, “**CustoEtanol**”, “**TotalDiesel**” e “**CustoDiesel**”. A variável **CustoInfraestrutura** é responsável por medir o custo de infraestrutura elétrica. Foi usado o carregamento em três níveis, conforme a Tabela 15. A classificação do carregamento dos carros elétricos é determinada pelo montante máximo de eletricidade disponibilizado pelo carregador, já que o mesmo afetará a velocidade da recarga. O tipo, uso e capacidade da bateria também afetam a velocidade de recarga, que varia entre 30 minutos a 20 horas. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2020), é preciso distinguir os tipos de recargas considerando o nível de tensão e de corrente (contínua ou alternada).

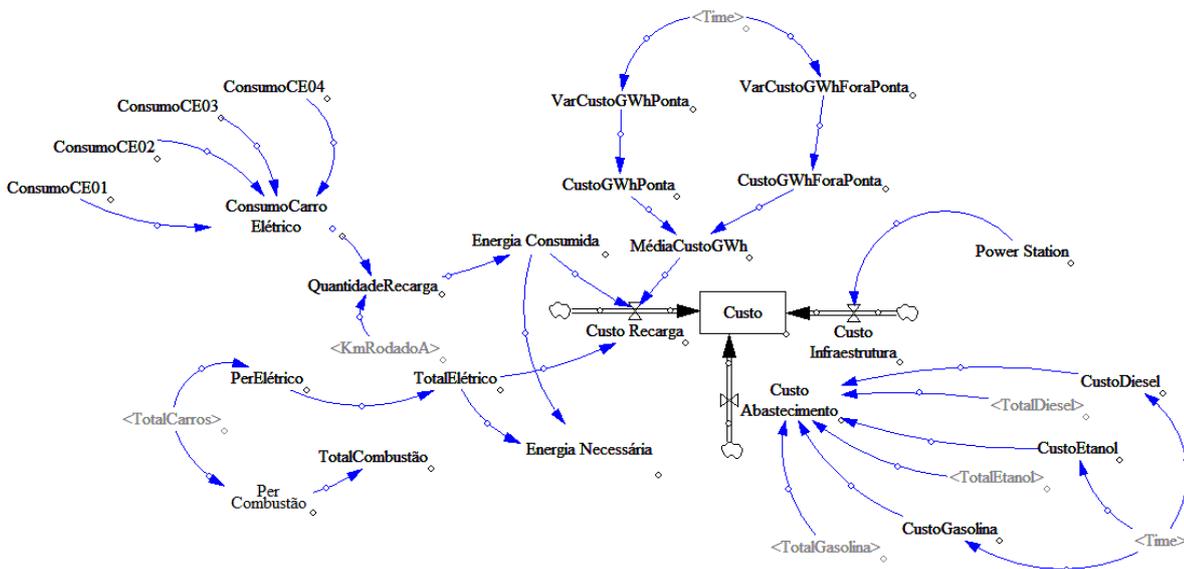
Tabela 15 – Tipos de carregamento de acordo com o nível de recarga

Nível	Uso típico	Tensão/voltagem e tipo de corrente	Autonomia por hora de recarga
Nível 1	Residências e locais de trabalho	127 V Corrente alternada	3km a 8km
Nível 2	Residências, locais de trabalho e locais públicos	220-240 V Corrente alternada	10km a 96km
Nível 3	Locais públicos	Podem atingir até 600 V Corrente alternada ou contínua	96km a 160km

Fonte: Adaptado de FGV Energia (2017).

A Figura 24 apresenta o modelo de custo da inserção de carros elétricos. Os dados relativos aos custos de energia e infraestrutura foram coletados em um concessionário de energia da região estudada, onde foi calculado o valor de cada GW. Para os dados relacionados aos veículos a combustão interna foram utilizadas bases do governo como a ANP (2021) e PETROBRAS (2021).

Figura 23 – Custo EVs



Fonte: Autor (2022).
 *Desenvolvido no software VENSIM-PLE

Considerando a realidade das metrópoles brasileiras em que os carros rodam em média 20 quilômetros por dia em uma cidade pequena e 48 km em uma capital, utilizar um carro com bateria de 350 kWh e carregador lento na garagem se torna mais barato a partir de 80 mil quilômetros rodados. Isto significa que carros com baterias de maior capacidade devem ser considerados apenas para cidades com média diária acima de 120 quilômetros.

Geralmente, os sistemas de recarga lenta possuem uma potência menor que 100 kW, o que, individualmente, não apresenta um impacto significativo (FARKAS; TELEK, 2018). Porém, se considerarmos que as empresas de transportes públicos possuem garagens onde são estacionadas grandes frotas de veículos, um sistema de recarga lenta acaba por resultar em uma demanda de potência imensa, pois geralmente todos os carregadores entram em operação no mesmo horário. Isso faz com que o investimento em infraestrutura para o suprimento desta demanda seja elevado, além de inviabilizar, em alguns casos, a utilização da tecnologia (GALLO; RUBIN; TOMIC, 2014; CIOCIOLA, 2020)

Por outro lado, os sistemas de recarga rápida são normalmente de alta potência (100kW a 500 kW), possuem um custo elevado e necessitam uma complexa infraestrutura de alimentação, quando comparados aos sistemas de recarga lenta (GALLO; RUBIN; TOMIC, 2014, p. 23). Como o uso destes sistemas é vinculado aos períodos de operação dos veículos, o consumo de energia se dá durante o dia, período no qual existe uma maior demanda no sistema elétrico, de acordo com os perfis de consumo dos alimentadores, ocasionando um maior desbalanceamento nas curvas de carga (DU et al, 2019)

Com isto, a eficiência e os custos de aquisição e operação são variáveis, o que torna a escolha de um modelo ou de outro um pouco complexa, uma vez que inúmeros parâmetros devem ser analisados para a definição da opção com melhor custo benefício, em cada caso (SINHUBER; ROHLFS; SAUER, 2010).

Foram geradas diversas equações para simular o modelo apresentado anteriormente, elas estão apresentadas no Quadro 8.

Quadro 6 – Equações modelo custo

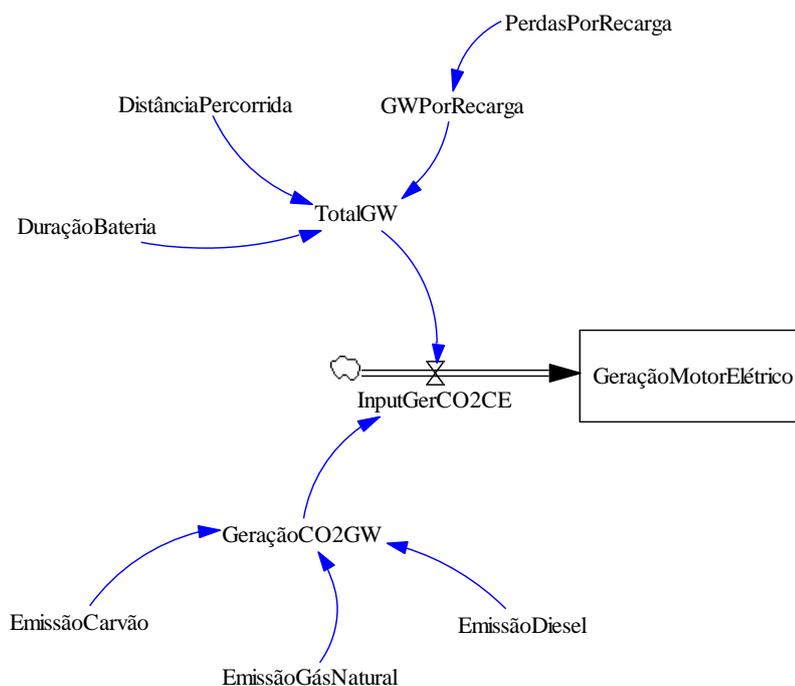
ConsumoCarroElétrico = (ConsumoCE01+ConsumoCE02+ConsumoCE03+ConsumoCE04)/4	
QuantidadeRecarga = ConsumoCarroElétrico*KmRodadoA	
Custo Recarga = (Energia Consumida*TotalElétrico)*MédiaCustoGWh	
Energia Necessária = Energia Consumida*TotalElétrico	
VarCustoGWhPonta = ((0,0)-(60,10)],(0,0.04),(60,0.06))	
CustoGWhPonta = 0.000453+(0.000453*VarCustoGWhPonta)	
VarCustoGWhForaPonta = ((0,0)-(60,10)],(0,0.03),(60,0.05))	
CustoGWhForaPonta = 0.000256+(VarCustoGWhForaPonta*0.000256)	
MédiaCustoGWh = (CustoGWhForaPonta+CustoGWhPonta)/2	
Custo Abastecimento =	
(CustoDiesel*TotalDiesel)+(CustoEtanol*TotalEtanol)+(CustoGasolina*TotalGasolina)	
Custo = Custo Abastecimento+Custo Infraestrutura+Custo Recarga	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para calcular a emissão de CO₂ para gerar a energia que irá abastecer os carros elétricos, desenvolveu-se o submodelo apresentado na Figura 25. A variável de estoque chamada “GeraçãoMotorElétrico” irá quantificar os totais de CO₂ gerados para posterior soma com a geração dos carros a combustão. A variável “GeraçãoCO₂GW” é composta da média da emissão de CO₂ para gerar energia elétrica nas usinas termoeletricas (Carvão, Gás e Diesel). Essa variável possibilitará ao decisor entender quanto é gerado de CO₂ para gerar 1GWh.

A variável auxiliar “TotalGW” tem por objetivo inserir no modelo o total de gigawatts utilizados pelos motores elétricos, ou seja, quantos Gw mensais foram necessários para suprir a demanda de energia que possibilitou o transporte urbano da região simulada. A auxiliar “QuantidadeRecarga” retêm o valor dos totais de recargas mensais. A variável “DuraçãoBateria” compreende a distância máxima atingida pela bateria até a próxima recarga. Já a variável “DistânciaPercorrida” insere no modelo a quantidade de quilômetros percorrida mensalmente pelas rotas dos carros simulados. Multiplicando essas variáveis, se obterá a quantidade de GWs utilizados por mês. A variável “PerdasPorRecarga” possibilitará verificar o tempo de vida da bateria, já que a cada recarga a mesma perde capacidade conforme o estudo de El-Saadawy (2020).

Figura 24 – Geração CO₂ Energia

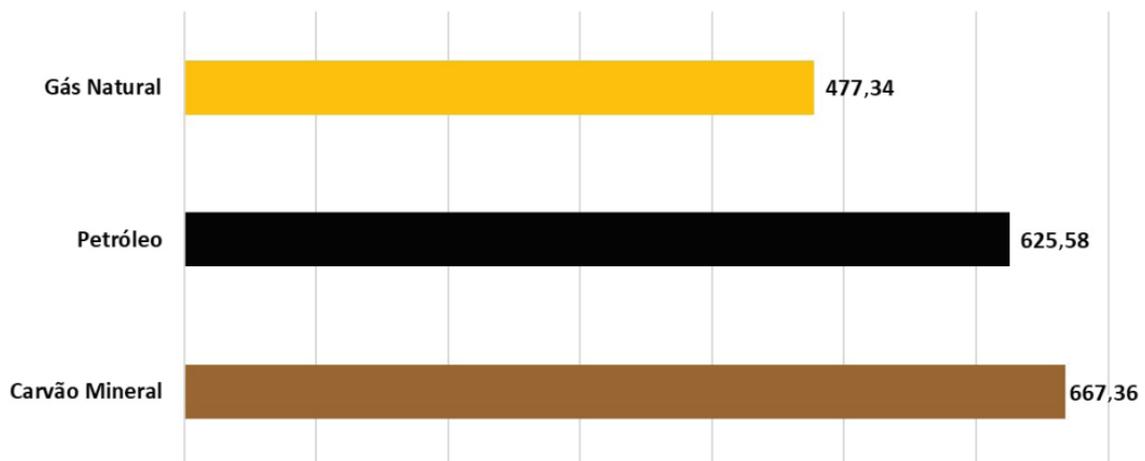


Fonte: Autor (2022)

*Desenvolvido no software VENSIM-PLE

A evolução das emissões por fonte primária de energia segue a mesma tendência da geração de cada uma dessas fontes. Entre 2019 e 2020, as emissões mensais em usinas movidas a gás natural diminuíram 31% e as movidas a derivados de petróleo apresentaram redução de 51%. Por outro lado, as emissões em usinas a carvão mineral diminuíram apenas 5%. Apesar da maior participação do gás natural nas emissões de GEE pela geração de eletricidade, as fontes de energia mais emissoras por unidade de energia produzida são os derivados de petróleo ou carvão mineral. O Gráfico 4, a seguir, apresenta o fator de emissão para cada fonte em termos de toneladas de CO₂ por GWh de energia elétrica produzida em 2016. Esse fator de emissão pode ser avaliado como indicador da eficiência, em termos de emissões de GEE, da geração de eletricidade por fonte fóssil. A energia pode ser gerada a partir de diferentes fontes, cada uma com custos distintos e caracterizada por um fator que indica a quantidade de toneladas de CO₂ que são lançados na atmosfera para produzir uma determinada quantidade de energia elétrica. Esses dados serão utilizados para demonstrar a equivalência de energia poderá ser gerada a partir da redução da emissão de CO₂ pelos veículos a combustão interna. O Gráfico 4 apresentam as emissões para gerar 1gwh.

Gráfico 4 – Emissões para gerar energia por termoeletrica



Fonte: SEEG (2021).

A seguir será apresentado o desenvolvimento do modelo de inserção de ônibus elétricos.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE URBANO

Seja no setor privado, ou em setores públicos, existe um crescente interesse por meios de transporte elétricos. É cada vez mais evidente o aumento em vendas de veículos elétricos ocorrido nos últimos anos (CAMPATELLI et al, 2014). Frente à demanda dos consumidores, o mercado automobilístico se mostra cada vez mais atento às inovações para este segmento (JURCEVIC, 2021).

Segundo o Ipea (2016), cerca de 85% da população brasileira vive em centros urbanos, sendo que somente 36 cidades possuem mais de meio milhão de habitantes, além de 40 regiões metropolitanas consolidadas, nas quais vivem mais de 80 milhões de pessoas. Dado este cenário de rápida urbanização e metropolização, a pressão sobre as infraestruturas urbanas é cada vez maior e estas, portanto, deverão passar por consideráveis transformações para criarem condições de vida sustentáveis para seus habitantes.

Para Rogge, Wollny e Sauer (2015), a evolução tecnológica constante tornou viável a tecnologia dos ônibus elétricos puros sendo considerada uma das mais indicadas quando se refere ao transporte elétrico coletivo devido a sua versatilidade e adaptabilidade as vias existentes. Sebastini (2014) acrescentou que cresce a geração de fábricas especializadas na fabricação de ônibus elétricos em larga escala, porém como cada região possui determinada tecnologia, necessita-se de fábricas para realizar as adaptações da tecnologia local.

Com o crescimento econômico e a urbanização, o setor de transportes tornou-se uma importante força motriz para as emissões de CO₂ (XIAO et al, 2017). O setor emite uma proporção significativa das emissões totais, sendo de 32,9% nos Estados Unidos da América (EUA), 17,7% no Japão e 8,6% na China em 2012 (IEA, 2020). No Brasil, no ano de 2019, o setor de transportes emitiu cerca de 196 Mt de CO₂, um aumento de um por cento se comparado ao ano anterior (SEEG, 2020).

As altas taxas de emissão de CO₂ no Brasil se devem especificamente devido a ampla utilização de uma malha de transportes baseada no setor de transporte urbano, composto em sua maioria por veículos movidos com motores à combustão. Em especial no setor de transportes de passageiros, no ano de 2016, do total de viagens efetuadas pela população, 29% foram realizadas por meio do setor de transporte público, das quais, 20% utilizaram ônibus municipais como meio de transporte (ANTP, 2018).

No campo do transporte urbano, os veículos elétricos são considerados uma alternativa aos veículos de combustão convencionais (JUAN et al., 2014; DAVIS; FIGLIOZZI, 2013), já que não têm emissões diretas de CO₂ e produzem apenas o mínimo de ruído (LIN et al, 2019).

No entanto, sob um viés desafiador, no Brasil, embora incidam em diversos benefícios ao meio ambiente, os veículos elétricos ainda apresentam um custo mais elevado para o consumidor, são mais caros e menos comerciais do que os veículos de combustão (NOVAIS, 2016, ALVIM, 2018). Nesta perspectiva, o país encontra-se atrasado em relação a outros no que tange a adesão a este tipo de veículos (ALVIM, 2018). Porém, várias empresas (BYD, ELETRA) começaram a empregar veículos elétricos em suas operações de entrega de última milha e governos (União Europeia, China) e empresas privadas estão começando a fornecer a infraestrutura necessária para impulsionar ainda mais essa tendência de eletrificação (GOEKE; SCHNEIDER, 2015).

Com o avanço da tecnologia elétrica e dos sistemas de armazenamento de energia, tornou-se um modo de transporte viável podendo ser utilizado até em pequenas cidades (SISTRAN ENGENHARIA INECO E INECO DO BRASIL, 2014). Para Fernandez et al (2015), a inserção de ônibus elétricos municipais incentivaria e reforçaria as políticas de redução da emissão de poluentes. De acordo com o Ipea (2020), o transporte motorizado baseado em combustíveis fósseis assumiu um papel predominante nos deslocamentos cotidianos da população brasileira, respondendo por grande parte das emissões de poluentes nos grandes centros urbanos. Dados da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2016), demonstraram que mais de 93% das viagens motorizadas no Brasil são feitas por modalidades baseadas em energia derivada do petróleo. Isso pode se refletir no quadro apontado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), em que o setor de transportes foi responsável por 42% das emissões de CO₂ associadas à matriz energética brasileira no ano de 2015.

4.2.1 Características do transporte urbano

A mobilidade no Brasil carece de atenção bem como maior enfoque por parte das políticas públicas principalmente no que tange ao transporte público (TB). Esses desafios são resultado do crescimento populacional aliado à falta de investimentos na infraestrutura. Ademais, o fenômeno da adesão ao transporte individual ao invés do transporte público a partir da década de 1990, especialmente de carros e motocicletas também contribuiu, pois, para com o congestionamento nas rodovias brasileiras (CARVALHO, 2016).

O objetivo desta primeira fase é a identificação de todos os elementos do caso em análise. Os elementos-chave são: quantidade da frota de ônibus, características dos diferentes tipos de veículos disponíveis (ou seja, fonte de energia, capacidade de viagem e nível de emissões de CO₂), logística do transporte (dados sobre distância percorrida, quantidade de passageiro por rota etc), dados sobre emissões, custos do transporte, preço combustível e preço unitário da passagem.

Neste tópico serão especificados dados referentes a quantidade da frota de ônibus, características dos diferentes tipos de veículos disponíveis (ou seja, fonte de energia, capacidade de viagem e nível de emissões de CO₂), logística do transporte (dados sobre distância percorrida, quantidade de passageiro por rota etc), dados sobre emissões, custos do transporte, preço do combustível e preço unitário da passagem, Para este estudo foram utilizados dados de uma associação de transporte do interior do Rio Grande do Sul.

Os dados quantitativos sobre a logística de transporte aplicada pela associação do transporte da cidade estão expostos na Tabela 16. Foi escolhida uma linha que possui 14 rotas, são utilizados cerca de 43 veículos para atender a demanda destas rotas. Na Tabela 16 serão apresentadas as informações sobre essas rotas.

Tabela 16 – Logística Transporte

Rota	Distância	Voltas	Qt On	DT	DO	TPT	Passageiros
A	30 Km	72	20	2160 Km	108 Km	40	xxxxxxxx
B	28 km	36	14	720 Km	52 Km	30	
C	25 Km	20	14	500 Km	35 Km	30	
D	28 Km	18	11	504 Km	46 Km	30	
E	12 Km	10	6	120 Km	20 Km	10	
F	48 Km	10	8	480 Km	60 Km	40	
G	59 Km	20	10	1180 Km	118 Km	40	

Fonte: ATU (2022)

Legenda: TP =Tempo parado terminal; DT = Distancia total; DO -= Distancia ônibus

A Tabela 17 apresenta os modelos dos ônibus utilizados para suprir a demanda da rota utilizada na simulação. Os dados foram utilizados para complementar e caracterizar os cenários, apresentados na metodologia do estudo. Para os cenários propostos pela pesquisa será utilizado os valores que serão apresentados a seguir. Vale ressaltar que o transporte da cidade utilizada para a simulação possui mais modelos de veículos, porém na rota escolhida são utilizados estes três modelos.

Tabela 17 – Modelos utilizados

Modelo	Ano	Consumo (km/l)	Combustível	PS	PE
VW/MPOLO TORINO GVU	2007	2,549	Diesel S10	44	24
M.BENZ/COMIL DOPPIO A	2016	3,583	DIESEL B12	83	40
SVELTOMIDI	2011	2,609	DIESEL B12	58	30

Fonte: <https://www.comilonibus.com.br/site/veiculos/detalhe/linha-urbano/produto-svelto#/dados-tecnicos>.

Legenda: Legenda: PS – Pessoas sentadas; PE – Pessoas em pé.

O rendimento energético médio dos ônibus urbanos convencionais varia entre 2,549 km/l e 3,583 km/l. Os dados para ambas as análises do rendimento e do consumo energético foram coletados diretamente na associação de transportes da região, o cálculo é baseado em apenas dias úteis, sendo removidos os dias não típicos (finais de semanas e feriados). O combustível utilizado em sua maioria é o diesel B13 (ANP, 2020), trata-se de uma mistura de biodiesel ao diesel derivado de petróleo, alguns modelos não suportam essa mistura, sendo abastecidos de diesel S10 puro (D'AGOSTO et al., 2014; DREIER et al., 2018).

4.2.2 Desenvolvimento modelo ambiental da eletrificação do transporte urbano

O transporte urbano desempenha um papel fundamental no desenvolvimento urbano eficiente e sustentável de uma cidade (SCHLIWA et al., 2015). Apesar dos benefícios das atividades de transporte em áreas urbanas, principalmente por transportar pessoas sem veículos próprios, externalidades negativas também são originadas por essas atividades. Por exemplo, enquanto as emissões gerais de CO₂ estão caindo em muitos outros setores, as emissões de transporte ainda devem aumentar no futuro, já que a atividade de transporte de carga deve se expandir ainda mais nas próximas décadas (ITF, 2015).

Ambientes excessivamente urbanizados, como das grandes cidades, possuem em seu ambiente muitos gases maléficos ao meio ambiente, boa parte originada dos meios de transporte (FALCO, 2017). Ye et al (2021) definiram o transporte como o principal setor responsável pelo consumo de energia urbana e pelas emissões de carbono no mundo, em que as emissões terão um papel integrante em esta transformação. Para Liyang et al (2020), A emissão relacionada ao tráfego como uma das principais causas da deterioração ambiental em áreas urbanas. Samaranayake et al., (2014) e Wang et al., (2016), expõem alguns gases, que prejudicam não só o meio ambiente mais a saúde humana: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrocarboneto (HC) e óxidos nítricos (NOX, principalmente NO e NO₂).

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal produto da combustão completa de motores movidos a combustíveis fósseis (MMA, 2020). Apesar de não ser considerado um poluente e estar presente naturalmente na atmosfera, o CO₂ é um gás gerador do efeito estufa, que contribui para o aquecimento global (IEA, 2020). Além dos danos à saúde e à qualidade de vida, os efeitos da poluição atmosférica acarretam maiores gastos do Estado com o serviço público hospitalar (em atendimentos e internações, medicamentos, etc.), os quais poderiam ser evitados com a melhoria da qualidade do ar nas cidades (MMA, 2017).

Para Yu et al. (2018), a eletrificação do transporte público pode diminuir a dependência em petróleo e reduzir os níveis de emissões. Lin e Zhang (2019) informam que apesar do volume de ônibus ser menor que o de veículos particulares, os ônibus consomem quantias consideráveis de combustível por causa dos longos períodos de operação. Para He, Song e Liu (2019), devido às características do motor e da rotina das rotas, como paradas e arrancadas frequentes e quantidade de passageiros transportados, ocorre alto consumo de combustível.

Os ônibus a diesel emitem mais partículas que veículos a gasolina, agravando a extensão da poluição (BI; KEOLEIAN; ERSAL, 2018). Segundo Lin e Zhang (2019) quando comparado aos ônibus elétricos estima-se que um e-bus reduz o consumo de energia em 72,9% comparado ao equivalente a diesel. Os ônibus com acionamento elétrico de emissão zero, como os ônibus elétricos a bateria é uma boa alternativa livre de carbono fóssil para as empresas de transporte coletivo urbano (BI et al, 2015). Para Dallmann (2019), as vendas globais de ônibus elétricos as baterias têm crescido rapidamente, segundo o New Energy Finance (2018) grande parte das vendas está centrada na China. Para a Asian Development Bank (2018), o mercado chinês é referência nesse setor pelas políticas ambientais e industriais da China, que incentivam e aceleram as transições para essa tecnologia.

No Brasil, alguns estados já aderiram aos ônibus elétricos, principalmente em São Paulo, um dos mais populosos e poluentes do país, que conta atualmente apenas com 100 ônibus elétricos em suas ruas (VENDITTI, 2022).

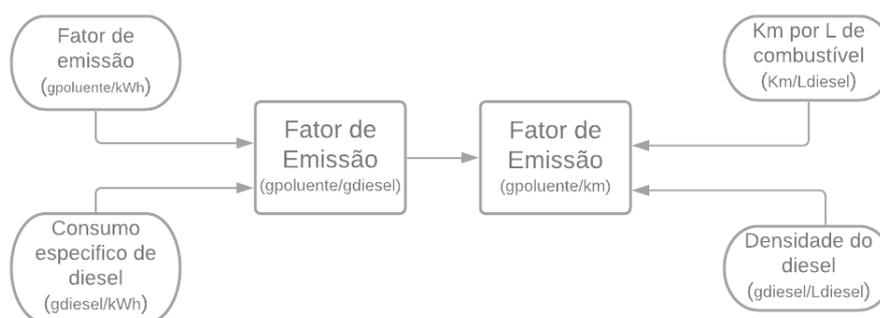
Como esta abordagem visa avaliar o impacto ambiental e os benefícios adjacentes frente à adesão a esta modalidade (VENDITTI, 2022), os fatores de emissão devem ser calculados de forma a avaliar o nível de emissões de CO₂. O fator de emissão de cada veículo é calculado a partir do quilômetro rodado por cada ônibus. Os veículos atuais utilizam diesel, diesel s10 e diesel B13 para a locomoção na cidade. Para Siqueira et al (2019), as externalidades ambientais da utilização de combustíveis de origem fóssil, como o diesel, no sistema de transporte são debatidas amplamente. Estudos demonstram que os impactos nas mudanças climáticas, oriundos do setor do transporte, são abordados principalmente nos relatórios do Painel

Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (IPCC, 2014; LOPES et al., 2018; STANLEY et al., 2011; ÜLENGIN et al., 2018).

Para a estimativa de CO₂ inicialmente foi determinado os índices de aprovação e reprovação dos veículos ano a ano baseado no teste de opacidade que tem como critério de aprovação ou reprovação os valores determinados na Resolução do CONAMA 418/2009 e a instrução normativa IBAMA Nº 6/2010. Com os índices de aprovação e reprovação dos veículos foram utilizados os dados referentes ao consumo de combustível relacionado à quilometragem rodada (km/L) ano a ano de cada veículo.

Na Figura 26 está ilustrado de maneira sintética os procedimentos adotados para incorporar no modelo os cálculos para os fatores de emissão, sendo os resultados iniciais obtidos, em “grama do poluente / km”. As emissões de dióxido de carbono (CO₂) aqui apresentadas são aquelas ocorridas no escapamento, ou seja, produto da queima dos combustíveis durante o uso dos veículos, não contabilizando, portanto, as emissões (ou remoções) ao longo de todo o ciclo de vida dos combustíveis. Os fatores de emissão de CO₂ para veículos do ciclo Diesel foram obtidos do Inventário Nacional, ANFAVEA, CETESB, PROCOVE, ANTP, PETROBRAS, CBCS e SEEG.

Figura 25 – Procedimentos adotados para estimar as emissões



Fonte: Adaptado de BEN (2021), ANFAVEA (2018), PROCOVE PETROBRAS (2020).

Os fatores de emissão médios para motores pesados do ciclo Diesel, apresentados pela CETESB e IBAMA, são gerados nos ensaios de homologação segundo os ciclos estabelecidos nas normas técnicas ABNT-NBR 14489 e ABNT-NBR 15634. As emissões são medidas em termos da massa de poluentes gerados por unidade de trabalho realizado pelo motor.

Segundo o Ipea (2020), pode-se classificar a poluição veicular em duas categorias, de acordo com a abrangência dos seus impactos, a poluição local, que causa danos no entorno onde o serviço de transporte é realizado, e os poluentes globais, que impactam o planeta como um

todo. Dentre os poluentes locais nocivos à saúde será avaliado no modelo o dióxido de carbono (CO₂), um importante gás causador do efeito estufa (GEE).

De acordo com o estudo do Ipea (2020), “Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros”, de 2018, a combustão de um litro de diesel produz 3,2 kg de gás carbônico, enquanto a ANFAVEA afirma que um litro de diesel poderá emitir de 2,6kg até 3,87kg, já BEN (2020) reforça que a combustão de um litro de diesel emitirá aproximadamente 3,1 kg.

Neste estudo será simulado um fator de emissão médio inicial de 2,6 kg de CO₂ para cada litro de diesel queimado na combustão, que poderá atingir 3,87 kg no decorrer da simulação, dependendo do cenário aplicado. Estes valores estão de acordo com a metodologia utilizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) que referencia a emissão máxima possível de CO₂, mostrando o pior cenário que pode acontecer (IPEA, 2018). A emissão máxima considerada foi de 3,87 Kg de CO₂ em Km/l de diesel consumido segundo dados da ANTT (2020).

O consumo de combustível foi calculado por meio de dados da ANFAVEA (2020), ANTT (2020), IPEA (2015) e URBS (2018), os dados destes estudos foram utilizados para o planejamento de cenários propostos por esta pesquisa. O consumo médio por quilometro, referente ao cenário atual foi coletado através de dados mensais informados pela associação de transporte da região, a Tabela 18 apresentou o valor médio dos veículos utilizados na simulação. O consumo utilizado nos cenários está exposto na tabela 3.

Tabela 18 – Consumo por km

Referência	Mínimo (Km/l)	Máximo (Km/l)
ANFAVEA (2020)	2,23	3,18
ANTT (2020)	2,19	3,23
IPEA (2018)	2,24	3,19
URBS (2018)	2,27	3,17
Valor Médio	2,215	3,19

Fonte: ANFAVEA (2020); ANTT (2020); IPEA (2018); URBS (2018).

Para Cuellar et al (2018), diferentes cidades do mundo já aplicam essa possibilidade de transporte. Diante de tais preceitos, neste estudo tem-se como objetivo inserir ônibus elétricos no transporte urbano seletivo da região estudada. Para isso foram selecionados alguns modelos de veículos capazes de suprir a demanda local, de modo que não prejudique o transporte de passageiros. Para a modelagem foram utilizados três ônibus elétricos como parâmetros de

simulação. Todos os veículos possuem seus chassis fabricados pela empresa Build Your Dreams (BYD)¹.

A missão da BYD é mudar o mundo, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis por meio do desenvolvimento e avanço da tecnologia de baterias e veículos elétricos. A empresa desenvolve soluções inteligentes e sustentáveis a fim de promover um sistema de transporte público de emissão zero (BYD, 2021).

Para o mercado brasileiro, a BYD oferece chassis de ônibus 100% elétricos que ganharam carrocerias feitas pelos parceiros locais. Cada ônibus com chassis 100% elétrico BYD em operação equivale a reduzir as emissões de carbono de 33 carros. Além disso, os ônibus são seguros, silenciosos e podem diminuir os custos operacionais em até 70% (BYD, 2021). Os modelos utilizados são o modelo “D9W”, “D9A” e “D11B41820”. A Tabela 19 apresenta as características de cada modelo.

Tabela 19 – Modelo de ônibus elétrico

Modelo	Características	Autonomia	Capacidade
D9W	Possui motor BYD-2912TZ-XY-A integrado em cada uma das rodas do eixo traseiro, contando com um módulo de controle eletrônico de tração. Chassi conceito Low Entry, ou seja, não existindo degraus para o embarque e desembarque dos passageiros. Chassi tubular que não necessita alongamento para carrocerias até 13,2 metros. Estrutura constituída por materiais de alta resistência à torção e à flexão. Freio a disco com ABS/EBS e sistema regenerativo, proporcionando maior segurança e autonomia ao veículo. Suspensão pneumática integral – conforto aos passageiros e motorista. Sistema de rebaixamento bilateral – permite o ajoelamento da suspensão, aumentando o conforto e segurança para embarque e desembarque dos passageiros. Também é possível elevar a altura da carroceria para transpor alguns obstáculos das vias públicas. Coluna de direção regulável – permite a regulagem de acordo com as características de cada motorista, melhorando a ergonomia.	250 km	80 passageiros
D9A	Motor BYD-2912TZ-XY-A integrado em cada uma das rodas do eixo traseiro, contando com um módulo de controle eletrônico de tração. Chassi tubular que não necessita alongamento para carrocerias até 13,2 metros. Estrutura constituída por materiais de alta resistência à torção e à flexão. Freios a disco com ABS e sistema regenerativo, proporcionando maior segurança e autonomia ao veículo. Suspensão pneumática integral – conforto aos passageiros e motorista. Coluna de direção regulável – permite a regulagem de acordo com as características de cada motorista, melhorando a ergonomia.	230 km	90 passageiros
D11B41820	É um modelo de ônibus articulados, eles possuem quatro motores elétricos ligados aos eixos. A potência de cada um é de cerca de 201 cv, com 148 cv de potência nominal. A recarga das baterias é feita em até três horas, de acordo com informações da fabricante. Entre os destaques, há coluna de direção regulável. Além disso, o chassi da BYD conta com regulagem de altura do piso, ajoelamento bilateral, sistema antichama, tacógrafo digital, rodas de alumínio e suspensão pneumática integral.	250 km	130 passageiros

Fonte: BYD (2021).

¹ <https://www.byd.com.br/sobre/>

As baterias utilizadas na simulação são compostas de fosfato de ferro-lítio como material de eletrodo positivo, que possui uma excelente segurança, ciclo de vida longo, bom desempenho em temperatura, alta densidade de energia, econômica e não poluente. Estima-se que o tempo de uso de uma bateria é de aproximadamente 5 anos, para esse estudo foi utilizado a troca de bateria a cada 4 anos, conforme os estudos de (ALWESABI et al, 2021; GLUCKER et al, 2021; MANZOLLI et al, 2022)

As baterias utilizadas na simulação possuem potência em torno de 224Kw, são produzidas pela Mitsubishi Heavy Industries, BYD entre outras. Com estes dados somos capazes de calcular o consumo médio do veículo, tomando como base a capacidade total das baterias de 224 kWh e dividindo pela autonomia máxima de 200 km temos como resultado um consumo de 1,12 kWh/km (BYD 2020, ELETRA 2016, WEG, 2016). Estes valores foram utilizados como dados iniciais do modelo. Testes realizados no Brasil indicam o consumo médio de energia dos ônibus elétricos varia entre 1,04 e 1,59 KWh/km (LIU et al, 2016; NORDELOF; ROMARE; TIVANDER, 2019).

Para inserir o comportamento do consumo futuro médio dos ônibus elétricos foram utilizados os estudos (NTU 2018, VARGAS et al, 2019). No modelo o primeiro mês foi acrescido ao valor inicial a média de carga diária de 234,57 kWh que equivale a aproximadamente 0,59 Km/ kWh e a partir do segundo mês foi de 181,91 kWh e 0,76 km/kWh, que representa um ganho de 22%.

Os dados sobre a autonomia dos ônibus elétricos foram retirados das pesquisas de Guenther e Padilha (2016), Gao et al (2017), Du et al (2019). Em suma os estudos descreveram que a autonomia dos ônibus elétricos é de aproximadamente 200 km, e em média os motores são compostos por 14 baterias de lítio, necessitando em média quatro horas para a recarga completa.

Foi estipulado que as baterias devem ser receber recarga quando atingirem entre 30 e 40 por cento de carga. Devido à diferença nas condições do número de passageiros e tráfego nos finais de semana (sábado e domingo), as viagens foram restritas somente para dias úteis (segunda a sexta-feira). As características da infraestrutura de recarga, horário que os ônibus serão carregados serão apresentados na sessão a seguir, já que são dados mais voltados para o modelo financeiro.

O comportamento das emissões de CO₂ referentes aos ônibus puramente elétricos e híbridos foram coletados dos estudos (ZHANG, 2014) Para quantificar a quantidade de CO₂ por cada kWh gerado utilizou-se o estudo de Wu e Zhang (2017), os autores utilizaram o método *well-to-wheel* (da fonte a roda) considerando a matriz energética de cada país e respectivas

perdas energéticas de transmissão. Para Wu e Zhang (2017), o Brasil é o país com o maior potencial de redução de CO₂, já que possuem a matriz energética baseada em hidroelétricas. Porém apresentam altos índices de geração de CO₂ oriundos dos veículos de combustão interna.

Com o objetivo de comparar as emissões dos veículos elétricos e a combustão interna foram levantadas as séries históricas das emissões de CO₂ da matriz elétrica brasileira e do Rio Grande do Sul (SEEG, 2019). O fator de emissão máximo da matriz brasileira, em 2015, foi de 108,23tonCO₂/GWh, contudo, em novembro de 2018 o fator de emissão atingiu o mínimo de 43,68tonCO₂/GWh. Os fatores da matriz elétrica anuais são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Matriz Elétrica anual

Ano	Geração de Eletricidade (GWh)	Emissões pela Queima de Combustíveis (t)	Emissões para gerar energia(tco2/GWh)
2010	515.799	21.582.216	373.067.646
2011	531.758	20.731.555	386.888.724
2012	552.496	22.852.108	420.354.069
2013	570.835	24.915.506	455.146.793
2014	590.542	24.868.911	480.372.684
2015	581.228	24.070.992	457.045.232
2016	578.898	23.310.948	423.914.401
2017	589.327	21.165.641	431.074.670
2018	601.396	20.563.442	409.331.882
2019	626.324	21.562.776	413.673.635

Fonte: Adaptado de EPE (2021).

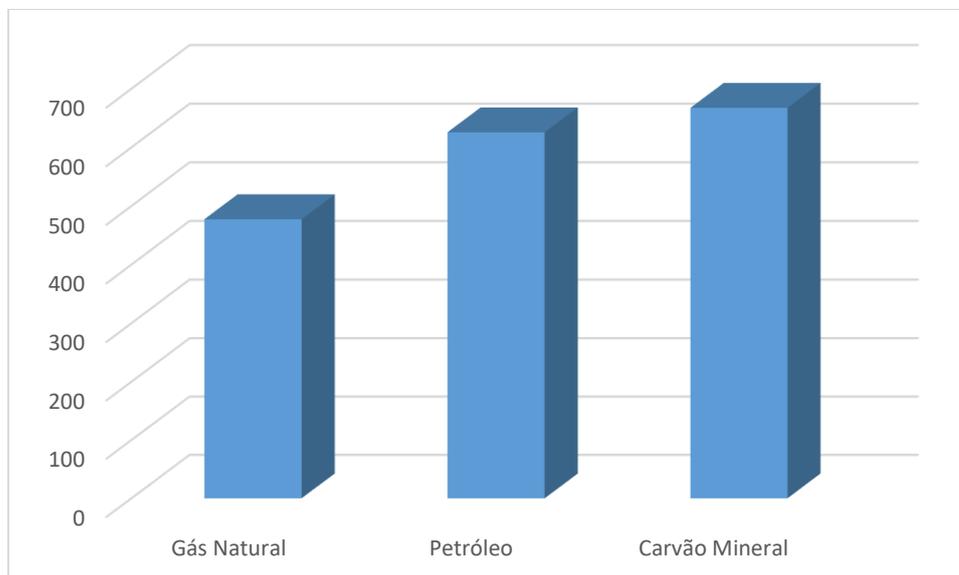
A emissão dos ônibus elétricos híbridos varia entre 1,35 e 1,4g CO₂/km (NTU, 2018). De acordo com o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (2018), a quantidade de CO₂ emitido para geração de cada MWh no Brasil no ano de 2017 foi de 0,0653. Esse fator considera as usinas operantes neste tempo e a proporção de geração de cada uma delas. As emissões de CO₂ médio utilizado nos cenários planejados foi de 272,7 gCO₂/km, para os ônibus híbridos e 132,4 gCO₂/km para os ônibus puramente elétrico (100%) (LAJUNEN, 2014; ZHANG et al., 2014; MUNCRIEF et al., 2012).

Outra análise realizada no modelo de simulação diz respeito à equivalência de geração de energia. Nessa análise serão verificados quantos GW de energia poderão ser gerados com a redução de emissão de CO₂ com a aplicação do modelo. Segundo SEEG (2019) em uma usina de gás natural para gerar 1GW é emitido aproximadamente 477,34 toneladas de CO₂, já uma usina movida a petróleo emitirá 623 GW e uma a carvão mineral irá emitir 667,36 por GWh.

A evolução das emissões por fonte primária de energia segue a mesma tendência da geração de cada uma dessas fontes. Entre 2015 e 2016, as emissões mensais em usinas movidas

a gás natural diminuiram 31% e as movidas a derivados de petróleo apresentaram redução de 51%. Por outro lado, as emissões em usinas a carvão mineral diminuiram apenas 5% (BEN, 2018). Apesar da maior participação do gás natural nas emissões de GEE pela geração de eletricidade, as fontes de energia mais emissoras por unidade de energia produzida são os derivados de petróleo ou carvão mineral. No Gráfico 5, a seguir, serão apresentados o fator de emissão para cada fonte em termos de toneladas de CO₂ e por GWh de energia elétrica produzida em 2016. Esse fator de emissão pode ser avaliado como indicador da eficiência, em termos de emissões de GEE, da geração de eletricidade por fonte fóssil.

