

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS  
CURSO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO CIVIL

Matheus Turri Benedetti

**Um modelo matemático para substituição de tecnologia em frotas heterogêneas de  
ônibus mediante o uso de leasing**

Florianópolis

2023

Matheus Turri Benedetti

**Um modelo matemático para substituição de tecnologia em frotas heterogêneas de  
ônibus mediante o uso de *leasing***

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Produção Civil do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Civil com habilitação em Produção.

Orientador(a): Prof. Sérgio Fernando Mayerle, Dr.

Florianópolis

20203

## Ficha de identificação da obra

Benedetti, Matheus Turri

Um modelo matemático para substituição de tecnologia em frotas heterogêneas de ônibus mediante o uso de leasing / Matheus Turri Benedetti ; orientador, Sérgio Fernando Mayerle, 2023.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Produção Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Civil. 2. Ônibus elétrico. 3. Substituição de Frota. 4. Leasing. 5. Pesquisa Operacional. I. Mayerle, Sérgio Fernando. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Civil. III. Título.

Matheus Turri Benedetti

**Um modelo matemático para substituição de tecnologia em frotas heterogêneas de  
ônibus mediante o uso de *leasing***

Florianópolis, 27 de junho de 2023.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado e aprovado pela banca examinadora  
composta dos seguintes membros:

Prof.(a) Sérgio Fernando Mayerle, Dr.  
Orientador(a)

Prof.(a) Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Rogério Feroldi Miorando, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certifico que esta é a versão final do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
pelo autor e julgado adequado por mim e pelos demais membros da banca para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil com habilitação em Engenharia de Produção.

---

Prof.(a) Sérgio Fernando Mayerle, Dr.(a)  
Orientador(a)

Dedico este trabalho à minha família: João, Nélida e Vinicius.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por me incentivar na luta pelos meus sonhos, vibrar a cada conquista e me apoiar incondicionalmente em todos os dias da minha vida. Os ensinamentos baseados no respeito, humildade e justiça foram essenciais para que eu pudesse realizar o sonho de me formar em uma Universidade Federal. Todo o meu amor por vocês, João, Nélida e Vinícius.

Agradeço ao meu avô Osmar pelo carinho, companheirismo e torcida até o último dia de sua vida. Agradeço à minha avó Cida pelo apoio e preocupação durante todos os momentos difíceis. De maneira geral, agradeço a todos da família Turri e da família Benedetti. Agradeço também à Angelina por ter sido uma segunda mãe desde o meu primeiro dia de vida.

Agradeço à UFSC por ter proporcionado os melhores anos da minha vida e todos os aprendizados adquiridos. Ao CALIPRO, por toda a liberdade e incentivo ao meu desenvolvimento, e também por expandir meu entendimento sobre diversidade. Ao GELOG, pelos ensinamentos teóricos que auxiliaram no entendimento dos meus interesses profissionais. Agradeço a todos os professores que contribuíram com a minha formação de alguma forma. Ao Professor Sérgio Fernando Mayerle, um agradecimento especial por ter me orientado de maneira excepcional na realização deste trabalho.

Obrigado aos amigos que fiz durante a graduação. Henrique, Esther, Filipo e Giovanna, que compartilharam essa trajetória comigo desde o primeiro dia. Ao Gabriel Milstein, pela parceria e experiências incríveis. Ao Vinicius, Ana Flávia e Milena, pelo cuidado e carinho. Ao Bruno, Pedro, Gabriel Henrique e todos os amigos do Village que me apoiaram independente da distância. E à Marina, por me mostrar as coisas mais lindas que a vida pode oferecer, estar sempre ao meu lado, acreditar em mim e me ajudar a me tornar um ser humano melhor.

## RESUMO

Diversas cidades ao redor do mundo têm exigido que as operadoras de transporte público deixem de utilizar ônibus movidos a combustíveis fósseis nas próximas décadas e passem a operar com veículos movidos a energias limpas. Diante deste cenário, os ônibus elétricos tem se mostrado uma opção interessante devido à constante evolução tecnológica. Este trabalho tem como objetivo construir um modelo matemático para o problema de substituição de frota de ônibus a combustão por ônibus elétrico, considerando o *leasing* como alternativa financeira. Assim, operadoras de transporte são capazes de otimizar o plano de substituição de frota, comparar alternativas financeiras e garantir que todas as restrições e metas determinadas serão respeitadas. O modelo é desenvolvido em programação inteira e faz uso da Modelagem como metodologia de pesquisa. Os resultados obtidos com a aplicação numérica baseadas em dados reais mostram que o modelo se comporta de acordo com a realidade do problema, se adaptando à modalidade de gerenciamento escolhida pela operadora de transporte. O *leasing* como alternativa financeira se mostrou competitivo no cenário estudado, resultando em soluções financeira e operacionalmente satisfatórias.

**Palavras-chave:** Ônibus elétrico. Substituição de frota. *Leasing*.

## **ABSTRACT**

Several cities around the world have demanded that public transportation agencies stop using fossil fuel buses in the coming decades and start operating with clean energy vehicles. Given this scenario, electric buses have proven to be an interesting option due to the constant technological evolution. This paper aims to build a mathematical model for the electric bus fleet transition problem, considering leasing as a financial alternative. Thus, transportation agencies will be able to optimize the fleet replacement plan, compare financial alternatives and guarantee that all restrictions and targets will be respected. The model is developed in integer programming and makes use of modeling as a research methodology. The results obtained with the numerical application based on real data show that the model behaves according to the reality of the problem, adapting to the management modality chosen by the transportation agency. Leasing as a financial alternative proved to be competitive in the scenario studied, resulting in financially and operationally satisfactory solutions.

**Keywords:** Electric bus Fleet replacement. Leasing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de modelagem .....	18
---	----

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento do valor de venda dos veículos por idade.....	36
Gráfico 2 – Idade média da frota ao longo do horizonte de planejamento.....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do modelo .....	22
Tabela 2 – Características dos modelos de ônibus do conjunto $K$ .....	33
Tabela 3 – Distribuição dos veículos no início do horizonte de planejamento .....	34
Tabela 4 – Características dos tipos de carregadores .....	34
Tabela 5 – Distribuição da frota utilizando a modalidade de Gerenciamento Integral .....	38
Tabela 6 – Distribuição da frota utilizando a modalidade de Gerenciamento Parcial.....	39
Tabela 7 – Comparação dos resultados entre as modalidades de gerenciamento da frota .....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAUE	Custo Anual Uniforme Equivalente
CNG	<i>Compressed Natural Gas</i>
EBFTP	<i>Electric bus fleet transition problem</i>
SE	Substituição de Equipamentos
TMA	Taxa Mínima de Atratividade

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTO.....	15
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO ..	16
1.3	OBJETIVOS .....	17
<b>1.3.1</b>	<b>Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Específicos .....</b>	<b>17</b>
1.4	DELIMITAÇÕES.....	17
1.5	METODOLOGIA.....	18
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1	<i>LEASING</i> .....	20
2.2	MODELO DE PELLETIER ET AL. (2019).....	20
<b>2.2.1</b>	<b>Conjuntos .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Parâmetros .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Variáveis de decisão.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Equações .....</b>	<b>24</b>
2.3	DEMAIS MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO DE FROTA.....	27
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO .....</b>	<b>29</b>
3.1	MODALIDADES DE GERENCIAMENTO DA FROTA .....	29
3.2	ADAPTAÇÕES DO MODELO .....	30
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO NUMÉRICA.....</b>	<b>31</b>
4.1	DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	32
<b>4.1.1</b>	<b>Parâmetros em comum entre as modalidades .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Parâmetros individuais de cada modalidade .....</b>	<b>35</b>
<i>4.1.2.1</i>	<i>Gerenciamento Integral da frota.....</i>	<i>35</i>
<i>4.1.2.2</i>	<i>Gerenciamento Parcial da frota.....</i>	<i>37</i>
4.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	37
<b>4.2.1</b>	<b>Modalidade de Gerenciamento Integral.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Modalidade de Gerenciamento Parcial .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Comparação dos resultados.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>44</b>

<b>APÊNDICE A – MODELO PARA GERENCIAMENTO INTEGRAL .....</b>	<b>48</b>
<b>APÊNDICE B – MODELO PARA GERENCIAMENTO PARCIAL .....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo é responsável por apresentar o contexto do tema, caracterizar o problema de pesquisa, definir os objetivos do trabalho, delimitar a pesquisa e apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento do TCC.

### 1.1 CONTEXTO

Diversas cidades ao redor do mundo estão deixando de utilizar veículos a combustão e passando a utilizar veículos movidos a fontes de energias renováveis, como eletricidade, biodiesel e hidrogênio (ADLER et al., 2017; XYLIA et al., 2017). Neste cenário, os ônibus elétricos tem aparecido como uma das principais soluções, principalmente devido a constante redução do preço das baterias e da evolução da performance dos veículos na última década (LI et al., 2018; PELLETIER et al., 2019). Entretanto, planejar o sistema de transporte público somente com ônibus elétricos é uma área de pesquisa recente. Apesar de apresentar benefícios ambientais significantes, a autonomia dos veículos e a longa duração de carregamento são aspectos que preocupam (TRANSPORT & ENVIROMENT, 2018).

Muitas cidades já possuem metas para substituírem os ônibus a combustão por ônibus elétrico. Por exemplo, Paris e Copenhagen pretendem realizar a transição completa da frota até 2025 (COPENHAGEN CAPACITY, 2019; TRANSPORT & ENVIROMENT, 2018). A cidade de Los Angeles e o estado da Califórnia tem o objetivo de operar o transporte público somente com ônibus elétrico a partir de 2030 e 2040, respectivamente (FINANCE, 2018; CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD, 2018). No Canadá, a cidade de Toronto está comprometida a ter 50% da frota composta por ônibus elétrico até 2032 e 100% até 2040. Já a cidade de Montreal, pretende comprar somente ônibus elétrico a partir de 2025. (TORONTO TRANSIT COMMISSION, 2019; MONTREAL GAZETTE, 2018).

Na América Latina, Santiago foi a primeira cidade a incorporar ônibus elétrico ao seu sistema de transporte coletivo. A capital chilena começou a transição da frota em 2018 e, atualmente, possui a segunda maior frota de ônibus elétrico do mundo. A modalidade financeira utilizada para realizar a incorporação dos veículos elétricos à frota foi o *leasing*. No contrato, o valor pago mensalmente pela operadora de transporte está incluso o aluguel dos ônibus, a infraestrutura de recarga e o fornecimento de energia à frota (GALARZA, 2020; GOBIERNO DE CHILE, 2017; STEER, 2020; WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2019; WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL, 2019).

No Brasil essa discussão vem sendo feita desde 2009, quando foi sancionada a Lei nº 14.933 (São Paulo, 2009), denominada de Lei de Mudanças Climáticas, que instituiu a Política de Mudança do Clima na cidade de São Paulo. Essa lei exigia que a redução da quantidade de ônibus movidos a combustíveis fosse de pelo menos 10% ao ano e que, em 2018, a frota não possuísse veículos dessa tecnologia. No entanto, essa meta não foi atendida em nenhum ano. Em 2018, uma nova lei foi sancionada a respeito dos ônibus urbanos da cidade (Lei Municipal nº 16.802/2018). Desta vez, a lei exige que as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil, NO<sub>x</sub> e MP sejam reduzidas em 50%, 80% e 90%, respectivamente, até 2038. Já ao final de 20 anos, as emissões de escapamento de CO<sub>2</sub> fóssil devem ser eliminadas, enquanto as de NO<sub>x</sub> e MP devem ser reduzidas em 95%.

## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Conforme apresentado na seção anterior, diversas cidades ao redor do mundo estão adotando a utilização de ônibus movidos por energias limpas no transporte público, seja por questões legislativas, ambientais ou financeiras. Na maioria dos casos, são estipuladas metas ou leis para que a substituição dos ônibus a combustão aconteça. As técnicas usuais para as análises de substituição de frota em engenharia econômica costumam utilizar o Custo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) e a determinação da vida econômica dos veículos. Esses modelos costumam ser eficientes em condições de regime permanente, isto é, quando a operação da frota ocorre sempre da mesma forma e nas mesmas condições. No contexto da substituição de tecnologia, surge o problema da transição, na qual deve-se determinar o momento apropriado para a realização da troca de uma modalidade de operação para outra. Assim, duas alternativas de modalidades podem ser consideradas: a empresa de transporte público pode operar uma frota própria ou utilizar veículos de terceiros sob um contrato de *leasing*. Pelletier et al. (2019) aborda a questão da substituição de tecnologia sob a primeira modalidade, e, embora algumas cidades já vem realizando a substituição através da segunda modalidade, não foi encontrado na literatura um modelo que aceite o *leasing* como modalidade de operação.

Para que as operadoras de transporte tenham o menor custo possível durante a transição de frota, é necessário que a substituição dos ônibus seja feita no momento ideal. Entretanto, o problema se torna ainda mais complexo ao passo em que a frota é heterogênea, ou seja, possui veículos de diferentes modelos e idades. Diante desse cenário, este trabalho se justifica por

considerar no modelo uma modalidade de operação que vem sendo utilizada, respeitando as restrições e buscando o menor valor presente.

### 1.3 OBJETIVOS

Essa seção é destinada à descrição do objetivo geral e dos objetivos específicos deste trabalho.

#### 1.3.1 Geral

Este trabalho tem como objetivo geral adaptar um modelo matemático para o problema de substituição de frota heterogênea de ônibus a combustão por ônibus elétrico, considerando o *leasing* como alternativa financeira no contexto de uma empresa de transporte de passageiros.

#### 1.3.2 Específicos

Para que esse objetivo seja atingido, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar as modalidades de financiamento e gerenciamento da frota que são aceitas pelo modelo;
- b) Levantar os parâmetros e variáveis de decisão que estão envolvidas no problema de substituição de frota;
- c) Levantar restrições operacionais da frota considerando uma frota de ônibus de transporte coletivo;
- d) Caracterizar o objetivo do modelo;
- e) Apresentar uma aplicação numérica para comparar resultados obtidos entre as duas modalidades financiamento.

### 1.4 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho permite à operadora de trânsito escolher apenas uma das modalidades de gerenciamento para conduzir a substituição da frota de ônibus. Portanto, a frota inteira deve estar sob contrato de *leasing* ou sob propriedade da operadora de trânsito.

A aplicação numérica deste trabalho é baseada em dados reais de uma operadora de trânsito francesa. Os valores não informados tiveram que ser estimados a partir de referências da literatura. Entretanto, houveram parâmetros declarados como nulos devido a falta de dados e dificuldade em estimá-los.

Este trabalho considera um contrato de *leasing* pelo qual os ônibus que são colocados a disposição da operadora de trânsito já possuem bateria instalada. Na aplicação numérica estudada na quarta seção deste trabalho, os custos de energia e manutenção são de responsabilidade da operadora de trânsito. Entretanto, o modelo permite que esses custos estejam embutidos no custo do *leasing*.