Gráfico 5 – Emissão de CO₂ por tipo de geração de energia



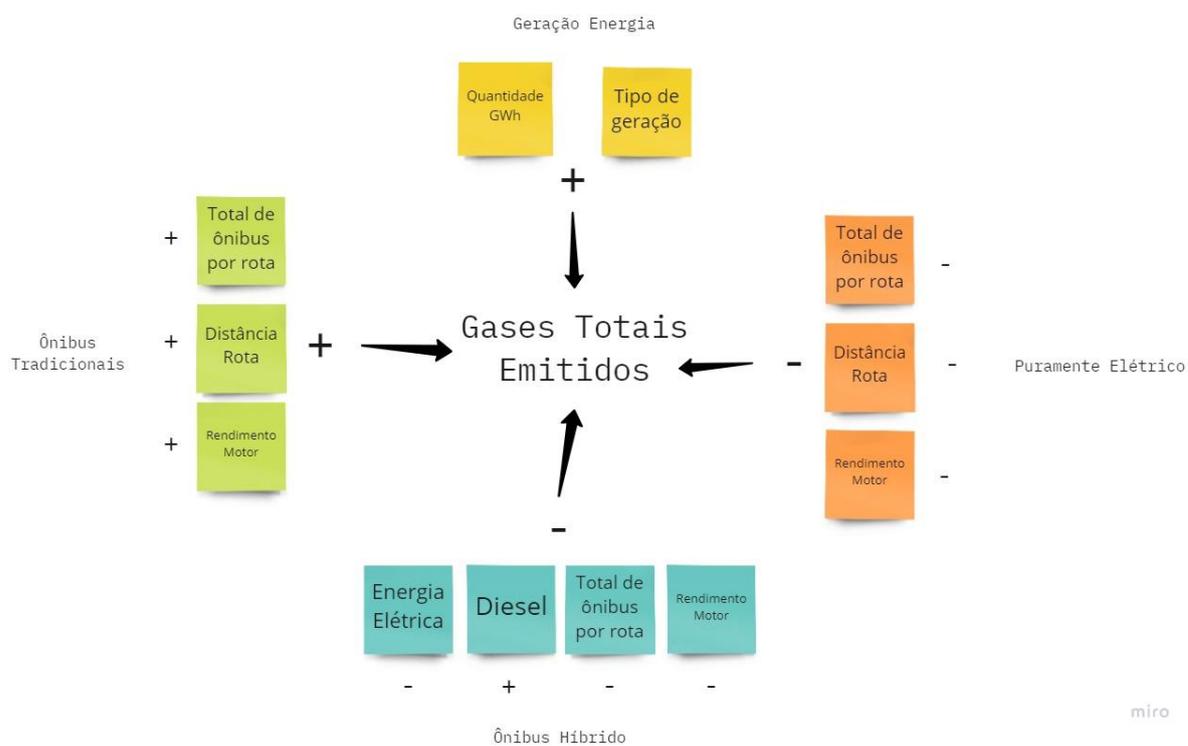
Fonte: SEEG (2019).

O Gráfico 5 será utilizado para analisar o impacto da emissão de CO₂ para gerar energia elétrica, os dados que serão usados no modelo de simulação dizem respeito à equivalência de geração de energia. Nessa análise iremos verificar quantos GW de energia poderia ser gerado com a redução de emissão de CO₂ com a aplicação do modelo. Segundo SEEG (2019) em uma usina de gás natural para gerar 1GW é emitido aproximadamente 477,34 toneladas de CO₂, já uma usina movida a petróleo emitirá 623 GW e uma a carvão mineral irá emitir 667,36 por GWh. Na seção a seguir, será apresentado o modelo ambiental desenvolvido.

O diagrama apresentado na Figura 27 representa a lógica para desenvolver o modelo responsável por analisar o impacto ambiental da inserção de ônibus elétricos no Transporte Urbano de uma cidade do interior do Rio Grande do Sul. Neste sentido, ressalta-se que o modelo

desenvolvido em questão poderá ser implementado em qualquer cidade brasileira. O modelo é baseado na lógica de estoque e fluxo, portanto o valor das emissões geradas pelas simulações dos cenários, serão somadas até o final do tempo de simulação pré estipulado.

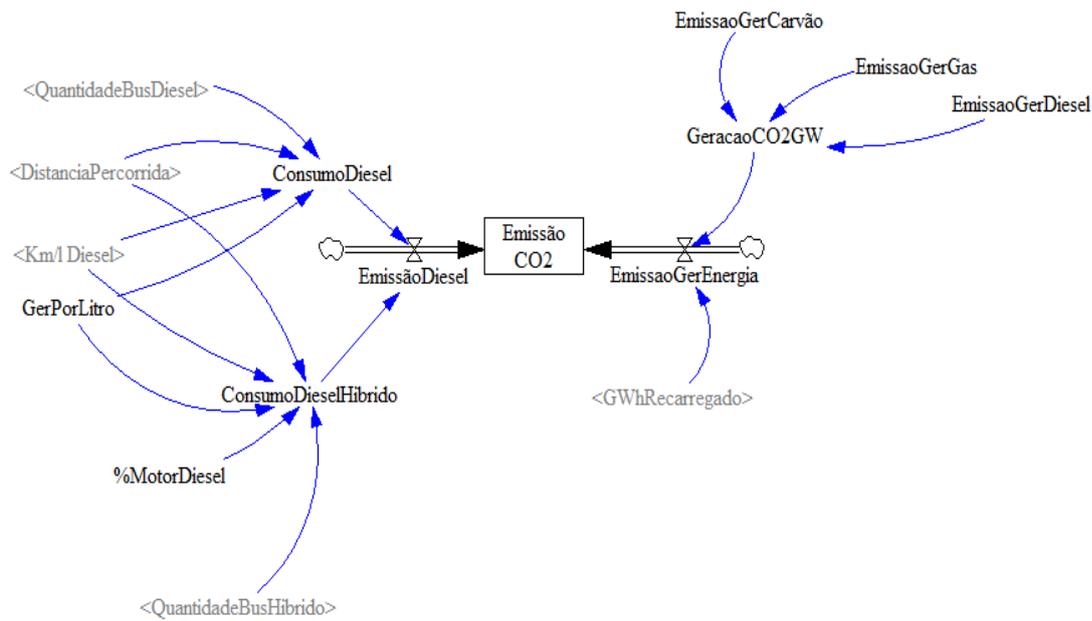
Figura 26 – Diagrama de causa consequencia ambiental



Fonte: Autor (2022).

A Figura 28 representa o modelo computacional desenvolvido para a análise dos cenários de inserção de ônibus elétricos.

Figura 27 – Modelo para análise ambiental



Fonte: Autor (2021); Modelo gerado a partir do software VENSIM-PLE (2021).

O modelo possui dois fluxos de entrada da variável de estoque “**EmissãoCO2**”. O fluxo “**EmissãoDiesel**” armazena os valores de entrada relativos ao consumo do combustível diesel. A variável auxiliar “**ConsumoDiesel**” inseri no modelo o comportamento de consumo de diesel por quilômetro, ela recebe valores de outras variáveis:

- “**QuantidadeBusDiesel**”: Seta a quantidade de ônibus a diesel usados na simulação e também que são usados para dar conta da demanda das linhas estudadas;
- “**DistanciaPercorrida**”: Responsável por armazenar o comportamento de rodagem mensal de cada ônibus, é através dela que as distâncias totais do transporte urbano são calculadas;
- “**Km/lDiesel**”: Rendimento do motor a diesel por quilômetro, ou seja, quantos litros são consumidos para percorrer um quilômetro;
- “**GerPorLitro**”: Geração de CO2 por litro.

O segundo fluxo de entrada é responsável por armazenar os dados do percentual elétrico das simulações. Como alguns ônibus são híbridos é necessário separar o motor elétrico (conjunto de baterias) e o motor a combustão interna. A emissão é relativa a geração de energia elétrica para abastecer os veículos elétricos. Para isso usou-se como base usinas termoeletricas para calcular a emissão de CO₂ por GwH (ZHOU et al, 2016)

Por fim, a interação das variáveis é inserida no estoque “EmissãoCO₂” e com ele os valores de emissões por cenário é simulado, possibilitando assim calcular o impacto da inserção de ônibus elétricos. O Quadro 9 apresenta o modelo das principais equações do modelo apresentado.

Quadro 7 – Modelo Equações Modelo Ambiental

- | | | |
|----|---|--|
| 1. | QuantidadeBusDiesel = TotalBus*PerBusDiesel | |
| 2. | DieselHibrido = (QuantidadeBusHibrido*(DistanciaPercorrida*"Km/l Diesel"))-
(QuantidadeBusHibrido*(PerElétrico*(DistanciaPercorrida*"Km/l Diesel"))) | |
| 3. | DieselGasto = (QuantidadeBusDiesel*(DistanciaPercorrida*"Km/l Diesel"))-
(QuantidadeBusDiesel*(PerDiesel*(DistanciaPercorrida*"Km/l Diesel"))) | |
| 4. | CustoLitroDiesel = VarCustoDiesel*2.99 | |
| 5. | Custo Transporte = (CustoLitroDiesel*(DieselGasto+DieselHibrido))+CustoManutencao | |

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

A próxima seção irá apresentar os dados utilizados para o desenvolvimento do modelo financeiro.

Uma das prioridades a curto prazo no Brasil, deve ser a adoção de ônibus elétricos no lugar da adoção de veículos particulares (SLOWIK et al, 2018). Neste sentido, ressalta-se uma série de benefícios com essa escolha (SLOWIK et al, 2018), tais como desenvolvimento econômico e industrial e geração de novos empregos na fabricação de VE e sua infraestrutura de apoio além da redução dos custos financeiros a longo prazo (LIMA, 2019).

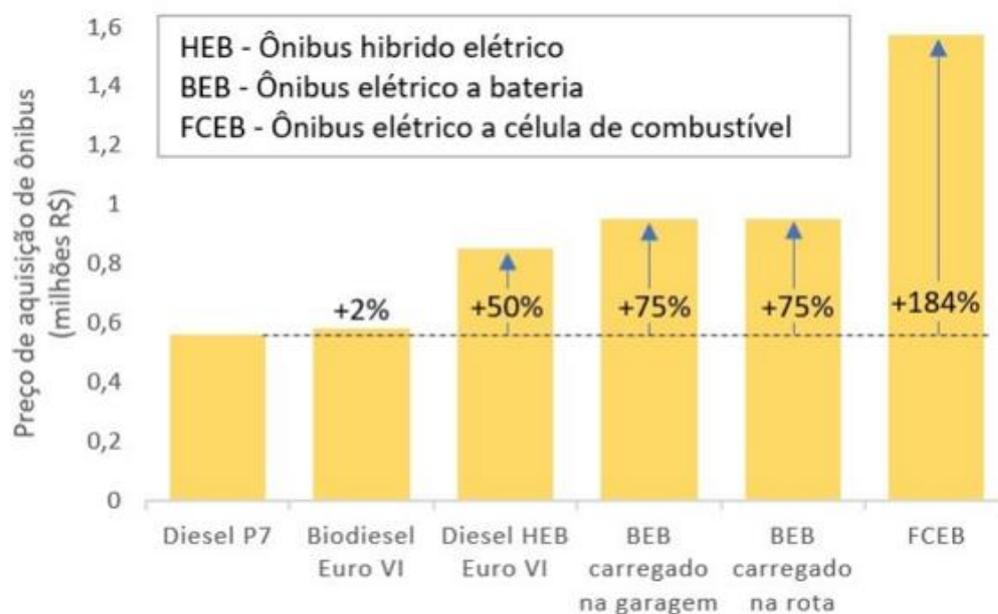
Ainda, a utilização de ônibus elétrico no transporte urbano aponta enquanto alternativa de modelo de negócios, onde novas estratégias são apresentadas e as companhias de energia representam um papel mais ativo, funcionando como financiadores das infraestruturas de recarga ou até mesmo das baterias (ORBEA et al, 2019). Li, Castellanos e Maassen (2018) acreditam que essas estratégias são caminhos para reduzir não só os custos iniciais aos operadores e agências de transporte, como também distribuir adequadamente os riscos da tecnologia elétrica. São exploradas também alternativas para modelos contratuais de forma a adaptar a remuneração dos custos operacionais e de capital às particularidades da tecnologia elétrica (ZHANG et al., 2019).

Nem toda a população tem interesse em se tornar usuária do sistema de transporte público. O grande número dessas variáveis é a razão da necessidade de serem analisadas por meio de um método capaz de lidar com sistemas complexos. Para Aurachman (2020) as necessidades do sistema de transporte são influenciadas por vários componentes. Esses componentes podem ser considerados o tamanho da população, o nível de uso da população e a prontidão da capacidade do sistema de transporte. (ARANI, 2014).

Foi usado o ônibus BYD modelo k9 como referência para o custo de compra do ônibus. A marca chinesa anunciou na BYD (2019) que a recarga pode levar 2 horas com capacidade de 80 kW. Portanto, esses valores de capacidade e tempo de carregamento são levados em consideração. Sabendo que a recarga plug-in é a mais barata, isso foi levado em consideração (BOONRKSA et al., 2019).

Com relação ao preço do ônibus elétrico, o estudo GREENPEACE BRASIL (2016) aponta que o custo de aquisição dos ônibus elétricos de duas empresas que já comercializam no Brasil, Eletra e BYD. Segundo o estudo em questão, o custo do ônibus, modelo "Ebus" 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. Neste viés, Slowik et al. (2018) comparou os preços de aquisição de ônibus a diesel e ônibus elétricos e demonstrou que o valor de compra para ônibus elétricos a bateria é de cerca de R\$ 1.000.000,00, como pode ser visualizado na Figura 29 a seguir.

Figura 28 – Preço de compra de ônibus de transporte elétrico em comparação com ônibus convencionais a diesel



Fonte: Adaptado de Slowi et al. (2018).

No estudo apresentado por Slowik et al. (2018), o autor descreve 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 nesse aspecto e sabendo-se 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-se os dois valores chega-se a R\$ 1.000.000. Na Tabela 21 é possível visualizar os valores utilizados referentes ao *Capital Expenditure* (CAPEX).

Tabela 21 – Valores CAPEX

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).

Os valores de aquisição dos ônibus elétricos embora superiores aos valores de aquisição dos ônibus à diesel podem sofrer uma redução relevante caso seja utilizado um recurso conhecido como *leasing* onde a empresa fabricante dos ônibus arrenda as baterias presentes nos ônibus (BYD, 2022). 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 (BYD, 2022).

Em relação aos custos de operação, *Operational Expenditure* (OPEX), o primeiro dado, relacionado aos custos operacionais, considerado na ferramenta, foi o rendimento dos ônibus, tanto a diesel quanto veículos 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 (RJ) indicou que o rendimento de um ônibus diesel em uma rota específica foi de 2,62 km/l. No estudo de 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. Já o estudo de Costa (2018), realizado em uma cidade em Brasília, demonstrou um rendimento de 2,9 km/l para uma empresa de ônibus.

Para o rendimento dos ônibus elétricos, foi utilizado como base o trabalho de D’agosto, Gonçalves 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 foi 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 associação de transporte da cidade estudada. Com base nas informações obtidas junto a empresa², foram gastos cerca de R\$ 34.913,99 em média por veículo para 47 veículos que cobrem a linha estudada. A quilometragem realizada por esses veículos, também disponibilizada pela associação, 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.

Destaca-se neste sentido que o valor para a manutenção de ônibus elétricos, cerca de R\$ 0,58 por quilômetro rodado (DALLMANN, 2019). Para o presente estudo, consideraram-se dados obtidos com base na cidade de São Paulo. A partir desses dados, pode-se verificar que os ônibus elétricos custam quase 30% a menos do que os ônibus movidos a diesel em termos de manutenção (MATOS, 2021). Todos os dados referentes à operação dos ônibus podem ser verificados na Tabela 22.

Tabela 22 – Dados Referentes ao OPEX

	Diesel	Elétrico
Custo Operacional (R\$/Km)	1,45	0,67
Rendimento (R\$/Km)	2,21	0,76
Custo do Combustível (R\$/l) (R\$/kWh)	3,21	0,51
Custo Operacional (R\$/Km)	0,814	0,58
Custo Operacional (R\$/mês)	165.227,41	90.937,49

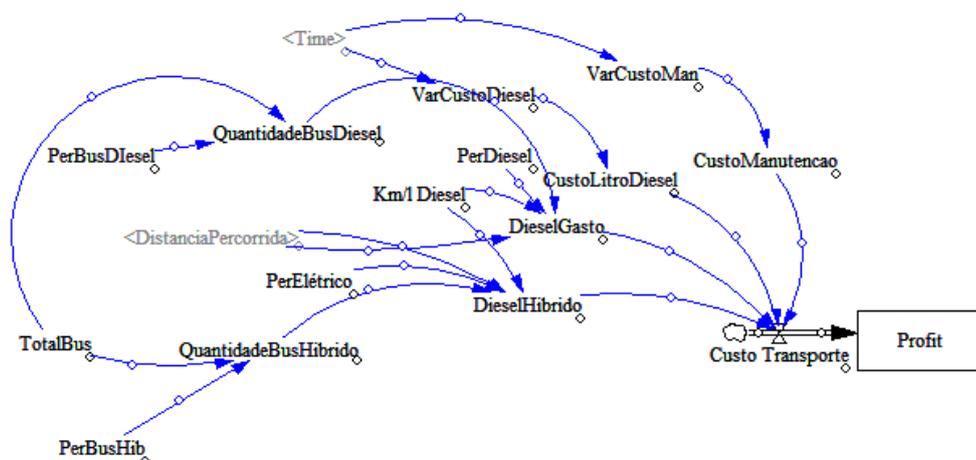
Fonte: Adaptado de D'Agosto, Gonçalves e Almeida (2017); Dallmann (2019).

A Tabela 22 apresentou a média dos valores utilizados para quantificar as equações desenvolvidas neste estudo. Com base nos dados referentes a operação dos ônibus elétricos utilizados na simulação, o modelo desenvolvido será apresentado na seção a seguir.

Em relação ao modelo financeiro, o modelo desenvolvido foi dividido em três partes para uma melhor compreensão. Na Figura 4 será apresentada a interação para apresentar os *inputs* do fluxo “Custo Transporte”. Previamente pelos dados coletados foram inseridos a quantidade de ônibus que cumprem a operação da linha analisada na variável “**TotalBus**”. Esse fluxo não armazena os custos relativos aos ônibus elétricos puro, apenas aos ônibus híbridos. A variável “**PerBusDiesel**” e “**PerElétrico**” dividem o percentual do motor a diesel ou elétrico, estes valores são alterados conforme o cenário projetado.

² Foram utilizados dados de antes da pandemia, portanto no ano de 2019.

Figura 29 – Fluxo Custo Transporte



Fonte: Autor (2022).

Pela Figura 30 percebe-se quatro variáveis auxiliares importantes. As variáveis auxiliares são as seguintes:

- Diesel Híbrido: Variável que recebe a quantidade de diesel consumido pelo motor dos ônibus híbridos utilizados na simulação;
- Diesel Gasto: Recebe o consumo de diesel dos ônibus sem nenhum percentual elétrico, só o consumo dos veículos puramente movidos a diesel são setados nesta variável;
- CustoSustentacao: Responsável por armazenar o custo (em reais) do litro do diesel, a variação no custo do litro é inserido na variável auxiliar “**VarCustoDiesel**”;
- CustoSustentacao: Responsável por inserir no modelo os dados da manutenção por ônibus coletado diretamente na associação de transportes.

Outras variáveis são usadas no modelo, como por exemplo “**DistânciaPercorrida**” e “**Km/l Diesel**”, ambas são variáveis utilizadas para medir o consumo dos ônibus. As principais equações do fluxo estão expostas no Quadro 10.

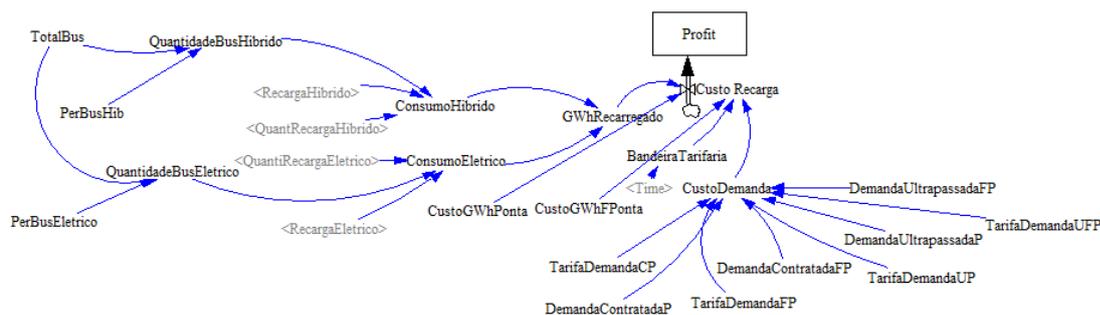
Quadro 8 – Modelo Equações Fluxo Custo Transporte

6.	$QuantidadeBusDiesel = TotalBus * PerBusDiesel$	
7.	$DieselHibrido = (QuantidadeBusHibrido * (DistanciaPercorrida * "Km/l Diesel")) - (QuantidadeBusHibrido * (PerElétrico * (DistanciaPercorrida * "Km/l Diesel")))$	
8.	$DieselGasto = (QuantidadeBusDiesel * (DistanciaPercorrida * "Km/l Diesel")) - (QuantidadeBusDiesel * (PerDiesel * (DistanciaPercorrida * "Km/l Diesel")))$	
9.	$CustoLitroDiesel = VarCustoDiesel * 2.99$	
10.	$Custo Transporte = (CustoLitroDiesel * (DieselGasto + DieselHibrido)) + CustoManutencao$	

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

O fluxo custo recarga é exposto pela Figura 31. Este fluxo é responsável por calcular o gasto com o consumo da energia elétrica dos ônibus elétricos projetados na simulação.

Figura 30 – Fluxo Custo Recarga



Fonte: Autor (2022).

As variáveis auxiliares “**PerBusEletrico**” representa o percentual dos ônibus puramente elétrico, ou seja, cem por cento elétrico. Por sua vez a auxiliar “**PerbusHib**” é responsável por inserir o percentual de eletrificação do ônibus híbrido. As variáveis “**ConsumoHibrido**” e “**ConsumoEletrico**” tem o objetivo de armazenar o consumo elétrico dos veículos, eles possuem como variáveis de imput a quantidade de recargar realizadas mensalmente (**QuantRecargaElétrico**) e a quantidade de Gw por recarga (**Recargaeletrico**; **RecargaHíbrido**). As interações das variáveis com o consumo elétrico são somadas na variável “**GWhRecarregado**” possibilitando o modelo calcular o GWh total consumido mensalmente.

Para calcular o custo de cada GW desenvolveu-se a variável “**CustoDemanda**”. Para ter o valor mais próximo da realidade foi dividido os valores em fora de ponta e ponta. O período fora ponta compreende o período do dia onde o consumo de energia elétrica é mais baixo, ou seja, a capacidade máxima das linhas de transmissão de energia está longe de ser atingida. Durante este período, as tarifas de energia elétrica e demanda não sofrem nenhum acréscimo

(CEEE, 2022). No período de consumo ponta, o valor da tarifa de energia e demanda chega a três vezes o valor da tarifa cobrada nas demais horas do dia. Esse aumento nas tarifas ocorre, principalmente, como argumento de incentivo ao não consumo de energia elétrica em um momento de pico (CEEE, 2022). As principais equações estão expostas no Quadro 1.

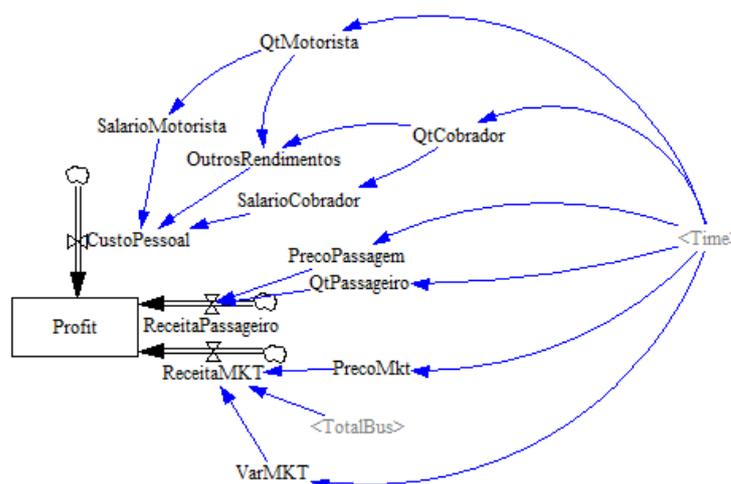
Quadro 9 – Modelo Equações Fluxo Custo Recarga

1. $\text{ConsumoHibridoDieselHibrido} = \text{QuantidadeBusHibrido} * (\text{QuantRecargaHibrido} * \text{RecargaHibrido})$
2. $\text{ConsumoElettrico} = \text{QuantidadeBusElettrico} * (\text{QuantiRecargaElettrico} * \text{RecargaElettrico})$
3. $\text{GWhRecarregado} = \text{ConsumoElettrico} + \text{ConsumoHibrido}$
4. $\text{Custo Recarga} = (\text{GWhRecarregado} * \text{CustoDemanda}) + (\text{GWhRecarregado} * \text{CustoGWhFPonta}) + (\text{GWhRecarregado} * \text{CustoGWhPonta}) + \text{BandeiraTarifaria}$
5. $\text{CustoDemanda} = (\text{DemandaContratadaFP} * \text{TarifaDemandaFP}) + (\text{DemandaContratadaP} * \text{TarifaDemandaCP}) + (\text{DemandaUltrapassadaFP} * \text{TarifaDemandaUFP}) + (\text{DemandaUltrapassadaP} * \text{TarifaDemandaUP})$

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Por fim na Figura 32, apresenta-se a representação da lógica desenvolvida para inserir o comportamento do custo de mão de obra e as receitas da associação de transportes. Na figura 6 são expostos os fluxos “**CustoPessoal**”, “**ReceitaPassageiro**” e “**ReceitaMKT**”.

Figura 31 – Fluxos Custo Pessoal e Receitas



Fonte: Autor (2022)

O fluxo “**CustoPessoal**” é responsável por armazenar os valores relativos aos funcionários das empresas de transporte urbano pertencentes a associação parceira do estudo. Ele é composto das variáveis auxiliares “**SalarioMotorista**”, “**SalarioCobrador**”,

“OutrosRendimentos”, “Qtmotorista” e “Qtcobrador”. As equações relativas a este fluxo estão expostas no Quadro 12.

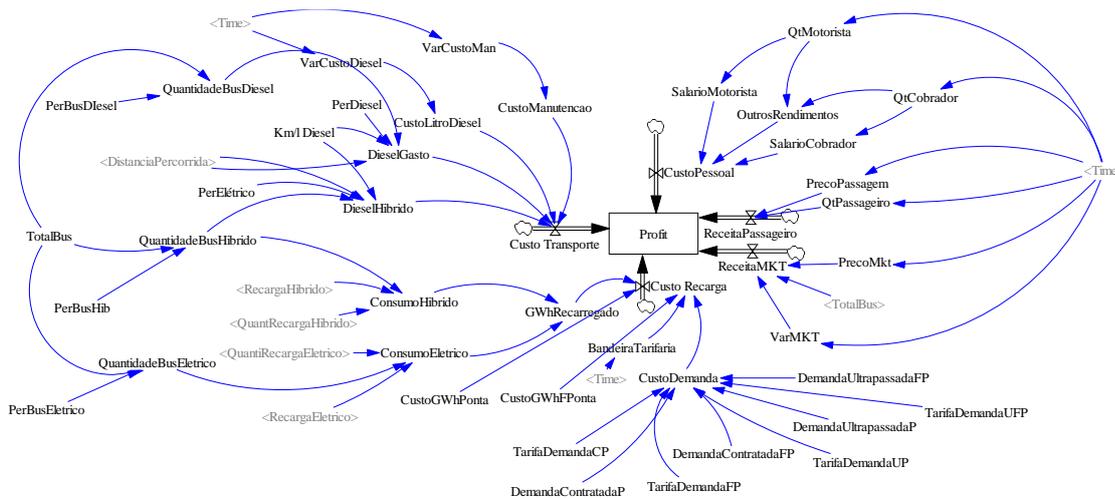
Quadro 10 – Modelo Equações Fluxo Custo Recarga

1. $CustoPessoal = SalarioMotorista + SalarioCobrador + OutrosRendimentos$
2. $OutrosRendimentos = (120 * QtCobrador) + (QtMotorista * 160)$
3. $SalarioCobrador = 1500 * QtCobrador$
4. $ReceitaPassageiro = QtPassageiro * PrecoPassagem$
5. $ReceitaMKT = ((PrecoMkt * VarMKT) + PrecoMkt) * TotalBus$

Fonte: Elaborado pelo Autor (2022).

Na Figura 33, será apresentado o modelo computacional para analisar o impacto financeiro para a inserção dos ônibus elétricos no transporte urbano da cidade estudada.

Figura 32 – Modelo impacto financeiro ônibus elétrico

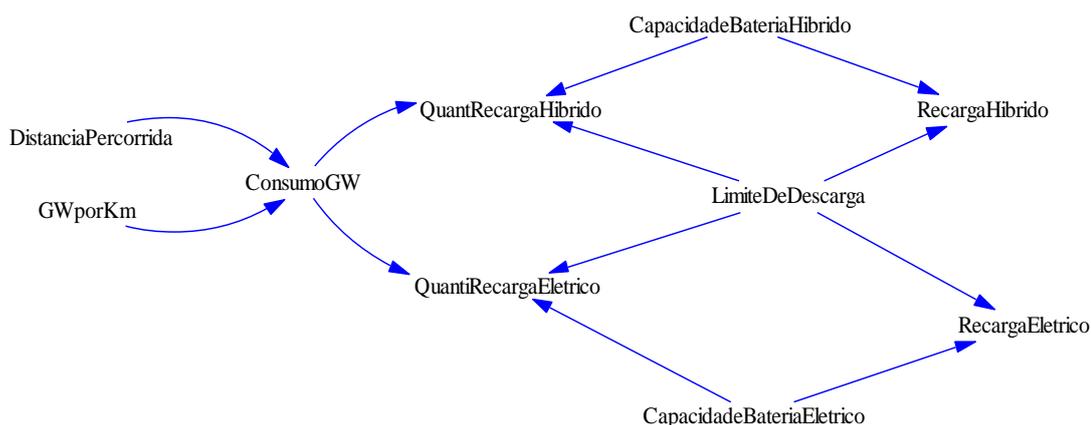


Fonte: Autor (2022).

A Figura 33 representa o modelo computacional desenvolvido. Ele é composto por uma variável de estoque chamada “**Profit**”, ela torna possível calcular o acúmulo do gasto com o transporte urbano e possibilita o cálculo do lucro para as empresas em caso de inserirem ônibus elétricos. A variável de estoque é alimentada por dados oriundos de cinco fluxos. Cada fluxo possui a sua importância. O fluxo “**Custo Transporte**” é responsável por armazenar o resultado da lógica das variáveis mapeadas que impactam o custo do transporte atual, ou seja, com predominância dos veículos movidos a combustão interna. O custo relacionado aos funcionários das empresas pertencentes a associação parceira do estudo, está armazenado no

fluxo “**CustoPessoal**”. O fluxo mais complexo é o “**CustoRecarga**” já que demanda de diferentes taxas pelo uso de energia. Em suma para calcular as tarifas, a agência (ANEEL) leva em consideração três principais custos: geração, transporte e encargos. A combinação desses fatores com outras variáveis auxiliares relativas aos ônibus elétricos (valores modificados em cada cenário proposto) apresentará o custo total pela recarga. Os cenários gerados neste estudo foram projetados para garantir o comportamento do transporte urbano atual, a inserção de ônibus elétrico não diminuirá nem aumentará a quantidade de veículos. Por fim duas receitas são calculadas nos fluxos “**Receitapassageiro**” e “**ReceitaMKT**”. Na Figura 34, será apresentada as simulações das recargas dos ônibus elétricos, isso possibilita a simulação em qualquer cidade brasileira.

Figura 33 – Modelo de consumo elétrico



Fonte: Autor (2022).

A variável auxiliar “**LimiteDeDescarga**” é usada para limitar o mínimo de bateria que um veículo deve possuir de carga, no modelo foi usado a sugestão da BYD que cada vez que a bateria atinja 40% o ônibus volte para recarregar completamente a bateria. As variáveis “**CapacidadeBateriaEletrico**” e “**CapacidadeBateriaHibrido**” são responsáveis por armazenar o total de GW possuem as baterias dos ônibus simulados. A interação entre o limite e a capacidade com o consumo irá resultar na quantidade de recarga dos veículos.

Apresentados os modelos de dinâmica de sistemas desenvolvidos a próxima seção apresenta o experimento e análise dos resultados.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ELETRIFICAÇÃO DE ENTREGAS VIA DELIVERY

A questão da mobilidade urbana e assim as motos elétricas ganham espaço no mercado automobilístico. Países asiáticos despontam em estudos com esse tipo de veículos. Chen et al (2019) destaca que países como Taiwan, Índia e China são considerados os locais com pesquisas mais avançadas e com maior incentivo do governo para a inserção das motos elétricas.

Em muitas cidades em desenvolvimento, a motocicleta é um importante meio de transporte, para trabalhadores e estudantes com baixa renda, devido aos seus baixos custos de aquisição e custos operacionais (KOOSSALAPEEROMA et al; 2019). As motocicletas não apenas usam o espaço de forma eficiente devido ao seu tamanho e capacidade de manobra (Yeung et al., 2015; Adnan, 2014), mas é provável que sua eficiência aumente com a participação das motocicletas no trânsito (CHEN et al., 2019).

Em áreas metropolitanas densamente povoadas, a motocicleta é um importante meio de transporte. A disseminação de motocicletas elétricas tem um impacto significativo na conservação de energia, redução de dióxido de carbono e redução da poluição do ar nas grandes cidades (HUANG; KUO; CHUOU, 2018). Os autores destacam ainda destacam:

Atualmente, as principais cidades do Japão, Europa e Estados Unidos desenvolveram ativamente o transporte de curta distância de motocicleta elétrica. Por exemplo, o Japão planejava trocar 85.000 motocicletas postais de gasolina para elétrica em 2018 e instalar 25.000 estações de troca de baterias nos correios do país. Algumas cidades estão desenvolvendo ativamente serviços de aluguel de compartilhamento de motocicletas elétricas, como Paris (cityscoot 1000), São Francisco (scoot networks 400), Barcelona (Cooltra/Yugo 561) e Berlim (Coup 1000).

Segundo Liu e Lai (2020) de 2020 a 2023, a taxa de crescimento anual composta da motocicleta elétrica global é de 12,3%, que atingirá 845.000 unidades em 2023, por exemplo, no primeiro semestre de 2020, a participação de mercado da motocicleta elétrica de Taiwan representa 5,3% das vendas globais, conforme mostrado na figura 35. Atualmente, a pesquisa sobre consumo de combustível e redução de emissões de motocicletas concentra-se no desenvolvimento de tecnologias inovadoras de baterias, na identificação de opções de energia mais limpas e no desenho de políticas de transporte e uso de energia para motocicletas.

A motocicleta elétrica é uma tecnologia inovadora interessante que pode substituir a motocicleta a gasolina existente. Tem um motor mais eficiente, consome menos energia e não produz emissões (TUAYHARN et al, 2015). Segundo Chen et al (2019) a motocicleta elétrica

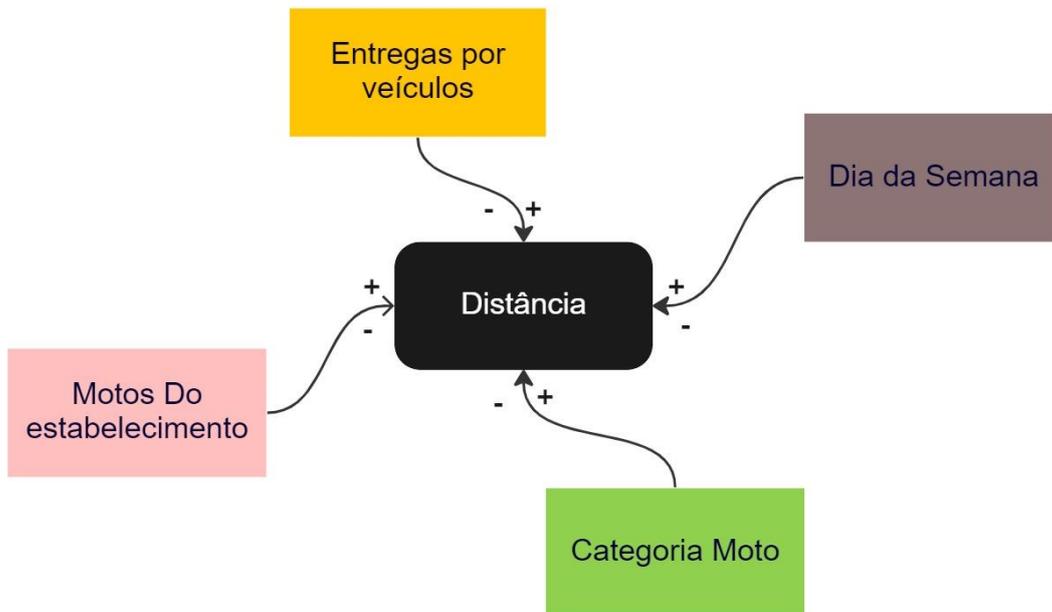
consome sete vezes menos energia e emite duas vezes menos CO₂ equivalente do que a motocicleta a combustão interna.

A troca de motocicletas a gasolina por elétricas melhoraria a qualidade do ar local e reduziria um dos efeitos adversos mais importantes associados às motocicletas (GUERRA, 2019). Embora o impacto na poluição global e no consumo de combustíveis fósseis dependa da produção de eletricidade e da substituição de veículos (HANNAN et al, 2018), a transição para motocicletas elétricas também pode apoiar os esforços de eliminação gradual dos combustíveis fósseis.

À medida que as pessoas prestam atenção à proteção ambiental, as motocicletas elétricas são cada vez mais populares devido às suas baixas emissões (Song et al., 2017a, 2017b). Em comparação com os veículos convencionais, as vantagens mais importantes das motocicletas elétricas são que elas ajudam a reduzir as emissões dos carros, a poluição sonora urbana, economizam energia e melhoram a segurança do óleo. Ao mesmo tempo, uma motocicleta elétrica requer muito menos espaço na estrada e estacionamento do que carros, o que pode reduzir o congestionamento nas estradas e resolver efetivamente os problemas de estacionamento (HUANG; KOU; CHOU. 2018).

Com o intuito de incentivar a inserção de moto elétricas no Brasil, este capítulo irá utilizar como objeto do estudo entregas de alimentos pelo sistema delivery. O serviço de delivery realiza entregas dos pedidos realizados por um aplicativo e entrega diretamente onde o cliente deseja. Inicialmente foi desenvolvido um modelo para calcular a distância diária percorrida pelos profissionais de tele entrega dos deliveries cadastrado na plataforma estudada. Para isso foi utilizada a lógica do loop causal apresentado na Figura 35.

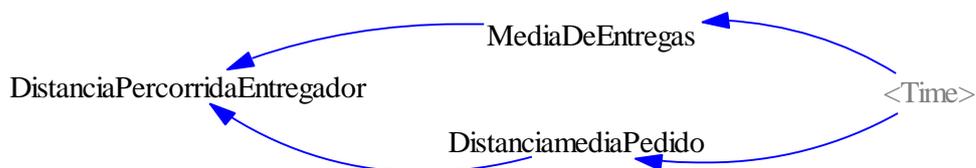
Figura 34 – Loopcausal distancia entrega



Fonte: Autor (2022).

Percebe-se pela figura anterior que a distância é influenciada pela quantidade de motos que um estabelecimento possui, cada estabelecimento possui sua política de delivery, isso influencia também a entrega por moto, existem restaurantes que fazem entrega unitária e outros que acumulam determinado números de pedidos para realizar a entrega. O dia de semana é um fator importante, tem variação conforme o dia da semana. Por fim as cilindradas (categoria moto) do veículo é uma variável que diferencia a capacidade de entregas do entregador. A Figura 36 apresenta o modelo desenvolvido, ele é formado por variáveis auxiliares e uma variável *shadow* responsável por inserir o tempo de simulação.

Figura 35 – Distância Percorrida Diária

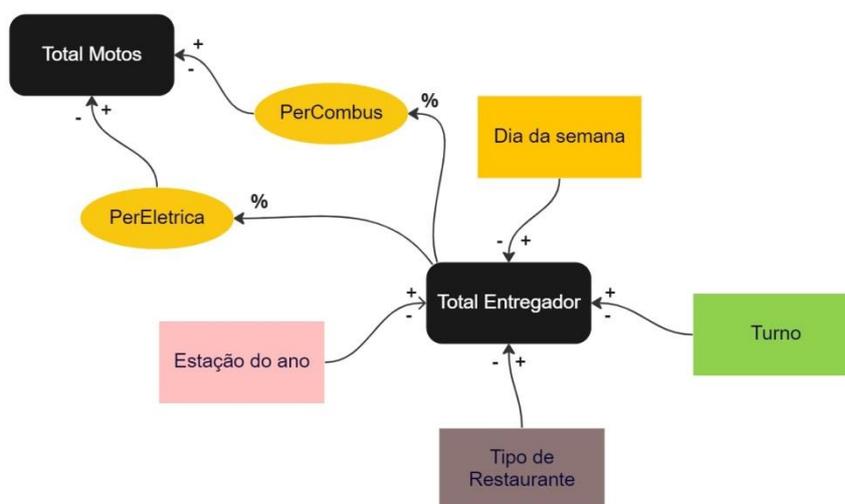


Fonte: Autor (2022).

A variável auxiliar “*MediaDeEntregas*” é responsável por calcular a média de entregas diárias solicitadas pelos estabelecimentos presentes no aplicativo analisado. Foi levado em conta a variação por dia da semana, época do ano e estação. Conforme o período a variável aumenta ou diminui o volume de entregas. Outra auxiliar presente no modelo é a variável “*DistanciamediaPedido*” onde a distância média diária é calculada. Essa variável armazenou os dados das distâncias médias de um ano, esses dados foram coletados diretamente da plataforma e de entregadores parceiros do estudo. Por fim através da multiplicação das variáveis apresentadas tornou-se possível calcular a distância que um entregador percorre diariamente, tal valor é armazenado na variável auxiliar “*DistanciaPercorridaEntregador*”.

Na sequência foi modelado a quantidade de motos responsáveis pelas entregas dos pedidos solicitados via sistema delivery. Para isso foi utilizada a lógica do loop causal apresentado na Figura 37.

Figura 36 – Loopcausal total entregador e total motos



Fonte: Autor (2022).