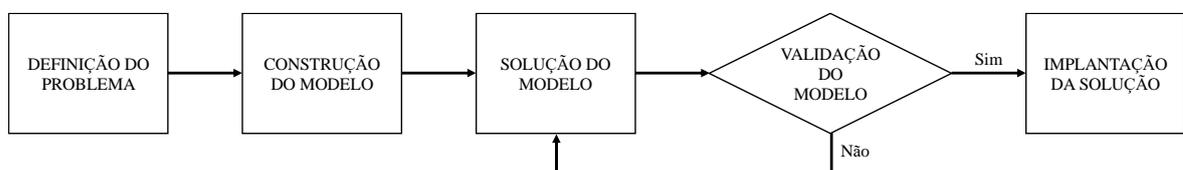
## 1.5 METODOLOGIA

A metodologia adotada como questão de pesquisa para este trabalho se enquadra como pesquisa quantitativa tanto na classificação de pesquisa axiomática normativa, quanto na pesquisa empírica normativa. O empirismo se remete à casos práticos e adequação dos modelos à realidade, enquanto o axiomático está relacionado com a construção de modelos. O termo normativo que está vinculado às ações disponíveis na literatura busca tanto a otimização do resultado de um problema real, quanto o empírico (CAUCHIK-MIGUEL, 2010).

O método de pesquisa adotado para o desenvolvimento deste trabalho de dissertação é a Modelagem. Este método auxilia os pesquisadores a aprimorarem o entendimento dos problemas estudados, onde os modelos são representações simplificadas da realidade e permitem uma compreensão do objeto de pesquisa ou estudo (LACERDA et al., 2013).

Parte dos dados utilizados na aplicação numérica são baseados em dados reais, enquanto outra parte é proveniente da literatura. A Figura 1 representa a metodologia proposta por Cauchick Miguel (2010), a qual é seguida para desenvolver o presente trabalho.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de modelagem



Fonte: adaptado de Cauchick Miguel (2010)

A primeira etapa da construção deste trabalho se baseia em estudar o problema e modelos existentes na literatura, a fim de entender o problema e todas as variantes que o mesmo possa vir a ter. Assim, o pesquisador garante a inclusão no modelo de todas as variáveis e parâmetros que fornecerão uma solução técnica para o problema (CHIWIF; MEDINA, 2006).

A construção do modelo geralmente é feita partindo-se de modelos existentes utilizados na Pesquisa Operacional, adaptando as restrições e parâmetros para aproximar o modelo das características do problema (CAUCHICK MIGUEL, 2010). Este trabalho utiliza o software GAMS (*General Algebraic Modeling System*) para a construção do modelo em programação inteira. Concluída essa etapa, é necessário verificar os erros do modelo computacional e corrigi-los (CHIWIF; MEDINA, 2006 apud FERNANDES, 2013).

A validação do modelo é feita em duas partes. Na primeira, inseriu-se dados de entrada simples e analisou-se os resultados obtidos. Cauchick Miguel (2010) relata que é comum realizar análises de sensibilidade e de cenários a fim de verificar o comportamento do modelo na primeira parte dessa etapa. A segunda parte consiste em inserir os dados originais do problema para testar o comportamento do modelo e definir se os resultados fazem sentido com o que se desejava representar.

De maneira resumida, a metodologia utilizada neste trabalho concentra-se em explorar os modelos existentes na literatura e confrontá-los com o que se quer representar da realidade. Após essas etapas, o foco é propor um modelo matemático para o problema de substituição de frota de ônibus a diesel por ônibus elétrico, considerando o *leasing* como alternativa financeira.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco seções. A primeira descreve o contexto em que a pesquisa está inserida e justifica sua realização. Além disso, são definidos os objetivos do trabalho, limitações e metodologia utilizada. Na segunda seção foi realizada a revisão da literatura, citando os principais trabalhos e conceitos sobre o tema em estudo, além da apresentação do modelo de referência deste trabalho. Na terceira seção foram apresentadas as modalidades de gerenciamento da frota e as adaptações realizadas no modelo para que fosse possível utilizar o *leasing*. A quarta seção expõe os valores utilizados na aplicação do modelo e explica como foram obtidos. Ainda nessa seção, os resultados são exibidos e discutidos. Por fim, a quinta seção conclui o trabalho informando os objetivos atingidos e sugerindo novas oportunidades de pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os principais trabalhos presentes na literatura sobre os temas de substituição de frota e *leasing*. Sendo assim, foi dividido em três seções. A primeira trata do conceito de *leasing* e mostra modelos de substituição de frota que

utilizam esse produto financeiro. A segunda seção detalha o modelo desenvolvido por Pelletier et al. (2019), o qual foi adaptado neste trabalho para atender a utilização do *leasing*. Por fim, são apresentados os principais trabalhos a respeito da substituição de frota.

## 2.1 LEASING

Ao contrário da elevada quantidade de trabalhos que apresentam modelos onde a modalidade de operação é com frota própria, poucos estudos sobre substituição de frota de veículos movidos a diferentes fontes de energia utilizam o *leasing* como alternativa financeira. Segundo Toledo Filho (2006), o termo *leasing* origina-se do verbo em inglês *to lease*, que significa alugar. No Brasil, esse produto financeiro foi denominado arrendamento mercantil e se caracteriza por ser uma operação realizada mediante a um contrato em que o proprietário do equipamento (arrendador) concede a outro (arrendatário) a utilização do mesmo, por prazo determinado (TOLEDO FILHO, 2006).

Kleindorfer et al. (2012) apresenta um modelo formulado em programação dinâmica onde os veículos convencionais e elétricos operam sob um contrato de *leasing*. O modelo faz uso de dados reais da operadora postal da França (La Poste) e leva em consideração as incertezas dos preços de combustível e bateria dos veículos elétricos no futuro. Ansariipoor et al. (2018) também utiliza o *leasing*, porém com um contrato flexível. São dadas três opções à operadora de transporte, as quais envolvem diferentes penalidades financeiras de acordo com o tempo que o veículo é devolvido para a empresa proprietária do veículo. Assim, a operadora de transporte possui mais autonomia para gerenciar os veículos que estão operando.

## 2.2 MODELO DE PELLETIER ET AL. (2019)

Pelletier et al. (2019) foi o primeiro a desenvolver um modelo de programação inteira considerando, simultaneamente, meta de eletrificação da frota, decisões de compra e venda de veículos, múltiplos modelos de ônibus elétricos com diferentes formatos de carregamento, investimento em infraestrutura de carregadores e demanda de carregamento. Através deste modelo, as organizações são capazes de determinar o plano de substituição da frota, garantindo que as metas de eletrificação da frota sejam executadas respeitando o orçamento anual para compra de novos veículos. O modelo é implementado utilizando dados reais de uma frota de uma agência transporte público, onde são considerados veículos a diesel, híbridos, CNG (*Compressed Natural Gas*) e elétricos. As análises são realizadas em diversos cenários e apresenta-se o plano de substituição da frota dentro de cada um deles. Os autores utilizam o

termo *electric bus fleet transition problem* (EBFTP) para representar o problema de substituição de frota para veículos elétricos.

O presente trabalho utiliza o modelo de Pelletier et al. (2019) como referência para fazer as adaptações propostas. Por isso, a atual seção detalha todos os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão utilizados no trabalho de referência para a formulação do modelo.

### 2.2.1 Conjuntos

O conjunto  $K = \{k1, k2, \dots\}$  representa todos os modelos de ônibus e  $K_E$  é um subconjunto que determina os modelos que são elétricos, sendo  $K_E \subseteq K$ . Para delimitar todas as possíveis idades permitidas para ônibus integrante da frota, utilizou-se o conjunto  $J = \{0, \dots, \kappa^k\}$ , sendo  $\kappa^k$  a idade máxima em operação, permitida para um veículo do modelo  $k$ . O conjunto  $C = \{c1, c2, \dots\}$  apresenta todos os possíveis tipos de carregadores de ônibus. Cada tipo de rota a ser percorrida deve ser descrita no conjunto  $R = \{R1, R2, \dots\}$ . Por fim, o conjunto  $T = \{1, \dots, t_F\}$  indica o horizonte de planejamento, sendo  $t_F$  o último período considerado pelo modelo.

### 2.2.2 Parâmetros

O parâmetro  $P^t$  indica a proporção mínima de ônibus elétricos na frota no período  $t$ . No início do horizonte de planejamento, a frota é composta por  $a_j^k$  ônibus de modelo  $k$  e idade  $j$  e  $E^c$  carregadores do tipo  $c$ . A idade média máxima dos ônibus remanescentes na frota no período  $t_F$  é indicada por  $\Gamma$ .

Um orçamento  $B_t$  para a compra de veículos e carregadores é disponível para cada período  $t$ . O preço de compra do modelo de ônibus  $k$  no período  $t$  é indicado por  $f_t^k$ . Para a aquisição de novos carregadores, utiliza-se  $PCC^c$  como o valor pago para cada carregador do tipo  $c$ . Os veículos podem ser vendidos com qualquer idade, porém, ao atingirem a idade  $\kappa^k$ , devem obrigatoriamente ser vendidos. Para cada idade  $j$  e modelo de ônibus  $k$ , é dado o valor de venda  $s_j^k$ . O parâmetro denominado como *Taxa* representa a Taxa Mínima de Atratividade do operador de transporte, que é utilizado para compor o fator de correção econômico *Beta*, dado pela expressão  $Beta = (1 + Taxa)^{-1}$ .

O custo total de operação  $TOC_{jt}^k$  do ônibus de modelo  $k$  e idade  $j$  no período  $t$  é o resultado da soma de dois parâmetros e são representados na equação  $TOC_{jt}^k = Enr_t^k + Mnt_j^k$ . Os parâmetros da equação representam o custo de energia ( $Enr_t^k$ ) do ônibus de modelo  $k$  no período  $t$  e o custo de manutenção ( $Mnt_j^k$ ) do modelo de ônibus  $k$  com idade  $j$ . Além do custo

de manutenção dos veículos que é descontado em todos os períodos, cada modelo de ônibus  $k$ , ao atingir a idade de meia-vida  $\alpha^k$ , passa por uma manutenção preventiva no período  $t$  com o custo  $MC_t^k$ .

Para garantir que a quantidade de carregadores acompanhe a evolução do número de ônibus elétricos na frota, é dada a proporção  $Teta^c$ , que é igual à quantidade de carregadores do tipo  $c$  disponíveis em relação à quantidade de veículos que são compatíveis com o carregador do tipo  $c$ . Em paralelo, o parâmetro binário  $CK_c^k$  é igual a 1 se e somente se o ônibus de modelo  $k$  for compatível com o carregador do tipo  $c$ . Cada carregador do tipo  $c$  consome  $GC^c$  kW de energia por período. As restrições de disponibilidade da rede de energia na garagem dos ônibus e de espaço físico são representadas por  $G$  e  $H$ , respectivamente.

As rotas exigem modelos de ônibus específicos para serem percorridas, visto que possuem particularidades que alguns modelos tem e outros não. Para tanto, o parâmetro binário  $HP_r^k$  é igual a 1 se e somente se um ônibus do modelo  $k$  pode operar na rota do tipo  $r$ . A quantidade de ônibus que devem ser atribuídos à rota  $r$  é dado por  $q_r$ .

### 2.2.3 Variáveis de decisão

A variável de decisão  $u_t^c$  corresponde a quantidade de carregadores do tipo  $c$  adquiridos no início do período  $t$ , enquanto a variável  $v_t^c$  indica a quantidade de carregadores do tipo  $c$  que estão disponíveis no período  $t$ . A variável  $w_{jtr}^k$  é responsável por informar a quantidade de ônibus do modelo  $k$  e idade  $j$  que são atribuídos à rota do tipo  $r$  no período  $t$ . Para representar as quantidades de ônibus que entram e saem da frota, utiliza-se as variáveis  $x_t^k$  e  $y_{jt}^k$ , sendo a primeira o número de veículos do modelo  $k$  comprados no início do período  $t$  e a segunda o número de ônibus do modelo  $k$  e idade  $j$  que deixam de integrar a frota no início do período  $t$ . Por fim, a variável  $z_{jt}^k$  indica a quantidade de ônibus do modelo  $k$  e idade  $j$  que estão disponíveis para operar no período  $t$ .

O resumo dos conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão utilizados na construção do modelo de Pelletier et al. (2019) é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão do modelo

CONJUNTOS	
$C$	Conjunto de possíveis tipos de carregadores
$J$	Conjunto de possíveis idades para os ônibus da frota

$K$	Conjunto de possíveis modelos de ônibus
$K_E$	Conjuntos de possíveis modelos de ônibus elétricos
$R$	Conjunto de tipos de rotas
$T$	Conjunto de períodos do horizonte de planejamento
PARÂMETROS	
$a_j^k$	Quantidade de ônibus do modelo $k$ e idade $j$ na frota no início do horizonte de planejamento
$B_t$	Orçamento disponível para compras de veículos e carregadores no período $t$
$Beta$	Fator de correção econômico
$CK_c^k$	Parâmetro binário igual a 1 se um ônibus do modelo $k$ pode utilizar um carregador do tipo $c$
$E^c$	Quantidade de carregadores do tipo $c$ disponíveis no início do horizonte de planejamento
$Enr_t^k$	Custo total de energia do ônibus de modelo $k$ no período $t$
$f_t^k$	Valor de compra do ônibus de modelo $k$ no período $t$
$G$	Restrição da rede de energia na garagem dos ônibus em kW
$\Gamma$	Idade média máxima dos ônibus no último período do horizonte de planejamento
$GC^c$	Consumo de energia em kW do carregador de tipo $c$
$H$	Restrição do espaço físico da garagem dos ônibus
$HP_r^k$	Parâmetro binário igual a 1 se o ônibus do modelo $k$ é compatível com a rota do tipo $r$
$\kappa^k$	Idade em que o ônibus de modelo $k$ deve ser necessariamente retirado da frota
$MC_t^k$	Custo de manutenção preventiva quando um ônibus do modelo $k$ atinge a idade de meia-vida $\alpha^k$ no período $t$
$Mnt_j^k$	Custo total de manutenção do ônibus do modelo $k$ com idade $j$
$P^t$	Proporção mínima de ônibus elétricos em relação à frota no período $t$
$PCC^c$	Valor de compra do carregador de tipo $c$
$PDC$	Custo do consumo de energia em \$/kW
$q_r$	Quantidade de ônibus que devem ser atribuídos à rota $r$
$s_j^k$	Valor de venda do ônibus de modelo $k$ com idade $j$
$Taxa$	Taxa de mínima atratividade do operador de transportes
$Teta^c$	Proporção mínima de carregadores do tipo $c$ em relação ao total de ônibus elétricos na frota
$TOC_{jt}^k$	Custo total de operação do ônibus de modelo $k$ com idade $j$ no período $t$
VARIÁVEIS DE DECISÃO	
$u_t^c$	Quantidade de carregadores do tipo $c$ instalados no início do período $t$
$v_t^c$	Quantidade de carregadores do tipo $c$ disponíveis durante o período $t$

$w_{jtr}^k$	Quantidade de ônibus do modelo $k$ com idade $j$ atribuídos à rota do tipo $r$ no início do período $t$
$x_t^k$	Quantidade de ônibus do modelo $k$ incorporados à frota no início do período $t$
$y_{jt}^k$	Quantidade de ônibus do modelo $k$ com idade $j$ retirados da frota no início do período $t$
$z_{jt}^k$	Quantidade de ônibus do modelo $k$ com idade $j$ disponíveis no período $t$

Fonte: adaptado de Pelletier et al. (2019).