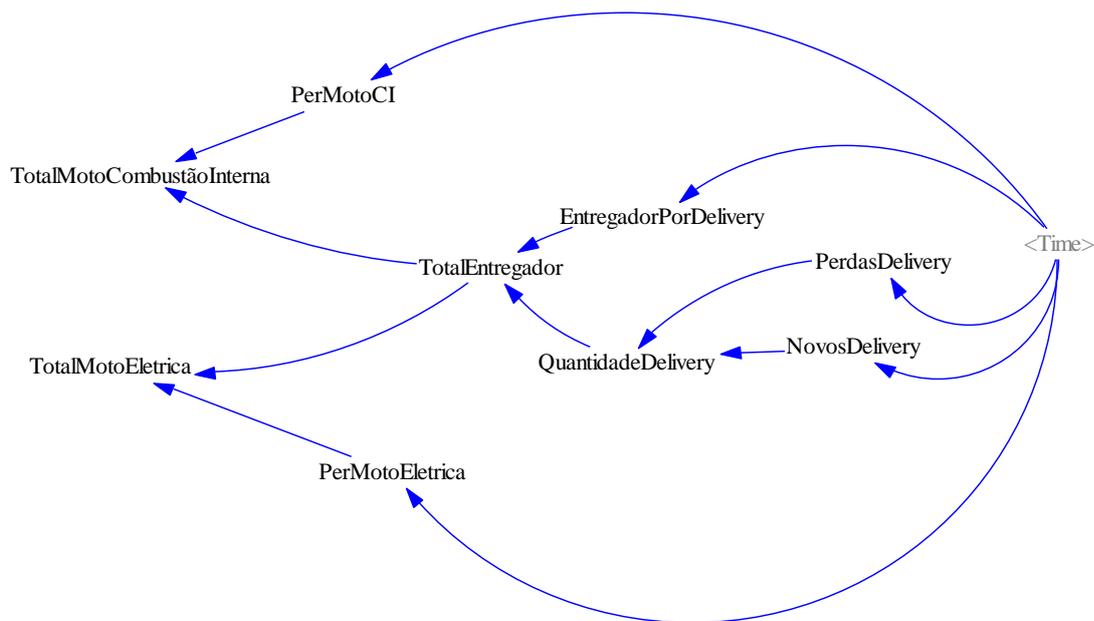
Para definir calcular o total de entregadores por restaurante é necessário entender alguns pontos:

- **Dia da semana:** frequência de entregas varia conforme o dia da semana;
- **Turno:** Foram considerados turno diurno e noturno. Existem estabelecimentos com funcionamento em apenas um turno, outros em ambos;

- **Tipo de restaurante:** Alguns estabelecimentos possuem apenas delivery, aumentando o fluxo de entrega, outros atendem ao público fazendo com que variem as entregas diárias; e,
- **Estação do ano:** Alguns estabelecimentos só possuem fluxo em determinada estação do ano, por exemplo, sorveterias que funcionam de outubro até abril. Também as estações influenciam nos fluxos de entrada dos estabelecimentos, alguns estabelecimentos vendem mais no inverno que no verão por exemplo.

A Figura 38 apresenta o modelo desenvolvido, compõe o modelo nove variáveis auxiliares e uma variável *shadow* responsável por inserir o tempo de simulação.

Figura 37 – Distância Percorrida Diária



Fonte: Autor (2022).

O mercado de delivery se tornou necessidade com a chegada da pandemia em 2020, estimulando o consumo e influenciando hábitos da população, seja pelo aumento de pedidos de um mesmo usuário, seja pela adesão de novos às plataformas de entrega de comida. Em 2021, segundo dados da Abrasel, Associação Brasileira de Bares e Restaurantes, as vendas por delivery no mercado alimentício movimentaram aproximadamente R\$35 bilhões, 20% das vendas do setor. Pensando no crescimento do setor foi gerada a variável “*NovosDelivery*” onde será armazenado os novos estabelecimentos na plataforma. Por outro lado, existem

estabelecimentos que funcionam em períodos do ano, nestes casos os dados serão armazenados na variável auxiliar “*PerdasDelivery*”. Sabe-se que no momento inicial da pesquisa existiam 300 estabelecimentos ativos cadastrados. A Equação 4 apresenta a interação destas variáveis.

Para inserir a quantidade de motos elétricas ou híbridas no modelo foram geradas duas variáveis auxiliares, “*PerMotoCI*” onde será armazenado o percentual de moto a combustão interna e “*PerMotoEletrica*” que irá inserir a quantidade de motos elétricas presentes nas entregas, as equações 7 e 8 apresentem o comportamento temporal das variáveis. O total de moto elétrica e a combustão interna é resultante das interações das variáveis com seus percentuais e com a variável auxiliar “*TotalEntregador*”, elas são representadas pelas equações 9 e 10. O Quadro 13 apresentam as equações deste modelo.

Quadro 11 – Equações Modelo Total Motos

<p>(2) $PerdasDelivery = Time([(0,0)-(365,10)],(0,0),(365,0))$ (3) $NovosDelivery = Time([(0,0)-(365,10)],(0,0),(365,0))$ (4) $EntregadorPorDelivery = [(0,0)-(365,10)],(0,8),(79,10),(80,8),(171,6),(266,4),(267,6),(365,8)$ (5) $QuantidadeDelivery = (300-PerdasDelivery)+NovosDelivery$ (6) $TotalEntregador = EntregadorPorDelivery*QuantidadeDelivery$ (7) $PerMotoCI = [(0,0)-(365,10)],(0,0.9),(365,0.9)$ (8) $PerMotoCI = Time([(0,0)-(365,10)],(0,0.1),(365,0.1))$ (9) $TotalMotoCombustãoInterna = TotalEntregador*PerMotoCI$ (10) $TotalMotoEletrica = TotalEntregador*PerMotoEletrica$</p>
--

Fonte: Autores (2022)

Para melhor precisão do modelo foi selecionado uma média de motos a combustão interna e alguns modelos de motos elétricas com o custo equivalente as motos movidas a combustível fóssil. O Quadro 14 apresenta as características dos níveis selecionados.

Quadro 12 – Características das motos utilizadas na simulação

Nome	Tipo	Observações	Nível
Honda CG 160	Combustão interna	O modelo CG 160 Start tem preço sugerido de R\$ 12.650. O motor atual é flex, que teve a capacidade aumentada para 162,7 cc e consegue fazer facilmente mais de 40 km/l com gasolina.	A
Yamaha Factor 125	Combustão interna	A Yamaha Factor 125i 2023 conta com preço competitivo frente aos itens que ela entrega e está disponível no mercado brasileiro com valor inicial de R\$ 13.390. Ela faz em torno de 40,5 km/l e é a mais utilizada na cidade simulada.	B
Honda NXR 160 Bros	Combustão interna	A Honda NXR 160 BROS é uma motocicleta fabricada pela Honda. Desde o fim de sua predecessora, 150 BROS, é uma das motos mais vendidas do Brasil. Pertence à categoria on-off road. Desde 2019 é fabricada apenas a versão ESDD. A moto está saindo agora por R\$ 15.100.	C
Shineray SE3	Elétrica	O modelo SE3 é da empresa chinesa Shinaray. Atualmente, esta moto está custando a partir de R\$ 12.990 O propulsor elétrico desta moto produz uma potência de 2.000W e faz com que moto atinja uma velocidade máxima de 50 km/h. O conjunto ainda conta com suspensão dianteira do tipo garfo telescópico.	A
Shineray SE2	Elétrica	Mais uma moto da Shineray em nossa lista das motos elétricas mais baratas do Brasil, custando em torno de treze mil reais. a velocidade máxima também é de 50 km/h. Enquanto isso, a bateria é de lítio com capacidade para 60V 24Ah. Esta moto tem autonomia de até 60 km. O tempo de recarga desta moto é de 6 a 8 horas. Aqui também iremos encontrar freis a disco na frente e atrás.	B
Voltz EV1 Sport	Elétrica	A Voltz é a empresa que fabrica a EV1 Sport. Este modelo está custando hoje a partir de R\$ 14.990. Esta moto está equipada com um motor de 3.000W de potência. O modelo mais barato da linha conta apenas com uma bateria 38.4h/60V. Outro ponto positivo deste modelo é o alcance, que pode chegar a 100 km. Já a velocidade máxima é de 75 km/h. A recarga dura apenas 5 horas.	C

Fonte: Autor (2023).

O nível A das motos elétricas é uma opção mais em conta é a SE1 lítio, com bateria removível da Shineray. Possui potência máxima de 2000 Watts, com 60 quilômetros de autonomia e obtendo carga completa de sua bateria entre 6 e 8 horas em tomadas convencionais, atingindo velocidade máxima de 60 quilômetros por hora. Seu peso é menos de 90 quilos (HABIBIE; SUTOPO, 2020).

Além da Voltz (Nível C), outras marcas vêm ganhando destaque na intenção de compra, como a Aima, e a Shineray (ELLIS, 2022). Alguns modelos de motocicletas elétricas vêm agradando o mercado, uma delas é a Voltz EVS, com autonomia que pode chegar aos 180 quilômetros em uso das duas baterias e 100 quilômetros com só uma bateria em uso, com uma potência que permite atingir os 120 quilômetros por hora, (NUNES, 2022).

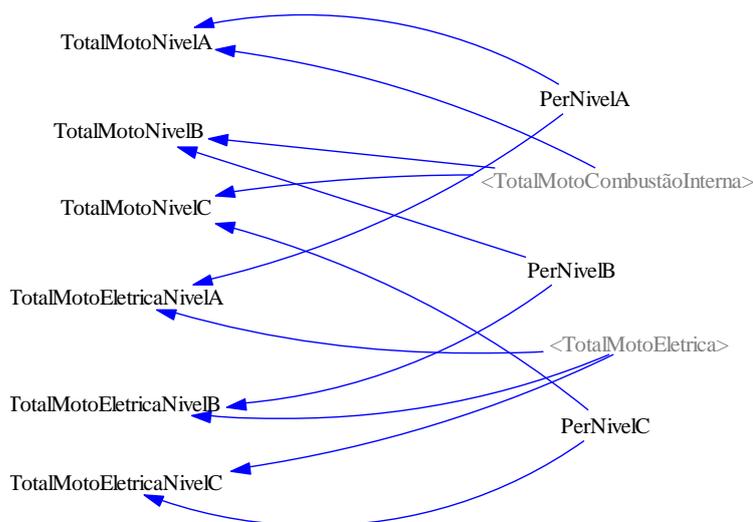
O consumo elétrico das motos utilizadas no estudo seguiu as pesquisas de Huang, Kuo e Chou (2018), Uribe et al (2023) e Yuniarto et al (2022). Os estudos desenvolveram sistemas de medição para realizar a coleta, o dispositivo foi inserido a bordo das motos elétricas. O sistema é composto por várias unidades, incluindo um registrador de dados para processamento

e registro coletados dados, sensor de velocidade da roda traseira para medir a velocidade e a corrente elétrica e sensor de tensão para medir o consumo de energia. As equações utilizadas pelos pesquisadores armazenaram a potência elétrica (watts, W), tensão elétrica (volts, V) e corrente elétrica (ampères, A). Em seguida, a energia elétrica foi convertida em consumo de energia elétrica. O consumo de energia elétrica foi calculado multiplicando a potência elétrica pelo tempo de medição.

Embora as motocicletas elétricas Nível C não emitissem emissões de gases de escape, a energia elétrica utilizada resultou em emissões de CO₂ devido à geração de eletricidade pela usina elétrica. O Ministério de Minas e Energias relatou que a geração de eletricidade no Brasil emitiu 0,506 kgCO₂ /kWh em média em 2021 (MME, 2021). Assim, este valor foi multiplicado pela energia consumida por unidade de distância para estimar as emissões de CO₂ para a mesma. Para a motocicleta a gasolina ou híbrida, o consumo de combustível e as emissões de CO₂ foram usados os dados de Murtiningrum, Darmawan e Wong (2022) e Kusalphirom et al (2022).

Em relação ao modelo dos níveis a Figura x apresenta as variáveis e suas relações, o modelo possui nove variáveis auxiliares e duas variáveis presentes em outro modelo já apresentado anteriormente, para isso foi utilizado a variável *shadow* que é capaz de replicar a variável sem causar duplicação de informação nas entradas das variáveis.

Figura 38 – Total de motos por nível



Fonte: Autor (2022).

As motos elétricas e a combustão interna foram separadas porem o comportamento de percentual por nível foi mantida, o Quadro 15 apresenta as equações desenvolvidas. As equações 11-13 apresentam a função RANDOM UNIFORM fornecem valores aleatórios dentro dos parâmetros indicados. Foi utilizado esta variável para auxiliar a manter a precisão do modelo, já que o comportamento de compra de cada um dos níveis não ficou claro na modelagem. As variáveis onde serão utilizados a ferramenta RANDOM UNIFORM a variação está condicionada pelos parâmetros média e desvio padrão.

Quadro 13 – Equações Modelo Total Motos

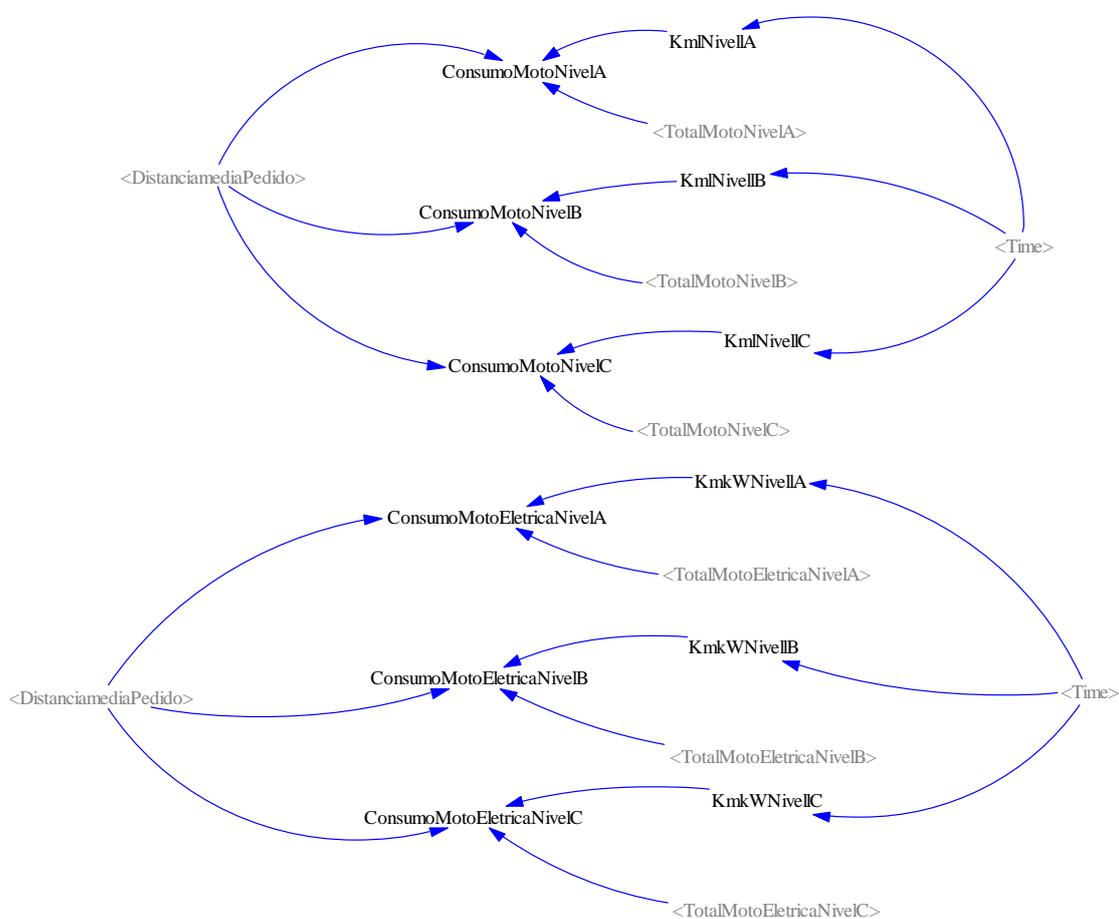
<p>(11) $PerNivelA = RANDOM\ UNIFORM(\{0,5\}, \{0,7\}, \{0,6\})$ (12) $PerNivelB = RANDOM\ UNIFORM(\{0,3\}, \{0,5\}, \{0,4\})$ (13) $PerNivelC = RANDOM\ UNIFORM(\{0,01\}, \{0,1\}, \{0,05\})$ (14) $TotalMotoNivelA = TotalMotoCombustãoInterna * PerNivelA$ (15) $TotalMotoNivelB = TotalMotoCombustãoInterna * PerNivelB$ (16) $TotalMotoNivelC = TotalMotoCombustãoInterna * PerNivelC$ (17) $TotalMotoEletricaNivelA = TotalMotoEletrica * PerNivelA$ (18) $TotalMotoEletricaNivelB = TotalMotoEletrica * PerNivelB$ (19) $TotalMotoEletricaNivelC = TotalMotoEletrica * PerNivelC$</p>

Fonte: Autores (2022).

As equações 14-19 são responsáveis por armazenar os totais de motos por nível, seja ela elétrica ou de combustão interna. Esse valor é calculado pela multiplicação do total de moto por tipo e pelo percentual por nível. Outro ponto a ser tratado é em relação ao consumo das motos, esta etapa segue a lógica apresentada na Figura 40.

As variáveis auxiliar com o prefixo ConsumoMotoXXX armazenam o total do consumo por tipo e nível da moto, ela é calculada através do rendimento do motor. Em relação as motos elétricas são calculadas utilizando a unidade Kw por quilometro e Km por litro as motos a combustão interna. As equações relativas ao consumo podem ser visualizadas no Quadro 16. As Equações 20-22 são responsáveis por armazenar a média de rendimento dos motores das motos a combustão interna, já as variáveis 26-28 representam o rendimento das baterias das motos elétricas.

Figura 39 – Consumo das motos



Fonte: Autor (2022)

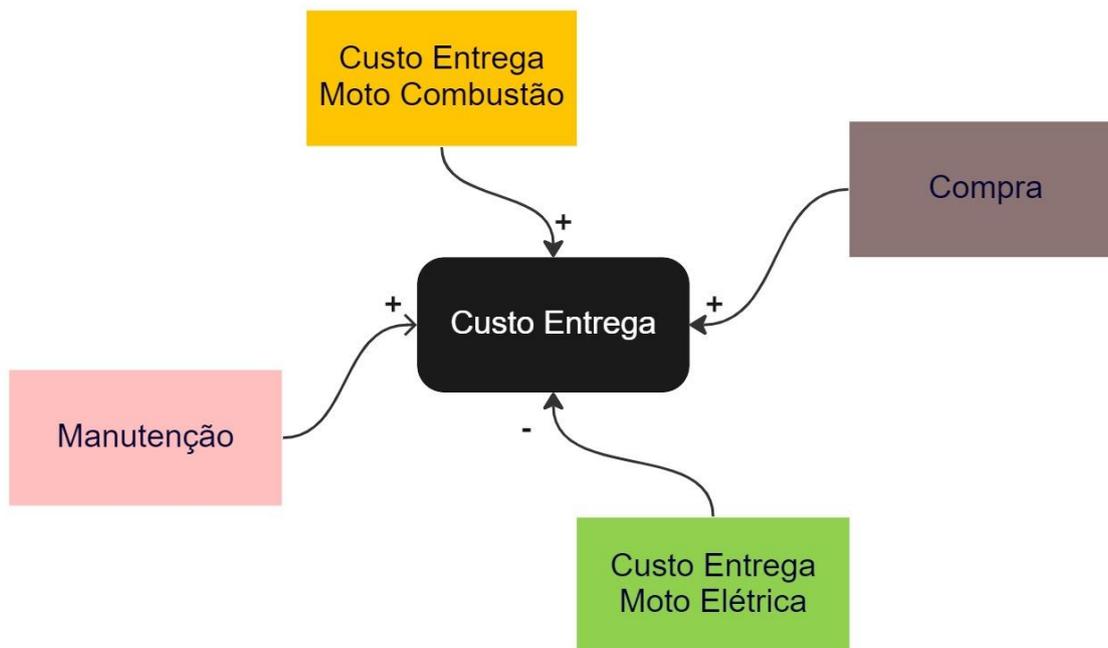
Quadro 14 – Equações Modelo Total Motos

- (20) $KmlNivelA = [(0,0)-(36564,600)],(0,60),(365,64)$)
 (21) $KmlNivelB = [(0,0)-(365,60)],(0,55),(365,59)$)
 (22) $KmlNivelC = [(0,0)-(365,50)],(0,40),(365,42)$)
 (23) $ConsumoMotoNivelA = TotalMotoNivelA*(DistanciamediaPedido*KmlNivelA)$
 (24) $ConsumoMotoNivelB = TotalMotoNivelB*(DistanciamediaPedido*KmlNivelB)$
 (25) $ConsumoMotoNivelC = TotalMotoNivelC*(DistanciamediaPedido*KmlNivelC)$
 (26) $KmkWNivelA = [(0,0)-(365,40)],(0,30),(365,35)$)
 (27) $KmkWNivelB = [(0,0)-(365,40)],(0,35),(365,40)$)
 (28) $KmkWNivelC = [(0,0)-(365,50)],(0,40),(365,45)$)
 (29) $ConsumoMotoEletricaNivelA = TotalMotoEletricaNivelA(DistanciamediaPedido*KmkWNivelA)$
 (30) $ConsumoMotoEletricaNivelB = TotalMotoEletricaNivelB*(DistanciamediaPedido*KmkWNivelB)$
 (31) $ConsumoMotoEletricaNivelC = TotalMotoEletricaNivelC*(DistanciamediaPedido*KmkWNivelC)$

Fonte: Autores (2022).

Por fim será apresentado os modelos responsáveis por coletar os dados a serem analisados. Inicialmente será apresentado o modelo que armazena o custo relativo a entrega, esta etapa segue a lógica do loop causal apresentado na Figura 41.

Figura 40 – Loopcausal custo



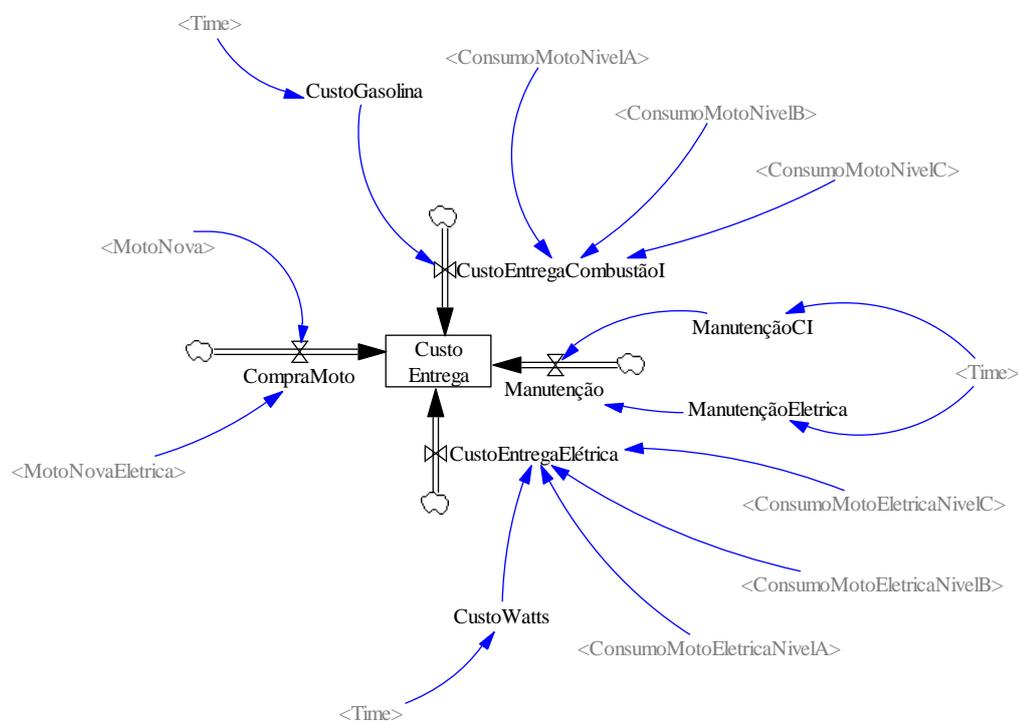
Fonte: Autor (2022).

Após o desenvolvimento da lógica foi gerado o modelo computacional que pode ser visualizado na Figura 42.

O modelo de custo é baseado na lógica de fluxo e estoque. O mesmo possui quatro fluxos de entrada:

1. CompraMoto: Esse fluxo irá armazenar o comportamento de compra ou troca de motos, sendo importante para a variação dos dados nos cenários a serem analisados;
2. CustoEntregaCombustãoI: Fluxo responsável por inserir os valores relativos as motos a combustão interna, ele irá calcular o gasto com gasolina total diária;
3. CustoEntregaElétrica: Fluxo que armazena o custo da entrega das motos elétricas, o valor da energia varia conforme as épocas do ano; e,
4. Manutenção: Soma os custos de manutenção dos veículos que executam as entregas.

Figura 41 – Custo Entrega



Fonte: Autor (2022).

Em relação ao custo da moto elétrica Saraiva (2016), cita o preço alto de motocicletas elétricas, sendo 3,7 vezes mais cara do que motos a combustão, por conta do câmbio e taxas de importação dos componentes elétricos, podendo reduzir nos próximos anos, com a queda do valor dos componentes elétricos, além do desenvolvimento de novas tecnologias, com destaque para baterias.

A eficiência desses motores no consumo de combustível, no caso da eletricidade, é maior do que os movidos a combustão interna de combustíveis fósseis, chegando a 90% de eficiência no caso dos elétricos de acordo com o ponto de operação. O torque automotivo é a força que o motor consegue gerar, ou seja, quanto maior o torque, maior a força. Segundo Nunes (2022) as motocicletas elétricas no Brasil custam entre R\$ 9.400,00 até R\$ 21.900,00.

As motocicletas elétricas são mais caras que as de combustão interna, mas oferecem vantagens para o consumidor e para o meio ambiente, como a não emissão de gases poluentes. São mais silenciosos, requerem pouca manutenção devido ao reduzido número de peças em sua estrutura e motor, além de serem econômicas e consomem pouca energia (NUNES, 2022)

De acordo com Sangeetha et al (2019) o consumo de energia da motocicleta elétrica é de 35,96 km/kWh ou 2,8 kW h/100 km. O consumo de energia da motocicleta a gasolina é de 41,16 km/L ou 2,43 L /100 km (4,38 km/kWh ou 22,84 kW h/100 km). A moto elétrica consome aproximadamente oito vezes menos energia do que a motocicleta a gasolina. As Equações podem ser visualizadas no Quadro 17 a seguir.

Quadro 15 – Equações Modelo Custo Entrega

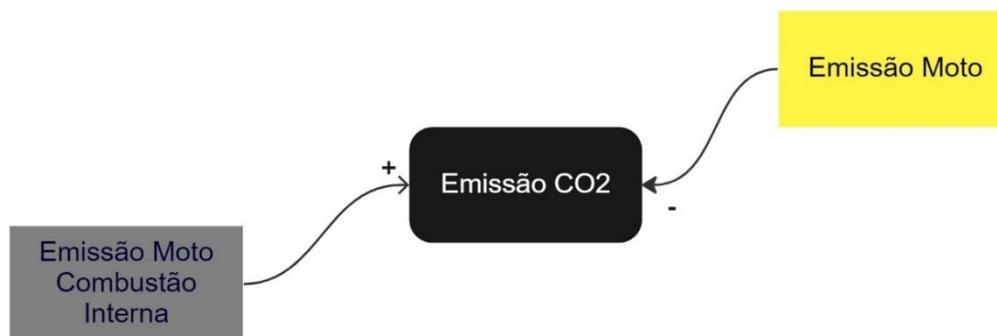
<p>(32) $\text{CustoGasolina} = ((0,0)-(365,10)),(0,4),(365,4.87))$</p> <p>(33) $\text{CustoEntregaCombustãoI} =$ $\text{CustoGasolina} * (\text{ConsumoMotoNivelA} + \text{ConsumoMotoNivelB} + \text{ConsumoMotoNivelC})$</p> <p>(34) $\text{CompraMoto} = \text{ValormedioCompraNANBNC}$</p> <p>(35) $\text{ManutençãoCI} = \text{Time}([(0,0)-(365,50)],(0,40),(365,45))$</p> <p>(36) $\text{CustoWatts} = \text{Time}([(0,0)-(365,10)],(0,0.06),(365,0.08))$</p> <p>(37) $\text{CustoEntregaElétrica} =$ $\text{CustoWatts} * (\text{ConsumoMotoEletricaNivelA} + \text{ConsumoMotoEletricaNivelB} + \text{ConsumoMotoEletricaNivelC})$</p> <p>(38) $\text{Manutenção} = \text{ManutençãoCI} + \text{ManutençãoEletrica}$</p> <p>(39) $\text{CustoEntrega} = \text{CompraMoto} + \text{CustoEntregaCombustãoI} + \text{CustoEntregaElétrica} + \text{Manutenção}$</p>

Fonte: Autores (2022).

Outro ponto a ser analisado é o impacto ao meio ambiente. Os veículos elétricos têm atraído a atenção porque reduzem efetivamente a demanda de petróleo e as emissões de gases. As pesquisas sobre veículos elétricos focam em objetivos como redução de custos e emissões de gases de efeito estufa e aumento da eficiência de conversão de energia (SUN; XIONG, 2015; HANNAN; HOQUE, 2018).

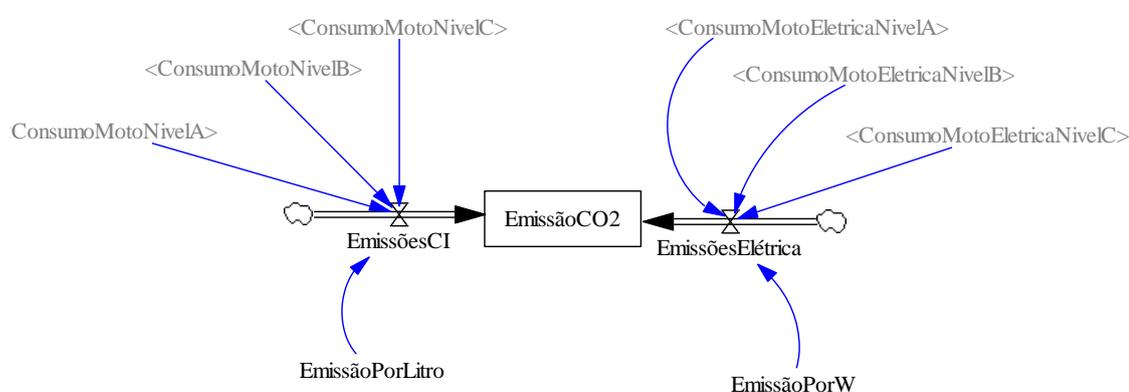
Serão analisadas as emissões por cada cenário projetado e simulado esta etapa segue a lógica do loop causal apresentado na Figura 43. Após o desenvolvimento da lógica foi gerado o modelo computacional que pode ser visualizado na Figura 44.

Figura 42 – Loopcausal Emissão



Fonte: Autor (2022).

Figura 43 – Emissão



Fonte: Autor (2022).

O modelo de estoque possui dois fluxos de entrada. O fluxo “*EmissõesCI*” armazenam as emissões das motos a combustão interna, ele é representado pela equação 40. Já a variável para armazenar as emissões relativas das motos elétricas é a equação 41, as motos nível a e b são modelo híbrido, portanto possuem parte de moto a gasolina. O Quadro a seguir apresenta as equações deste modelo.

Com debates sobre sustentabilidade e fontes alternativas de energia em contrapartida aos combustíveis fósseis, pode despontar no mercado a motocicleta elétrica, que tem potencial de contribuir para a temática de desenvolvimento sustentável (FIRMANSYAH et al, 2022). Com um espaço maior e necessário de inovações, as motocicletas elétricas podem começar a adquirir força no mercado brasileiro, quando se trata de fontes alternativas de energia que venham a ser mais baratas e menos poluentes do que os atuais combustíveis fósseis (MURTININGRUM; DARMAWAN; WONG, 2022). Os autores ainda acreditam ter uma

escassez de combustíveis fósseis se não houver mudanças nas matrizes energéticas e assim, deixar as gerações futuras com fontes limitadas de energia.

Quadro 16 – Equações Modelo Emissão

<p>(40) $Emissões_{CI} = (ConsumoMotoNivelA * ConsumoMotoNivelB * ConsumoMotoNivelC) * Emiss\tilde{a}oPorLitro$ (41) $Emiss\tilde{a}oEl\acute{e}trica =$ $(ConsumoMotoEletricaNivelA + ConsumoMotoEletricaNivelB + ConsumoMotoEletricaNivelC) * Emiss\tilde{a}oPorW$ (42) $Emiss\tilde{a}oCO2 = Emiss\tilde{a}oCI + Emiss\tilde{a}oEl\acute{e}trica$</p>

Fonte: Autores (2022).

As motocicletas começaram a ganhar força no mercado no Brasil desde a década de 90, quando a economia começou a ser liberalizada e privatizada. Várias motocicletas eram de produção nacional e outras importadas dos Estados Unidos e do Japão e eram utilizadas para o lazer de pessoas de maior poder aquisitivo. Após o Plano Real e a liberalização da economia em 1994, o Brasil passou a conviver com a desregulamentação e as privatizações, que afetaram o país e a distribuição de seus recursos (FIRMANSYAH et al, 2022).

As motocicletas consomem menos combustível, ocupam menos espaço em estacionamentos, são confortáveis para se locomover no trânsito e seus custos de aquisição e operação são baixos em comparação com os carros, o que leva ao aumento da frota de carros (ALVES JÚNIOR, 2017). Santos et al (2021), também citam em seu estudo aspectos como tempo, facilidade e a praticidade que o uso da motocicleta traz. Uma motivação a mais para escolha da motocicleta é ela ser compacta e permitir grande mobilidade, facilitando o acesso a alguns ambientes, gerando a economia de tempo em relação aos que gastariam com outros veículos.

4.4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

A energia é um dos principais elementos da sociedade moderna e permeia todos os setores da sociedade – economia, trabalho, meio ambiente e relações internacionais – assim como nossas próprias vidas – moradia, alimentação, saúde, transporte, lazer. Isso é necessário na produção de bens e serviços baseados em recursos naturais para satisfazer as necessidades de uma população cada vez maior (BELLUCCI, 2022)

Conforme Hinrichs et al. (2014), o fornecimento de energia, de forma adequada e confiável, também é necessário para o desenvolvimento econômico, como foi observado na

modernização do Ocidente, que passou de uma sociedade rural para outra, urbana e rica, através da utilização de modernas tecnologias firmadas em uma ampla série de avanços científicos, os quais foram energizados por combustíveis fósseis como fontes de energia.

A crescente demanda de energia em todo o mundo propiciou que grande importância fosse associada à exploração de novas fontes de energia (NOGUEIRA et al, 2022). Para garantir uma segurança energética, é necessário que os países desenvolvam novas formas de geração de energia e tecnologias que promovam o acesso à eletricidade, como vem ocorrendo em países como Alemanha, Estados Unidos, Espanha, França, Itália e Japão, que estão desenvolvendo mecanismos para a redução da dependência de combustíveis fósseis, com a introdução de energias renováveis nos seus sistemas de fornecimento de energia (CARVALHO et al., 2017).

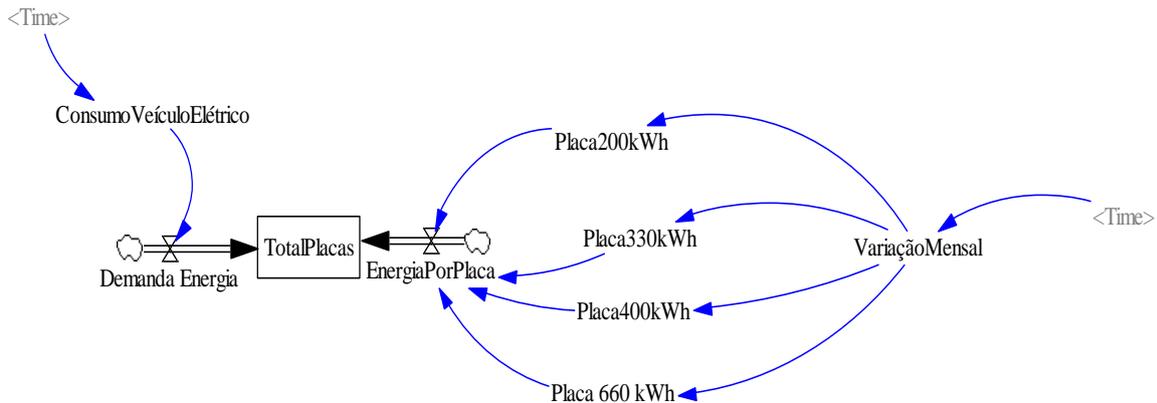
Conforme Angelis-Dimakis (2011), um exemplo de fonte renovável de energia é o sol, sendo possível a transformação direta da luz solar em energia elétrica, através do efeito fotovoltaico. A geração de energia através da conversão de energia solar diretamente em energia elétrica realizada através de células fotovoltaicas apresenta como vantagem sua simplicidade, inexistência de qualquer peça mecânica móvel, sua característica modular, os curtos prazos para instalação previstos, o elevado grau de confiabilidade dos sistemas e sua baixa manutenção (NOGUEIRA et al., 2012).

Jannuzzi et al. (2013) defende que o uso e a disseminação das tecnologias de geração de energia solar fotovoltaica são opções viáveis por três fatores: alto custo da energia residencial, grande disponibilidade de radiação solar, e redução dos preços dos módulos e painéis solares. Apesar de as células solares continuarem relativamente caras, o seu preço caiu mais de 1000 vezes de 1950 até os dias atuais (HINRICHS et al., 2014).

Sabe-se que um dos empecilhos da inserção de veículos elétricos é a geração energia para suprir o consumo dos mesmos. Portanto desenvolveu-se um modelo capaz de analisar a quantidade energia necessária para suprir os cenários apresentados anteriormente. Para gerar a energia foi escolhida a energia solar. O modelo apresentado na Figura 45 apresenta o impacto da geração fotovoltaica.

Após medir o custo de inserção das placas, foi desenvolvido um modelo computacional para analisar a quantidade de placas necessárias para suprir a demanda de energia dos modelos citados anteriormente. A Figura 44 a seguir apresenta esse modelo.

Figura 44 – Total de Placas



Fonte: Autor (2023).

O modelo foi desenvolvido na lógica de estoque e fluxo. O fluxo de entrada chamado **“Demanda Energia”** é responsável por armazenar a energia demanda dos veículos elétricos. Para fins de comparação cada cenário representará um veículo elétrico e a variável auxiliar **“Consumo Veículo Elétrico”** armazenará o valor de cada um dos modelos já simulados. Como cada modelo simulou horizontes de tempo diferentes, foi realizado uma proporção para deixar os dados com a mesma unidade temporal.

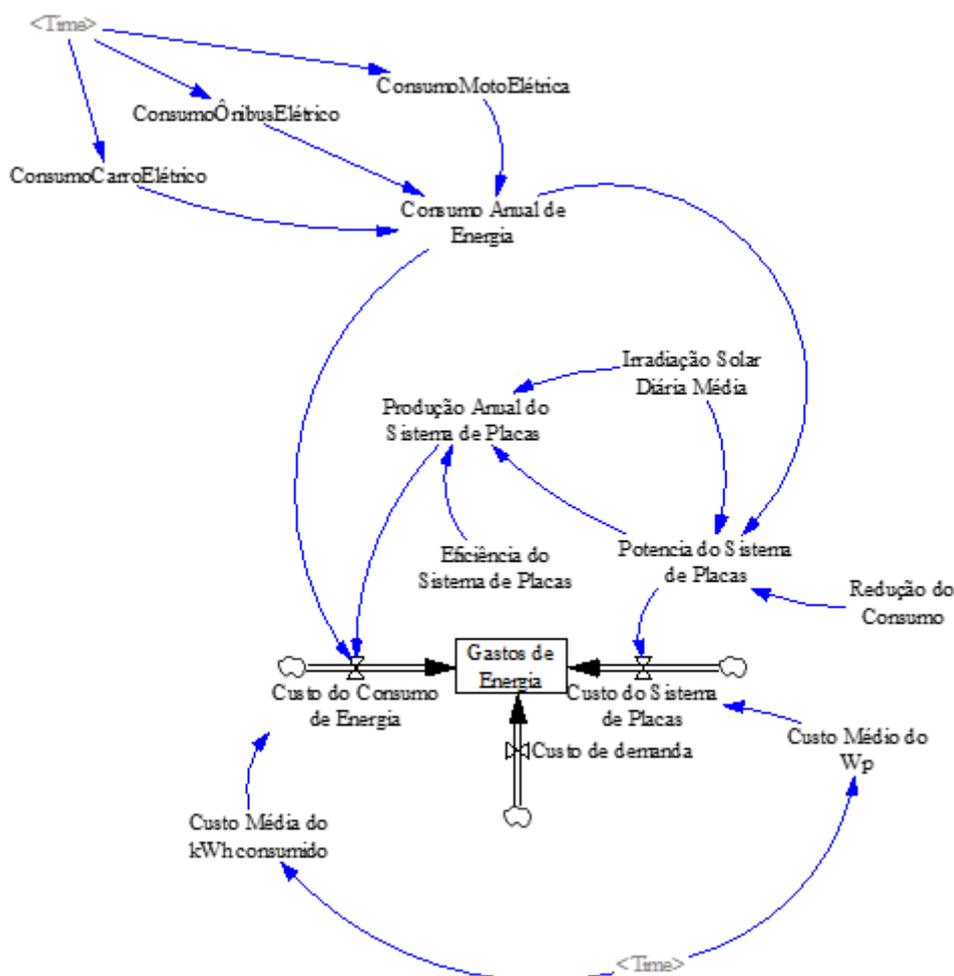
Para calcular a energia gerada pelas placas foi utilizado quatro potências de captação de energia: **“Placa 200kWh”**, **“Placa 330kWh”**, **“Placa 400kWh”** e **“Placa 660kWh”**. Por fim o fluxo **“Energia Por Placa”** armazena a média de geração de energia, que varia conforme a **“variação mensal”**. A variável de estoque **“Total Placas”** calculará, por fim, a quantidade total de placas por cenário. A seguir, o Quadro 17 apresenta as equações do modelo.

Quadro 17 – Equações do modelo de placas

$$\begin{aligned} \text{Variação Mensal} &= \text{Time} ([(0,0)-(12,10)], (0,0.88), (3,0.66), (9,0.44), (12,0.8)) \\ \text{Placa 200kWh} &= (0.27*30)*\text{Variação Mensal} \\ \text{Placa 330kWh} &= (0.45*30)*\text{Variação Mensal} \\ \text{Placa 400kWh} &= (0.55*30)*\text{Variação Mensal} \\ \text{Placa 660 kWh} &= (0.91*30)*\text{Variação Mensal} \\ \text{Energia Por Placa} &= (\text{Placa 660 kWh} + \text{Placa 200kWh} + \text{Placa 330kWh} + \text{Placa 400kWh})/4 \\ \text{Total Placas} &= \text{Demanda Energia} / \text{Energia Por Placa} \end{aligned}$$

Fonte: Autor (2023).