## 2.2.4 Equações

O modelo matemático que representa o EBFTP é definido como um problema de programação inteira e é composto por 22 equações. A primeira delas indica a função objetivo do modelo de programação e é representada por  $z_{obj}$  no modelo de programação. As demais equações são utilizadas como restrições do modelo. Todas as equações são declaradas abaixo.

*minimizar*

$$\begin{aligned}
& \sum_{t \in T} Beta^{t-1} \sum_{k \in K} \left( f_t^k x_t^k - \sum_{j=1}^{\kappa^{k+1}} s_j^k y_{jt}^k + \sum_{r \in R} \sum_{j=0}^{\kappa^k} TOC_{jt}^k w_{jtr}^k + MC_t^k z_{\alpha^k t}^k \right) \\
& + \sum_{t \in T} Beta^{t-1} \sum_{c \in C} (PCC^c u_t^c + PDC GC^c v_t^c) \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} \sum_{j=0}^{\kappa^{k-1}} \sum_{i=1}^{\kappa^k - j} Beta^{t_F+i-1} TOC_{j+i,t_F,r}^k w_{jt_F r}^k \\
& - \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{\kappa^k} Beta^{t_F+\kappa^k-j} s_{\kappa^k+1,t_F}^k z_{jt_F}^k \\
& + \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{\alpha^k} Beta^{t_F+\alpha^k-j-1} MC_{t_F}^k z_{jt_F}^k
\end{aligned} \tag{1}$$

*sujeito a*

$$\sum_{k \in K_E} \sum_{j=0}^{\kappa^k} z_{jt}^k \geq P^t \left( \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{\kappa^k} z_{jt}^k \right) \quad t \in T \tag{2}$$

$$\sum_{k \in K} \sum_j w_{jtr}^k = q_r \quad r \in R \tag{3}$$

$$w_{jtr}^k \leq HP_r^k z_{jt}^k \quad k \in K, r \in R, t \in T, j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{r \in R} w_{jtr}^k = z_{jt}^k \quad k \in K, r \in R, t \in T, j \in J \quad (5)$$

$$z_{0t}^k = x_t^k - y_{0t}^k \quad k \in K, t \in T \setminus \{1\} \quad (6)$$

$$z_{0,1}^k = a_0^k + x_1^k - y_{0,1}^k \quad k \in K \quad (7)$$

$$z_{jt}^k = z_{j-1,t-1}^k - y_{jt}^k \quad k \in K, t \in T \setminus \{1\}, j \in J \setminus \{0\} \quad (8)$$

$$y_{\kappa^k+1,t}^k = z_{\kappa^k,t-1}^k \quad k \in K, t \in T \setminus \{1\} \quad (9)$$

$$y_{\kappa^k+1,1}^k = a_{\kappa^k+1}^k \quad k \in K \quad (10)$$

$$z_{j,1}^k = a_j^k - y_{j,1}^k \quad k \in K, k \in J \setminus \{0\} \quad (11)$$

$$\sum_{k \in K} \left( f_t^k x_t^k - \sum_{j=0}^{\kappa^k+1} s_j^k y_{jt}^k \right) + \sum_c PCC_c u_t^c \leq B_t \quad t \in T \quad (12)$$

$$v_t^c \geq Teta^c \sum_{k \in K_E | c \in C} \sum_j CK_c^k z_{jt}^k \quad c \in C, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{c \in C} GC^c v_t^c \leq G \quad t \in T \quad (14)$$

$$\sum_{c \in C} v_t^c \leq H \quad t \in T \quad (15)$$

$$v_1^c = E^c + u_1^c \quad c \in C \quad (16)$$

$$v_t^c = v_{t-1}^c + u_t^c \quad c \in C, t \in T \setminus \{1\} \quad (17)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{\kappa^k} j z_{j,t_F}^k \leq \Gamma \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{\kappa^k} z_{j,t_F}^k \quad (18)$$

$$x_t^k \in \mathbb{Z}^+ \quad k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$u_t^c, v_t^c \in \mathbb{Z}^+ \quad c \in C, t \in T \quad (20)$$

$$w_{jtr}^k \in \mathbb{Z}^+ \quad k \in K, r \in T, t \in T, j \in J \setminus \{\kappa^k + 1\} \quad (21)$$

$$y_{jt}^k, z_{j-1,t}^k \in \mathbb{Z}^+ \quad k \in K, t \in T, j \in J \setminus \{0\} \quad (22)$$

A função objetivo (1) é formulada para minimizar os custos da substituição da frota de ônibus ao longo do horizonte de planejamento. Os custos considerados no modelo são os de compra e operação de veículos e carregadores, além do custo de manutenção preventiva quando o veículo atinge a idade de meia vida. Como receita, o único valor considerado é de venda dos ônibus que deixam de integrar a frota. Todos os valores são descontados periodicamente através do fator *Beta*, para que seja possível realizar projeções de custos e análises de indicadores econômico-financeiros para qualquer horizonte de planejamento.

A restrição (2) garante respeito à proporção  $P^t$  de ônibus elétricos em relação a quantidade total de veículos da frota ao longo de todos os períodos do horizonte de planejamento. A restrição (3) assegura que cada rota disponha da quantidade de veículos necessários para poder operar. A restrição (4) certifica a compatibilidade da alocação do veículo  $k$  e idade  $j$  na rota  $r$ . A restrição (5) iguala a quantidade de veículos disponíveis na frota com a quantidade de veículos necessários para que todas as rotas sejam percorridas. Paralelamente, essa restrição também significa a proibição de veículos sem utilização na frota. A restrição (6) define que a quantidade de veículos novos com idade  $j = 0$  disponíveis na frota no período  $t$  é a quantidade de veículos adquiridos no início deste período subtraída do número de veículos novos que foram vendidos também neste período. Essa restrição é válida para todos os períodos do horizonte de planejamento, com exceção do primeiro. Para o caso do primeiro período de horizonte de planejamento em que  $t = 1$ , a restrição (7) tem a mesma função que a (6), porém contabiliza os veículos novos que já faziam parte da frota. A restrição (8) garante que os