Figura 45 – Modelo de inserção fotovoltaica



Fonte: Autor (2023)

O modelo desenvolvido segue a lógica de estoque e fluxo. As variáveis auxiliares “ConsumoCarroElétrico”, “ConsumoônibusElétrico”, “ConsumoMotoElétrico” e “ConsumoCaminhãoElétrico” armazenam o consumo médio de energia por cada um dos modelos já apresentados no estudo. Ambos são somados na variável auxiliar “ConsumoAnualdeEnergia”. Para calcular esses valores foi realizado uma proporção entre os cenários, já que alguns modelos são baseados em dados diários e outros em dados mensais.

Em relação a variável “ProduçãoAnualdoSistemadePlacas” ela é responsável por calcular a geração de energia elétrica das placas, essa variável possibilita o cálculo de quantidade de placas necessárias para suprir a demanda de energia. O valor armazenado nesta variável é gerado através da interação de duas variáveis auxiliares. A variável “EficiênciadoSistemadePlacas” calcula quantos Wp o sistema de placas poderá gerar por dia. Já a variável “IrradiaçãoSolarDiáriaMédia” que armazena a propagação de energia sem a

necessidade de meio material. É a quantidade de radiação solar em determinado intervalo de tempo, ela é medida em watt por hora por metro quadrado.

A variável de estoque “**Gastos de energia**” é responsável por calcular o custo da implementação do sistema para suprir a demanda de energia dos modelos, ela recebe dados de entrada de três fluxos: “**CustodoConsumodeEnergia**”, “**CustodoSistemadePlacas**” e “**CustodeDemanda**”.

O Custo de Demanda representa o agregado de valores que na fatura de energia não são afetados pelo Sistema de Placas. Ele se caracteriza por ser constante, que, em tese, não se alteraria, salvo se houver uma mudança em um dos seus componentes de cálculo. O valor definido nesta constante foi de R\$3.438.291,26. No seu cálculo considerou-se o contratado de demanda de ponta e de demanda fora de ponta, as tarifas cobradas pela concessionária no mês de junho de 2018 (aplicando-se a tributação média do PIS, do COFINS e do ICMS dos últimos 12 meses), as retenções obrigatórias correspondentes a Lei nº 10.833/2003 e a contribuição de iluminação pública mensal, seus valores são discriminados no Quadro 18.

Quadro 18 – Dados utilizados para formar o valor do Custo de Demanda

Constantes	Valor
Contratado de demanda de ponta	3mW
Contratado de demanda fora de ponta	5mW
Tarifa pelo kW contratado – demanda de ponta	R\$32,28
Tarifa pelo kW contratado – demanda fora de ponta	R\$21,67
Tarifa de contribuição de iluminação pública	R\$163,28

Fonte: Autor (2023).

O Custo Médio do kWh Consumido é uma das constantes que ajudam a formar o Custo do Consumo de Energia Anual. O valor definido para esse componente na simulação foi de R\$0,55717431. Para determinar o valor do kWh consumido pago pela IES na simulação foi considerado: o consumo anual de energia de ponta e fora de ponta, as tarifas cobradas pela concessionária no mês de junho de 2018 (aplicando-se a tributação média do PIS, do COFINS e do ICMS dos últimos 12 meses), total de dias de bandeira verde, amarela, vermelha I e vermelha II de ponta e fora de ponta, fator de potência médio de ponta e fora de ponta, (últimos 12 meses), fator mínimo de potência estabelecido pela ANEEL e as retenções obrigatórias correspondentes a Lei nº 10.833/2003.

Quadro 19 – Dados Utilizados para formar o valor do custo médio do kWh Consumido

Variáveis	Valor
Consumo anual fora de ponta	1.406.669,11kWh
Tarifa do kWh de ponta consumido	14.413.877,33kWh
Tarifa do kWh fora de ponta consumido	R\$0,45257
Tarifa de transmissão do kWh de ponta	R\$0,28266
Tarifa de transmissão do kWh fora de ponta	R\$0,06167
Adicional bandeira amarela por kWh consumido	R\$0,06167
Adicional bandeira vermelha I por kWh consumido	R\$0,01000
Adicional bandeira vermelha II por kWh consumido	R\$0,03
Tarifa de consumo do kWh reativo	R\$0,05
Total de dias de bandeira verde de ponta	118,117
Total de dias de bandeira verde fora de ponta	118,677
Total de dias de bandeira amarela ponta	90,78
Total de dias de bandeira amarela fora de ponta	89,73
Total de dias de bandeira vermelha ponta	93,58
Total de dias de bandeira vermelha fora de ponta	63
Fator mínimo de potência estabelecido pela ANEEL	92,00%
Fator de potência médio de ponta	90,36%
Fator de potência médio fora de ponta	90,24%

Fonte: Autor (2023).

A unidade de medida usada para medir o Potencial do Sistema de Placas fotovoltaicas é o Watt-pico (Wp), são também admitidos utilizar seus múltiplos como quilowatt-pico (kWp) e megawatt-pico (MWp). Para se estabelecer Custo Médio do Wp realizou-se uma pesquisa de mercado, buscando-se o melhor custo– benefício dos kits de produção de energia fotovoltaicas. Optou-se pelo kit que oferecia a potência de 15,6kWp, custando R\$64.390,00. Foi agregado a esse valor o frete estimado (3,5%), o valor do projeto estimado (7%) e valor da instalação (30%) totalizando R\$90.467,95. O que resultou um valor de R\$5,79922756 por Wp. A Eficiência Estimada do Sistema de placas foi arbitrada em 83%, o valor é a taxa de eficiência padrão para um projeto.

Para definir a Irradiação Diária Solar Média foram considerados os dados do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESCESB, 2018) usando-se as coordenadas da IES. Para fazer a média ponderada entre as irradiações mensais e seus números de dias correspondentes de cada mês, utilizou-se o plano horizontal (0° N), sem inclinação, o que totalizou 4,47287671kWh/m2.dia. Os dados citados acima estão resumidos no quadro 22.

Quadro 20 – Irradiação diária solar média

Variável	Valor
Custo de Demanda	R\$3.438.291,26
Tarifa do Kwh consumido	R\$0,55717153
Consumo Anual de Energia (kWh)	15.820.546,44
Custo do kWp	R\$5,79922756
Eficiência Estimada do Sistema de Placas	83%
Irradiação Solar Diária Estimada (kWh/m ² .dia)	4,47287671

Fonte: Autor (2023).

Estabelecidas as constantes do modelo, buscar-se-á esclarecer as relações matemáticas entre os demais elementos não expostos até então. O Custo do Sistema de Placas (A) é o total de investimentos necessários para implementação do projeto fotovoltaico proposto. Para se definir esse valor leva-se em consideração a Potência do Sistema de Placas (B) e o Custo Médio do Wp (C). Por sua vez, a Potência do Sistema de Placas (B) depende Eficiência Estimada do Sistema de Placas (D), Irradiação Solar Diária Média (E) e a Redução do Consumo (F) esperada.

Até então dois elementos de causa do Custo do Consumo de Energia (G) foram apresentados: Consumo Anual de Energia (H) e Custo Médio do kWh Consumido (I). A Produção Anual do Sistema de Placas (J) é o componente faltante, que depende da Irradiação Solar Diária Média (E), Eficiência Estimada do Sistema de Placas (D) e a Potência do Sistema de Placas (B). E por último temos Gastos de Energia (K) acumulados, que é a soma do Custo do Sistema de Placas (A), Custo de Demanda e Iluminação Pública (L) e Custo de Consumo de Energia (G) anual. Abaixo segue as equações matemáticas abastecidas pelas constantes já apresentadas.

Quadro 21 – Modelo de equações

Custo do Sistema de Placas (A) = B*C
Potência do Sistema de Placas (B) = (F*H)/(E*D*365)
Produção Anual do Sistema de Placas (J) = E*B*D*365
Custo do Consumo de Energia (G) = (H-J)*I
Gastos de Energia (K) = A+L+G

Fonte: Autor (2023).

Por fim, variando os valores de Redução do Consumo, foi possível gerar alternativas de cenários de produção de energia fotovoltaica, em um panorama de quinze anos. Juntamente com tecnologias de geração de energia eólica, geotérmica e maremotriz, a energia solar tem

sido vista com bons olhos pelo menor impacto ambiental causado. Muito embora haja, por exemplo, impactos na extração e processamento do silício (componente dos painéis), depois de instaladas, as placas não geram poluição e impactos negativos ao meio ambiente. Ao longo do tempo, o custo da energia fotovoltaica vem baixando, sua popularização vem permitindo que o mercado pratique preços mais acessíveis sucessivamente. Apesar da redução do preço, os custos de implementação de projetos que utilizam essa tecnologia continuam exigindo altos investimentos para se concretizar

4.5 CASAS INTELIGENTES COM VEÍCULOS ELÉTRICOS

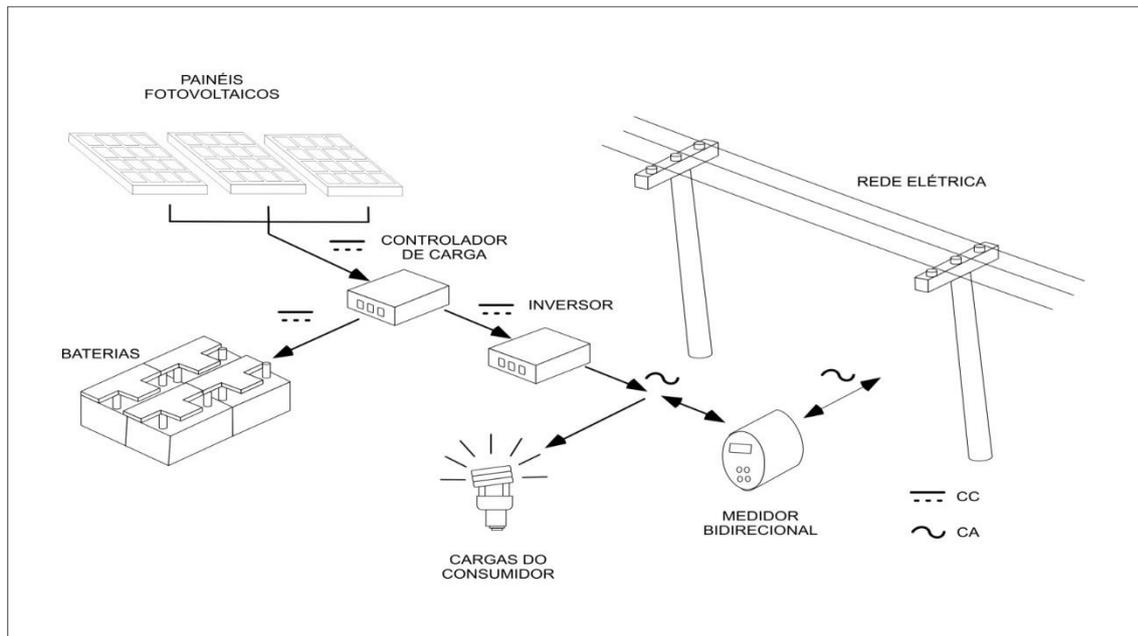
Esse capítulo irá apresentar o desenvolvimento de um modelo computacional para simular a inserção de veículos elétricos em residências. Para a geração do modelo foi necessário a construção de um ambiente computacional. Nesse ambiente serão testados diferentes cenários, tornando possível verificar os pontos positivos e negativos de cada proposta. O conceito de gerar energia próxima ao seu local de consumo foi inserido no experimento.

Produzir energia próxima ao seu local de consumo segue uma tendência de acentuado crescimento nas últimas duas décadas. Essa característica é associada à Geração Distribuída (GD), quando pequenas usinas de geração substituem ou reforçam grandes centrais de energia (em casos em que o custo da fonte, ou em que a central de energia convencional opera próximo ao seu limite de potência).

A geração distribuída normalmente emprega fontes renováveis de energia, principalmente geradores eólicos e ou fotovoltaicos. Pelo fato da região estudada possuir uma usina de energia fotovoltaica, esta energia será utilizada como fonte renovável principal nesta pesquisa, já que os dados foram coletados diretamente na usina.

Em residências, há a perspectiva de que, cada vez mais, sejam empregados painéis fotovoltaicos, que têm a vantagem de serem moduladores, silenciosos e mais flexíveis de serem instalados em telhados de residências. No Brasil, destaca-se a resolução normativa RN 482 de 2012 (ANEEL, 2012), retificada pela RN 517 de 2012 (ANEEL, 2012), publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Ela estabelece as condições de acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e também a forma de compensação tarifária da energia injetada na rede pelo consumidor. A figura 46 ilustra, um esquema típico de GD conectada à rede elétrica, com possibilidade de compensação tarifária.

Figura 46 – Exemplo de esquema de GD



Fonte: Adaptado de Balen (2014).

A infraestrutura da rede deverá suportar o gerenciamento de dados dos medidores eletrônicos, o monitoramento e o controle do estado da rede, o gerenciamento de carga e de geração distribuída, o carregamento de veículos elétricos *plug-in*, entre outros recursos. Os sistemas de informação deverão comunicar-se entre si, em diferentes níveis de aplicação, como estratégias de regulação de potência, tarifação dos serviços, gerenciamento de equipes de manutenção, atualização de bancos de dados e sistemas de informação geográfica, entre outros. A figura 47 apresenta a estrutura da infraestrutura que foi simulada em um ambiente computacional.

Os conceitos das variáveis expostas na figura 13 são os seguintes:

- **Controle de Geração Distribuída:** responsável por controlar a energia gerada pela fonte renovável, possibilitando a sua inserção no sistema elétrico de potência.
- **Rede Primária e Rede Secundária:** A rede primária são os circuitos (fios) que conduzem corrente em grandes tensões de distribuição. A rede secundária é constituída pelos circuitos que conduzem corrente em tensões que já passaram pelos transformadores localizados nesses postes e foram reduzidas para os valores de consumo desejado, por exemplo, 127/220 volts. Geralmente, esses circuitos se localizam na parte mais baixa dos postes. Quando o poste não possui “2 andares” de circuitos, então geralmente a rede é secundária. Em suma, diz-se primário o que

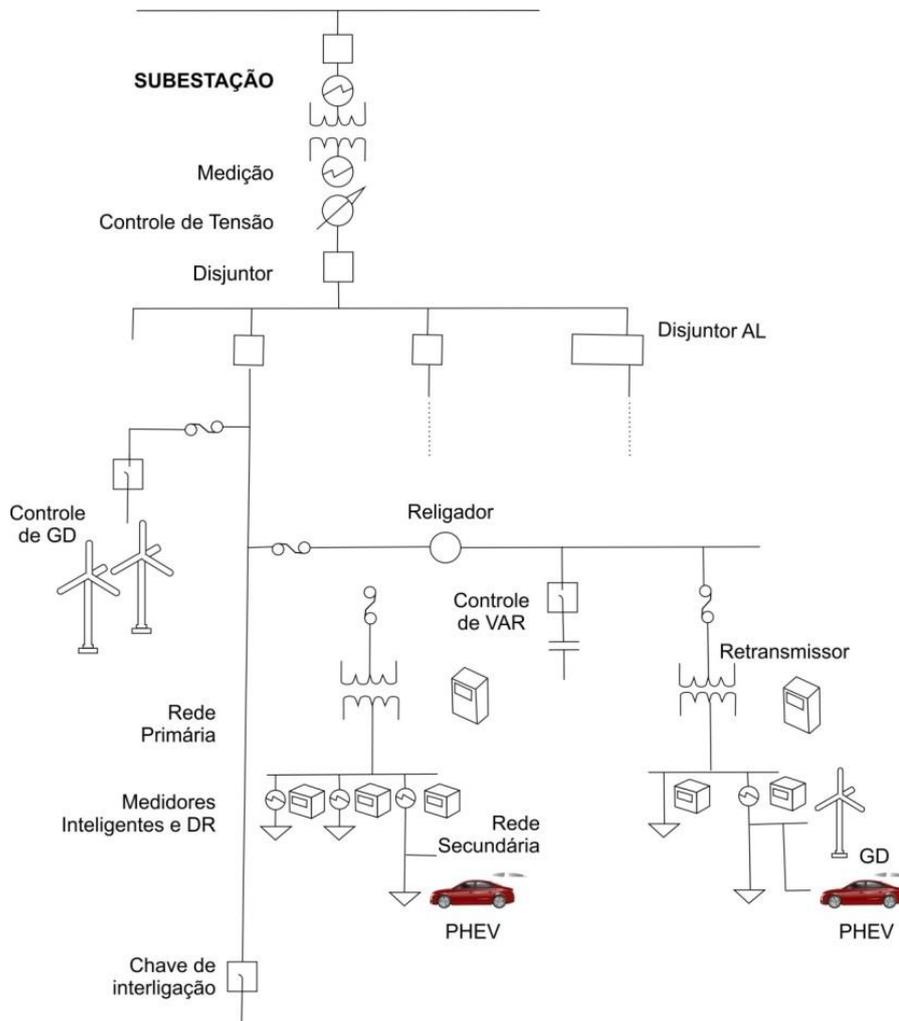
está antes de um transformador, e secundário o que sai dele, já transformado. No caso de um transformador, ele tanto pode servir para aumentar quanto para diminuir a tensão, entre outros. Mas de “rede primária” e “rede secundária”, entende-se, a primária a rede com tensão mais alta, e a secundária a rede com tensão de consumo, geralmente mais baixa, mas nem sempre.

- **Medidores Inteligentes e DR:** Os medidores inteligentes são os responsáveis por calcular a quantidade de energia armazenada na rede e o DR é o dispositivo que armazena a energia elétrica vinda de energias renováveis.
- **Chave de interligação:** é responsável por conectar a rede elétrica com a fonte de energia distribuída, fazendo com que a energia armazenada seja inserida na rede elétrica quando necessária.
- **Disjuntor AL** (Disjuntor de alta tensão): Um disjuntor é um dispositivo eletromecânico, que funciona como um interruptor automático, destinado a proteger uma determinada instalação elétrica contra possíveis danos causados por curtos-circuitos e sobrecargas elétricas. A sua função básica é a de detectar picos de corrente que ultrapassem o adequado para o circuito, interrompendo-a imediatamente antes que seus efeitos térmicos e mecânicos possam causar danos à instalação elétrica protegida.
- **Religador:** é um dispositivo utilizado em sistemas elétricos com a função de protegê-los contra problemas transitórios. Religadores são geralmente aplicados em linhas aéreas de transmissão e de distribuição de energia, buscando reduzir o tempo de interrupção de fornecimento de energia nos casos de problemas não permanentes. Ao detectar algum defeito (normalmente uma sobrecarga provocada por curto-circuito) o religador realiza um ciclo pré-programado de aberturas e fechamentos até o desaparecimento do defeito ou até se considerar que o defeito é permanente. No caso de defeito permanente, o religador ficará aberto para proteger o sistema elétrico até que seja rearmado manualmente ou via telecomando após a solução do problema que causou a atuação do religador.
- **Controle de VAR:** os níveis de tensão dependem do fluxo de potência reativa do sistema elétrico. Quando a rede está com escassez de potência reativa, o nível de tensão cai. Já o excesso eleva o nível de tensão (RAHIMI; MARINELLI; SILVESTRO, 2012). A maioria das cargas instaladas, possuem uma porcentagem indutiva (absorvem potência reativa). Já bancos de capacitores geram potência

reativa (VAr) assim como os condutores de linhas de transmissão, que por sua capacitância entre os condutores e o solo geram Var. A realização do controle de tensão e potência reativa (Controle Volt/VAr), a partir dos equipamentos de um sistema de distribuição é essencial para manter a tensão em níveis adequados em todos os pontos do alimentador de distribuição, considerando as mais diversas condições de operação do sistema (IBRAHIM; SALAMA, 2015).

- **PHEV:** Tipo e carro elétrico utilizado apenas como exemplo.
- **Retransmissor:** Retransmite a energia elétrica gerada pelo gerador distribuído residenciais para o sistema de potência elétrico.

Figura 47 – Ambiente de simulação



Fonte: Autor (2023).

Sob a perspectiva sistêmica, as forças motrizes são representadas pelos múltiplos enlaces de reforço e balanceadores de um mapa sistêmico da realidade atual. Enlaces são forças motrizes quando estão sistemicamente estruturadas. Tende-se, então, a afirmar que esses enlaces são os elementos predeterminados, que estruturados gerariam certo padrão de comportamento a ser modelado e simulado em um *software* de dinâmica de sistemas (ANDRADE, 2006). As análises geradas pelo modelo terão o intuito de comparar impactos ambientais e financeiros, apresentando ao decisor possibilidades de estratégias a serem aplicadas na área de estudo propostas.

Para Miller, Arbabzadeh e Hourly (2020) o incentivo a população a possuir um veículo elétrico é uma medida efetiva para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, e sua expansão generalizada em todos os países ocorrerá em breve. Para Li et al (2021) o desenvolvimento adequado dos VEs e seus equipamentos de carregamento na rede elétrica, o planejamento da futura rede de distribuição de ambos os fatores de demanda de carregamento de VEs e sua capacidade de descarga deve ser considerado. Para Wang et al (2020) a energia necessária para carregar esses veículos pode ser modelada como uma carga adicional para a rede elétrica primária. Portanto, para esse modelo acontecer é necessário entender a questão de energia distribuída.

Para Zhang e Hong (2021) o conceito de produzir energia próximo ao seu local de consumo segue uma tendência de acentuado crescimento nas últimas duas décadas. Essa característica é associada à Geração Distribuída (GD). Atualmente aumenta-se a utilização de pequenos geradores de energia renováveis, alocados próximos aos centros de consumo, com vistas à diversidade da matriz energética (ZAND et al, 2020). O Brasil também está seguindo esta tendência mundial, com a regulamentação da conexão de micro e mini geração no nível do consumidor e possibilidade de compensação na tarifa de consumo (GUIMARÃES, 2022).

O conceito de geração distribuída refere-se a uma fonte de energia elétrica diretamente conectada à rede local dos consumidores (SANJEEVIKUMA et al , 2021). Da mesma forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) definiu o termo geração distribuída como: “centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas, ou não, pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)” (ANEEL, 2018). Para Zhang e Hong (2021) as centrais geradoras podem ser constituídas a partir de diferentes tecnologias, dentre as quais se destacam a energia eólica, solar fotovoltaica, pequenas central hidrelétricas, biomassa e gás natural.

Devido ao aumento do número de conexões dos geradores distribuídos, torna-se necessária a análise de seu impacto nas redes de distribuição, principalmente quanto ao grau de inserção e ao controle de níveis de tensão (LI et al, 2021). Para Zand et al (2020) a GD normalmente emprega fontes renováveis de energia, principalmente geradores eólicos e fotovoltaicos, por uma questão de inviabilidade de construção de pequenas usinas convencionais, como hidrelétrica e térmica a carvão próximas aos centros de consumo. Usinas térmicas a gás e biomassa também têm sido empregadas em geração distribuída, porém, em menor escala.

No Brasil, a resolução Normativa da ANEEL nº 206 (2016) estabelece que as distribuidoras de energia podem atender até 10% da carga total do sistema com energia elétrica proveniente de empreendimentos de GD. Neste sentido, deve-se considerar que a inserção de GD nas redes de distribuição alcançará níveis cada vez maiores, principalmente através das recentes políticas de incentivo e das novas regulamentações. A partir da dissiminação da GD, as concessionárias de energia elétrica terão que se adaptar a esta nova realidade, adequando seus procedimentos para operação e planejamento dos sistemas de distribuição.

As variações dos níveis de tensão nas redes elétricas são ocasionadas pelo comportamento das cargas elétricas, potenciais ativa e reativa, ao longo das redes de distribuição. Tradicionalmente, as quedas de tensões são compensadas com o ajuste da posição de TAP (*Transformer Adjust Position*) dos transformadores de distribuição, com a presença de reguladores de tensão automáticos e com o controle da potência reativa através da instalação de capacitores *shunt* ou compensadores estáticos de reativos (*Static synchronous compensator – STATCOM*) (GUPTA; SWARNKAR; NIAZI, 2012).

Segundo Gupta, Swarnkar e Niazi, (2012) a inserção de GD nas redes de distribuição podem influenciar nas variações dos níveis de tensão de duas formas:

- Quando opera em coordenação com as variações de carga da rede, ou seja, acompanhando o aumento ou diminuição da carga;
- Quando opera de acordo com os preços da energia ou da disponibilidade de recursos naturais, como nos casos de energia solar e eólica, o que não acompanha necessariamente as variações de carga.

Comparando os dois casos, no primeiro, a GD atua reduzindo as variações dos níveis de tensão, visto que acompanha a variação da carga. No segundo, a GD pode aumentar as variações dos níveis de tensão em casos, por exemplo, da operação da rede em carga pesada com a

produção de energia da GD em baixa potência ou da operação da rede em carga leve com a produção de energia da Geração Distribuída a plena potência.

A Geração Distribuída também pode ser utilizada para controlar os níveis de tensão localmente. Isso pode ser realizado a partir de STATCOM, que alteram o fator de potência do ponto de conexão GD, conforme as variações de tensão da rede de distribuição (GUPTA; SWARNKAR; NIAZI, 2012). Entretanto, a norma IEEE 1547 (*Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*), que estabelece critérios para a conexão da GD aos sistemas de potência, define que a GD não deve regular ativamente as tensões da rede de distribuição, exceto quando existe acordo mútuo entre a concessionária e o proprietário da GD (MACIEL, 2012).

As perdas de energia são decorrentes do transporte de energia elétrica nos alimentadores, por efeito joule, devido principalmente à resistência elétrica dos condutores, conexões e equipamentos. Este efeito representa as perdas de energia ativa, que é função do quadrado da corrente elétrica que percorre uma determinada resistência em um intervalo de tempo, estabelecendo uma relação crescente do aumento de perdas com o aumento do carregamento dos alimentadores. A conexão de GD na rede de distribuição também pode influenciar nas perdas de energia, que diminuem ou aumentam dependendo da localização e da quantidade de potência gerada em função da quantidade de energia requerida pela carga (DELMASQUIO et al, 2022).

Dessa forma, a GD pode ser utilizada em um ponto crítico da rede de distribuição para fornecer energia localmente, reduzindo as perdas com a diminuição do fluxo de corrente que flui através dos alimentadores (GUIMARÃES, 2022). Verifica-se a importância do estudo de fluxo de potência, uma vez que o ponto de conexão e a potência fornecida pela GD influenciam nas variações de perdas de energia do sistema. É importante que sejam identificadas as características de geração de energia e níveis de tensão para que possam ser adequadamente avaliadas (SILVA 2022).

Com a GD localizada mais próxima aos centros de carga, há uma redução gradual da corrente ao longo dos alimentadores, proporcionando alívio aos sistemas de distribuição e transmissão e, conseqüentemente, redução dos carregamentos dos condutores e equipamentos. Entretanto, com a injeção de potência da GD ocorrerá um aumento do fluxo de potência na rede que faz a sua conexão aos sistemas, devendo essa ser dimensionada de forma compatível ao transporte de energia com segurança (JOHN, 2013).

A conexão da GD na rede de distribuição pode influenciar na melhoria dos índices relacionados à duração da indisponibilidade no fornecimento de energia, devido à possibilidade

do suprimento de parte da carga pela GD (BERNARDON et al, 2014). Com a perspectiva de um aumento significativo de fontes de geração distribuída, a operação em modo ilhado pós-contingência torna-se atrativo para fins de confiabilidade. Em se tratando de sistemas rurais, que possuem poucas interligações entre redes, o modo ilhado torna-se bastante interessante, sendo em muitas vezes a única opção de suprimento alternativo de energia. Já os índices relacionados à frequência de falha não apresentam melhorias tão significativas, devido à atuação da proteção da GD, que a desconecta da rede quando da ocorrência de perturbação no sistema elétrico SILVA (2022).

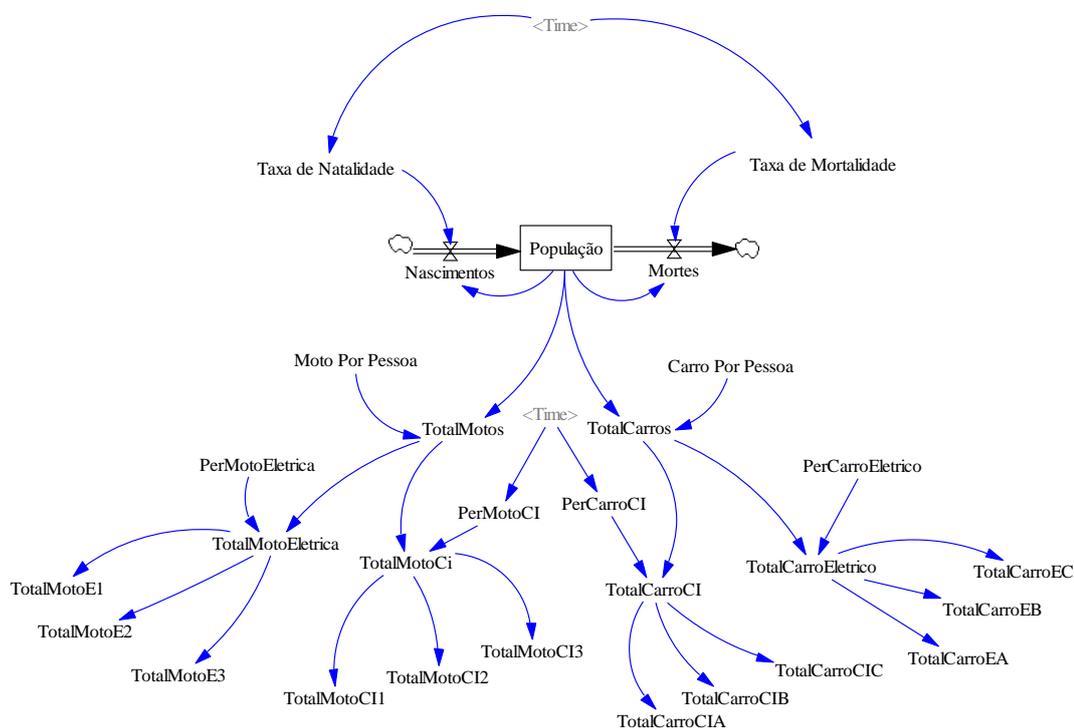
Para Nasri et al (2021) o fornecimento de energia proveniente de GD torna a rede de distribuição menos dependente do sistema de geração e transmissão. Entretanto, carece de estudos mais aprofundados envolvendo uma série de questões técnicas e regulamentações, inclusive de automação e adequações dos geradores para esta finalidade. Entre os aspectos a serem considerados, estão a intermitência da geração distribuída, em função da disponibilidade do combustível (recursos naturais: radiação solar, vento, água, biogás) e a taxa de falha dos equipamentos.

Além de atender à demanda de energia na programação rotineira da rede de distribuição, o planejamento do desempenho da rede de distribuição, incluindo estações de carregamento, requer soluções para outras questões técnicas, como planejamento da capacidade da estação de carregamento, localização da instalação da estação de carregamento, programação do alimentador de energia e programação da subestação, inclui estações de carregamento dos veículos elétricos (TIGHTIZ et al, 2020).

Diante de todos os dados e apontamentos destacados, a Figura 48 apresenta o modelo responsável por verificar os totais de veículos a população estudada. Foi utilizado como veículos os carros e motos, já que são os dois mais populares entre a população.

O modelo é baseado na lógica de estoque e fluxo, a variável de estoque “**População**” irá armazenar a população da região estudada. Foi utilizado essa lógica de crescimento populacional pelo fato de inserir o comportamento de compra da população, também torna possível a simulação em qualquer cidade do mundo. As variáveis auxiliares “**TotalMotos**” e “**TotalCarros**” são responsáveis em armazenar os totais de veículos, elas são auxiliadas pelas variáveis “**MotoPorPessoa**” e “**CarroPorPessoa**” onde é inserido o comportamento de compra da região, por falta de dados temporais o as variáveis foram programadas como constantes.

Figura 48 – Total de veículos por categoria



Fonte: Autor (2023).

Para inserir veículos elétricos foram desenvolvidas as variáveis “**PerMotoEletrica**” e “**PerCarroEletrico**” que podem ser modificadas conforme o cenário projetado. Todos os veículos foram divididos em três tipos, de menor potência para maior potência, as equações deste modelo são apresentadas a seguir no Quadro 22.

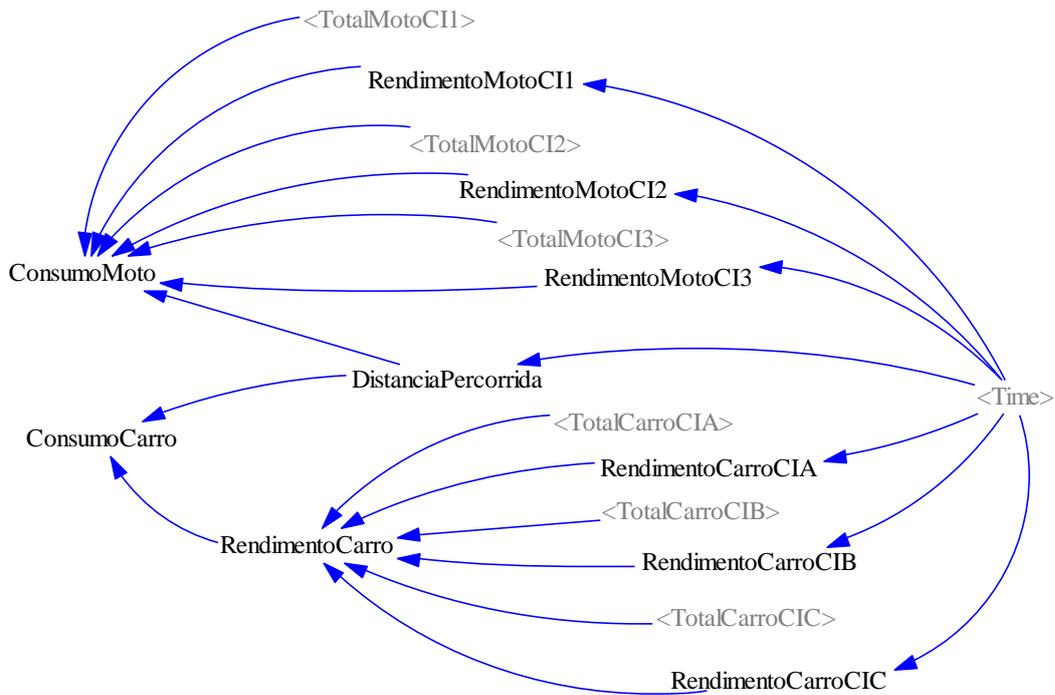
Quadro 22 – Modelo de equações

<p> População = Nascimentos-Mortes Nascimentos = População*Taxa de Natalidade Mortes = População*Taxa de Mortalidade Taxa de Natalidade = time ([(0,0)-(1825,10)],(0,0.012),(1825,0.011)) Taxa de Mortalidade = time ([(0,0)-(1825,10)],(0,0.007),(1825,0.011)) TotalMotos = População*Moto Por Pessoa TotalCarros = População*Carro Por Pessoa TotalMotoEletrica = TotalMotos*PerMotoEletrica TotalMotoCi = TotalMotos*PerMotoCI TotalCarroCI = TotalCarros*PerCarroCI TotalCarroEletrico = TotalCarros*PerCarroEletrico </p>
--

Fonte: Autor (2023).

Em relação ao consumo médio dos veículos, a Figura 50 apresenta o modelo responsável por calcular o consumo dos veículos a combustão interna.

Figura 49 – Consumo dos veículos a combustão interna



Fonte: Autor (2023).

O consumo das motos a combustão interna é baseado no rendimento médio de cada um dos motores e da distância média percorrida por dia, a mesma lógica é usada para calcular o consumo dos carros a combustão interna. O Quadro 25 apresenta as equações deste modelo.

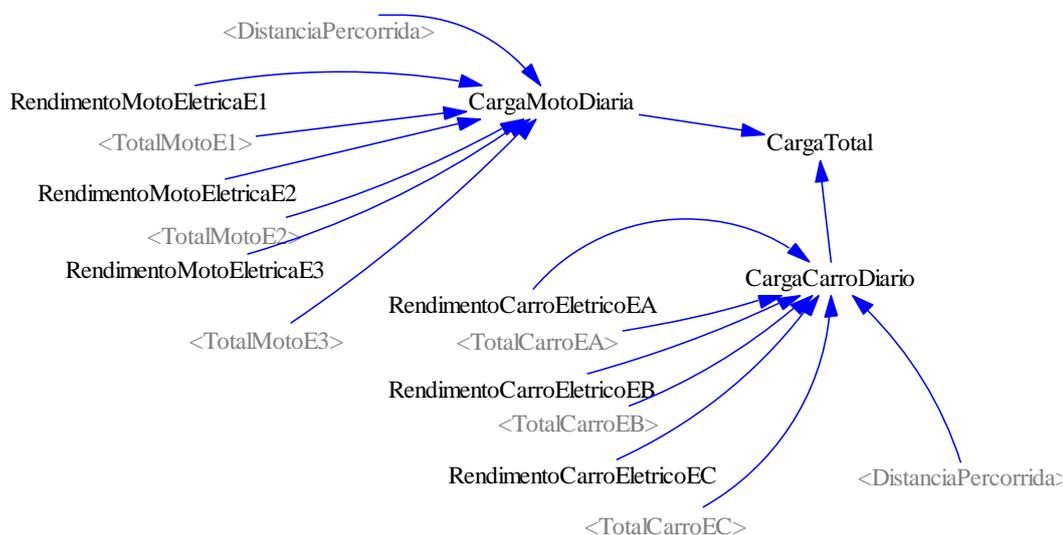
Quadro 23 – Modelo de equações

$$\begin{aligned} \text{ConsumoMoto} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI1} * \text{TotalMotoCI1})) + \\ & (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI2} * \text{TotalMotoCI2})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI3} * \text{TotalMotoCI3})) \\ \text{ConsumoCarro} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIA} * \text{TotalCarroCIA})) + \\ & (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIB} * \text{TotalCarroCIB})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIC} * \text{TotalCarroCIC})) \end{aligned}$$

Fonte: Autor (2023).

Em relação aos veículos elétricos a Figura 51 apresenta o modelo responsável para calcular a carga de energia necessária para locomover os veículos.

Figura 50 – Carga de energia necessária para locomover os veículos



Fonte: Autor (2023).

As variáveis auxiliares “**CargaMotoDiaria**” e “**CargaCarroDiario**” armazenam em kWh a carga dos veículos elétricos. Em relação aos carros elétricos, o equivalente ao consumo de km por litro é o km por kWh. Este valor pode ser obtido dividindo a autonomia do veículo pela capacidade total da bateria. Por exemplo: um carro com autonomia de 480 km e capacidade total de 60 kWh terá um consumo de 8 km por kWh – (480 km ÷ 60 kwh = 8 km/kWh). A seguir o Quadro 26 apresenta as equações utilizados no modelo.

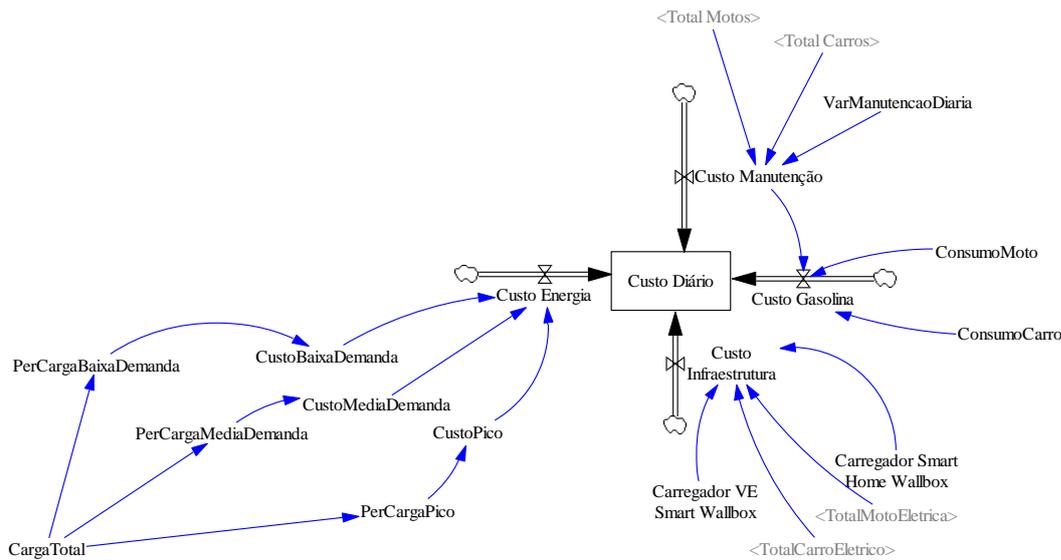
Quadro 24 – Modelo de equações

$$\begin{aligned}
 \text{CargaMotoDiaria} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoEletricaE1} * \text{TotalMotoE1})) + \\
 &(\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoEletricaE2} * \text{TotalMotoE2})) + (\text{DistanciaPercorrida} * \\
 &(\text{RendimentoMotoEletricaE3} * \text{TotalMotoE3})) \\
 \text{CargaCarroDiario} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroEletricoEA} * \text{TotalCarroEA})) + \\
 &(\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroEletricoEB} * \text{TotalCarroEB})) + \\
 &(\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroEletricoEC} * \text{TotalCarroEC})) \\
 \text{CargaTotal} &= \text{CargaCarroDiario} + \text{CargaMotoDiaria}
 \end{aligned}$$

Fonte: Autor (2023).

Para calcular o custo diário para a população possuir veículos elétricos foi necessário desenvolver o modelo “**Custo Diário**”, a Figura 52 apresenta as variáveis que compõem o modelo.

Figura 51 – Variáveis que compõem o modelo



Fonte: Autor (2023).

Para calcular o consumo de energia em kWh de qualquer equipamento elétrico, basta multiplicar a sua potência em Watts (W) pelo tempo de uso em horas (h) e dividir o resultado por 1.000. Soma-se a este cálculo a tarifação das bandeiras, no modelo não usou diferenciação por cor e sim por demanda. O valor do acréscimo na tarifa referente à bandeira é definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), assim como a bandeira a ser aplicada. As variáveis “**CustoBaixaDemanda**”, “**CustoMediaDemanda**” e “**CustoPico**” armazenam a lógica do consumo de energia e das tarifas. O fluxo “**CustoEnergia**” é a variável de entrada do estoque “**CustoDiário**”.

O fluxo “**CustoInfraestrutura**” armazena o custo da infraestrutura para o carregamento dos veículos elétricos. Para isso utilizou-se o carregador VE Smart Wallbox e o carregador Smart Home Wallbox. Os carregadores Quasar da Wallbox foram desenvolvidos para transformar os veículos elétricos em potentes fontes de energia. A sua tecnologia bidirecional, possibilita não carregar e descarregar o seu veículo, mas também transferir a corrente da bateria do veículo para a sua rede doméstica ou para a rede elétrica pública.

O fluxo “**CustoGasolina**” armazena o custo dos veículos a combustão interna, a variação do custo da gasolina foi baseada em dados da ANP (2022) e calculado com métricas de estudos como Reginatto (2022) e Pacheco e Blass (2022). Em relação ao custo de manutenção foi coletado no estudo de Valério (2022). A seguir o Quadro 26 apresentam as equações deste modelo.

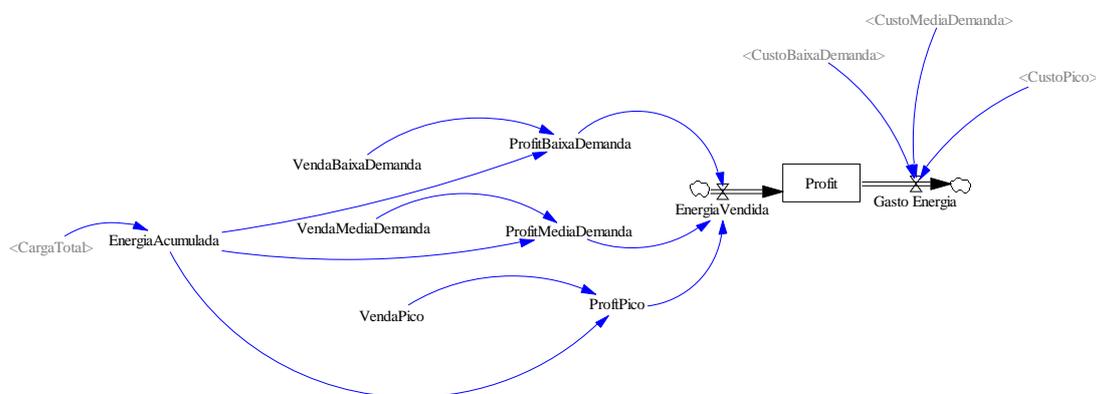
Quadro 25 – Modelo de equações

$$\begin{aligned} \text{CustoBaixaDemanda} &= \text{PerCargaBaixaDemanda} * 0.455 \\ \text{CustoMediaDemanda} &= \text{PerCargaMediaDemanda} * 0.5 \\ \text{CustoPico} &= \text{PerCargaPico} * 0.655 \\ \text{Custo Energia} &= \text{CustoBaixaDemanda} + \text{CustoMediaDemanda} + \text{CustoPico} \\ \text{Custo Infraestrutura} &= (\text{TotalCarroElettrico} * \text{Carregador Smart Home Wallbox}) + (\text{TotalMotoElettrica} * \text{Carregador VE Smart Wallbox}) \\ \text{Custo Manutenção} &= 0.075 * (\text{TotalCarros} + \text{TotalMotos}) + \text{VarManutencaoDiaria} \\ \text{ConsumoMoto} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI1} * \text{TotalMotoCI1})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI2} * \text{TotalMotoCI2})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoMotoCI3} * \text{TotalMotoCI3})) \\ \text{ConsumoCarro} &= (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIA} * \text{TotalCarroCIA})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIB} * \text{TotalCarroCIB})) + (\text{DistanciaPercorrida} * (\text{RendimentoCarroCIC} * \text{TotalCarroCIC})) \\ \text{Custo Gasolina} &= 4.78 * (\text{ConsumoCarro} + \text{ConsumoMoto}) \\ \text{Custo Diário} &= (\text{Custo Energia} + \text{Custo Gasolina} + \text{Custo Infraestrutura} + \text{Custo Manutenção}) \end{aligned}$$

Fonte: Autor (2023).

Por fim a Figura 53 é apresentado o modelo para calcular o lucro com a energia excedente nas baterias dos veículos elétricos.

Figura 52 – Lucro com a energia excedente nas baterias dos veículos elétricos



Fonte: Autor (2023).

Em relação a variável de estoque “**Profit**” para cada veículo nas estações de carregamento, a venda da energia excedente é separada pelo horário de carregamento dos veículos, os valores são separados em três variáveis auxiliares “**VendaBaixaDemanda**”, “**VendaMediaDemanda**” e “**VendaPico**”. Então, de acordo com esta informação, considerando o lucro de usar os veículos como armazenamento e o custo de carregar as baterias para dirigir, é determinado o lucro por período de demanda, os valores são armazenados nas respectivas variáveis auxiliares: “**ProfitBaixaDemanda**”, “**ProfitMediaDemanda**” e “**ProfitPico**”.

O tempo necessário para carga/descarga total das baterias do veículo foi calculado usando dados de Nasab et al (2021) e trazendo para realidade brasileira foi simulado dois carregadores mais populares no Brasil (Carregador VE Smart Wallbox e Carregador Smart Home Wallbox). A relação entre a energia armazenada em uma bateria e sua capacidade é definida como a carga inicial entre 0 e 100. Este parâmetro aumenta quando a bateria EV está sendo carregada. O SOC é reduzido pelo consumo de energia da bateria (fornecimento de energia à rede ou ao veículo).

A capacidade de armazenamento da bateria dos VEs não é utilizada durante o carregamento na estação de carregamento. O uso desse recurso dependerá da carga inicial da bateria do VE. Devido à variabilidade da distância percorrida pelos VEs, sua eficiência e o tipo de baterias EV, a quantidade de energia inicial restante nas baterias EV não será conhecida. A capacidade da bateria dos veículos elétricos no armazenamento de energia elétrica permite que as estações de carregamento forneçam parte da energia da rede a um preço menor do que a rede nos horários de pico. Reduz o custo para o gerente do sistema de distribuição. O lucro pelo uso da tecnologia de transmissão de energia do veículo para a rede.

Em suma a maioria dos motoristas de veículos elétricos vai até a estação de recarga para suas tarefas diárias e viagens curtas para recarregar suas baterias. Os proprietários das estações de carregamento podem aumentar seus lucros fornecendo serviços de carregamento para motoristas de veículos. O ganho obtido com a recarga das baterias dos veículos é calculado a partir das equações apresentados no Quadro 28.

Quadro 26 – Modelo de equações

$\text{ProfitBaixaDemanda} = (\text{EnergiaAcumulada} * 0) * \text{VendaBaixaDemanda}$ $\text{ProfitMediaDemanda} = (\text{EnergiaAcumulada} * 0) * \text{VendaMediaDemanda}$ $\text{ProfitPico} = (\text{EnergiaAcumulada} * 1) * \text{VendaPico}$ $\text{Lucro Por Pessoa} = \text{Profit} / (\text{TotalCarroEletrico} + \text{TotalMotoEletrica})$ $\text{Gasto Energia} = \text{CustoBaixaDemanda} + \text{CustoMediaDemanda} + \text{CustoPico}$ $\text{Profit} = \text{EnergiaVendida} - \text{Gasto Energia}$
--

Fonte: Autor (2023).

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a definição dos cenários para a experimentação dos modelos, foram executadas as simulações no simulador Vensim (VENSIM, 2022) em um computador com processador Pentium Core i7 e 16 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação foi na ordem de milionésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado no experimento foi modificado em cada modelo, porém a configuração dessa variável fica a cargo do projetista / usuário, pois a mesma depende da análise a ser feita.

As decisões, a partir dos resultados gerados pelos modelos, poderão envolver a inserção de veículos elétricos (total ou parcialmente), incentivando a redução da emissão de CO₂, poluição da água e obtendo um maior retorno financeiro. Outras análises e observações de interesse dos gestores ambientais e/ou organizacionais, desde que as mesmas sejam passíveis de execução nos modelos de simulação, poderão ser executadas, pois os modelos foram concebidos buscando simplificar a interação usuário-modelo, para que análises do tipo *what-if* sejam de simples execução.

Em trabalhos de pesquisa envolvendo o desenvolvimento de modelagem computacional para representação de sistemas do mundo real, uma das partes mais importantes, e críticas, é a verificação e a avaliação do modelo (SIMONETTO et al, 2016). Em relação a modelo, Pidd (1998) afirma que um modelo é uma representação do mundo real ou de parte dele. Portanto, tudo o que a avaliação precisa fazer é verificar se o comportamento do modelo e o do mundo real ocorrem nas mesmas condições. Se a avaliação é positiva, o modelo é válido. Se não, então o modelo não é válido.

Alves (2019) afirma que não é possível que um modelo represente todo o sistema do mundo real, mas é possível definir relações entre os componentes do modelo de forma que permitam uma representação aceitável do mundo real. Por sua vez, a verificação deve garantir que todos os requisitos para o desenvolvimento do modelo sejam devidamente contemplados nele e que não haja erros em seu desenho (SOMMERVILLE, 2015).

No desenvolvimento dos modelos apresentados na seção anterior, a verificação e a avaliação fizeram-se presentes em todas as etapas da sua concepção. Na primeira fase (modelo conceitual), foram utilizados dados de artigos científicos, relatórios do governo, experimentos de empresas e, também, contou com a participação de stakeholders para definir as variáveis da modelagem proposta.

Na segunda fase, quando da implementação no simulador Vensim (VENTANA SYSTEMS, 2022), foram utilizados dados históricos para a verificação da integração entre os

módulos componentes do modelo, bem como dos resultados gerados, pois foram avaliadas as saídas produzidas pelo modelo de simulação a partir de dados reais fornecidos a estes. Em ambos os casos, os resultados foram satisfatórios e atenderam às expectativas dos projetistas. Na terceira fase de verificação e avaliação, para a construção do experimento, foram utilizados dados e taxas de uma associação de transporte urbano. A seguir será apresentado os resultados da simulação de inserção de carros elétricos.

5.1 IMPACTO DA INSERÇÃO DE CARROS ELÉTRICOS

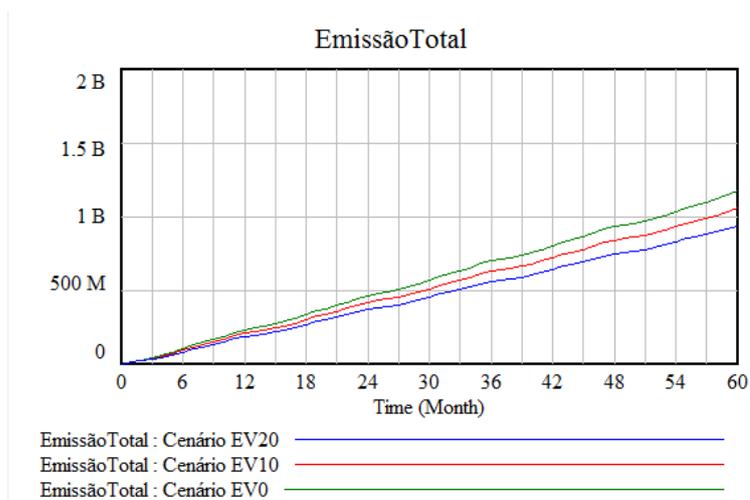
Após a definição dos três cenários para a experimentação do modelo, foi estipulado o horizonte de tempo de sessenta meses. A utilização de meses como fator de tempo ocorre devido as mudanças de deslocamento de carros mensalmente nas cidades, fatores como época do ano e férias das instituições de ensino são fatores importantes para a simulação. Também a variação de compra de carros varia conforme o mês do ano. O horizonte de tempo simulado poderá ser modificado em outras simulações, a configuração dessa variável fica a cargo do projetista/usuário, pois esta depende da análise a ser feita.

Devido à sua sustentabilidade ambiental e alta eficiência, espera-se que as os carros elétricos sejam uma solução para combater as emissões veiculares (LIN et al., 2018). A eletricidade é atualmente um dos combustíveis mais relevantes utilizados na descarbonização do setor energético e de transportes (CELLURA et al., 2017; FINOCCHIARO et al., 2016; ORTIZ et al., 2014 SPENCER et al., 2017).

Em particular, como transportador de energia para a propulsão de veículos, a eletricidade oferece a possibilidade de substituir os combustíveis fósseis utilizados em veículos com motor de combustão interna (ICE) por fontes de energia renovável (RESs), permitindo reduções consideráveis nas emissões de CO₂ do setor automotivo (CUSENZA et al, 2019)

A Figura 54 apresenta o acumulo de emissões dos carros simulados, essa primeira simulação usou capitais como comportamento para ser analisado. Como o modelo desenvolvido é baseado na lógica de estoque os totais são somados a cada ano. Percebe-se que os três cenários acumulam mais de 950 milhões de toneladas de CO₂, porém percebe-se que a inserção de carros elétricos diminui o acumulo total. Essa premissa corrobora com o estudo de Holmberg e Erdemir (2019) que cita os frutos de décadas de pesquisa dedicada em veículos totalmente elétricos alimentados por baterias elétricas, estão abrindo caminho para um futuro de transporte muito mais limpo e sustentável.

Figura 53 – Emissões simulação capital



Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

Comprova-se que o cenário atual (**EV0**) não apresenta bons resultados para as políticas de proteção ambiental, o que corrobora com Stokes e Breetz (2018), os quais afirmam que os governos devem incentivar a utilização de carros elétricos para diminuir a emissão de CO₂ – fato demonstrado neste estudo, já que os cenários que analisam a inserção de carros elétricos obtiveram resultados mais positivos para o meio ambiente.

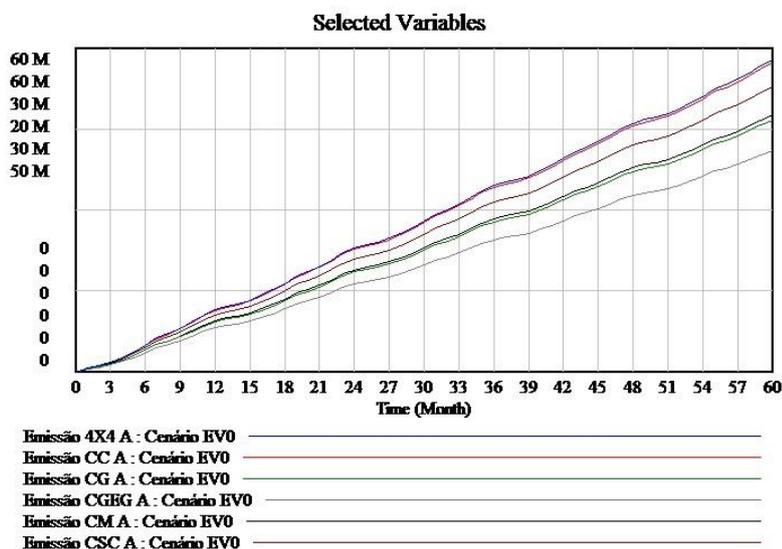
O cenário EV0 emitirá em sessenta meses cerca de 130 milhões de toneladas de CO₂, valor expressivo e preocupante. Se o comportamento de compra de carros elétricos aumentar em dez por cento, o acúmulo de CO₂ em sessenta meses diminuirá em cerca de 20 milhões de toneladas. Esta diferença equivale a gerar aproximadamente 41.898 GW em uma usina de gás natural. Segundo o SEEG (2021), uma usina de gás natural que gera 1GW emite aproximadamente 477,34 toneladas de CO₂. Já uma usina movida a petróleo poderia gerar aproximadamente 29.985 GW. Para o SEEG (2021), uma usina movida a petróleo emite cerca de 623 toneladas de CO₂ para gerar 1GW. Uma usina a carvão mineral, que emite 667,36 toneladas por GW, geraria em torno de 27 mil GW.

Se o incremento de carros elétricos fosse de 20%, a diferença de emissão de CO₂ seria ainda maior. Em sessenta meses o cenário EV20 emitiria provavelmente 42 milhões de CO₂ a menos, se comparado ao cenário atual. Essa redução equivale a geração de 83.857 GW em uma usina movida a gás natural, em uma usina a petróleo a geração de energia elétrica seria entorno de 64.205 GW, já em uma usina a carvão mineral o valor poderá alcançar em torno de 59.972 GW.

A eletrificação da frota mundial é, portanto, um fator importante na redução do aquecimento global, pois grande parte das emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar são geradas pela combustão de combustíveis fósseis em motores de veículos convencionais (ERCAN; ONAT, TATARI, 2016; JIAO. et al., 2017.; GOLDEMBERG; LUCON, 2012; IEA, 2017)

A segunda análise ambiental é referente as cidades que não capitais, porém são consideradas grandes cidades pelo IBGE (2022). Em relação a esta análise foi verificado a emissão por categoria, anteriormente não realizou esta análise pelo fato de não possui uma precisão nos dados coletados. A Figura 55 demonstra a simulação de todas as categorias.

Figura 54 – Categoria Emissão CO2

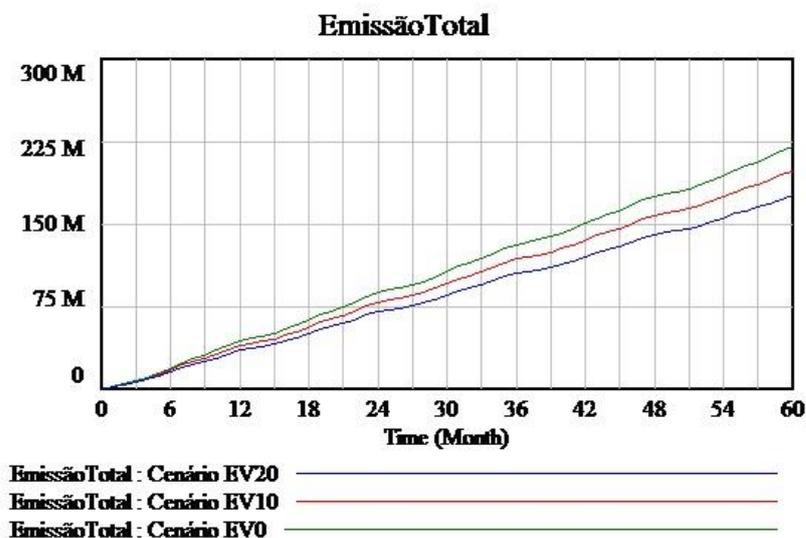


Fonte: Autor (2022).

*Desenvolvido no *software* VENSIM-PLE

Vale lembrar que foi realizada uma análise proporcional a quantidade de carros em cada categoria, portanto a categoria com maior emissão não possui relação com a quantidade de carros. Percebe-se que a categoria 4x4 é a maior emissora do estudo, a maioria dos carros desta categoria é movida por diesel. Sharma et al (2020) destaca que a redução do uso de combustíveis fósseis como o diesel trará menos impactos maléficis ao meio ambiente. Os carros compactos emitiram CO2 semelhantes aos carros 4x4, porém por não possuírem veículos movidos a diesel a categoria emitiu menos gases. A Figura 55 apresenta as emissões de CO2 da simulação executada.

Figura 55 – Emissão de CO2 EVs cidades não capitais



Fonte: Autor (2022).

*Desenvolvido no *software* VENSIM-PLE

O cenário atual (EV0) emitirá em 60 meses cerca de 223 milhões de toneladas de CO₂, esse acumulado de emissões é equivalente a gerar 334332 GW em uma termoelétrica, energia que poderia abastecer diferentes cidades do país. Quando comparado aos cenários com inserção de carros elétricos, o cenário que irá inserir até vinte por cento de carros no cotidiano das cidades, emitirá 8 milhões de CO₂ a menos por mês, enquanto que se inserido 10 por cento o valor reduzido será de em torno de 38 milhões a menos que os cenários EV0. Para Guller e Yomralioglu (2020) mesmo que seja necessário emitir gases maléficos ao meio ambiente para gerar energia que abastecerá os carros elétricos, a eletrificação do transporte apresentará menores emissões veiculares.

Pelo resultado da simulação percebe-se que a inserção de carros elétricos proporcionará menos gases prejudiciais à saúde humana. O resultado também aponta uma justificativa para o desenvolvimento sustentável, para Deb et al (2018) questões como baixa geração de poluentes e utilização de fontes “limpas” de energia, como o uso de veículos elétricos, ou seja, é um modo de auxiliar nas políticas ambientais atuais. Para Guler e Yomralioglu o incentivo de uso de carros elétricos devem ser explorados mais amplamente e que simulações computacionais justificam a aplicação de modelos que incentivam a mobilidade elétrica. A seção a seguir apresenta o impacto financeiro da inserção de carros elétricos.

Embora o motor de combustão interna seja mais flexível, a eficiência energética do motor elétrico é muito maior. Especificamente, o motor totalmente elétrico tem uma eficiência

total de cerca de 59,2%, enquanto o motor de combustão interna tem uma eficiência total de 17 a 21% (Vaz et al., 2015). Por esse motivo, a Bloomberg New Energy Finance (2018) aponta que, em algumas configurações, os veículos elétricos têm sido mais baratos que os veículos a combustão na avaliação do custo total de propriedade.

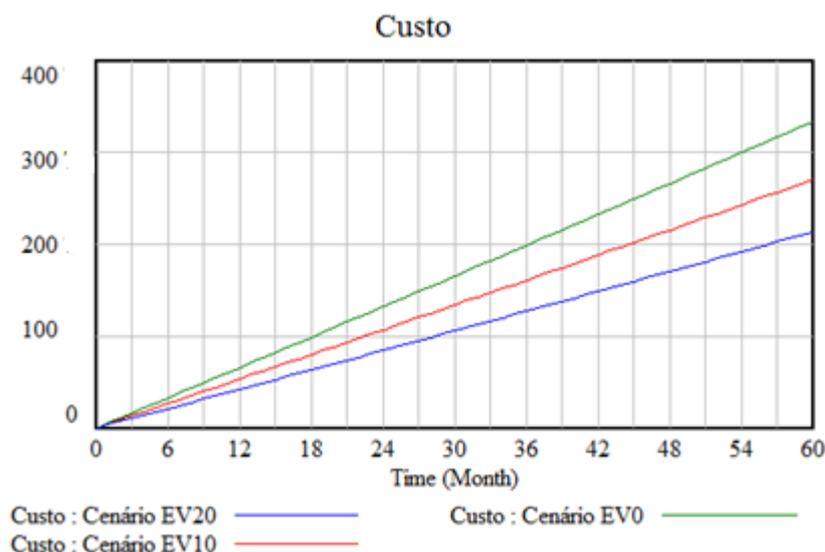
Embora os custos de energia representem apenas uma pequena fração dos custos totais de transporte, os altos preços dos combustíveis fósseis e os baixos preços da eletricidade podem estimular a mudança para ônibus elétricos (DANIELIS; GIAN SOLDATI; ROTARIS, 2018). Espera-se que os preços do petróleo subam nas próximas décadas, devido ao aumento do custo de extração de petróleo em áreas incomuns (WEISS; ZERFASS; HELMERS, 2019).

Além disso, a crescente demanda por petróleo na China e na Índia pode levar a um aumento constante dos preços devido à escassez de oferta. Os preços da eletricidade também devem subir, mas devem ser menores do que os preços do petróleo. As políticas de carbono causarão custos adicionais para os combustíveis fósseis e o impacto geral das mudanças de preços estimulará a eletrificação e o uso de veículos mais eficientes em termos de combustível (DIJK et al., 2013).

A análise financeira do estudo é referente ao gasto pelo consumo do veículo, comparando o gasto com consumo dos carros elétricos e dos carros a combustão interna. A Figura 57 apresenta o resultado da simulação do modelo desenvolvido usando capitais como parâmetro.

O resultado da pesquisa reforça a importância de utilizarmos mais veículos elétricos. Os cenários com carros elétricos obtiverem redução do custo do consumo mensal. O gasto com combustível em uma capital, se somado todos os veículos, atinge cerca de 320 bilhões de reais nos 60 meses simulados, para Vianna, Garcia e Szaniecki (2019) a maioria da população utiliza veículos particulares para seu deslocamento e com isso boa parte do orçamento pessoal é destinado ao seu veículo. Pensando em valores unitários, o custo médio com consumo veicular é em torno de R\$1200,00 mensais em uma capital.

Figura 56 – Gasto de consumo simulação capital



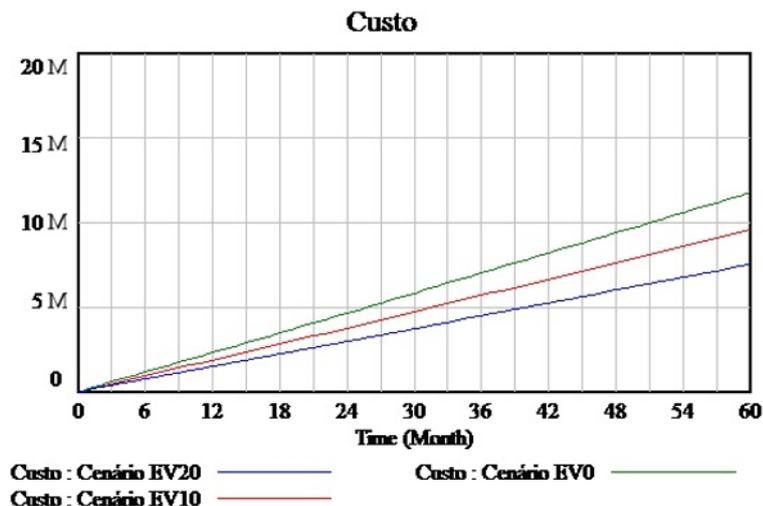
Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

O cenário EV20 diminuirá o custo em torno de 118 bilhões de reais, vinte por cento de carros elétricos apresenta redução de 36,85% quando comparado aos carros a combustão interna. Winebrake, Green e Carr (2017) acrescenta a esse resultado que os carros elétricos também reduzem o custo de manutenção dos veículos utilizados no cotidiano da população. Em valores unitários um carro elétrico poderá diminuir cerca de 432 reais do bolso do cidadão.

O cenário mais mediano, com a inserção de dez por cento de carros elétricos, apresentou resultado satisfatório. Para Borshiver e Tavares (2018) é importante o incentivo de ações contra a poluição ambiental e a eletrificação do transporte é uma ação viável e necessária. Reforça a inserção dos veículos elétricos a economia mensal apresentada pelos cenários, onde surge uma solução para a redução de custos do dia a dia da população.

Em relação ao custo do consumo de cidades não capitais a Figura 58 apresenta a simulação executada. Para De Souza e Hiroi (2021) as cidades não capitais possuem mais empecilhos para a inserção de carros elétricos, principal em relação a modelos, porém como estudo é uma simulação esta questão não foi levada em conta, o objetivo é apresentar os benefícios e auxiliar as pessoas a tomarem melhores decisões.

Figura 57 – Custo EVs em cidades não capitais



Fonte: Autor (2022).

*Desenvolvido no *software* VENSIM-PLE

Como o resultado anterior, a simulação também apresentou redução de custo de consumo semelhante. Em sessenta meses o consumo custará em torno de 12 milhões de reais, enquanto em um cenário com a inserção de vinte por cento de carros elétricos custará 7,5 milhões de reais. O percentual de redução é menor se comparado as capitais, a redução é de em torno de 29,16%. O valor inferior pode ser refletido em relação a mudança do custo do combustível em cidades maiores do que as menores, além do comportamento de deslocamentos não serem semelhantes (SANTOS, 2017). Para Azevedo (2018) o custo dos combustíveis em cidades não capitais varia mais vezes do que as capitais e isso poderá afetar os valores mensais.

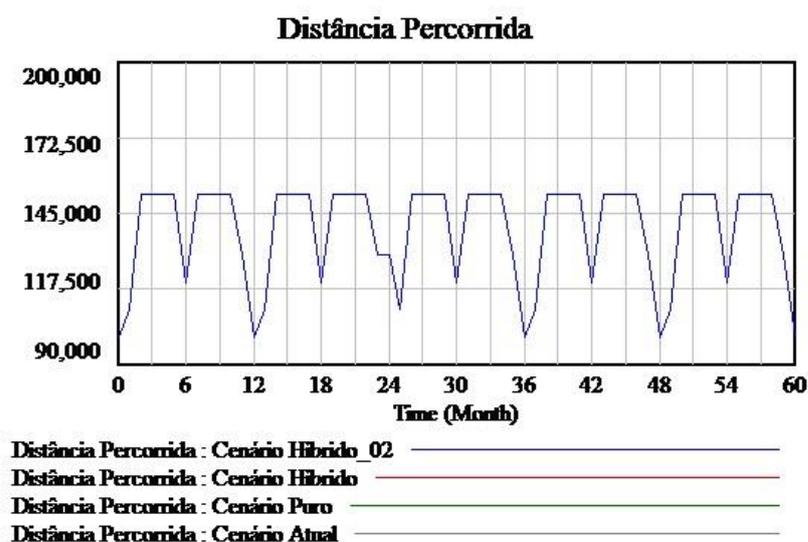
Os resultados financeiros comprovam que o mercado de carros elétricos se mostra muito promissor. Como observado nas figuras o carro elétrico não é um vilão dos custos e não tem somente um apelo ambiental. Seus custos se mostram a longo prazo menores do que os veículos a combustão convencionais.

Para Azevedo (2018) o Brasil possui um grande espaço territorial e uma grande quantidade de recursos para gerar energia “limpa”. A análise bibliográfica permite inferir possíveis causas das dificuldades de desenvolvimento da frota de veículos elétricos que antes pareciam pouco claras e verificar alternativas energéticas viáveis para garantir um futuro sustentável e humano. O país apresenta que não está muito interessado nesse tipo de tecnologia, mas tem um grande potencial em termos de recursos energéticos (AZEVEDO, 2018).

5.2 IMPACTO DA INSERÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS

Para este modelo foram desenvolvidos quatro cenários, foi estipulado o horizonte de tempo de sessenta meses. A utilização de meses como fator de tempo ocorre devido ao fluxo de passageiros conforme o mês, fatores como época do ano e férias das instituições de ensino são fatores importantes para a simulação assim como destacado no modelo anterior. O horizonte de tempo simulado poderá ser modificado em outras simulações, a configuração dessa variável fica a cargo do projetista/usuário, pois esta depende da análise a ser feita. Previamente a logística das rotas do transporte urbano foi mapeada, a quantidade de rotas é calculada conforme o fluxo de pessoas mensal na região estudada. Pela Figura 59 percebe-se o somatório da distância percorrida pelas rotas mensais.

Figura 58 – Distância Percorrida



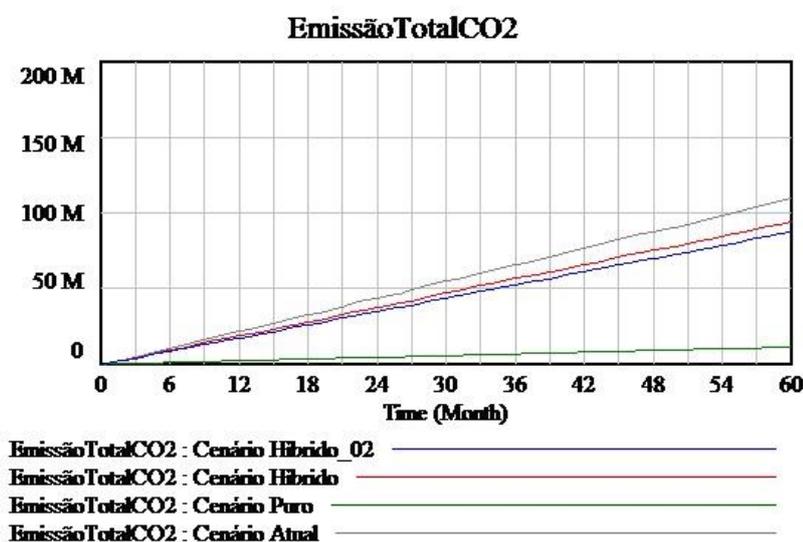
Fonte: ATU (2023)

A primeira análise a ser desenvolvida com o uso do modelo refere-se ao potencial de redução da emissão de CO₂ na atmosfera a partir da eletrificação do transporte urbano. Para analisar a variável, manteve-se o número de aquisições de novos ônibus em 6% da frota. O resultado mostra, que ao fim de sessenta meses, o cenário puro será capaz de reduzir a emissão de CO₂ em até 110.000 toneladas de CO₂. Os cenários com a inserção de ônibus híbridos serão capazes de reduzir em torno de 98.000 e 96.000 toneladas de CO₂. Assim, o resultado denota a importância de inserir veículos elétricos na rotina diária da população. O cenário atual também

apresenta uma taxa de redução pelo fato da inserção de Biodiesel no combustível que é utilizado na atualidade.

O resultado corrobora com o estudo de Janovec e Koháni (2019) que destaca a importância de buscar alternativas de utilização de veículos elétricos para redução de emissões de gases maléficos ao meio ambiente. Segundo Santana e Sampaio (2021) os ônibus elétricos apresentam um fator adicional para a substituição dos combustíveis fósseis e a consequente redução da emissão de GEE, contribuindo para a preservação do meio ambiente. A Figura 60 apresenta a variação da quantidade de redução de CO₂ ao longo do tempo simulado.

Figura 59 – Redução CO₂



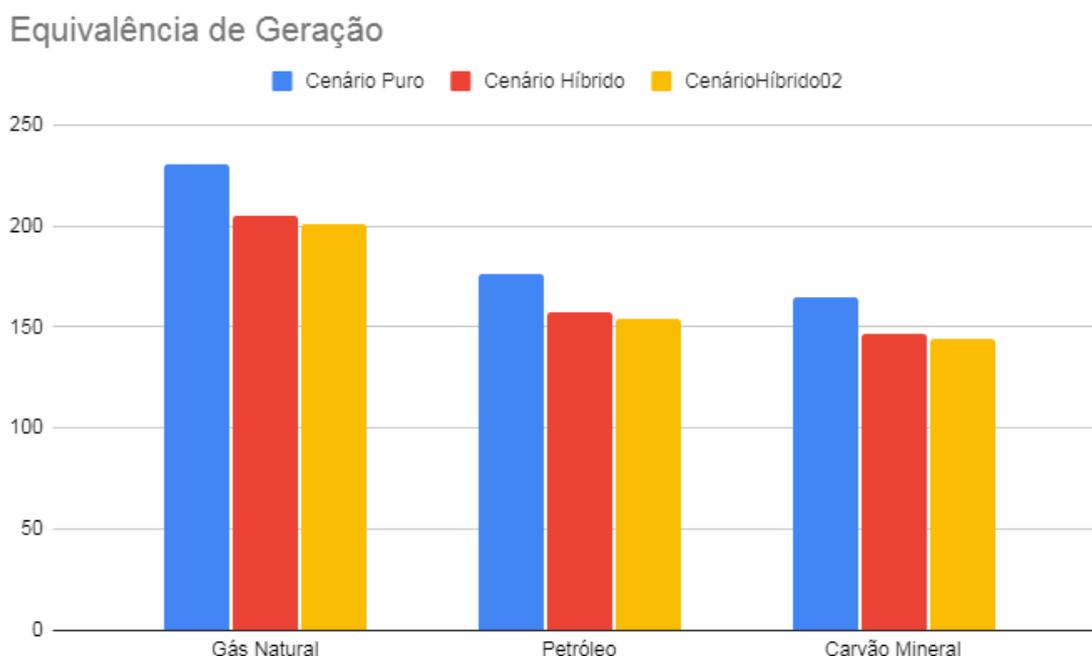
Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

Essa redução de emissão pode ser comparada a equivalência de geração de energia elétrica. Ambos cenários com ônibus elétrico apresentaram resultado favorável à redução de emissão de CO₂. O Gráfico 6 apresenta quantos GW poderia ser gerado com a redução de CO₂, o objetivo do gráfico é demonstrar a importância da redução de gases maléficos ao meio ambiente.

Analisando a usina termoeletrica que menos gera gases para gerar energia, a usina de gás natural, os valores relativos a redução pelos ônibus puramente elétrico geraria cerca de 230 GW, já os ônibus híbridos poderiam gerar entre 205 e 201 GW. Valor equivalente a consumo de uma grande cidade em um ano, conforme dados do Ranking paulista de energia (2021). Já uma usina com maior geração, no caso as usinas movidas a carvão mineral, os ônibus puramente

elétricos reduziram CO2 equivalente a gerar 164 GW, já os ônibus híbridos alcançaram equivalência entorno de 143 a 146 GW.

Gráfico 6 – Equivalência de geração de energia



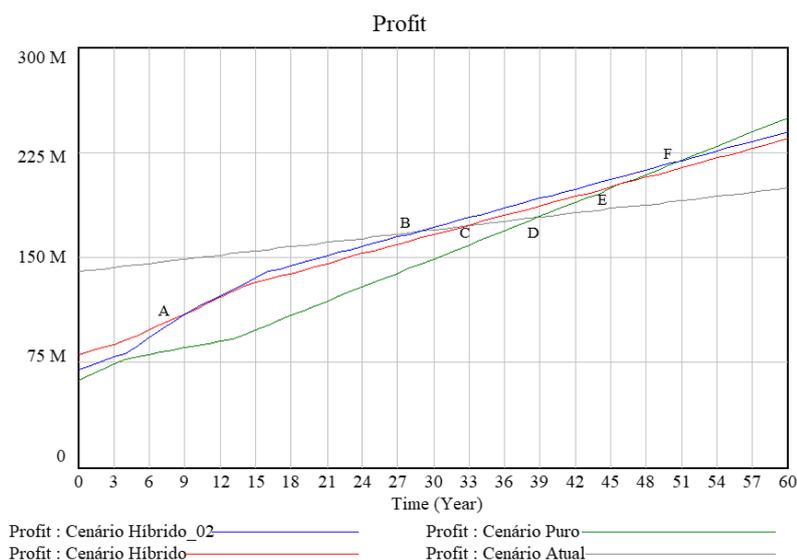
Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

Outra análise realizada no modelo de simulação diz respeito à quantidade de dispositivos que poderiam ser reutilizados, mas que têm como destino os resíduos eletrônicos da instituição. No caso específico, foi avaliada a quantidade de CPUs descartadas, uma vez que elas apresentavam o maior número de componentes (placas, memórias, processadores, etc.) em sua composição. Atualmente, todas as CPUs são descartadas como lixo eletrônico, mas caso fosse implantada uma política de reaproveitamento dos dispositivos, como, por exemplo, a remanufatura de computadores, verifica-se que com os cenários definidos anteriormente a quantidade de CPUs descartadas (e-waste) no décimo ano simulado seria de apenas 36 (20,2%) unidades do total gerado no cenário otimista, e 142 (79,8%) unidades, no moderado. A Figura 9 apresenta a variação anual da quantidade descartada de CPUs comparada à quantidade considerada lixo eletrônico na instituição.

Na última das análises mostradas neste artigo. Nessa análise, parte-se do pressuposto que, com o prolongamento do ciclo de vida de um computador, o consumo de energia deste é menor do que o de um novo, pois, no ciclo de vida dos equipamentos novos, a etapa que consome mais energia é a de sua manufatura (77% do consumo total). Para a realização dos

cálculos, foram utilizadas as taxas de consumo apresentadas por Frota-Neto e Bloemhof (2012), já descritas anteriormente no artigo. A evolução anual da redução da emissão do CO₂ pode ser visualizada na Figura 61, na qual se verifica que, em ambos os cenários, houve pouca redução das emissões no início do tempo simulado. No cenário otimista, no décimo ano simulado, as emissões foram reduzidas em 569 618 kg CO₂, por sua vez, no cenário.

Figura 60 – Profit



Fonte: Resultado da pesquisa (2022).

O ponto “A” marcado na Figura 11 representa o momento onde o cenário Híbrido e Híbrido_02 se iguala, a partir do mês 14 o cenário Híbrido_02 apresenta maior Profit que o cenário Híbrido_2 e durante toda a simulação não apresenta menor profit que o cenário Híbrido que pelos primeiros nove meses atingiu melhor profit que o cenário Híbrido_02. Ambos cenários simulam a inserção de ônibus híbridos com diferentes quantidades de baterias.

O Cenário atual durante 28 meses apresentou o maior profit quando comparado aos três cenários propostos. O primeiro cenário a igualar o seu profit foi o cenário Híbrido_02, o ponto “B” representa esta relação, a partir do mês 29 da simulação o cenário Híbrido_02 atingi valor de profit maior que o cenário atual.

Durante 33 meses de simulação o cenário atual obteve maior profit que dois cenários, porém o ponto “C” representa o momento onde o cenário Híbrido e o cenário Atual se igualam. A partir do mês 34 o cenário Híbrido já apresenta maior profit que o cenário Atual.

O último cenário a igualar o valor de profit do cenário atual é o cenário com inserção de ônibus puramente elétricos, o ponto D representa este momento onde o cenário Puro o mês 39

igual a seu valor de profit. A partir do mês 40 o cenário já irá apresentar maior profit que o cenário atual, portanto a empresa que optar pela inserção de ônibus cem por cento elétrico demorará quarenta meses para obter lucro financeiro.

O Cenário Puro iguala o cenário Híbrido no mês 45 e este momento é representado pelo ponto E. O cenário puramente elétrico apresentará lucro a empresa, comparado ao cenário elétrico, 46 meses de sua aplicação. O cenário híbrido apesar de possibilitar maior rendimento para a empresa durante 45 meses, porém a partir do mês 46 o cenário com ônibus puramente elétrico apresentará melhor desempenho. Por fim o ponto “F” representa o instante onde o cenário híbrido e o cenário puro se igualam. Durante 51 meses o cenário híbrido_02 foi o com maior profit quanto comparado ao cenário puro.

Em relação aos cenários, durante a simulação em sessenta meses o cenário Puro acumulará em torno de R\$ 228 milhões de profit, fato que pode ser explicado por Vidotto (2021) onde o autor apresenta justificativas financeiras para a inserção do ônibus elétrico, como por exemplo a redução da manutenção mensal. Para Bednar et al (2016), Antonioli, Montenegro e Ruther (2017) e Casale e Mahoney (2018) além de custos reduzidos em manutenção, o custo com abastecimento é inferior ao custo do abastecimento com diesel. Além disso, estima-se que a vida útil máxima para VEs em comparação a veículo diesel seja superior, justificada por questões técnicas como maior durabilidade e menor presença de partes móveis (EPE, 2020a).

Em relação aos cenários, durante a simulação em sessenta meses o cenário Puro acumulará em torno de R\$ 234 milhões de profit, fato que pode ser explicado por Vidotto (2021) onde o autor apresenta justificativas financeiras para a inserção do ônibus elétrico, como por exemplo a redução da manutenção mensal. Para Bednar et al (2016), Antonioli, Montenegro e Ruther (2017) e Casale e Mahoney (2018) além de custos reduzidos em manutenção, o custo com abastecimento é inferior ao custo do abastecimento com diesel. Além disso, estima-se que a vida útil máxima para VEs em comparação a veículo diesel seja superior, justificada por questões técnicas como maior durabilidade e menor presença de partes móveis (EPE, 2020a). Em comparação ao cenário Atual o cenário Puro obterá mais de cinquenta milhões de reais de profit, sendo assim o cenário mais positivo para a inserção de ônibus.