veículos disponíveis em cada período  $t$  com idade  $j$ , para todo  $t > 1$  e  $j > 0$ , são aqueles que já estavam na frota no período anterior menos os aqueles que foram vendidos no início do período. A restrição (9) obriga a venda de todos os ônibus que operam, no período  $t$  para todo  $t > 1$ , com idade máxima  $\kappa^k$  no período anterior. A restrição (10) repete a lógica da (9) para o início do primeiro período do horizonte de planejamento, quando a frota ainda apresenta a configuração inicial  $a_j^k$ . A restrição (11) trata somente de veículos com idade  $j > 0$  e indica que a quantidade total de ônibus disponíveis no primeiro período deve ser igual a quantidade de ônibus já existentes na configuração inicial da frota menos a quantidade de ônibus vendida no início do primeiro período. A restrição (12) limita as compras de novos veículos e carregadores em cada período através do orçamento  $B_t$ . O valor da receita obtida com a venda de veículos no período  $t$  é somada ao orçamento do mesmo período. A restrição (13) garante o suprimento da demanda de carregadores do tipo  $c$  no período  $t$ . As restrições (14) e (15) limitam o consumo de energia e espaço físico através de suas respectivas disponibilidades na garagem dos ônibus no período  $t$ . A restrição (16) representa a quantidade de carregadores disponíveis do tipo  $c$  no primeiro período do horizonte de planejamento como a soma entre a quantidade de carregadores já existentes anteriormente e a quantidade de carregadores adquiridos no início do primeiro período. A restrição (17) tem como objetivo garantir a atualização da quantidade de carregadores ao longo de todos os períodos do horizonte de planejamento posteriores ao primeiro período. Essa lógica é representada pela soma da quantidade de carregadores do período anterior com a quantidade adquirida no início do período atual. A restrição (18) aplica a idade média máxima para todos os ônibus de todos os modelos ao fim do horizonte de planejamento. As últimas quatro restrições, representadas por (19), (20), (21) e (22), tem como função definir o domínio em que as variáveis de decisão estão inseridas.

### 2.3 DEMAIS MODELOS DE SUBSTITUIÇÃO DE FROTA

A pesquisa sobre a Substituição de Equipamentos (SE) é um campo com vasta literatura, sendo Taylor (1923) e Hotelling (1925) os pioneiros a desenvolverem trabalhos sobre o tema. O objetivo principal desses autores foi maximizar o valor presente de um único equipamento, sendo necessário a determinação do momento ótimo de substituição do mesmo. O tema foi impulsionado ainda mais com os trabalhos de Bellman (1955) e Alchian (1958). Os processos utilizados pelos autores para determinarem políticas ótimas de SE foram baseados na minimização do valor presente do custo de operação e na substituição do equipamento de acordo com o seu valor econômico. O desenvolvimento da programação dinâmica possibilitou a incorporação de modelos computacionais na resolução dos problemas de SE, permitindo

análises mais complexas e detalhadas (ALCHIAN, 1958). Weingartner (1965) e Hinomoto (1965) são referências amplamente citadas no campo de SE. Mais recentemente, os trabalhos de Bethuyne (1998) e Chand et al. (2000) somaram à literatura sobre o tema de maneira relevante.

Os modelos de substituição de frota de veículos podem ser categorizados em dois grupos principais, a depender das características da frota: homogêneo e heterogêneo. Nos modelos homogêneos, veículos do mesmo modelo e idade são substituídos simultaneamente. Para solucionar esses casos, geralmente utiliza-se a programação dinâmica (Bellman, 1955; Bean et al., 1984; Oakford et al., 1984; Hartman, 2001; Hartman; Murphy, 2006), a qual apresenta a vantagem de utilizar distribuições probabilísticas ao declarar as variáveis. Nos modelos heterogêneos, a frota possui veículos de modelos e idades diferentes. Nestes casos, as substituições dos veículos devem ser executadas de maneira otimizada, garantindo que cada veículo será substituído no seu momento ótimo. Outro fator que caracteriza o modelo como heterogêneo são as restrições. Por exemplo, a restrição orçamentária para a compra de novos veículos pode fazer com que dois ônibus do mesmo modelo e idade tenham que ser substituídos em momentos diferentes (FENG; FIGLIOZZI, 2012). Os modelos heterogêneos normalmente são utilizados para representar dados que se aproximam da realidade, considerando diversas restrições, e por isso são solucionados através da programação inteira (Simms et al., 1984; Karabakal et al., 1994; Hartman, 1999; Hartman, 2000; Hartman, 2004).

O trabalho de Keles et al. (2004) utiliza a programação inteira para solucionar um modelo de substituição de frota heterogênea com múltiplas alternativas de fornecedores de ônibus e sob restrição orçamentária e regulamentadora. Entretanto, as equações de custos são simplificadas e não consideram projeções de preço e demanda. Figliozzi et al. (2011) também utiliza programação inteira para otimizar a substituição de uma frota heterogênea de carros de passeio, com restrições orçamentárias e ambientais. Os impactos de mercado, políticos, emissão de poluentes, utilização da frota e fatores tecnológicos foram analisados no trabalho. Feng et al. (2013) executou o mesmo estudo de Figliozzi et al. (2011), porém utilizando dados de uma frota de caminhões a diesel, idade máxima de 15 anos e horizonte de planejamento de 30 anos. O objetivo do trabalho era otimizar a substituição da frota por caminhões elétricos, suprimindo a demanda de distância a ser percorrida. A solução encontrada mostra que os caminhões elétricos são mais lucrativos somente quando a taxa de utilização é alta. Feng et al. (2014) utilizou um modelo similar para um estudo de caso onde uma agência de trânsito de ônibus deveria escolher entre veículos a diesel ou híbridos para substituir a frota

atual. Entretanto, neste estudo não foi considerado as tecnologias mais recentes, como baterias elétricas e células de hidrogênio.

O problema de substituição de frota com mudança de tecnologia envolve diversas incertezas. Tratando-se de ônibus elétricos, o custo da bateria de lítio é um componente que impacta diretamente no preço de compra do veículo (PELLETIER et al., 2019). Schmidt et al. (2017) projeta, em diversos cenários, o preço da bateria de acordo com a evolução da quantidade de passageiros por ônibus elétrico. O resultado deste trabalho mostra a redução do preço da bateria de lítio ao longo dos anos, tornando o preço de compra dos veículos elétricos mais acessível.

Não foi encontrado na literatura um modelo de substituição de frota heterogênea que permite à operadora de transporte escolher qual modalidade de operação irá utilizar para ter os veículos necessários a sua disposição. Assim, o presente trabalho agrega à literatura a medida em que apresenta um modelo onde a operadora de transporte tem a liberdade para decidir entre comprar e vender seus veículos ou operar sob um contrato de *leasing*. Além disso, este trabalho também apresenta a comparação das soluções obtidas nas duas modalidades de operação.

### **3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO PROPOSTO**

A primeira seção deste capítulo foi utilizada para descrever as duas modalidades de gerenciamento da frota, evidenciando as principais diferenças entre elas e as particularidades de cada uma.

Conforme mencionado anteriormente, este trabalho é uma adaptação do modelo de Pelletier et al. (2019). Foi necessário adicionar e modificar parâmetros no modelo original para viabilizar a representação das duas modalidades de operação em um único modelo matemático. As adaptações serão detalhadas na seção 3.2 deste trabalho.

#### **3.1 MODALIDADES DE GERENCIAMENTO DA FROTA**

O modelo desenvolvido neste trabalho, resultado de uma adaptação do modelo apresentado em Pelletier et al. (2019), possibilita a resolução do EBFTP através de duas modalidades: Gerenciamento Integral da Frota e Gerenciamento Parcial da Frota. Essas modalidades representam a maneira como a operadora de transporte irá conduzir os investimentos na compra de novos veículos.

Na modalidade de Gerenciamento Integral da Frota, a operadora de transporte compra os ônibus, lida com os custos de operação e realiza a venda dos veículos que deixam de

interessar à frota. Nesta modalidade, a própria operadora assume todos os riscos financeiros relacionados aos investimentos e assume um elevado valor de capital imobilizado.