Em relação aos cenários híbridos, que são compostos de ônibus movidos por energia elétrica e diesel, o cenário Híbrido_02, por R\$ 2 milhões, é o cenário com maior rentabilidade. O cenário Híbrido_02 acumulará profit de aproximadamente R\$ 230 milhões, enquanto o cenário Híbrido atingirá em 60 meses por volta de R\$ 228 milhões. Blloomber (2021) destaca que os ônibus híbridos são os melhores para a transição da eletrificação do transporte e que comparado aos ônibus movidos a combustão interna apresentam potencial redução de custos

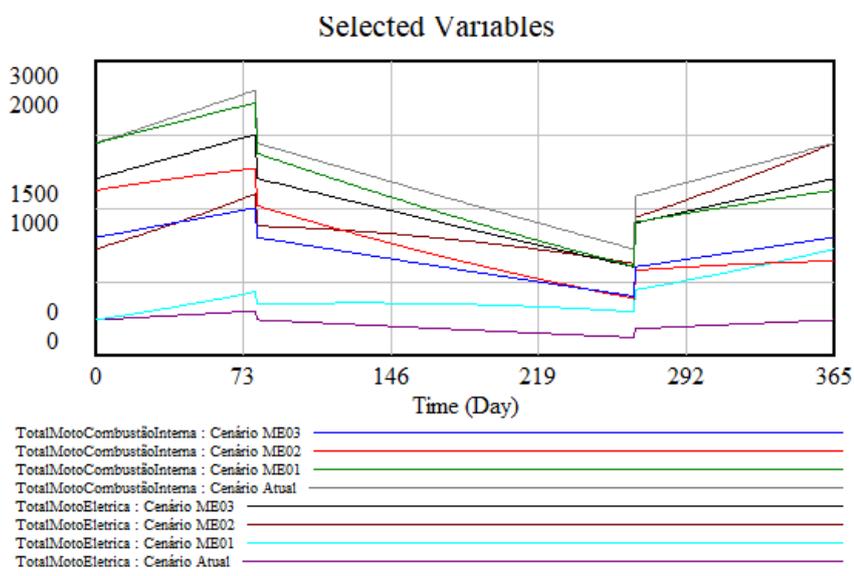
para as empresas de transporte urbano, sendo uma possibilidade estratégica para atingir melhor resultado. Dullius et al (2017) acredita que os ônibus elétricos irão modificar o mercado dos transportes urbanos. Fica comprovado pela simulação que a inserção de ônibus elétricos trará retorno financeiro para a empresa que resolver utilizar cenários de veículos elétricos.

5.3 IMPACTO DA INSERÇÃO DE MOTOS ELÉTRICOS

Em relação ao modelo da inserção das motos elétricas nos aplicativos de delivery foi utilizado o horizonte de tempo de 365 dias. Foi realizado a simulação diária pelo fato das diferenças de vendas ocorridas por dia da semana, além disso conforme a época do ano as entregas aumentam ou diminuem. Não foi simulado mais de um ano pelo fato de falta de dados para avaliar o comportamento das entregas em um fluxo maior do que 365 dias.

A Figura 62 apresenta a variações de veículos por cenário. O comportamento é baseado na época do ano e também média de pedidos diário. O verão é a época com maior volume de pedidos, portanto é necessário maior volume de entregadores. A média foi calculada por dia, a medida por dia possibilita inserir o comportamento correto das entregas, já que também existem diferenças de entrega por dia da semana.

Figura 61 – Quantidade de motos por cenários

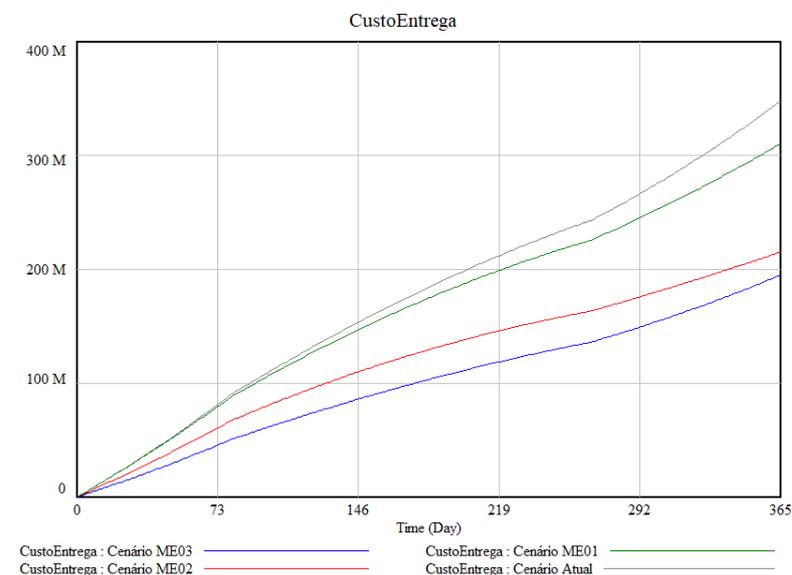


Fonte: Desenvolvido pelo Autor (2022).

Inicialmente foi avaliado o custo da entrega. O objetivo é verificar se as motos elétricas ou híbridas possibilitam a redução deste custo. Chen, Tsai e Hsieh (2017) acreditam que a

eficiência energética é um fator que influencia a decisão dos motociclistas em adotar o uso de motocicletas elétricas. A Figura 63 destaca o custo de entrega por cenário.

Figura 62 – Custo entrega



Fonte: Resultado da Pesquisa (2023).

Dentre os quatro cenários analisados, o cenário atual apresenta o maior custo para o entregador de delivery. Como o modelo é baseado em estoque-fluxo a Figura x apresentou o acumulo em reais de cada cenário. O cenário atual acumulará mais de 310 mil reais de custo bruto para os trabalhadores, lembrando que este cenário não possui a inserção de motos elétricas e sim é simulada com as motos utilizadas no atual momento.

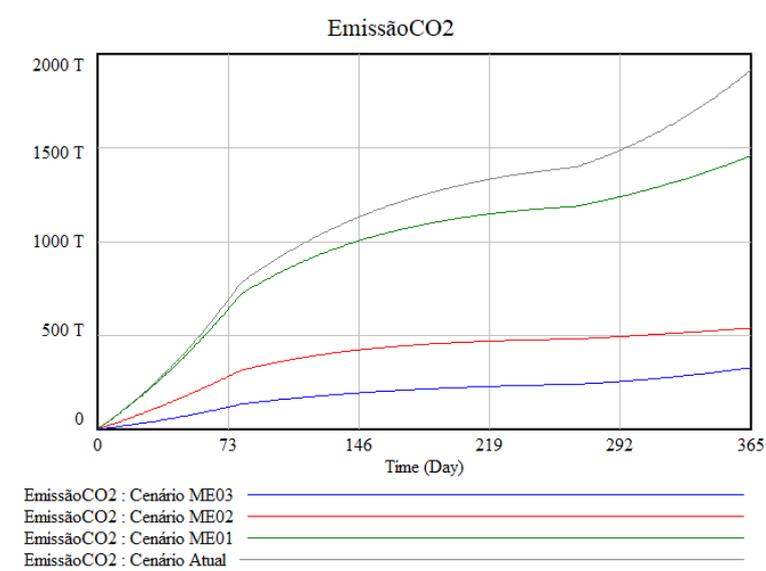
Com a pandemia as entregas por delivery ganharam destaque e somado a este fator a crise econômica pelo qual passamos, a inserção de uma moto com menor custo é de suma importância. Percebe-se que ambos os cenários propostos obtiveram resultado adequado para a afirmação anterior. O cenário ME03 reduzirá as entregas em cerca de cento e quinze mil reais, tal valor é equivalente a economia de 557 reais mensais de cada entregador. Vale ressaltar que o valor apresentado no gráfico é a soma do custo de todos os entregadores envolvidos na simulação. O cenário ME01, que é um cenário mais ponderado, apresentou economia de aproximadamente 271 reais mensais a cada entregador, provando a importância de inserirmos no cotidiano veículos movidos a energia limpa, Para Liu e Lai (2020) este resultado é importante para a mudança no comportamento do sistema de transporte mundial.

Os resultados corroboram com o estudo de Wu et al. (2015) onde os pesquisadores apontam que a economia de energia é um fator importante quando os motociclistas estão

considerando o uso de uma motocicleta elétrica. Autores como Huang, Kuo e Chou (2018) concluíram que as motocicletas elétricas oferecem um benefício significativo de economia de energia para uma alta economia de combustível. Portanto, a percepção de economia no gasto com combustível deverá influenciar a aceitação das motocicletas elétricas pelos motociclistas.

No que diz respeito às preocupações ambientais, como as motocicletas elétricas contribuem principalmente para a redução da poluição do ar (HUANG et al., 2018), um dos motivos pelos quais um motociclista consideraria uma motocicleta elétrica seria a percepção de seu desempenho na redução da poluição. A Figura 64 apresentam os resultados da simulação relativas a emissões do sistema de entrega por delivery.

Figura 63 – Emissão CO2 sistema entrega por delivery



Fonte: Resultado da Pesquisa (2023).

Para esta simulação foi usado a lógica apresentada no capítulo anterior, as motos expõem até 5,5 gramas por quilômetro rodado (g/km), em relação as motos híbridas utilizadas no estudo valor varia de 1,28 até 3,85 gramas por quilometro. Pelo gráfico da Figura x percebe-se a importância de incentivar a inserção de motos elétricas no cotidiano das entregas por delivery. O Cenário atual emitirá em um ano mais de 1800 toneladas de CO₂, enquanto o cenário ME03 atingirá no máximo 275 toneladas, tal diferença não levou em consideração a emissão de CO₂ para gerar a energia elétrica das motos, tal valor será apresentado no capítulo a seguir. O cenário ME02 também poderá incentivar a inserção de motos elétricas, o mesmo irá emitir cerca de 1300 toneladas a menos que o cenário atual. Por outro lado, o cenário com menos volume de inserção de motos elétricas, o cenário ME01, também apresentou resultado

positivo, emitindo menos CO₂, tal cenário irá emitir aproximadamente 1480 toneladas, valor alto, porém menor que o cenário atual.

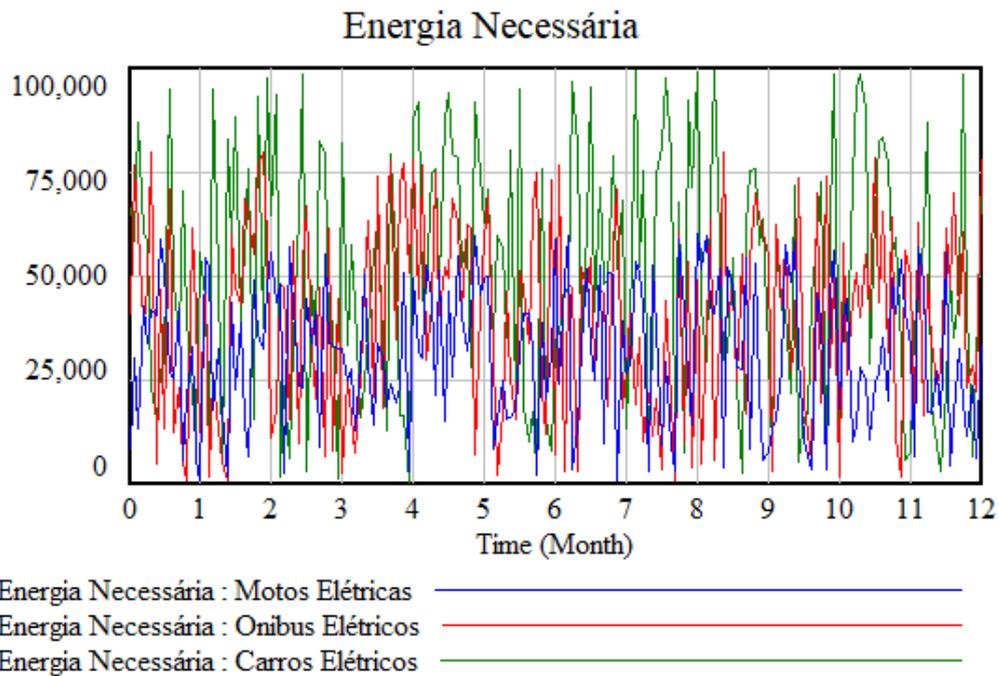
Tais resultados corroboram com o estudo de Koossalapeerom et al (2019) onde indicou que as motocicletas elétricas consomem aproximadamente oito vezes menos energia e emitem aproximadamente a metade do CO₂ equivalente das motocicletas a gasolina. Esses achados são consistentes com os de Tuayharn et al. (2015), que verificaram que as emissões de CO₂ equivalente da motocicleta elétrica variaram de 10,70 a 20,67 gCO₂/km, dependendo da produção do recurso. Cox e Mutel (2018) também acrescentam que as motos elétricas serão de suma importância para combater o aumento das emissões de gases nocivos à saúde urbana, principalmente em cidades muito urbanizadas e com problemas de poluição no ar.

Os resultados corroboram com os estudos de diversos autores, como Zhu et al (2019) e Redman (2015) que apontam para o benefício de economia de energia e benefício ambiental da inserção das motos elétricas. Como potencial alternativa às motocicletas a gasolina, surgiram soluções com emissões zero (no sentido de que utiliza energia reciclada), baixo ruído e alta eficiência energética: motocicletas elétricas ou veículos elétricos de duas rodas motorizados (Redman, 2015). As motocicletas elétricas são uma boa solução ambiental, pois são movidas a eletricidade e não emitem gases de escapamento (Wu et al, 2015). A difusão de motocicletas elétricas é importante na redução da poluição do ar em áreas metropolitanas densamente povoadas (LIU; LAI, 2020)

5.4 ENERGIA RENOVÁVEL

A energia solar fotovoltaica consiste em uma fonte de energia limpa. Há duas formas de aproveitar esta fonte natural: através de sistemas de aquecimento de água ou através de placas fotovoltaicas (GEBERT; MULLER; CASAGRANDE, 2017). Neste estudo usou o modelo de placas fotovoltaicas. Inicialmente para calcular a quantidade de placas necessárias foi simulado a energia demandada por modelo simulado anteriormente. A Figura 65 é resultante da simulação da inserção dos veículos elétricos

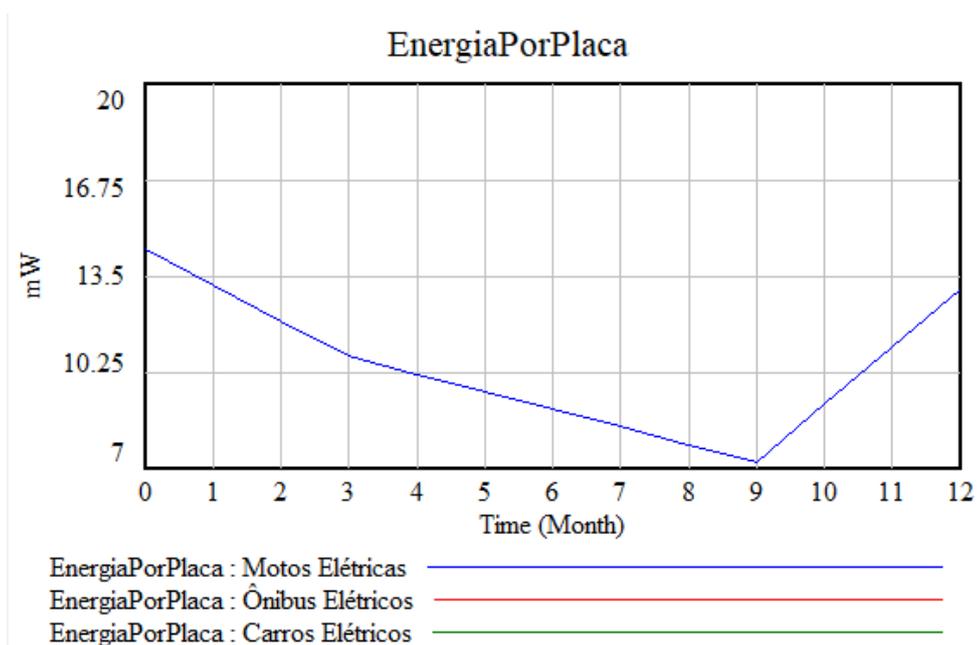
Figura 64 – Energia necessária por modelo simulado



Fonte: Autor (2023).

Para esse resultado apresentado na Figura 65 foi utilizado a função “RANDOM UNIFORM”, essa função tem o objetivo de inserir valores gerados de um conjunto de interações, fornecendo uma distribuição uniforme entre máximo e mínimo. Foi utilizado essa função para variar o consumo de energia por cada trecho analisado. Percebe-se que a cada mês essa variação é executada, a ideia é simular diferentes valores, já que as rotinas mensais, tanto de consumo como de uso, é diferente. A seguir a Figura 66 apresenta a variação de geração de energia mensal. Sabe-se que conforme as épocas do ano a geração de energia por placas fotovoltaicas são diferentes.

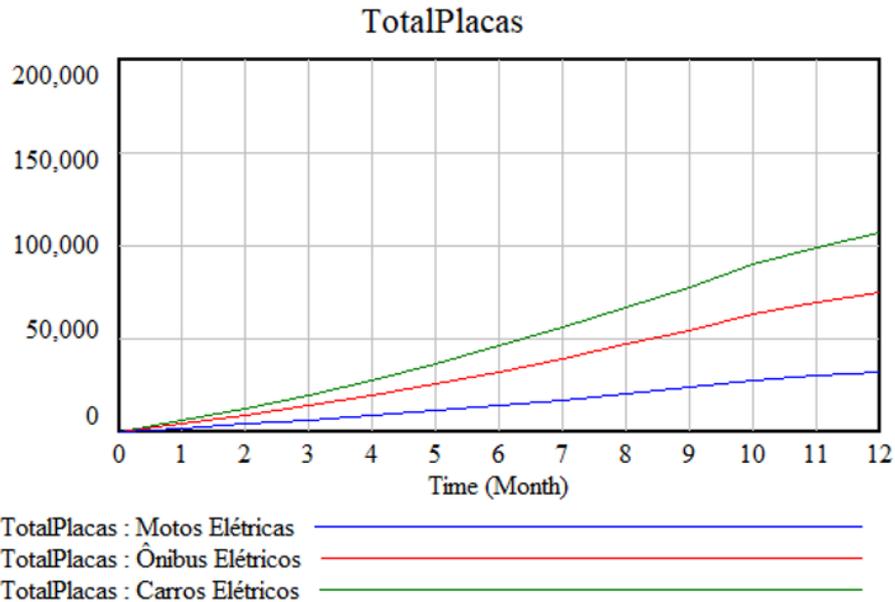
Figura 65 – Energia gerada média por Placa



Fonte: Autor (2023).

Percebe-se pela Figura 66 que valor gerado por placa varia de 7,7 mW A 14,87 Mw, tal valor varia conforme a radiação solar, já que o verão é o período de maior rendimento de captação de energia pelas placas, conforme destaca Choudhary e Srivastava (2019) que afirma esse apontamento. A seguir será apresentado o total de placas por modelo desenvolvido.

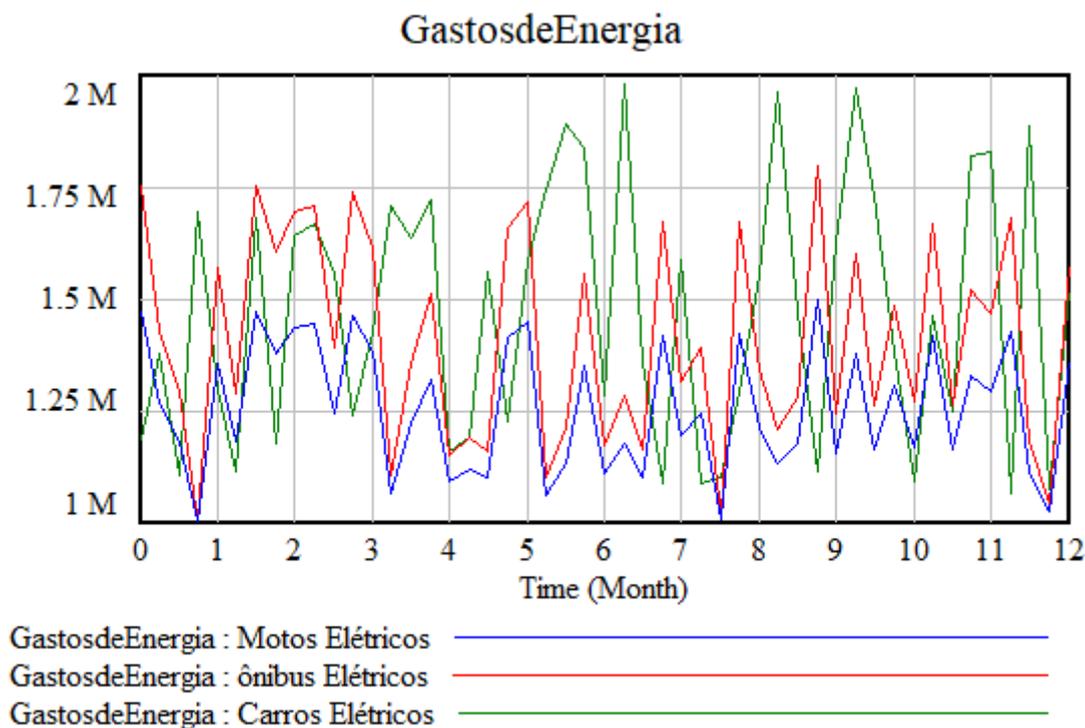
Figura 66 – Total de Placas



Fonte: Autor (2023).

O modelo de carros elétricos é o que mais necessitará de infraestrutura de geração de energia renovável. Será necessário a inserção de mais de cem mil placas solares para o modelo ter êxito, lembrando que essa simulação é um valor médio dos cenários simulados em cada capítulo. Os ônibus elétricos deverão possuir em suas garagens cerca de sessenta mil placas elétricas, esse modelo é o mais simples de ser aplicado, segundo Arif et al (2020) o tamanho das garagens possibilita a inserção de um conjunto de placas solares capazes de suprir a energia dos ônibus elétricos. Por fim os modelos das motos elétricas são aqueles que menos necessitam de energia renovável, resultado que não apresenta novidade pelo fato de ser o veículo elétrico que demanda menor energia, para Niyonsaba, Samvura e Bikorimana (2021) frisa que as motos elétricas são as que menos dependem de infraestrutura elétrica. A seguir será apresentado o resultado do modelo de gastos com a energia elétrica demandada.

Figura 67 – Gastos de energia elétrica



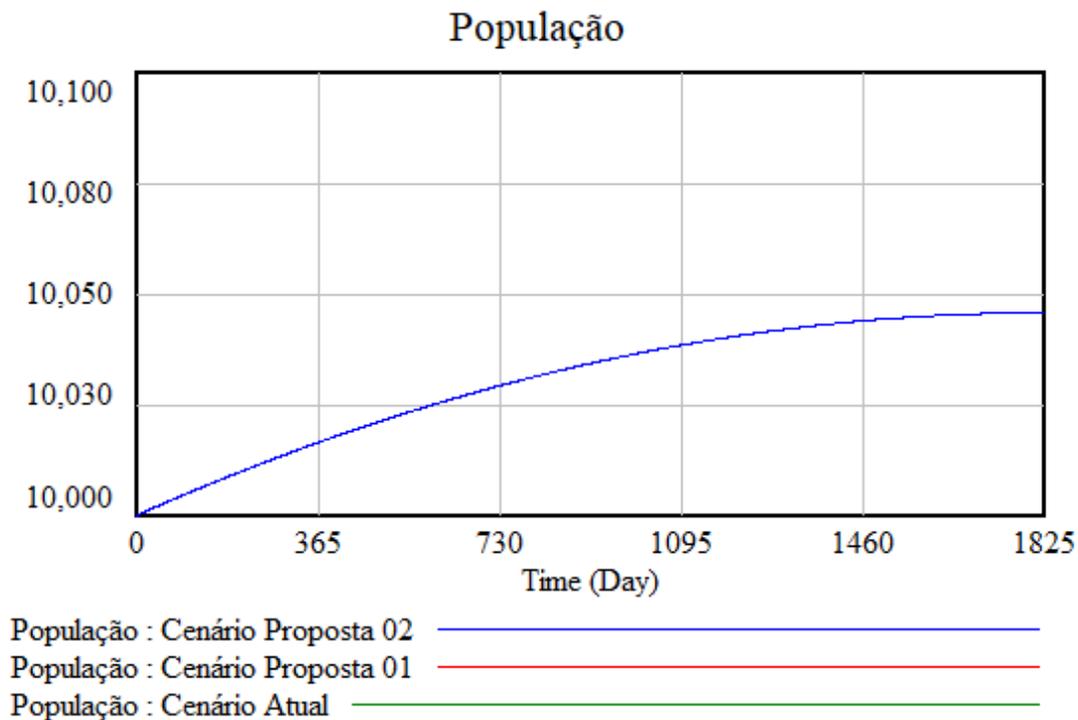
Fonte: Autor (2023).

Pelo gráfico percebe-se a variação de gastos com a energia elétrica, tudo pelo fato da interação entre o custo da energia elétrica mensal e também pelo consumo da mesma. Percebe-se que os carros elétricos são os com maior despesa de energia, esse resultado é resultante do fato de possuir mais carros elétricos simulados do que ônibus elétricos, que por sua vez é o segundo veículo elétrico com maior gasto de energia. As motos elétricas são as com menor despesa de energia elétrica. Para Boçon (2019) o custo com a energia elétrica varia conforme a localidade e o modo de abastecimento de energia, também dependem de fatores ambientais que são importantes para o modelo de captação de energia do sistema elétrico de potência brasileiro.

5.5 CASA INTELIGENTE COM VEÍCULOS ELÉTRICO

Para a simulação do modelo foi necessário compreender o crescimento populacional da região estudada. A Figura 69 apresenta a projeção conforme dados do IBGE (2023). Vale lembrar que o modelo poderá simular o comportamento de qualquer cidade ou região do Brasil.

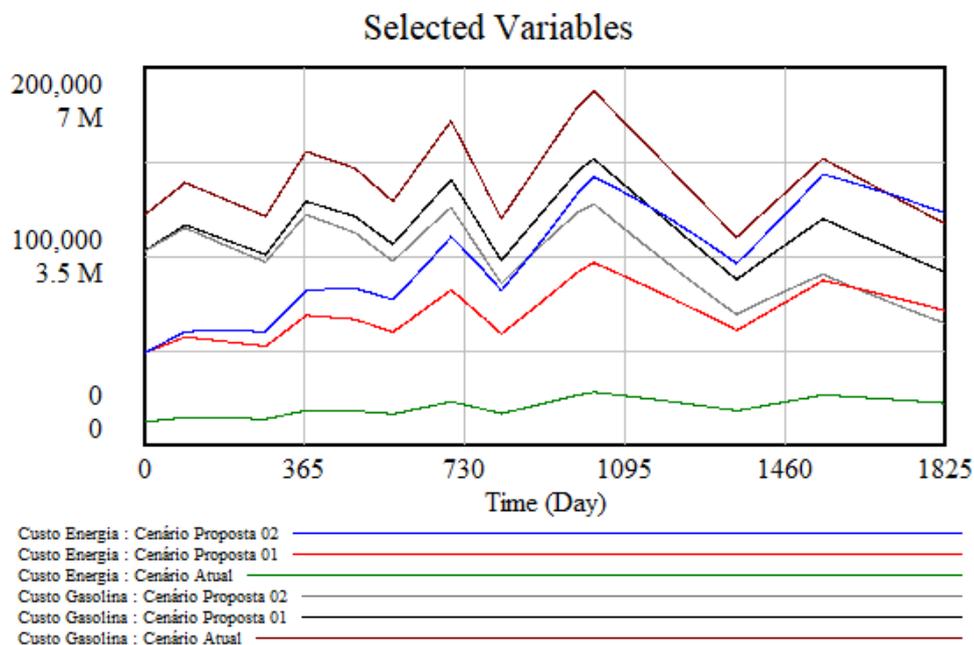
Figura 68 – População da região estudada



Fonte: Autor (2023).

A eletrificação da mobilidade para Grimm (2021) é considerada um trunfo para as novas políticas de sustentabilidade e de mitigação dos fatores influenciadores das mudanças climáticas. Diante do exposto a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) projeta uma frota de pouco mais de meio milhão de unidades para 2030 e uma frota de 3,23 milhões de carros elétricos para o ano de 2035, caso o Brasil siga a tendência mundial. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) projeta uma frota de 11,8 milhões de unidades para 2050, quase 9% da frota nacional estimada, em relação as motos elétricas a ANFAVEA (2022) destaca que a projeção para 2050 é de um aumento de aproximadamente 23% da frota atual. Buscando justificativa para os veículos elétricos foi analisado o custo de cenários com inserção de veículos elétricos comparado ao cenário atual com predominância de veículos movidos a gasolina ou etanol. A Figura 69 a seguir apresenta a variação de economia apresentada pelos veículos.

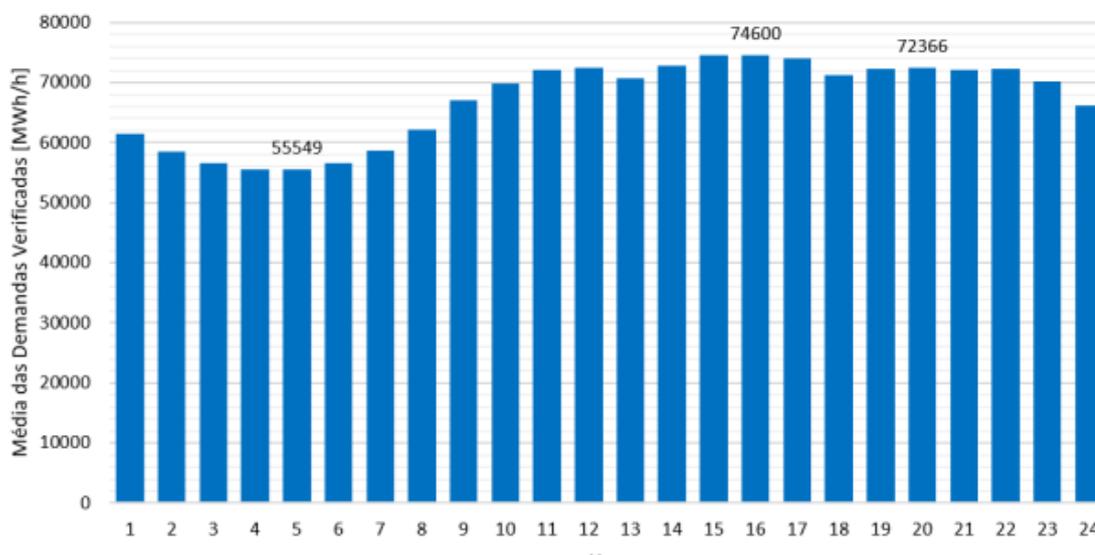
Figura 69 – Variação de economia apresentada pelos veículos



Fonte: Autor (2023).

Para analisar o impacto na rede de energia elétrica inicialmente foi mapeado a demanda necessária da região por hora, foi realizado uma média para esse cálculo. Tal dado foi validado com os dados da ONS (2019). O Gráfico a seguir apresenta a variação de demanda média por hora.

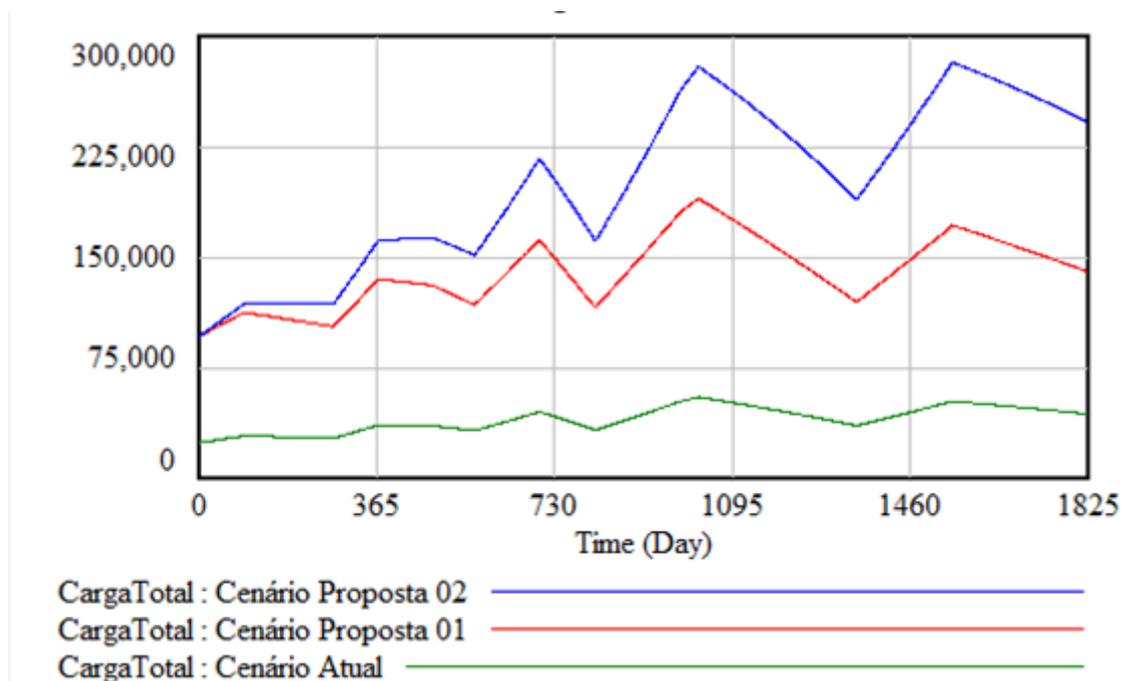
Figura 9 – Curva de carga média de 2019



Fonte: ONS (2019); GRIMM (2023).

Para Grimm (2023) a demanda observada entre 8 e 17 horas é predominantemente comercial, a queda às 13 horas reflete o horário de almoço, bem como a demanda entre 18 e 23 horas é predominantemente doméstica e a queda às 18 horas reflete o deslocamento trabalho-casa. Provavelmente existem picos de demanda às 16 e às 20 horas. Das 24 às 7 horas a rede está em estado de subutilização. Entendendo a demanda por hora e podendo calcular o valor médio diário a Figura 70 apresenta a demanda de energia necessária para carregar os veículos elétricos de cada cenário projetado.

Figura 70 – Carga Total

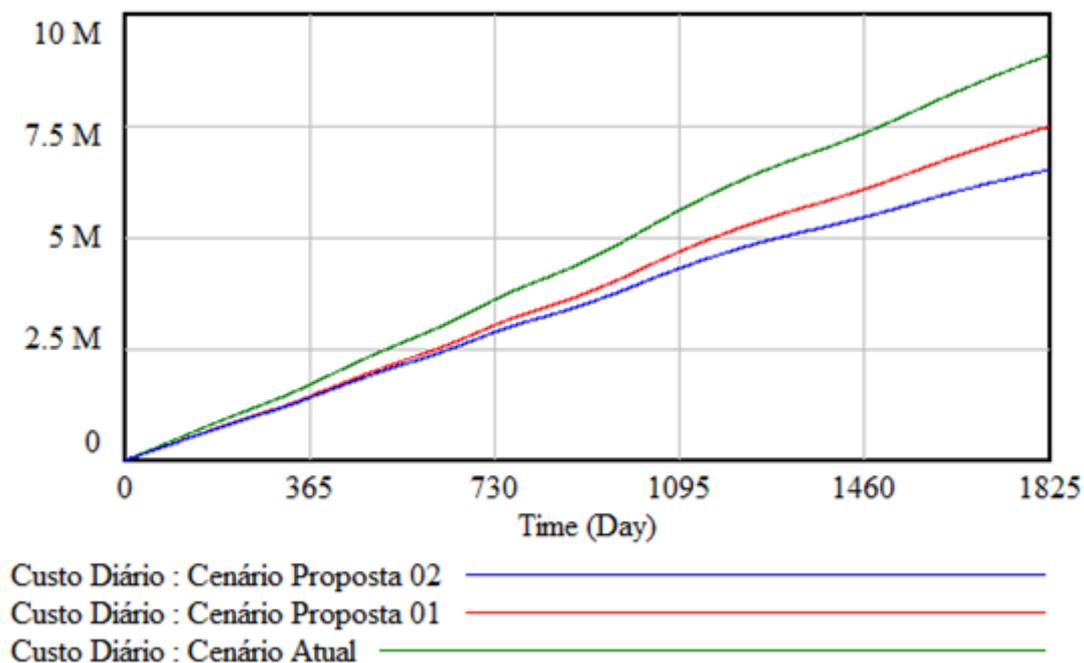


Fonte: Autor (2023).

Percebe-se pela Figura 70 a mudança de demanda de energia pela inserção dos veículos elétricos. É de suma importância a inserção de energia distribuída e renovável nas residências do Brasil. Com essa inserção o modelo poderia ser aplicado sem prejuízos elétricos ao cotidiano das pessoas.

Em relação ao comparativo de custo de abastecimento (veículos a combustão interna) e de recarga (Veículos elétricos) a Figura 72 apresenta este comparativo.

Figura 71 – Custo diário

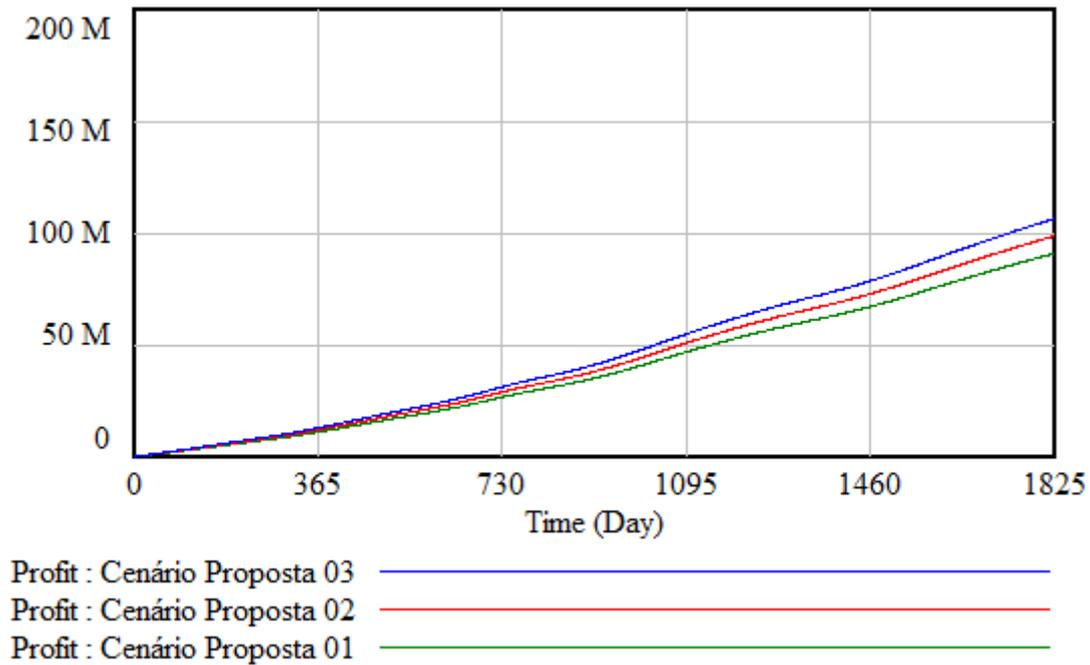


Fonte: Autor (2023).

A Figura 71 destaca que os cenários propostos comparado ao cenário atual, apresentam economia significativa. O cenário Proposto02 representa um gasto com recarga de aproximadamente R\$ 1369,00 diários comparado ao cenário atual, enquanto o Cenário Proposto01 irá economizar R\$ 821,00 de economia. Tais resultados corroboram com o estudo de Barulli et al (2020) onde os autores frisam que carros elétricos são ferramentas importantes para economizar custos relativos ao transporte diários. Holmberg e Erdemir (2019) acrescentam que os veículos elétricos também pode ser fontes importantes para arrecadar capital através do mercado de crédito de carbono, já que são veículos com menor emissões de poluentes.

Para simular uma das propostas do modelo, o lucro pela venda de energia acumulada em veículos elétricos, a Figura 73 apresenta os resultados dos cenários propostos.

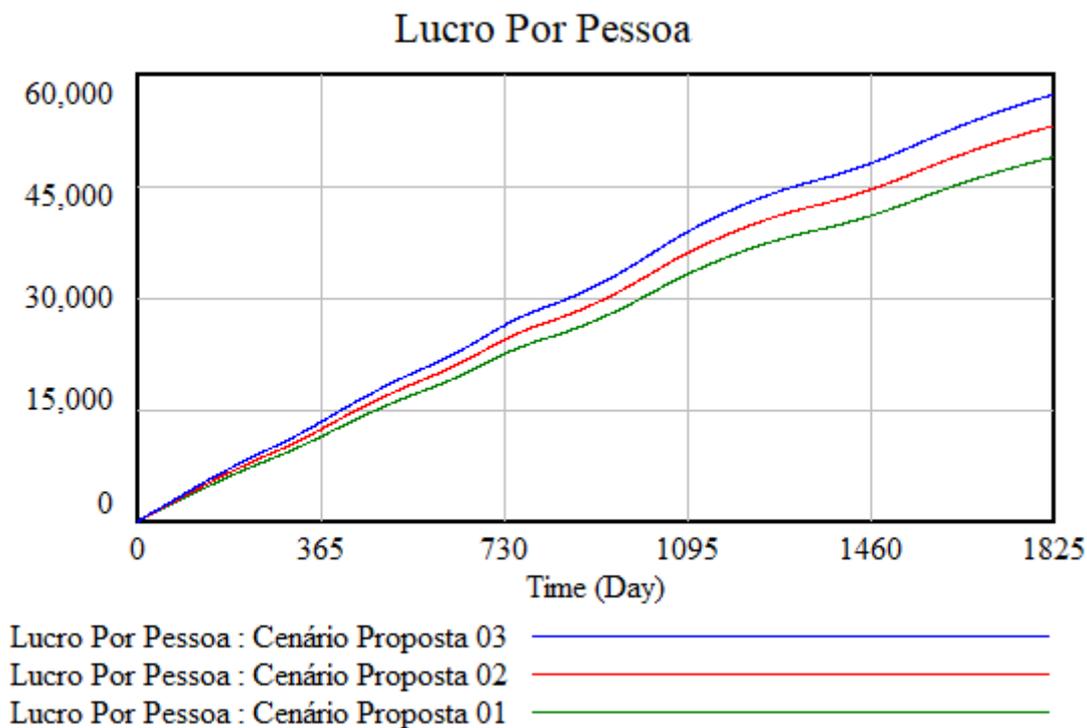
Figura 72 – Lucro da venda da energia acumulada



Fonte: Autor (2023).