Na modalidade de Gerenciamento Parcial da Frota, a operadora de transporte utiliza o *leasing* para ter os veículos a sua disposição durante um prazo determinado. Assim, a operadora deixa de ser responsável pela compra e venda dos ônibus e se concentra somente na operação da frota. O contrato entre a operadora de transporte e a fabricante que irá fornecer os ônibus pode incluir todos os custos de operação ou apenas parte deles. Sendo custo de energia sob responsabilidade da empresa arrendadora, pode surgir oportunidades adicionais de ganhos, a medida em que os investimentos em geração de energias renováveis poderão ser compartilhados entre os operadores de transporte. Outra oportunidade neste contrato é a opção do *leasing* somente das baterias dos ônibus. Essa modalidade permite que a operadora de transporte opere os veículos sem a necessidade do desengaixe de capital, resultando em baixos riscos financeiros.

### 3.2 ADAPTAÇÕES DO MODELO

O modelo matemático desenvolvido por Pelletier et al. (2019) para solucionar o EBFTP foi construído com uma visão de gerenciamento integral da frota, em que todos os fatores envolvidos nessa transição são atribuídos à operadora de transporte. Essa visão pressupõe que as operadoras de transporte são responsáveis pela compra e venda dos veículos, além da manutenção em ônibus movidos a diferentes fontes de energia. Entretanto, o modelo não considera o *leasing* como possível modalidade de gerenciamento da frota por parte das operadoras de transporte. Sendo assim, o presente trabalho adaptou o modelo de Pelletier et al. (2019) para possibilitar a escolha do modelo que apresente o melhor resultado de acordo com as necessidades de cada operadora de transporte e sua respectiva configuração de frota.

A principal adaptação realizada foi em relação parâmetro de custo de operação total em cada período. No modelo de Pelletier et al. (2019), esse parâmetro é igual à soma do custo de energia com o custo de manutenção para cada ônibus do modelo  $k$  e idade  $j$  que percorre a rota  $r$  no período  $t$ . Já neste trabalho, foi necessário criar um novo parâmetro que representa o valor da parcela do *leasing* do ônibus de modelo  $k$  e idade  $j$  ( $Lsg_j^k$ ). Este parâmetro foi incluso no custo total de operação ( $TOC_{jt}^k$ ), o qual passou a ser resultado da soma de outros três parâmetros: custo de energia ( $Enr_t^k$ ), custo de manutenção ( $Mnt_j^k$ ) e custo do *leasing* ( $Lsg_j^k$ ).

Na função objetivo do modelo de Pelletier et al. (2019), os últimos três termos têm como objetivo reduzir os efeitos do fim do horizonte de planejamento e garantir que a operação continue acontecendo após o último período  $t_F$ . Para o modelo deste trabalho, esses últimos

três termos não são necessários, visto que a modalidade de *leasing* apresenta valores constantes e os valores de compra e venda de veículos são nulos. Assim, o modelo não é impactado com os efeitos do fim do horizonte de planejamento.

Cada uma das duas modalidades de gerenciamento da frota possui particularidades que devem ser consideradas no momento de declaração dos valores dos parâmetros. Para a modalidade de gerenciamento integral, o parâmetro  $Lsg_j^k$  deve ser nulo para todos os modelos e períodos, visto que todos os ônibus serão comprados. Para a modalidade de gerenciamento parcial da frota, as seguintes particularidades devem ser consideradas:

- **Parâmetro  $f_t^k$ :** para os ônibus de modelo  $k$  movidos a combustão, os valores de compra no período  $t$  devem ser inalcançáveis para inviabilizar a utilização. Para os outros modelos  $k$  movidos a energias limpas, o valor de compra deve ser o custo de *setup*, que corresponde a instalação de acessórios obrigatórios e adesivagem do veículo. Essa adaptação deve ser feita porque, no *leasing*, a operadora de transporte não realiza a compra do veículo. Outra função é evitar a substituição recorrente de veículos novos.
- **Parâmetro  $s_j^k$ :** para os ônibus de modelo  $k$  que já faziam parte da frota antes do início do planejamento, os valores de venda devem ser iguais aos da modalidade de gerenciamento integral da frota. Com isso, a receita de venda dos veículos que são de propriedade da operadora de transporte será contabilizada. Para os outros modelos, o valor deve ser nulo, já que no *leasing* os veículos não são propriedade da operadora de transporte.
- **Parâmetro  $Lsg_j^k$ :** este parâmetro corresponde ao custo de utilização do veículo  $k$  e idade  $j$ . Todavia, este parâmetro envolve o modelo de contrato da operadora de transporte com a fabricante que irá fornecer o ônibus. Caso a fabricante seja responsável por todos os custos de operação, os custos de energia  $Enr_t^k$  e manutenção  $Mnt_j^k$  devem ser declarados como nulos. Assim, os custos totais de operação se resumem somente ao custo de *leasing*, ou seja, na prática o parâmetro  $TOC_j^k$  é resumido somente ao parâmetro  $Lsg_j^k$ .

#### 4 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Para a implementação do modelo desenvolvido neste trabalho, utilizou-se o software GAMS, que é um software de modelagem voltado para a otimização matemática. Os dados utilizados na implementação do modelo são semelhantes ou adaptados de Pelletier et al. (2019),

o qual se baseou em dados reais de uma operadora de ônibus da França. Com o objetivo de comparar o resultado das duas modalidades de gerenciamento de frota que foram descritas neste trabalho, os parâmetros foram declarados de maneiras diferentes. Na seção 4.1.1 serão apresentados os parâmetros em comum, enquanto a seção 4.1.2 é responsável por declarar os parâmetros individuais de cada modalidade. A seção 4.2 apresenta os resultados de cada modalidade e compara os valores.

## 4.1 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS

### 4.1.1 Parâmetros em comum entre as modalidades

O horizonte de planejamento  $T$  tem início em 2019 e se encerra em 2050, e cada período  $t$  corresponde a um ano. Por se tratar de um planejamento a longo prazo, outras tecnologias podem surgir e os valores adotados podem variar fora do esperado. Entretanto, é possível observar o comportamento do modelo em mais de uma substituição completa da frota. O objetivo de eletrificação da frota é garantir que, no mínimo, 50% da frota seja composta por veículos elétricos em 2035 e que essa proporção  $P^t$  se mantenha acima deste valor até o fim do horizonte de planejamento. Pelletier et al. (2019) decidiu utilizar o ano 2035 para que todos os veículos que já integram a frota possam completar seu ciclo de vida e serem vendidos no período que seja mais rentável economicamente.

A idade máxima  $\kappa^k$  permitida para qualquer ônibus que seja integrante da frota é 15 anos, fazendo com que  $J = \{0, 1, 2, \dots, 15\}$ . A idade média máxima da frota ao final do horizonte de planejamento  $\Gamma$  é 7,5 anos. Assume-se que cada veículo percorre 60.000 km por ano. A operadora de ônibus é responsável por operar 84 rotas (conjunto  $R$ ), sendo que 52 dessas devem ser percorridas por ônibus de 40 pés e as outras 32 por ônibus de 60 pés. Assim, a quantidade de ônibus que devem ser atribuídos para cada rota  $q_r$  é igual a 1 para todas as rotas. Os modelos de ônibus considerados possuem 40 ou 60 pés e podem ser movidos a diesel, híbridos, CNG (no Brasil, utilizamos a sigla GNV – Gás Natural Veicular – para representar este tipo de combustível) ou elétricos. Os modelos de veículos elétricos definem o subconjunto  $K_E \in K$ . Entretanto, estes apresentam mais de um formato de carregamento, conforme foi identificado em Finance (2018). Por este motivo, os modelos de ônibus do conjunto  $K$  são abreviados de acordo com a fonte de energia, bateria, tamanho do veículo e formato de carregamento. A Tabela 2 apresenta todos os modelos e suas respectivas características.