Esse modelo utilizou como base que a energia acumulada seria vendida nos momentos de alta demanda de energia, são os momentos com maior custo de watts hora. Percebe-se que o cenário Proposta 03 é capaz de gerar cerca de 103 milhões de reais em 1825 dias. Tal valor justifica a inserção de veículos com o intuito também de servir como apoio as concessionais de energia nos momentos de alta demanda. Pelo fato da energia gerada no Brasil ser basicamente por hidrelétricas, Zanella (2022) destaca que sendo usada ou não, a energia é gerada, ela só não é armazenada, com isso os veículos elétricos poderiam ser mini acumuladores de energia e servirem como suporte para momentos de falta de energia em locais com consumo alto de energia elétrica. Tal fato justifica a aplicação do modelo do estudo, além de apoiar em momentos de falta de energia os veículos poderão ser um modo de gerar renda para as famílias. A Figura 74 a seguir apresenta quanto cada pessoa proprietária de um veículo elétrico poderá gerar de renda.

Figura 73 – Lucro da venda da energia acumulada por pessoa



Fonte: Autor (2023).

Pensando no fato de uma residência ter em média um veículo elétrico e que segundo dados do IBGE (2022) no Brasil moram cerca de três pessoas por residência a Figura x apresentou quanto cada residência poderia acumular em cinco anos, percebe-se que em média poderia acrescentar na renda família em torno de mil reais apenas da venda de parte da energia acumulada. Dentre os cenários os valores variam entre R\$ 800,00 e R\$1200. Neste valor já está descontado o valor de recarga, para isso os veículos ficariam abastecendo entre as 11 horas da noite e as 6 horas da manhã, onde o valor de recarga é inferior ao valor de pico.

5.6 IMPACTOS A SOCIEDADE GERADOS PELA INSERÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Este capítulo tem por objetivo analisar os impactos positivos dos modelos apresentados nos capítulos anteriores. Inicialmente será apresentado dados sobre redes elétricas inteligentes, é de suma importância para a inserção de veículos elétricos que seja investido no conceito de smart grids. Posterior esta análise será apresentada gráficos relativos a redução de CO₂ e que equivalência de geração de energia esse resultado apresenta para a sociedade.

5.6.1 Rede Elétrica Inteligente

As Smarts Grids surgem com a necessidade de modernizar a rede elétrica tornando-a mais ecológica e com melhor utilização da energia. Como as Smart Grids são mais autônomas e possibilitam aumentar a eficácia e a eficiência da entrega de energia, as concessionárias podem usar a infraestrutura existente e minimizar a necessidade de construir mais usinas e subestações. Para Tuballa e Abundo (2016), as smarts grids surgem para possibilitar que os recursos de energia renovável sejam conectados com segurança à rede e, conseqüentemente para complementar o fornecimento de energia para os clientes, através de geração e armazenamento de energia distribuída.

Para Sharma e Saini (2015), uma Smart Grid é uma rede de eletricidade que pode integrar de forma inteligente as ações de todos os usuários conectados a ela, fornecendo eficientemente fontes de eletricidade econômica e segura, além de gerar informações que poderão servir para futuras decisões. Já para Purkayastha e Savoie (1990), uma Smart Grid refere-se a uma rede de última geração que integra a tecnologia da informação à rede elétrica existente, buscando otimizar e acrescentar eficiência energética da rede, através de uma troca bidirecional de informações sobre eletricidade entre fornecedores e consumidores em tempo real.

Tuballa e Abundo (2016), em seu estudo, afirmam que Smart Grid não possui uma definição universalmente aceita, podendo ser descrita de forma simples ou mais complexa, dependendo do motivo pelo qual está sendo aplicada. Para os autores, de forma simplificada, Smarts Grids é uma rede inteligente capaz de armazenar, comunicar e tomar decisões. O sistema de Smart Grid transforma a rede atual em uma nova rede que funciona de forma mais cooperativa, responsiva e orgânica.

De acordo com o Documento de Implantação Estratégica para as Redes de Eletricidade do Futuro da Europa, uma Smart Grid é uma rede de eletricidade que pode integrar de forma inteligente as ações de todos os usuários conectados a ela (geradores, consumidores e aqueles que fazem as duas coisas), para fornecer eficientemente fontes de eletricidade econômica e segura (EUROPEAN TECHNOLOGY PLATFORM, ETP, 2018).

De acordo com o National Institute of Standards and Technology (NIST), a Smart Grid é um sistema que integra diversas tecnologias, tanto nas áreas de computação, comunicação e engenharia, além de serviços para a infraestrutura do sistema de energia elétrico. As redes elétricas inteligentes possibilitam a integração dos sistemas residenciais, reduzindo os custos operacionais, como por exemplo, o tempo de detecção de falhas na rede. A Smart Grid pode ser melhor compreendido quando visto ao lado da rede tradicional. Cavdar (2004) fez uma boa comparação entre as duas estruturas. Um resumo geral das características das duas redes é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – A grade elétrica tradicional versus a grade inteligente

REDE ATUAL	SMART GRID
Mecanização / Comunicação unidirecional	Digitalização/Comunicação bidirecional em tempo real
Geração de energia centralizada	Geração de energia distribuída
Rede Radial/Menos dados envolvidos	Rede Dispersa; Grandes volumes de dados envolvidos
Pequeno número de sensores	Muitos sensores e monitores
Menos ou nenhum monitoramento automático	Grande monitoramento automático
Controle manual e recuperação	Controle e recuperação automáticos
Menos preocupações com segurança e privacidade	Propenso a questões de segurança e privacidade
Atenção humana às interrupções do sistema/Produção e consumo simultâneos de energia / eletricidade/Controle limitado	Proteção adaptativa/Use de sistemas de armazenamento
Resposta lenta a emergências/ Menos opções de usuários	Resposta rápida a emergências/ Vastas escolhas do usuário

Fonte: Adaptado de Lamnatou, Chemisana e Cristofari (2004).

Para Wessel (2015) as *smarts grids* ou redes elétricas inteligentes empregam um extenso conjunto de tecnologias e serviços inovadores como monitoramento, controle e comunicação inteligente, com a finalidade de reduzir custos e aumentar a confiabilidade e transparência. As redes elétricas inteligentes são a modernização do Sistema Elétrico de Potência, trazendo consigo novos paradigmas, funcionalidades e características conformem descrevem Ghansah (2009) e Ferreira (2010):

- Facilitar o monitoramento e operação de geradores;

- Realizar o controle e o monitoramento em tempo real;
- Melhorar a eficiência energética;
- Permitir a participação ativa dos consumidores em resposta a demanda;
- Fornecer informações mais detalhadas sobre o abastecimento de energia;
- Integrar as fontes de energia distribuída e da microgeração;
- Reduzir emissões de gases e o impacto ambiental;
- Fornecer um abastecimento de energia resiliente e seguro;
- Realizar controle eficiente de tensão;
- Melhorar capacidade de armazenamento de energia;
- Implantar tarifas inteligentes; e,
- Promover detecção e isolamento automático de falhas, restauração e reconfiguração do serviço (*Self-healing*).

As *smarts grids* também possibilitam a inserção do conceito de prossumidor, que define o cliente não somente como consumidor, mas também como produtor. A microgeração e geração distribuída de energia elétrica em unidades locais do consumidor, torna-o um produtor de energia. A energia que não for consumida localmente poderá ser injetada no sistema da distribuidora. Essa energia injetada será convertida em créditos que poderão ser abatidos no consumo dos meses subsequentes (ANEEL, 2014).

Na rede inteligente, segundo Amini, Hasanpour e Jalali (2016), os clientes têm acesso ao consumo de eletricidade e aos dados de preços por meio de medidores inteligentes. Assim, eles são capazes de participar dos programas de resposta à demanda (DR). Com a aplicação de *Smart Grid*, os clientes serão partes ativas da rede, podendo verificar as informações disponíveis sobre o preço da eletricidade e tomar decisões sábias em relação ao seu consumo diário de eletricidade (FARHANGI, 2010). Estes fatos incentivam os clientes a consumirem menos energia durante os horários de pico (BAHRAMI ; PARNIANI ; VAFAEMEHR, 2012).

Segundo o Congresso do Estados Unidos da América (USC) a *Smart Grid* propõe respostas e soluções para as preocupações de adequação do fornecimento de eletricidade. A Lei de Independência e Segurança Energética de 2007 (EISA) estabelece o cenário para a modernização da rede elétrica. A seção *Smart Grid* lista as seguintes características:

- **Confiabilidade, segurança e eficiência da rede elétrica:** A fonte de alimentação confiável é crucial para qualquer sistema de energia. Ele determina o sucesso da rede em fornecer o serviço necessário para os usuários finais. As Smart Grids

segundo melhoram a detecção de falhas e permitem o autorregamento (HE ; BLUM, 2011 ; XIA ; LUO ; CHAN 2014). À medida que as redes continuam a crescer em tamanho e complexidade, torna-se mais difícil analisar a confiabilidade da rede. Porém com a criação de banco de dados, novos métodos analíticos surgem com o a análise das aplicações das *smarts grids* pelo mundo, possibilitando a criação de algoritmos de mineração de dados, como por exemplo o software *Bayesianas*, com o objetivo de descobrir e estimar a confiabilidade dos serviços de rede a partir do histórico dos dados gerados pelo sistema (OZGE ; RAMIREZ ; JOSE, 2012). O monitoramento remoto da geração híbrida e o gerenciamento automático da *Smart Grid* para a distribuição instável contribuem para a eficiência (COLMENAR et al, 2015). A rede de informação gerada pela *Smart Grid* permite muitos recursos e, embora seja propensa a ataques, foi combatida por soluções promissoras, como por meio de um sistema de detecção de intrusão (IDS) ou pela ocultação aleatória de informações confidenciais domésticas em leituras normais usando esteganografia (LIU et al, 2015; ABUADBBA ; KHALIL, 2015).

- **Implantação e integração de recursos distribuídos e geração:** Os recursos energéticos distribuídos (DER) são pequenas fontes de energia que podem ajudar a atender a demanda regular de energia. Os recursos energéticos distribuídos, como tecnologias de armazenamento e renováveis, facilitam a transição para redes inteligentes (*ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE*, 2015). A entrada de fontes de energia renováveis como geradores distribuídos pode ajudar a mitigar os problemas de esgotamento de reservas fósseis e a crescente demanda dos consumidores (HOWLADER; MATAYOSHI; SENJYU, 2015). A agregação dessas fontes, no entanto, também significa que quantidades significativas de dados precisariam ser manipuladas e processadas. O trabalho de Peña et al (2012) apresenta uma arquitetura que distribui a inteligência por toda a rede por meio de nós inteligentes individuais que controlam vários ativos elétricos, em vez de serem centralizados.
- **Resposta de demanda e recursos do lado da demanda:** A *Federal Energy Regulatory Commission* define a resposta da demanda como “mudanças no uso elétrico pelos recursos do lado da demanda, seus padrões normais de consumo em resposta a mudanças no preço de eletricidade ao longo do tempo, ou para incentivar pagamentos destinados a induzir a utilização de eletricidade em alturas de preços de mercado elevados ou quando a fiabilidade do sistema é comprometida”. Para o

Departamento de Energia dos Estados Unidos da América a resposta à demanda oferece aos consumidores a chance de se envolverem em operações de rede, já que eles podem reduzir ou deslocar o uso de eletricidade durante períodos de pico e se beneficiarem de incentivos financeiros. O desenvolvimento de tecnologias e técnicas de modernização de redes para resposta à demanda é um dos objetivos do Departamento de Energia dos EUA (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. DEMAND RESPONSE, 2015).

- **Implantação de tecnologias "inteligentes", como automação de medição e distribuição:** Para Tuballa e Abundo (2016), a medição do consumo energético em *Smart Grids* permite a comunicação bidirecional entre os medidores e o usuário. Os medidores garantem contas mais precisas e possibilitam aos consumidores acessar em tempo real o seu consumo de energia, possibilitando o controle de seu uso de energia. Os medidores inteligentes, como normalmente são chamados, envolvem sensores, notificação de falta de energia e monitoramento da qualidade de energia. Com a infraestrutura de medição avançada, as concessionárias podem coletar informações do consumidor mais rapidamente e fornecer comunicações em todo o sistema. A automação da rede e da distribuição, possibilitam a modernização da rede através do monitoramento de transformadores e alimentadores, gerenciamento de interrupções, integração de veículos elétricos e isolamento efetivo de falhas (HART DG, 2012). Uma maneira de obter automação de distribuição é através da implementação do Sistema de Automação de Subestações (SAS), que define ações de controle local para resolver o congestionamento com redução mínima de fontes de energia renováveis (BERIZZI et al, 2015).
- **Integração de dispositivos "inteligentes" e dispositivos de consumo:** Aparelhos e dispositivos inteligentes são equipamentos que podem se comunicar com as redes elétricas, desligando ou reduzindo seu consumo durante o horário de pico e são capazes de mudar o uso de energia de maneira inteligente por conta própria. Em um estudo realizado na Grã-Bretanha, verificou-se que a resposta da demanda em residências com 20% de penetração de aparelhos inteligentes pode fornecer até 54% dos requisitos de reservas operacionais, dependendo da hora do dia (NISTOR.S, 2015). Aparelhos inteligentes são capazes de atuar como reservas operacionais para o operador do sistema (XUE et al, 2014; KOBUS.C et al, 2015). Um estudo sobre famílias que utilizam a automação da máquina de lavar roupa inteligente, observou que a lavagem foi automaticamente ligada em períodos de tempo onde o

fornecimento de electricidade estava disponível em abundância (KOBUS et al, 2015). Uma rede de área residencial de sensor sem fio usando o protocolo ZigBee, usado para retransmitir mensagens entre diferentes entidades em um esquema de gerenciamento de energia residencial com base na coordenação de dispositivos, pode fornecer soluções otimizadas para problemas de gerenciamento de energia (MAHMOOD, 2014).

- **Tecnologias avançadas de armazenamento de electricidade, incluindo veículos elétricos híbridos e elétricos plug-in (PHEVs):** O armazenamento de electricidade e as tecnologias que tentam moderar e reduzir picos é uma funcionalidade essencial da *Smart Grid* (VAN DER KAM e VAN SARK, 2015). O armazenamento de energia é indispensável porque a geração de electricidade a partir de energia renovável flutua. Os dispositivos de armazenamento guardam o excedente de electricidade quando a geração de energia renovável é abundante, de modo que o sistema seja capaz de usar essa energia conforme a demanda aumenta (SOHAR, 2014). Veículos elétricos (VEs) podem servir a rede elétrica como fonte independente de energia. Eles podem permanecer conectados à rede assim que estiverem estacionados, e dessa forma, fornecer a energia de suas baterias em uma tecnologia conhecida como veículo-a-grade (V2G) (UNIVERSITY OF DELAWARE, 2015).

De acordo com Ramos (2012), uma rede elétrica inteligente destaca-se por utilizar as tecnologias da informação para facilitar a administração e o gerenciamento da rede elétrica convencional. As *Smart Grids* visam modernizar a rede elétrica, que ao longo dos anos, apresentou uma discreta evolução. Segundo Toledo (2012) as *smarts grids* proporcionam um avanço tecnológico para o âmbito da gestão, fornecendo novos dados ao sistema, que poderão habilitar ações em tempo real nos equipamentos presentes na geração à distribuição da energia elétrica.

A cadeia de valor da *Smart Grid* proporcionará uma participação ativa do consumidor na gestão da sua energia, possibilitando às concessionárias avaliar os benefícios e as demandas necessárias na adaptação à nova realidade (TOLEDO, 2012). Trata-se também de uma grande oportunidade de estreitar ainda mais o relacionamento das concessionárias com os clientes, cuja participação será fundamental para o sucesso de tais práticas (SHARMA; SAINI, 2015).

A implementação de *Smarts Grids* beneficiará a sociedade como um todo, não apenas as concessionárias. As práticas adotadas para sua implementação e os resultados alcançados são

estratégicos e de interesse de toda a sociedade (DELGADO, 2017; BERNARDON et al, 2015; SHARMA; SAINI, 2015). Toledo (2012) afirma que os benefícios da tecnologia de redes elétricas inteligentes se estendem a diversos atores do mercado, como, por exemplo, clientes, meio ambiente, órgãos reguladores e sistema elétrico nacional.

Em relação aos clientes, Toledo, Gouvêa e Riella (2012) afirmam que a aplicação deste novo artifício permitirá a prestação de novos serviços, ofertando uma tomada de decisão mais ágil, através, principalmente, da manutenção e do atendimento remoto, além de possibilitar ao cliente o acompanhamento dos diferentes graus de energia elétrica recebida. O conceito de redes elétricas inteligentes também amplia o número de canais de interação da concessionária com o consumidor.

No tocante ao seu desperdício de energia, as *smarts grids* proporcionam com maior eficácia o controle da energia, estimulando o uso racional e eficiente de energia, acarretando em redução do gasto com a energia elétrica e emissões de gases maléficos ao meio ambiente (TOLEDO; GOUVÊA; RIELLA, 2012). Para Tubala e Abundo (2016), os benefícios para os clientes, para a sociedade e partes interessadas incluem:

- Possibilidade de participação ativa do consumidor no mercado por meio do conceito de “prosumidor”, em que o produtor-consumidor pode fornecer energia para a rede;
- Informações em tempo real sobre o serviço prestado e o consumo de energia;
- Melhor planejamento e controle dos gastos com energia elétrica e adequação de seu consumo ao orçamento doméstico;
- Mais produtos e serviços oferecidos pela concessionária de energia e por parceiros;
- Capacidade de gerenciar a carga e de se beneficiar de tarifas diferenciadas de energia, adequadas ao consumo;
- Redução do tempo de atendimento;
- Melhoria na qualidade do serviço prestado; e,
- Maior privacidade em decorrência da não necessidade de visitas frequentes de funcionários das concessionárias para realizar leituras de dados dos medidores de energia, salvo em casos específicos.

Segundo Toledo, Gouvêa e Riella (2012) para o sistema elétrico e, conseqüentemente, para a sociedade durante o processo de revisão tarifária, através do princípio da modicidade, os benefícios incluem:

- Detecção e correção inteligente de falhas na rede em tempo real;
- Reconfigurações automáticas da rede;
- Gestão preventiva via monitoramento dos ativos da rede;
- Monitoramento da qualidade do fornecimento de energia, melhoria dos índices associados e da confiabilidade do sistema elétrico;
- Suporte à geração e ao armazenamento distribuídos de energia;
- Gestão pelo lado da demanda;
- Gestão e monitoramento de ativos de rede em tempo real;
- Fornecimento de informações aos clientes em tempo real, tarifas, produtos e serviços inovadores, apropriados a sua realidade, que inspirem uma mudança de hábito e o consumo eficiente de energia, bem como a adequação de seu consumo com seu orçamento e a consequente redução de emissões de CO₂;
- Ampliação dos canais de interação com os clientes e detalhamento do serviço prestado;
- Gestão em tempo real da oferta versus demanda de energia;
- Medição inteligente;
- Ações intensificadas de combate ao furto de energia e redução dos índices de inadimplência;
- Redução de perdas técnicas;
- Expansibilidade e suporte a novos tipos de consumidores (veículos elétricos e/ou híbridos recarregáveis); e,
- Melhorias na eficiência operacional.

Muitos defensores das *smarts grids* citam alguns ou todos os atributos a seguir como representativos de sua promessa, apontando os mesmos como benefícios, a tabela 24 apresenta estes dados:

Tabela 24 – Atributos das *Smarts Grids*

Eficiente	Capaz de atender à crescente demanda do consumidor sem agregar infraestrutura
Fácil Integração	Aceitando energia virtualmente de qualquer fonte de energia, incluindo solar e eólica, tão fácil e transparentemente quanto carvão e gás natural; capaz de integrar todas e quaisquer idéias e tecnologias melhores (tecnologias de armazenamento de energia, por exemplo), já que são comprovadas no mercado e estão prontas para entrar em operação
Motivador	Viabilizar a comunicação em tempo real entre o consumidor e a concessionária, para que os consumidores possam adaptar seu consumo de energia com base em preferências individuais, como preço e / ou preocupações ambientais
Oportunista	Criar novas oportunidades e mercados por meio de sua capacidade de capitalizar inovações onde e quando apropriado
Foco na qualidade	Capaz de fornecer a qualidade de energia necessária, livre de afundamentos, picos, distúrbios e interrupções, para impulsionar nossa economia cada vez mais digital e os centros de dados, computadores e eletrônicos necessários para fazê-lo funcionar
Segurança	Cada vez mais resistente a ataques e desastres naturais à medida que se torna mais descentralizado e reforçado com protocolos de segurança de redes inteligentes
Verde	Desacelerando o avanço das mudanças climáticas globais e oferecendo um caminho genuíno para uma melhoria ambiental significativa no impacto da energia elétrica servindo à humanidade

Fonte: Adaptado de El-hawary (2014).

Em outras palavras, as possibilidades que são geradas a partir da aplicação de *Smarts Grids* são vastas no advento da tecnologia moderna e aumentam a interdependência entre os usuários da rede. As redes inteligentes podem fornecer uma plataforma capaz de maximizar a confiabilidade, disponibilidade, eficiência, desempenho econômico e maior segurança contra ataques e rupturas de energia que ocorrem naturalmente (RIEDMULLER et al, 2008).

Para El-hawary (2014), o sistema elétrico de potência apresenta uma diversidade de necessidades de rede. Em alguns sistemas, bem delimitados e geograficamente concisos, é possível utilizar comunicação através de meios cabeados confiáveis. Como por exemplo, fibra óptica. Sistemas de geração é um exemplo clássico onde isso é possível. No entanto, em sistemas de distribuição, em função da grande quantidade de dispositivos e de sua alta dispersão geográfica, a implementação dessa rede de comunicação torna-se uma tarefa mais complexa (GTREI, 2010).

Toledo, Gouvêa e Riella (2012) informam a necessidade das concessionárias de energia elétrica em lidar com os desafios da rede atual em suprir a demanda das redes inteligentes, além de se preparar pelo provável avanço da tecnologia na área de energia elétrica. Os autores citam alguns desafios:

- A inevitável penetração de novas fontes de geração e armazenamento de energia;
- A potencial mudança do perfil do cliente de energia elétrica, como por exemplo, o advento dos consumidores móveis de energia (veículos elétricos e híbridos recarregáveis);
- A necessidade de lidar com a bidirecionalidade energética e de informação em tempo real, relacionada a tais tecnologias;
- A adequação a metas ligadas à sustentabilidade do planeta e à tendência de cidades e habitats inteligentes;
- A gestão otimizada do crescimento significativo da carga que acontece anualmente;
- A resposta à crescente expectativa dos clientes em relação à qualidade do fornecimento de energia, assim como aos anseios do regulador e das demais autoridades;
- A necessidade de redução de custos operacionais; e,
- A tendência de competição no mercado de energia elétrica direta ou indiretamente.

Tal como acontece com muitos novos desenvolvimentos tecnológicos inovadores, o cuidado deve ser tomado para tratar de preocupações e questões que confrontam o progresso, adoção e aceitação das empresas. El-hawary (2014) aponta alguns impedimentos para as *Smarts Grids*:

- **Engajamento das partes interessadas:** Mas os estágios iniciais das implementações de redes inteligentes, as percepções negativas das partes interessadas podem inviabilizar até mesmo o projeto mais benéfico, especialmente quando os proponentes não prestam muita atenção aos aspectos educacionais. Os projetistas e gestores precisam ser capazes de explicar e identificar claramente os benefícios de cada componente da rede inteligente para os clientes, que são a chave potencial para o sucesso do serviço;
- **Segurança:** Como base das redes inteligentes, a proeminência da tecnologia da informação pode introduzir novas vulnerabilidades cibernéticas. Mitigar os riscos

de segurança está entre as mais importantes atividades de pesquisa e desenvolvimento de redes inteligentes;

- **Custos iniciais elevados:** altos custos insustentáveis dos programas – pilotos podem atuar como impeditivos à aceitação e adoção de redes inteligentes. O compartilhamento da carga de custos entre jurisdições e potenciais beneficiários pode aliviar parcialmente algumas dessas dificuldades;
- **Medo de obsolescência:** Como muitos usuários de tecnologia estão dolorosamente conscientes, a adoção de novas ferramentas pode abrir a porta para custos novos e adicionais, que só podem ser suportados pelo consumidor final. Este receio pode ser resolvido através do desenvolvimento de padrões de interoperabilidade e compatibilidade retroativa de tecnologias; e,
- **Privacidade:** a supervisão insuficiente de como os dados são usados aumenta o risco de possíveis violações de privacidade do consumidor. Essa preocupação precisa ser tratada adequadamente para ganhar aceitação e confiança do consumidor.

Com o avanço da tecnologia, as *Smarts Grids* tornam-se, a cada ano, mais acessíveis ao consumidor final. Mas ainda existem diversos desafios à serem vencidos. O quadro 29 apresenta apontamentos de diversos pesquisadores do mundo.

Quadro 27 – Apontamentos de diversos pesquisadores do Mundo

- V2G: uso da bateria, baixa penetração dos VEs, novas tecnologias de bateria;
- Barreiras à implementação: custo e benefício, conhecimento, inércia institucional;
- Custos, engajamento do consumidor, proteção de dados, privacidade;
- Questões de segurança e desafios na Smart Grid baseada em Iot;
- Design de roteamento;
- Interoperabilidade e conformidade com as normas;
- Segurança física, segurança cibernética, vulnerabilidades na AMI;
- Simuladores de Smart Grid e co-simuladores: capazes de simular apenas cenários simples;
- Sincronização de tempo e troca de dados;
- Falta de plataformas de middleware de reconhecimento de contexto escaláveis e interoperáveis;
- Problema de compatibilidade com dispositivos inteligentes, padrões tecnológicos para registro de dados e requisitos de comunicação;
- Geração distribuída no sistema de distribuição e automação do sistema de distribuição; e,
- Projetando esquemas de criptografia de dados fortes, as soluções de segurança variam entre os domínios.

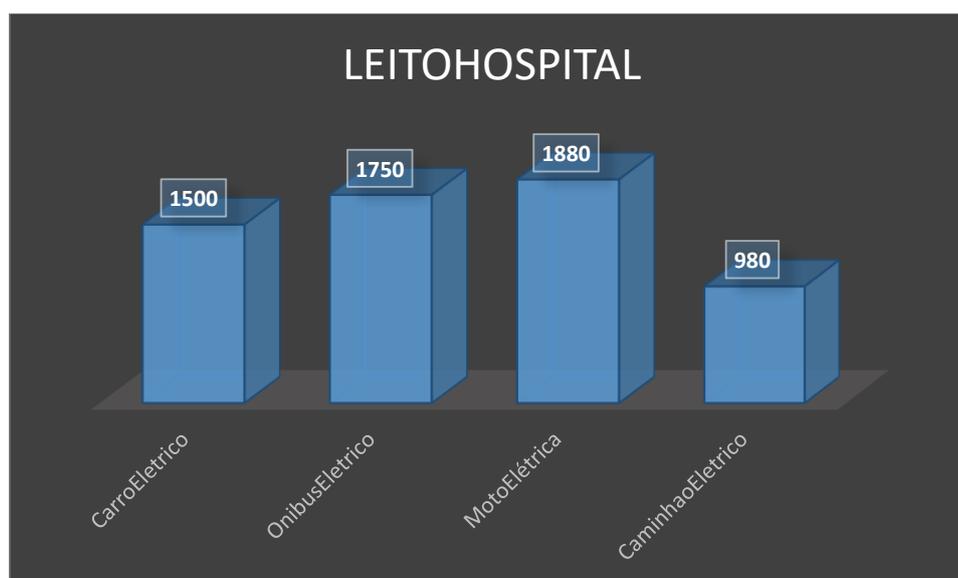
Fonte: Bekara C. (2014).

Para suprir os impecilhos citados nesta sessão, será necessário muito avanço tecnológico, onde a pesquisa acadêmica terá que estar presente. A criação de novos programas de energias renováveis poderá dar um suporte nas mudanças que deverão ocorrer nos modos de transmissão e armazenamento de energia. Fato é, a necessidade da utilização de redes inteligentes crescem continuamente.

5.6.2 Equivalência Focada no Setor Público

Em relação ao consumo de energia elétrica no setor público, serão apresentados gráficos com os resultados dos benefícios energéticos dos modelos de inserção de veículos elétricos. Para Chin et al (2023) a energia elétrica é a principal fonte de energia do mundo, e isso reflete a importância desse insumo de um ponto de vista global. Porém, quanto maior sua relevância para a população, maior se torna a dependência dos indivíduos em relação ao seu uso. O emprego da energia elétrica ultrapassa as fronteiras econômicas e sociais, muitas das vezes, sua utilização está atrelada ao próprio bem-estar das pessoas. O Gráfico 7 apresenta a energia gerada pela equivalência de CO₂ de cada um dos modelos, para realizar o cálculo foi utilizado dados da Empresa de pesquisa energética (2022) e o estudo de Vieira (2022) que mapeou as demandas de energia de leitos de hospitais durante noventa dias.

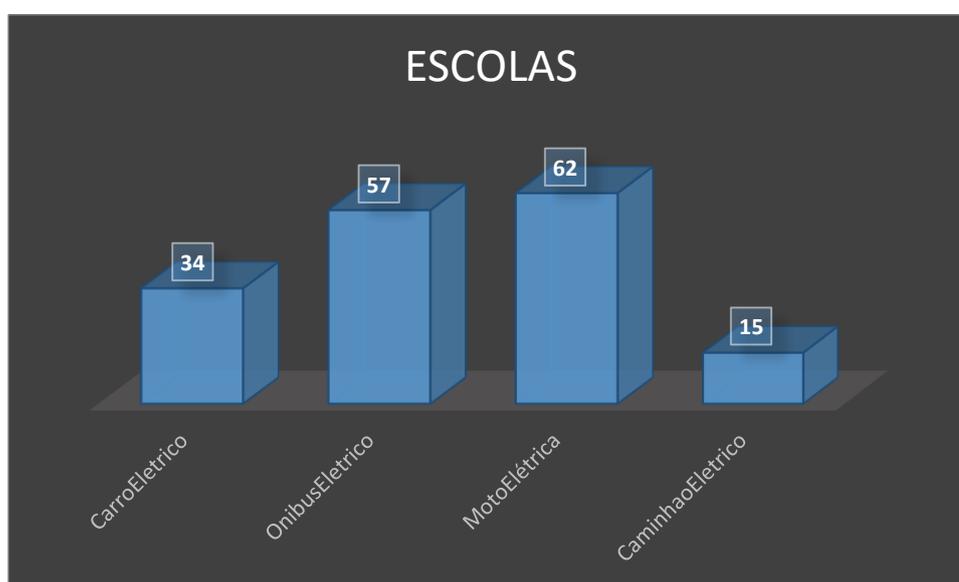
Gráfico 7 – Total de leitos de hospitais beneficiados



Fonte: Baseado em EPE (2022) e Vieira (2022).

Percebe-se pelo gráfico que o modelo de inserção de motos elétricas poderá gerar energia para 1880 leitos de hospitais mensalmente. Em relação aos ônibus elétricos irá gerar energia para suprir o consumo de 1750 leitos de hospitais. Lembrando que são leitos comuns e não de UTI. O Gráfico 8 apresenta a análise de quantidades de escolas que os resultados poderiam suprir a demanda em até sessenta por cento de energia elétrica. Para calcular esse gráfico foi coletado dados em escolas da região do estudo, dados do EPE (2023), IBGE (2022) e Reis, Junior e Perin (2020).

Gráfico 8 – Total de Escolas beneficiadas



Fonte: Baseado em EPE (2023), IBGE (2022) e Reis, Junior e Perin (2020).

Resultado importante para auxiliar a gestão pública, pelo Gráfico 8 percebe-se que em torno de sessenta escolas, que atendem até 500 alunos, poderão ser beneficiadas. Tal resultado corrobora com o estudo de Chen et al (2021) que acredita que os veículos elétricos possuem potencial para apoiar governos em redução de custos. A seguir será apresentado benefícios relacionados ao tratamento de água da população.

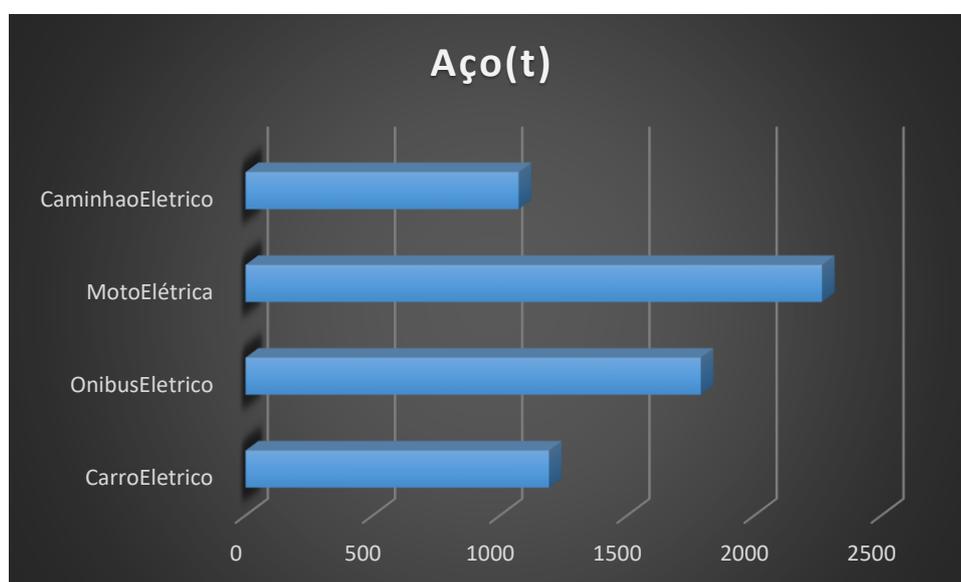
5.6.3 Equivalência Focada no Setor de Construção Civil

O setor da Construção Civil é um dos que mais cresce atualmente e isso não se reflete apenas no âmbito mundial, mas também no nacional. O setor da construção civil requer a produção de diversos materiais para serem utilizados em canteiros de obra, entre os principais

materiais temos o cimento, aço e ferro que provocam alto consumo energético. Portanto será apresentada o que poderia ser gerado de materiais (aço, ferro e cimento) com a equivalência da redução de CO₂ apresentada com a inserção dos veículos elétricos.

A indústria do Aço é uma das indústrias mais importantes em termos de consumo de materiais e energia, além de ser uma indústria que pode causar diversos impactos ambientais (BARBOSA; SILVA; TEIXEIRA, 2022). O Gráfico 9 apresenta em toneladas a quantidade de aço gerada pela equivalência de redução de CO₂ ocasionada pela inserção de veículos elétricos.

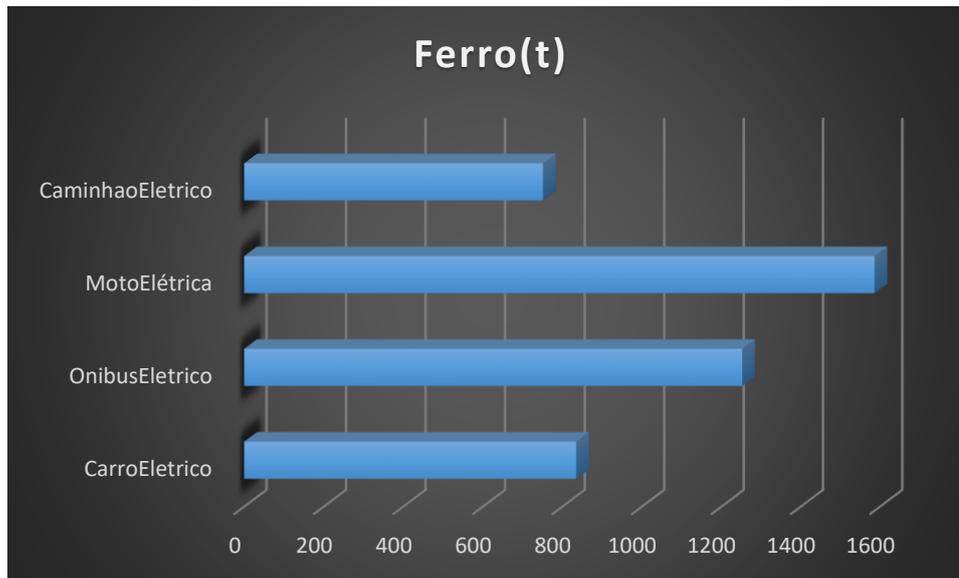
Gráfico 9 – Produção de aço



Fonte: Autor (2023).

Pode-se perceber pelo Gráfico 9 que poderá ser gerado em média 1500 toneladas de aço, valor que reforça a importância da inserção de veículos elétricos. Para Queiroz (2018) esse volume poderia ser integrado em projetos de aproximadamente trinta prédios comerciais de 16 andares. A seguir o Gráfico 10 apresenta a geração de ferro a partir da equivalência de redução de CO₂ dos modelos apresentados anteriormente.

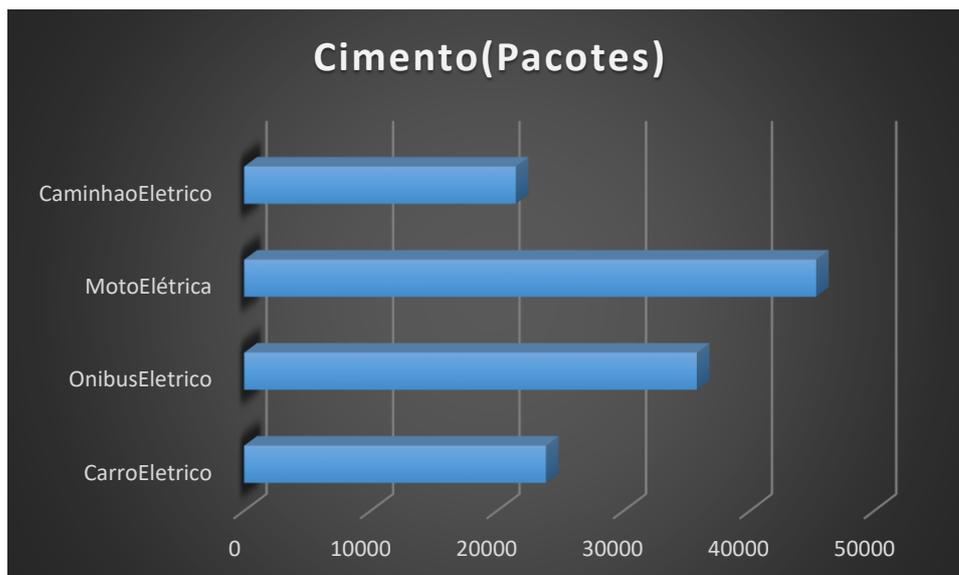
Gráfico 10 – Produção de ferro



Fonte: Autor (2023).

Poderia ser gerado em torno de 1200 toneladas em média, tal valor equivale a construção de poderia auxiliar a construção de mais de 500 casas com tamanho médio de 68 metros quadrados. Ao mesmo tempo outros produtos poderiam ser produzidos como veículos, geradores entre outros produtos. A seguir será apresentado a produção de cimento.

Gráfico 11 – Produção de cimento



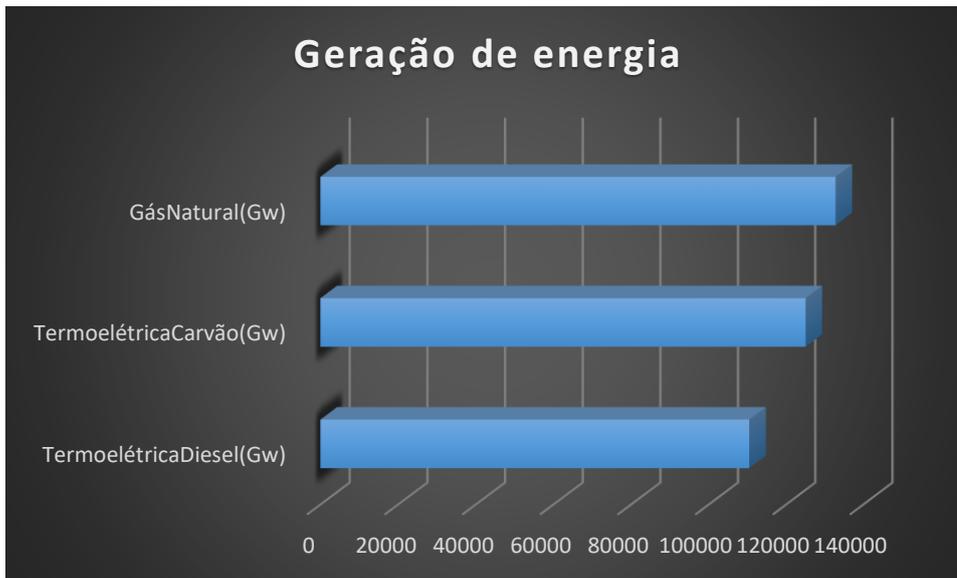
Fonte: Autor (2023).

Usando o exemplo anterior de casas de 68 metros quadrados, pelo resultado poderia ser construída em torno de 15000 casas, este fato prova que o impacto dos veículos elétricos atinge todos os pontos, desde as residências até a saúde pública. Vale ressaltar que são valores oriundo dos cenários projetados, alterando a simulação outros valores serão alcançados.

5.6.3 Equivalência Focada na Geração de Energia

Inicialmente o Gráfico 12 apresenta a quantidade (em Gw) de energia elétrica, gerada pelos resultados dos modelos, em uma usina termoeétrica a Diesel. Para A energia produzida a partir da queima do diesel é injetada nos transformadores da subestação para Grana (2023) em uma usina a Diesel são necessários 320 mil litros de óleo diesel para a produção de energia elétrica a cada 24 horas. Dos tanques, o combustível é enviado para os geradores. A energia produzida a partir da queima do diesel é injetada nos transformadores da subestação para, então, ser enviada ao sistema interligado nacional. Em usinas movidas a carvão mineral a energia é gerada a partir da queima do mesmo, o calor gerado por essa queima aquece a água em uma caldeira, a qual se transforma em um vapor com alta pressão que faz as pás das turbinas da usina girarem (BIBIANO, 2022). Já em relação as usinas movidas a gás natural, Caspitrano et al (2022) destaca que o gás natural é queimado em uma turbina a gás que aciona um gerador para produzir eletricidade. Os gases quentes expelidos pela turbina a gás são enviados a um gerador de vapor de recuperação de calor para gerar tanto o vapor subcrítico quanto o supercrítico.

Gráfico 12 – Geração de energia elétrica em uma usina a diesel



Fonte: Autor (2023).

Pelo Gráfico 12 é possível notar que a maior geração de energia elétrica está nas usinas a gás natural, a redução de CO² é equivalente a geração de aproximadamente 132 mil Gw, valor representativo e que reforça a importância de reduzirmos o uso de combustíveis fósseis. Já as usinas a carvão gerariam cerca de 120 mil Gw com a equivalência de CO² reduzido pelos modelos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de transportes desempenha um papel significativo na poluição do ar, resultando em mudanças climáticas devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE), principalmente em regiões urbanas; isso exigiu a eletrificação do transporte rodoviário, pelo que a substituição de veículos de combustão interna por veículos de nova energia, como veículos elétricos, parece ser um passo promissor em direção à sustentabilidade urbana. É reconhecido que os veículos elétricos são uma nova e importante tecnologia de redução de carbono para o setor de transporte em todo o mundo.

Sabe-se que há muitas condições para atingir um transporte urbano mais sustentável, ainda mais se tratando de veículos elétricos. Permitir que sejam satisfeitas as necessidades de acesso e mobilidade das pessoas, organizações e população, compatíveis com a saúde humana, que contribuam para o equilíbrio do ecossistema, com custos admissíveis e com limite nas emissões de resíduos e poluentes seriam características do transporte considerado sustentável

Veículos híbridos e elétricos estão longe de ser uma novidade no mercado. Nos primórdios da indústria automobilística, foram fortes concorrentes do automóvel convencional, mas perderam a corrida e por mais de 80 anos foram uma mera nota de rodapé na história do automóvel. Os debates sobre mobilidade urbana podem trazer contribuições diretas e indiretas com a qualidade do ambiente e de vida das pessoas que residam ou sejam frequentadoras de atividades diurnas no espaço urbano, podendo ser positivas ou negativas, conforme a necessidade do espaço urbano

6.1 DISCUSSÃO SOBRE O ALCANCE DA QUESTÃO-PROBLEMA E OS OBJETIVOS DA PESQUISA

No Brasil, o veículo elétrico pode tornar-se uma alternativa importante, caso se adote, no curto prazo, uma política de incentivo à sua utilização. Dado o nível de desenvolvimento da nossa frota, ainda em estágio inicial, o uso do carro elétrico em larga escala, em detrimento do carro convencional, traria benefícios estratégicos e ambientais efetivos no longo prazo. É importante notar que, mesmo nos casos em que a eletricidade é gerada a partir de combustíveis fósseis, como o carvão e o gás natural, o carro elétrico traz a vantagem de concentrar as emissões nas fontes geradoras de energia, que são passíveis de serem reguladas, e não nos pontos de consumo, que são numerosos, dispersos e de difícil controle. Por outro lado, um importante risco ambiental do carro elétrico está associado à bateria, que deve ser reciclada ao

final de sua vida útil. Além do mais, a história tem mostrado que não são poucas as forças contrárias à ideia do veículo elétrico. Há barreiras institucionais e políticas, além das mercadológicas, a serem vencidas para que os veículos elétricos se consolidem no mercado. No entanto, o imperativo da exaustão dos recursos fósseis e as questões ambientais deixam os veículos elétricos em posição ímpar para se tornarem realidade.

Diante disso a questão-problema que esta pesquisa se propôs a responder foi: qual o impacto da inserção de veículos elétricos em cidades brasileiras? Para alcançar o resultado pretendido, foi realizada uma revisão da literatura acerca dos elementos teóricos e, na sequência, foram desenvolvidos modelos para cada tipo de veículo elétrico. Ao final, verificou-se que, todos os modelos foram simulados e os cenários foram testados, pode-se dizer que a inserção de veículos elétricos apresentará impactos ambientais relativos a diminuição da geração de gases maléficos ao meio ambiente e também poderão apresentar redução de custos relativos ao combustível, conforme fica demonstrado no capítulo Resultados. Assim sendo, entende-se que a questão-problema da pesquisa foi respondida.

Em relação ao objetivo geral, que foi conceber, desenvolver e avaliar modelo(s) de dinâmica de sistemas que sirvam para apoio ao processo decisório envolvendo a inserção de veículos elétricos no sistema elétrico de potência. O objetivo desta tese foi atingido, já que todos os veículos elétricos foram analisados em modelos computacionais diferentes com situações particulares. Através dos modelos foi possível analisar os cenários propostos da pesquisa e será possível auxiliar decisores da área estudada. Vale ressaltar que os modelos poderão ser simulados com dados e cenários diferentes, validando etapas necessárias da dinâmica de sistemas.

6.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

A primeira contribuição da pesquisa são os modelos capazes de simular diferentes situações de inserção de veículos elétricos. Entende-se que cada tipo de veículo elétrico tem que ser projetado diferente. Os carros elétricos são utilizados no cotidiano com o intuito de locomoção pessoal, já os ônibus elétricos vêm para atender ao transporte público, e as motos elétricas podem ser utilizadas tanto para transporte pessoal como para funcionalidades do dia a dia como entregas por delivery. Portanto os modelos desenvolvidos possibilitam simular situações diárias de qualquer localidade do mundo.

Observa-se, também, que entre os modelos desenvolvidos, debates públicos poderão ser levantados. O caso do ônibus elétrico apresenta possibilidades de transportar pessoas com

menos consumo de energia e também com menores custos relativos às rotas dos veículos diárias. Isso possibilita pensar na redução do preço das passagens ou até em inserir mais políticas de transporte com menor custo para pessoas com dificuldades financeiras.

Também é importante trazer a questão de renda extra, com a inserção de veículos elétricos algumas possibilidades de a população ter uma renda extra, seja no modelo de entrega de delivery, já que as motos elétricas possuem menor custo que as motos a combustão interna, ou no modelo de veículos elétricos como acumulador de energia, tal ponto ainda está em processo no Brasil e poderá seguir o modelo americano.

Com a análise dos modelos, pode-se justificar a inserção dos veículos elétricos. No que tange os resultados ambientais, mesmo que seja emitido gases para a geração de energia elétrica, os veículos elétricos são potenciais ferramentas para combater a emissão de gases poluentes ao meio ambiente. O último ponto que se entende merecedor de destaque faz referência ao processo de aprendizagem relacionado à dinâmica de sistemas. Essa tese poderá servir como base para o desenvolvimento de futuras pesquisas relativas ao uso do software Vensim-PLE e também de dinâmica de sistemas.

6.3 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Nesta tese, nem todas as extensões e domínios acerca dos veículos elétricos foram contemplados no estudo aqui apresentado. Dessa forma, como principais limitações do trabalho, pode-se citar a falta de análise de inserção de caminhões elétricos. Este ponto não foi apresentado pela falta de dados válidos e também estudos para validar as variáveis e equações desenvolvidas.

Outro ponto considerado como uma limitação é a necessidade de explorar mais profundamente o conceito de geração distribuída, alguns pontos não foram apresentados por ser uma tese da área de administração e alguns pontos poderiam ser considerados temas da engenharia. Também algumas variáveis relacionadas à geração de energia elétrica necessitam ser melhor validadas.

Em relação aos trabalhos futuros, o conhecimento, as discussões e os resultados obtidos na presente tese podem ser ampliados. Assim, sugere-se novas possibilidades de pesquisa em outros setores, como por exemplo o uso do caminhão elétrico para transporte de mercadorias entre cidades. O caminhão elétrico não foi apresentado neste estudo por falta de dados válidos e pesquisas que poderiam embasar o modelo de inserção de caminhões elétricos.

Em relação a geração de energia renovável, o modelo desenvolvido necessita uma exploração maior e com maior detalhamento. Para isso será feita parceria com outras linhas de pensamento, principalmente relacionadas a engenharia elétrica. Com isso serão desenvolvidas variáveis capazes de coletar mais precisamente a quantidade de energia gerada por dia.

Em relação ao modelo de inserção de carros elétricos, pretende-se expandir o modelo para cidades com menor geração de energia, com isso os modelos de carros elétricos e energias renováveis deverão ser planejados de forma conjunta. Por fim, pode-se desenvolver um novo estudo focado especificamente em geração distribuída. Tal tema é necessário para a inserção de veículos elétricos, portanto será desenvolvido um modelo de geração distribuída com os resultados dos modelos desenvolvidos nesta tese.

REFERENCIAS

ABUADBBA, A ; KHALIL, I. Development of diagnostic systems for the fault tolerant operation of micro-grids. *Inf Syst.* 2015.

ABVE. Aumento do número das vendas de carros elétricos no Brasil divulgado pela ABVE, disponível em: <http://www.abve.org.br/noticias/carros-eletricos-ja-correspondem-a-19-das-vendas>. Acesso: 28 de jan de 2019.

ADNAN, Muhammad. Passenger car equivalent factors in heterogenous traffic environment- are we using the right numbers? In: *Procedia Engineering, Fourth International Symposium on Infrastructure Engineering in Developing Countries, IEDC 2013*, vol. 77, pp. 106–113. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.07.004>.

AGAMLOH, Emmanuel; VON JOUANNE, Annette; YOKOCHI, Alexandre. An overview of electric machine trends in modern electric vehicles. *Machines*, v. 8, n. 2, p. 20, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Guia do empreendedor de pequenas centrais hidrelétricas. Brasília, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa No.482 de 17 de abril de 2012 . Disponível em: < <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em fev de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Nota Técnica nº 0050/2016-SRD/ANEEL. 19 de abril de 2016. Disponível em:http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos..pdf.

ALDABÓ, R. Energia solar. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

ANDRADE, A.L; SELEME, A.; RODRIGUES, L.H.; SOUTO, R. Pensamento Sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade. Porto Alegre, Bookman, 2006.

ARIF, Syed Muhammad et al. Plug-in electric bus depot charging with PV and ESS and their impact on LV feeder. *Energies*, v. 13, n. 9, p. 2139, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, NBR10899:2013. Energia Solar Fotovoltaica – Terminologia. Comitê ABNT/CB-003 Eletricidade, 2013.

AZEVEDO, Marcelo Henrique de. Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro. 2018.

BAHRAMI, M ; PARNIANI, A; VAFAEMEHR, A. Modified approach for residential load scheduling using smart meters. *Proc. Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. (ISGT)*, Berlin, Germany. 2012.

BALEN, G. Desenvolvimento de um carregador rápido para carro elétrico. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

BARBOSA, Mariana Oliveira; SILVA, Priscilla Chantal Duarte; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Aço verde e a sustentabilidade na produção de ferro-gusa. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, p. e022018-e022018, 2022.

BARNARD, M. Will Electric Cars Break The Grid? *CleanTechnica*, 2016. Disponível em: <https://cleantechnica.com/2016/05/11/will-electric-cars-break-grid/>. Acesso em: abr de 2019.

BARULLI, Michelangelo et al. On scalability of electric car sharing in smart cities. In: 2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2). IEEE, 2020. p. 1-8.

BAYAZIT, N. Investigating Design: a review of forty years of design research, Massachusetts Institute of Technology. *Design Issues*, v. 20, n. 1, p. 16-29, 2004.

BELLUCCI, Alessandro et al. A Three-Terminal Hybrid Thermionic-Photovoltaic Energy Converter. *Advanced Energy Materials*, v. 12, n. 20, p. 2200357, 2022.

BENTO, Vagner Anselmo et al. Análise técnica e econômica do fornecimento de energia para condomínios de edifícios residenciais com demanda até 300 kVA utilizando rede BT da concessionária ou MT com transformadores internos. 2021.

BERIZZI, A ; BOVO, C ; ILEA V ; MERLO, M ; MIOTTI, A ; ZANELLINI F. Decentralized congestion mitigation in HV distribution grids with large penetration of renewable generation. *Int J Electr Power Energy Syst* 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.02.023> acesso: dez de 2018.

BIBIANO, Ramiro Hiroito das Neves. Estudo da viabilidade de adição de cinzas sulfatadas geradas em usina termoeletrica a carvão em matrizes cimenticias. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BOÇON, Gustavo Schafhauser. Análise do impacto de veículos elétricos na rede de distribuição de energia elétrica. 2019.

BORSCHIVER, Suzana; TAVARES, Aline. Economia circular e o setor energético. 2018.

BORTOLASO, V. Proposta de Construção de um Modelo de Referência para a Avaliação de Redes de Cooperação Empresariais. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2009.

BRAUN-GRABOLLE, P. A integração de sistemas solares fotovoltaicos em larga escala no sistema elétrico de distribuição urbana. 2010. 257p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

BRENNA, Morris et al. Electric vehicles charging technology review and optimal size estimation. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, v. 15, p. 2539-2552, 2020.

BUENO, N.P. Identificando mudanças de regimes sistêmicos em processos econômicos: um procedimento baseado na abordagem de dinâmica de sistemas. *Economia e Sociedade*, Campinas, v. 22, n. 1 (47), p. 77-106, abr. 2013.

ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design Research for Cadastral Systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 35, p. 77-87, 2011.

CAMPATELLI, Gianni; LORENZINI, Lorenzo; SCIPPA, Antonio. Optimization of process parameters using a response surface method for minimizing power consumption in the milling of carbon steel. *Journal of cleaner production*, v. 66, p. 309-316, 2014.

CAPISTRANO, Bianca Fabiani et al. Estudo do custo social dos impactos à saúde oriundos das emissões da termelétrica a gás natural na região de Ibitié. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 18, n. 54, p. 1-20, 2022.

CARRANZA, G., DO NASCIMENTO, M., FANALS, J., FEBRER, J., & VALDERRAMA, C. Life cycle assessment and economic analysis of the electric motorcycle in the city of Barcelona and the impact on air pollution. *The Science of the total environment*, 821, 153419. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153419>

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. Texto de discussão. *Mobilidade Urbana Sustentável: Conceitos, tendências e Reflexões*. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2016.

CASTRO, Laira Augusta Freitas. Análise de veículos elétricos no setor de logística em centros urbanos. 133 f. Dissertação(Programa de Mestrado Profissional em Administração – Gestão Ambiental e Sustentabilidade) – Universidade Nove de Julho, São Paulo. 2019.

CAVDAR H. A solution to remote detection of illegal electricity usage via power line communications. *IEEE Trans Power Deliv* 2004.

CELLURA, Maurizio et al. Modeling the energy and environmental life cycle of buildings: A co-simulation approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 80, p. 733-742, 2017.

CHAKRABARTI, A. A Course for Teaching Design Research Methodology. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, v. 24, p. 317-334, 2010.

CHEN, P.-T.; PAI, P.-H.; YANG, C.-J.; HUANG, K.D. Development of Transmission Systems for Parallel Hybrid

CHOUHARY, Piyush; SRIVASTAVA, Rakesh Kumar. Sustainability perspectives-a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities. *Journal of Cleaner Production*, v. 227, p. 589-612, 2019.

CIOCIOLA, Alessandro et al. Impact of charging infrastructure and policies on electric car sharing systems. In: 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, p. 1-6. 2020.

CLEMEN, R. T. Making hard decisions: an introduction to decision analysis. 2nd ed. Belmont: Duxbury Press, 1996.

COLMENAR, S ; PÉREZ, M ; BORGE, D ; PÉREZ. Reliability and management of isolated smart-grid with dual mode in remote places : application in the scope of great energetic needs. *Electr Power Energy Syst* 2015.

COX, B.L., MUTEL, C.L. The environmental and cost performance of current and future motorcycles. 212 (December 2017), 1013–1024, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.100>.

CUSENZA, Maria Anna et al. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of cleaner production*, v. 215, p. 634-649, 2019.

DANIELIS, Romeo; GIAN SOLDATI, Marco; ROTARIS, Lucia. A probabilistic total cost of ownership model to evaluate the current and future prospects of electric cars uptake in Italy. *Energy Policy*, v. 119, p. 268-281, 2018.

DELMASQUIO, Lucas Zanela et al. Implementação do fluxo de potência pelo método de newton-raphson considerando geração distribuída e veículos elétricos. 2022.

DIJK, M.; ORSATO, R. J.; KEMP, R. The emergence of an electric mobility trajectory. *Energy Policy*, vol. 52, p. 135–145, 2013.

DRESCH, A ; LACERDA, D; PROENÇA, A; JÚNIOR, J. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gest. Prod.*, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

DU, Jiuyu et al. Boundaries of high-power charging for long-range battery electric car from the heat generation perspective. *Energy*, v. 182, p. 211-223, 2019.

ELECTRIC VEHICLES. *Appl. Sci.* 9, 1538, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.027>"

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI),intelligrid, 2015. Disponível em: www.intelligrid.epri.com, acesso em set 2018.

ELÉTROBRAS. Manual de Minicentraís Hidrelétricas, 1985.

EL-HAWARY, M. The Smart Grid—State-of-the-art and Future Trends, *Electric Power Components and Systems*, 2014. Disponível em DOI:10.1080/15325008.2013.868558, acesso em set 2018.

EL-SAADAWY, Omnia et al. Modeling flash floods and induced recharge into alluvial aquifers using multi-temporal remote sensing and electrical resistivity imaging. *Sustainability*, v. 12, n. 23, p. 10204, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Escassez hídrica e o fornecimento de energia elétrica no Brasil. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/infogr%
c3%a1fico.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/infogr%c3%a1fico.pdf). Acesso em: 30 set. 2021.

ERCAN, T.; ONAT, N. C.; TATARI, O. Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 133, p. 1260– 1276, 2016.

FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2010.

FARKAS, Csaba; TELEK, Miklós. Capacity planning of electric car charging station based on discrete time observations and MAP (2)/G/c queue. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, v. 62, n. 3, p. 82-89, 2018.

FERNANDES, M. Estudos para a implantação do conceito veículo grid na Rede Elétrica do CT/UFRJ. Dissertação (Engenharia Elétrica) Escola Politécnica do Rio de Janeiro, 2017.

FERREIRA, M. C. A. F. Perspectivas e Desafios para a Implantação das Smarts Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://www.ie.ufrj.br/gee4/index.php/get-monografia/132-perspectivas-e-desafios-para-a-implantacao-das-smart-grids-um-estudo-de-casodos-euaportugal-e-brasil>>. Acesso em: mar. 2019.

FINOCCHIARO, Pietro et al. Life cycle assessment of a compact desiccant evaporative cooling system: the case study of the “Freescop”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 156, p. 83-91, 2016.

FIRMANSYAH, Arfie Ikhsan et al. Performance Testing of Electric Motorcycle Conversion. In: 2022 7th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). IEEE, 2022. p. 165-168.

FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics*. Cambridge MA: Productivity Press, 1961.

FORRESTER, J. W. *Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers*. *Harvard Business Review*, v. 26, n. 4, p. 37-66, 1958.

GAVIANO A ; WEBER K; DIRMEIER C. challenges and integration of PV and Wind energy facilities from a smart grid point of view. *Energy Procedia*, 2011.

GEBERT, Alice; MULLER, Rafaela; CASAGRANDE, Deise. *ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA*. Feira Regional de Matemática, v. 1, n. 1, 2017.

GHANSAH, I. Smart Grid Cyber Security Potential Threats, Vulnerabilities And Risks. *PIER*, 2009. Disponível em: <<http://www.energy.ca.gov/2012publications/CEC500-2012-047/CEC-500-2012-047.pdf>>. Acesso em: ago. 2018.

GHOFRANI M, ARABALI A, ETEZADI-AMOLI M. Electric drive vehicle to grid synergies with large scale wind resources. *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. IEEE*; 2012. Disponível em doi: 10.1109/PESGM.2012.6345662, acesso jan de 2019. *Global EV Outlook . Two million and counting*, International Energy Agency, 2017.

GHORBANZADEH, Omid et al. Sustainable urban transport planning considering different stakeholder groups by an interval-AHP decision support model. *Sustainability*, v. 11, n. 1, p. 9, 2019.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. 3. ed. São Paulo: Editora USP, 2012.

GRANA, Lucas Filipe Barini Rodrigues. Estudo do impacto da ampliação da usina termoeletrica de Mauá nas concentrações de Ozônio, CO e material particulado sobre as cidades de Manaus, Iranduba e Manacapuru, utilizando o WRF-CHEM. 2021.

GRIMM, Deborah Boller. Estudo inicial do potencial impacto da recarga de carros elétricos no sistema elétrico brasileiro em 2030, 2035 e 2050. 2021.

GUIMARÃES, Gabriel et al. Análise do impacto dos veículos elétricos no sistema de energia elétrica, considerando um modelo de injeção de potência ativa. 2022.

HABIBIE, A.; SUTOPO, W. A literature review: commercialization study of electric motorcycle conversion in Indonesia. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. p. 012048.

HANLEY, S. Agrees On New Wireless. Charging Standard. Gas2, 2017. Disponível em: <http://gas2.org/2017/01/30/sae-agrees-new-wireless-charging-standard/>. Acesso em: abril de 2019.

HANNAN, M. A., HOQUE, M. M., HUSSAIN, A., Yusof, Y., and Ker, P. J. State-of-the-art and energy management system of lithium-ion batteries in electric vehicle applications: Issues and recommendations. IEEE Access, vol. 6, pp. 19362–19378, 2018.

HART, D. How advanced metering can contribute to distribution automation. IEEE Smart Grid. Disponível em: smartgrid.ieee.org/august-2012/644-how-advancedmetering-cancontribute-to-distribution-automation, acesso em out de 2018.

HE, Q; BLUM, R. Smart grid fault detection using locally optimum unknown or estimated direction hypothesis test. Energy Procedia 2011. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.10.024>, acesso em jan de 2019.

HINRICHS, R.A ; KLEINBACH, M; REIS, L. Energia e meio ambiente. Cengage Learning, 1 ed, São Paulo, 2014.

HOLLAND, Stephen P. et al. Distributional effects of air pollution from electric vehicle adoption. Journal of the Association of Environmental and Resource Economists, v. 6, n. S1, p. S65-S94, 2019.

HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars. Tribology International, v. 135, p. 389-396, 2019.

HUANG, S.K., KUO, L., & CHOU, K. The impacts of government policies on green utilization diffusion and social benefits – A case study of electric motorcycles in Taiwan. Energy Policy. 2018.

HUANG, Shihping Kevin; KUO, Lopin; CHOU, Kuei-Lan. The impacts of government policies on green utilization diffusion and social benefits–A case study of electric motorcycles in Taiwan. Energy Policy, v. 119, p. 473-486, 2018.

HUNG, Nguyen Ba; LIM, Ocktaeck. A review of history, development, design and research of electric bicycles. Applied Energy, v. 260, p. 114323, 2020.

IEA. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. IEA. Global EV Outlook. OECD, IEA. 2016. Disponível em: www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf. Acesso em abril de 2019.

IEA. Key World Energy Statistics 2017. Statistics, p. 97, 2017.

IEA. Key World Energy Statistics 2020. Statistics, p. 61, 2020.

IWAN, Stanislaw & KIJEWski, Dawid. Possibilities of Applying Electrically Powered Vehicles in Urban Freight Transport. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. 151. 87-101. 10.1016/j.sbspro.2014.10.010.

JIA, Si Yuan. System Dynamics Modeling and Analysis of Regional Carbon Emission from Electric Vehicle Grid in Clean Energy Development Scenario. 2022.

JIAN, L ; ZHENG Y ; XIAO, X ; CHAN C..Optimal scheduling for vehicle-to-grid operation with stochastic connection of plug-in electric vehicles to smart grid. *Appl Energy* 2015. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.030>, acesso em nov de 2019.

JIANWEI Xing, BENJAMIN Leard, SHANJUN Li, What does an electric vehicle replace?, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 107, 2021, 102432, ISSN 0095-0696, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102432>.

JIAO, Z. et al. Fleet management for Electric Vehicles sharing system under uncertain demand. 14th International Conference on Services Systems and Services Management, ICSSSM 2017 - Proceedings, 2017.

JOHN P. Renewable Energy: Hydropower. *Environmental Science Act*, 2013. Disponível em: [/www.dlese.org/library/catalog_ESA-000-000-000-045.htm](http://www.dlese.org/library/catalog_ESA-000-000-000-045.htm), acesso em jan de 2019.

JUVVALA, Rambabu; SARMAH, S. P. Evaluation of policy options supporting electric vehicles in city logistics: a case study. *Sustainable Cities and Society*, v. 74, p. 103209, 2021.

KIM, Yooan; KIM, Hakkwan; SUH, Kyo. Environmental performance of electric vehicles on regional effective factors using system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, v. 320, p. 128892, 2021.

KOBUS, C. A real-life assessment on the effect of smart appliances for shifting households' electricity demand. *ApplEnergy* 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.073>. Acesso em jan de 2019.

KOSSALAPEEROM, Triluck et al. Comparative study of real-world driving cycles, energy consumption, and CO2 emissions of electric and gasoline motorcycles driving in a congested urban corridor. *Sustainable cities and society*, v. 45, p. 619-627, 2019.

KUSALAPHIROM, Triluck et al. Development of a Real-World Eco-Driving Cycle for Motorcycles. *Sustainability*, v. 14, n. 10, p. 6176, 2022.

KYOERA SOLAR. High Efficiency Multi-Crystalline Photovoltaic Modul, Disponível em: <<http://www.kyocerasolar.com.br/pdf/KD245GH.pdf>>. Acessado em fev de 2019.

LI, Fangyi et al. Regional comparison of electric vehicle adoption and emission reduction effects in China. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 149, p. 714-726, 2019.

LI, M.-W.; WANG, Y.-T.; GENG, J.; HONG, W.-C. Chaos cloud quantum bat hybrid optimization algorithm. *Nonlinear Dyn*. 2021, 103, 1167–1193.

LIN, Rui et al. Stability of High-Performance Pt-Based Catalysts for Oxygen Reduction Reactions. *Advanced Materials*, v. 30, n. 17, p. 1705332, 2018.

LIU, Y., & LAI, I. K. W. The Effects of Environmental Policy and the Perception of Electric Motorcycles on the Acceptance of Electric Motorcycles: An Empirical Study in Macau. *SAGE Open*, 10(1), 2020. <https://doi-org.ez47.periodicos.capes.gov.br/10.1177/2158244019899091>

LÖEBLER, M. L. Processamento da informação: uma avaliação dos diferentes níveis de conhecimento no processo de decisão. Tese (Doutorado em Administração) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

LONAN, Erwin Stefano; ARDI, Romadhani. Electric Vehicle Diffusion in the Indonesian Automobile Market: A System Dynamics Modelling. In: 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). IEEE, 2020. p. 43-47, 2020.

MACIEL, R. Otimização Multiobjetivo na Análise da Integração de Geração Distribuída às Redes de Distribuição Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal Paulista e Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, 2012.

MAHESH, Aganti; CHOKKALINGAM, Bharatiraja; MIHET-POPA, Lucian. Inductive wireless power transfer charging for electric vehicles—a review. *IEEE Access*, v. 9, p. 137667-137713, 2021.

MAHMOOD, A. Home appliances coordination scheme for energy management using wireless sensor networks in smart grids. *Procedia Comput Sci* 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.449>. Acesso em jan de 2019.

MALCZYNSKI, Leonard A.; LANE, David C. Sublime reason: when Isaac Asimov met Jay Forrester. *System Dynamics Review*, 2022.

MILLER, I.; ARBABZADEH, M.; GENÇER, E. HOURLY Power Grid Variations, Electric Vehicle Charging Patterns, and Operating Emissions. *Environ. Sci. Technol.* 2020, 54, 16071–16085.

MISKOLCZI, Márk et al. Urban mobility scenarios until the 2030s. *Sustainable Cities and Society*, p. 103029, 2021.

MONTEIRO, V; PINTO, J. G.; AFONSO, J. L. Operation modes for the electric vehicle in smart grids and smart homes: present and proposed modes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 3, p. 1007-1020, 2016.

MURTININGRUM, Angela Dianita; DARMAWAN, Agus; WONG, Hartanto. The adoption of electric motorcycles: A survey of public perception in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, v. 379, p. 134737, 2022.

NASAB Azimi M, Zand M, Padmanaban S, Khan B. Simultaneous Long-Term Planning of Flexible Electric Vehicle Photovoltaic Charging Stations in Terms of Load Response and Technical and Economic Indicators. *World Electric Vehicle Journal*. 2021; 12(4):190. <https://doi.org/10.3390/wevj12040190>

NASRI, S.; NOWDEH, S.A.; DAVOUDKHANI, I.F.; MOGHADDAM, M.J.H.; KALAM, A.; SHAHROKHI, S.; ZAND, M. Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Renewable

Energy System Using a New Method Based on Turbulent Flow of Water-Based Optimization (TFWO) Under Partial Shading Conditions. In *Energy Systems in Electrical Engineering*; Springer: Cham, Switzerland, 2021; pp. 285–310. ISBN 9789813364561.

NEMOTO, Eliane Horschutz et al. How to measure the impacts of shared automated electric vehicles on urban mobility. *Transportation research part D: transport and environment*, v. 93, p. 102766, 2021.

NISTOR S ; WU, J ; SOORIYABANDARA, M ; EKANAYAKE, J. Capability of smart appliances to provide reserve services. *Appl Energy* 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.011>. Acesso em Jan de 2019.

NIYONSABA, Jean D.'Amour; SAMVURA, Jean De Dieu; BIKORIMANA, Jean Marie Vianny. Integration of Electric Motorcycle Charging Station Based on PV System in Kigali City. In: *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*. IEEE, p. 1-4, 2021.

NUNES, Vitor da Silva. *Motocicletas elétricas no Distrito Federal e entorno: cenário atual e perspectivas futuras de utilização por motociclistas do segmento delivery*. 2022. 71 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Administração) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

ORSI, F., MURATORI, M., ROCCO, M., COLOMBO, E., RIZZONI, G. A multi-dimensional well-to-wheels analysis of passenger vehicles in different regions: primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. *Appl. Energy* 169, 197–209, 2016.

ORTIZ, Joana et al. Stochastic model for electrical loads in Mediterranean residential buildings: Validation and applications. *Energy and Buildings*, v. 80, p. 23-36, 2014.

OZGE, D ; RAMIREZ, E ; JOSE, M.. An automated method for estimating reliability of grid systems using Bayesian networks. *Reliab Eng Syst Saf* 2012.

PACHECO, Fernando; BLASS, Leandro. Análise da produção nacional de barris de petróleo e estimativa para o preço médio da gasolina no brasil para 2023. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 2, n. 14, 2022.

PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. [S.l.] Hemus, 2002.

PARENTE, Cecília de Gois et al. Estratégias para mitigar a emissão de poluentes no setor de carros particulares. 2020.

PELLETIER, Samuel et al. The electric bus fleet transition problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 109, p. 174-193, 2019.

PENYA, Y.K ; NIEVES, J.C ; ESPINOZA, A ; BORGES, C.E ; PEÑA, A ; ORTEGA, M. Distributed semantic architecture for smart grids. *Energies* 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en5114824>. Acesso: Dez de 2018.

PINTO, J. G. Bidirectional battery charger with grid-to-vehicle, vehicle-to-grid and vehicle-to-home technologies. *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*. IEEE, 2013.

PURKAYASTHA I ; SAVOIE P. Effect of harmonics on power measurement. IEEE Trans Ind Appl, 1990.

PYPER, J. How to Accelerate the Electric Vehicle Market: Create Allure. Greentech Media, 2016. Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-to-accelerate-the-electric-vehicle-market>. Acesso em: set de 2018.

RACZ, A. A., MUNTEAN, I., & STAN, S. D. A look into electric/hybrid cars from an ecological perspective. Procedia Technology, 19, 438-443, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.02.062>.

RAJPER, Sarmad Zaman; ALBRECHT, Johan. Prospects of electric vehicles in the developing countries: a literature review. Sustainability, v. 12, n. 5, p. 1906, 2020.

REBS, Tobias; BRANDENBURG, Marcus; SEURING, Stefan. System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. Journal of cleaner production, v. 208, p. 1265-1280, 2019.

REDMAN, Chad. The Impact of Motorcycles on Air Quality and Climate Change: A Study on the Potential of Two-Wheeled Electric Vehicles. 2015.

REGINATTO, João Paulo. Análise histórica do preço da gasolina brasileira de 2011 a 2021 e o impacto no salário mínimo brasileiro. 2022.

REIS, Mari Aurora Favero; JÚNIOR, Paulo Reis; PERIN, Dirceu Lorivaldo. Sustentabilidade energética em escola pública. MIX Sustentável, v. 6, n. 3, p. 37-44, 2020.

RIEDMULLER, K ; FORSYTH, R ; GIERLINGER, A ; GRIMM, G ; OFNER, E ; SATTLER, S. A mixed-signal ASIC with embedded DSP core for power metering application. Proceedings of the 24th European conference on solid-state circuits.. 2008. p. 4603.

RIZET, Christophe & CRUZ, Cecilia & VROMANT, Martine. (2016). The Constraints of Vehicle Range and Congestion for the Use of Electric Vehicles for Urban Freight in France. Transportation Research Procedia. 12. 500-507. [10.1016/j.trpro.2016.02.005](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.005).

ROGGE, Matthias; WOLLNY, Sebastian; SAUER, Dirk Uwe. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. Energies, v. 8, n. 5, p. 4587-4606, 2015.

ROMARE, Mia; DAHLLÖF, Lisbeth. The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries. 2017.

RUPP, Matthias et al. Contribution of country-specific electricity mix and charging time to environmental impact of battery electric vehicles: A case study of electric buses in Germany. Applied Energy, v. 237, p. 618-634, 2019.

RUPP, Matthias et al. Economic and ecological optimization of electric bus charging considering variable electricity prices and CO₂eq intensities. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 81, p. 102293, 2020.

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. LABSOLAR, Florianópolis: 2004.

SAMAD, T ; ANNASWAMY A. Control for Renewable Energy and Smart Grids. The Impact of Control Technology. Disponível em: www.ieeeccs.org, 2011. Acesso em out de 2018.

SANGEETHA, T.; CHEN, P.-T.; CHENG, W.-F.; YAN, W.-M.; HUANG, K.D. Optimization of the Electrolyte Parameters and Components in Zinc Particle Fuel Cells. *Energies*, 12, 1090, 2019.

SANTOS, A. C. F. d. R. Análise da viabilidade técnica e econômica de um veículo elétrico versus veículo a combustão. Universidade Federal de Santa Maria. Citado 4 vezes nas páginas 9, 39, 40 e 47, 2017.

SHARMA, K ; SAINI, L.M.. Performance analysis of smart metering for smart grid. Elsevier Ltd. All rights reserved. 2015. Disponível em: [overview http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.1701364-0321](http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.1701364-0321). Acesso em jan de 2019.

SILVA, A.M. Sistema de Conversão de Energia Solar Fotovoltaica. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Major Automação), Universidade do Porto, Porto, 2008.

SILVA, Rogério Diogne de Souza. Os recursos energéticos distribuídos no contexto da modernização do setor elétrico brasileiro. 2022.

SILVESTRE, Adalberto Porfirio. A disrupção na indústria de seguros no Brasil: desafios estratégicos para empresas incumbentes e startups frente à transformação digital. 2021. Tese de Doutorado.

SIMON, H. A. Artificial intelligence: an empirical science. *Artificial Intelligence*, v. 77(1), p. 95-127, ago. 1995.

SIMON, H. A. Comportamento Administrativo. Tradução de Aluizio Loureiro Pinto. 1ª ed. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1965.

SIMON, H. A. The Sciences of the Artificial. 3 Ed. The MIT Press: Cambridge, 1996.

SMART GRIDS. Smart grids: strategic deployment document for Europe's electricity networks of the future n.d. Disponível em: www.smartgrids.eu/documents/SmartGrids_SDD_FINAL_APRIL2010. Pdf, acesso em jan de 2019."

SOHAR H ; SALAM, M ; AZIZ A ; ALWAELI, A.H. ; KAZEM, H.A. Optimal sizing of photovoltaic systems using; 2014.

SOUZA, Daniela CR; FERREIRA, Vitor H.; NETO, Carlos AS. Aplicação de Redes Neurais Artificiais para Estimção de Indicadores de Segurança Estática e Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 2, n. 1, 2022.

STEPHEN, L ; SPANISH, C.S.P. Plant with Storage Produces Electricity for 24 h Straight. 2011. Disponível em

<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2011/07/solarcan-be-baseload-spanish-csp-plant-with-storage-produces-electricityfor-24-hours-straight>. Acesso em Dez de 2018.

STERMAN, J. D. et al. System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. *Journal of Operations Management*, v. 39-40, n. November, p. 1-5, 2015. ISSN 0272-6963. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jom.2015.07.001>

THORIN E. Basics of energy, in reference module in earth systems and environmental sciences. Elsevier; 2014.

TIGHTIZ, L.; NASAB, M.A.; YANG, H.; ADDEH, A. An intelligent system based on optimized ANFIS and association rules for power transformer fault diagnosis. *ISA Trans*, 103, 63–74, 2020.

TOLEDO, F ; GOUVÊA, A ; RIELLA, T. Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes: Smart Grid. Rio de Janeiro, Brasport, 2012.

TOLEDO, f, Desvendando as redes elétricas inteligentes, Rio de Janeiro, Brasport, 2012.

TORRES, R. C. Energia solar fotovoltaica como fonte alternativa de geração de energia elétrica em edificações residenciais. 2012. 164p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.

TUAYHARN, K., KAEWTATIP, P., RUANGJIRAKIT, K., & LIMTHONGKUL, P. ICE motorcycle and electric motorcycle: Environmental and economic analysis. *SAE Technical Paper*, 109–114 2015-01-0100, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Demand response n.d. Disponível em: <http://energy.gov/oe/technology-development/smart-grid/demand-response>. Acesso em Out de 2018.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. The modern grid: a vision for the smart grid v2, 2009. Disponível em: www.netl.doe.gov/smartgrid. Acesso em Abr de 2019.

URIBE, Alejandro et al. Discrete event simulation for battery-swapping station sizing for hybrid and electric motorcycles. *Journal of Cleaner Production*, v. 390, p. 136155, 2023.

VALÉRIO, Pedro Daniel Ribeiro da Silva. Simulação de custos de manutenção automóvel. Tese de Doutorado. 2022.

VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

VAN DER KAM, M ; VAN SARK, W. Smart charging of electric vehicles with photovoltaic power and vehicle-to-grid technology in a microgrid ; a case study. *Apply Energy* 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.092>. Acesso em Jan de 2019.

VAZ, C. R.; MALDONADO, M. U. O que é a Dinâmica de Sistemas? Reflexões sobre sua evolução e sobre as oportunidades de aplicação na gestão de operações, 2016, disponível em

https://www.researchgate.net/publication/305222914_O_que_e_a_Dinamica_de_Sistemas_Reflexoes_sobre_sua_evolucao_e_sobre_as_oportunidades_de_aplicacao_na_gestao_de_operacoes

VIANNA, Sergio Besserman; GARCIA, Marcio Gomes Pinto; SZANIECKI, Yuri Alter. Tesla Motors: A introdução dos veículos elétricos nos EUA, seu impacto para a economia, bem como suas externalidades. 2019.

VIEIRA, Elder Faria et al. Gestão de energia em hospitais: estudo de caso no Hospital São Marcos. 2022.

WADE, L. Tesla's electric cars aren't as Green as you might think. Wired, 2016. Disponível em: <https://www.wired.com/2016/03/teslas-electric-cars-might-not-green-think/>. Acesso em: abr de 2019.

WANG, B.; ZHAO, D.; DEHGHANIAN, P.; TIAN, Y.; HONG, T. Aggregated Electric Vehicle Load Modeling in Large-Scale Electric Power Systems. IEEE Trans. Ind. Appl. 2020

WANG, Jing; KANG, Lixia; LIU, Yongzhong. Optimal scheduling for electric bus fleets based on dynamic programming approach by considering battery capacity fade. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 130, p. 109978, 2020.

WARNE, D. ; CALNAN, P. Generation of electricity from the wind. IEEE Proceedings of the institution of electrical engineers, v. 124, n 11, 1977.

WEISS, Martin; ZERFASS, Andreas; HELMERS, Eckard. Fully electric and plug-in hybrid cars-An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO2 and air pollutant emissions. Journal of cleaner production, v. 212, p. 1478-1489, 2019.

WESOFF, E. How Soon Can Tesla Get Battery Cell Costs Below \$100 per Kilowatt-Hour?. Greentech Media, 2016. Disponível em: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/HowSoon-Can-Tesla-Get-Battery-Cell-Cost-Below-100-per-Kilowatt-Hour?>. Acesso em out de 2018.

WESSEL, P. Segurança cibernética e redes de comunicação em sistemas SCADA no contexto de smart grid. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Redes de Computadores) Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2015.

WINEBRAKE, James J.; GREEN, Erin H.; CARR, Edward. Plug-In Electric Vehicles: Economic Impacts and Employment Growth. Energy and Environmental Research Associates, out. 2017.

WU, Zhixin et al. Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle. Journal of Cleaner Production, v. 190, p. 462-470, 2018.

XING, Jianwei; Benjamin, Leard; Shanjun, Li. What does an electric vehicle replace?, Journal of Environmental Economics and Management, Volume 107, 2021, 102432, ISSN 0095-0696, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2021.102432>.

XUE, Y ; XU, Z ; WONG, K. P. Recent advancements on smart grids in China. Elect. Power Compon. Syst., Vol. 42, No. 3-4, pp. 251-261, 2014.

YEUNG, Jian Sheng, WONG, Yiik Diew, SECADININGRAT, Julius Raditya. Lane-harmonised passenger car equivalents for heterogeneous expressway traffic. *Transp. Res. Part A: Policy Pract.* 78 (August), 361–370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.001>, 2015.

YILMAZ, M ; KREIN, P.T. Review of benefits and challenges of vehicle-to-grid technology. *IEEE energy convers. Congr. Expo. IEEE*; 2012. Disponível em: doi: 10.1109/ECCE.2012.6342356. Acesso em jan de 2019.

YIM, S ; BARRETT, S. Public Health Impacts of Combustion Emissions in the United Kingdom. *Environmental Science and Technology*, Volume 46 (8), pp. 4291-4296, 2012.

YIYUN, T ; CAN, L ; LIN, C ; LIN, L. Research on vehicle-to-grid technology. In: *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring IEEE*; 2011.

YUNIARTO, Muhammad Nur et al. Modeling, Simulation, and Validation of An Electric Scooter Energy Consumption Model: A Case Study of Indonesian Electric Scooter. *IEEE Access*, v. 10, p. 48510-48522, 2022.

ZAND, M.; NASAB, M.A.; HATAMI, A.; KARGAR, M.; CHAMORRO, H.R. Using Adaptive Fuzzy Logic for Intelligent Energy Management in Hybrid Vehicles. In *Proceedings of the 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tabriz, Iran, 4–6 August 2020; pp. 1–7.

ZHU, Lichao et al. Exploring the determinants of consumers' WTB and WTP for electric motorcycles using CVM method in Macau. *Energy Policy*, v. 127, p. 64-72, 2019.