Tabela 2 – Características dos modelos de ônibus do conjunto *K*

<b><i>K</i></b>	<b>FONTE DE ENERGIA</b>	<b>BATERIA</b>	<b>TAMANHO</b>	<b>CARREGADORES</b>
D-40	Diesel	-	40 pés	DC
D-60	Diesel	-	60 pés	DC
H-40	Híbrido	-	40 pés	DC
H-60	Híbrido	-	60 pés	DC
CNG-40	CNG	-	40 pés	DC
CNG-60	CNG	-	60 pés	DC
E250-40	Eletricidade	250 kW	40 pés	DC
E350-40	Eletricidade	350 kW	40 pés	DC
E650-60	Eletricidade	650 kW	60 pés	DC
E250-40-FC	Eletricidade	250 kW	40 pés	DC e FC
E110-40-PC	Eletricidade	110 kW	40 pés	DC e PC
E110-40-WC	Eletricidade	110 kW	40 pés	DC e WC

Fonte: elaborado pelo autor

Assume-se que cada ônibus está disponível durante 85% do ano (310 dias), sendo o restante do tempo destinado para possíveis manutenções. Sendo assim, é necessário considerar uma frota substituta de ônibus de 40 e 60 pés para operar nos outros 55 dias restantes do ano. Ao dividir 310 dias por 55 dias, conclui-se que cada veículo da frota substituta pode cobrir 5,64 veículos por ano. Para determinar a quantidade de veículos de cada tamanho, dividiu-se a quantidade de rotas que permitem veículos de 40 pés pela quantidade de veículos que um ônibus da frota substituta é capaz de cobrir  $\left[\frac{52}{5,64} = 10\right]$ . O mesmo procedimento foi realizado para veículos de 60 pés  $\left[\frac{32}{5,64} = 6\right]$ . Portanto, são necessários 10 ônibus de 40 pés e 6 ônibus de 60 pés na frota substituta para garantir que a operação não pare em nenhum dia do ano. Por fim, a quantidade total de ônibus disponíveis por período é a soma da quantidade de ônibus atribuídos às rotas com a quantidade de ônibus da frota substituta, totalizando 100 ônibus disponíveis por período.

No início do horizonte de planejamento, a frota era composta apenas de veículos a diesel. Por se tratar de um dado de uma operadora de ônibus da França que não foi divulgado e nem apresentado no trabalho de Pelletier et al. (2019), definiu-se de maneira aleatória as idades dos 52 ônibus de 40 e dos 32 ônibus de 60 pés. Essa distribuição é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição dos veículos no início do horizonte de planejamento

$a_j^k$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D-40	0	0	1	4	5	6	7	8	8	7	6	5	4	1	0	0
D-60	0	0	0	1	2	4	8	8	8	4	2	1	0	0	0	0

Fonte: elaborado pelo autor

Por falta de dados e dificuldade em estimar valores, o parâmetro que limita o orçamento de cada período  $B_t$  e os parâmetros que restringem a capacidade da rede de energia e do espaço físico da garagem dos ônibus  $G$  e  $H$ , respectivamente, assumem valores infinitos. Segundo Blynn (2018), o custo de manutenção preventiva  $MC_t^k$  do ônibus que atinge a idade de meia vida é nulo, visto que muitas operadoras de transporte não realizam esse tipo de cuidado e algumas fabricantes de ônibus elétricos fornecem garantias longas para as baterias. A taxa de desconto periódico utilizada para a operadora de transporte foi de 10% a.a.. A explicação da utilização de um valor maior utilizado em Pelletier et al. (2019) se dá pelo fato da instabilidade econômica no cenário nacional, enquanto as taxas internacionais apresentam estabilidade nas últimas décadas.

Segundo Gallo et al. (2014), o custo mensal de consumo de energia varia de \$0/kW a \$24/kW. Entretanto, Pelletier et al. (2019) utilizam o valor médio de \$12/kW por mês, resultando em um custo anual de consumo de energia ( $PDC$ ) de \$144/kW ao ano.

A operadora de ônibus que detém a frota em análise não possui nenhum carregador disponível no início do horizonte de planejamento. A Tabela 4 apresenta o conjunto de carregadores  $C$  e como é feito o carregamento nos locais em que são instalados. Além disso, define os parâmetros de valor de compra  $PCC^c$ , consumo de energia  $GC^c$ , proporção  $Teta^c$  do tipo  $c$  de carregador em relação a quantidade de ônibus elétrico na frota e a compatibilidade de cada tipo de carregador  $c$  com os modelos de veículos elétricos. Os valores foram obtidos em Finance (2018).

Tabela 4 – Características dos tipos de carregadores

$C$	CARREGAMENTO	$PCC^c$	$GC^c$	$Teta^c$	$CK_c^k$
DC	Lento na garagem dos ônibus	\$ 50.000	50 kW	0,5	Todos
FC	Rápido nos terminais de ônibus	\$ 110.000	120 kW	0,05	E250-40-FC
PC	Pantográfico nos pontos de ônibus	\$ 230.000	300 kW	0,15	E110-40-PC

Fonte: elaborado pelo autor

Um dos modelos de ônibus elétricos da frota em estudo (E110-40-WC) possui compatibilidade com carregamento via *wireless*. Entretanto, pela dificuldade de encontrar os

dados dos parâmetros relacionados a este tipo de carregador, considerou-se que o modelo de ônibus E110-40-WC possui compatibilidade apenas com os carregadores instalados na garagem dos ônibus, representado por DC.

Os custos de manutenção para os veículos a diesel e híbridos foram obtidos em Feng et al. (2014), que é resultado de uma análise de regressão e apresenta o custo por milha de acordo com a idade do ônibus. Assume-se que o custo de manutenção é igual para os ônibus de 40 e 60 pés de cada tipo. Para os veículos CNG e elétricos, os custos de manutenção são baseados em Blynn (2018), que faz uma comparação com os custos dos veículos movidos a diesel. Visto que o custo de manutenção dos ônibus CNG correspondem a variação de -12% a 10% em relação aos custos dos ônibus a diesel, assume-se que são idênticos. A economia com o custo de manutenção dos ônibus elétricos em relação aos veículos a diesel está entre 20% e 60%, portanto foi utilizado o valor de 40%.

A eficiência dos veículos de 40 e 60 pés dos modelos a diesel, híbrido e CNG foram obtidas com base em Ambrose et al. (2017), que apresenta os valores em milha por galão. Para os veículos elétricos de 40 pés, utilizou-se os valores em milha por kWh apresentados em Finance (2018). Por fim, a eficiência do ônibus elétrico de 60 pés e bateria de 650 kWh é 230 milhas, segundo a fabricante BYD Motors (2018). Para os preços de diesel, gás natural e eletricidade, utilizou-se os dados da projeção de valores até 2050 de U.S. Energy Information Administration (2019). Considera-se que cada veículo percorre 60.000 quilômetros por ano. Assim, é possível determinar o custo de energia por período  $t$  de cada modelo de ônibus  $k$ .

#### **4.1.2 Parâmetros individuais de cada modalidade**

Os parâmetros que foram declarados com valores diferentes entre as duas modalidades de gerenciamento de frota são os custos de *leasing*, valores de compra e valores de venda de ônibus. Os subtópicos 4.1.2.1 e 4.1.2.2 descrevem individualmente cada um desses parâmetros nas duas modalidades de gerenciamento da frota.

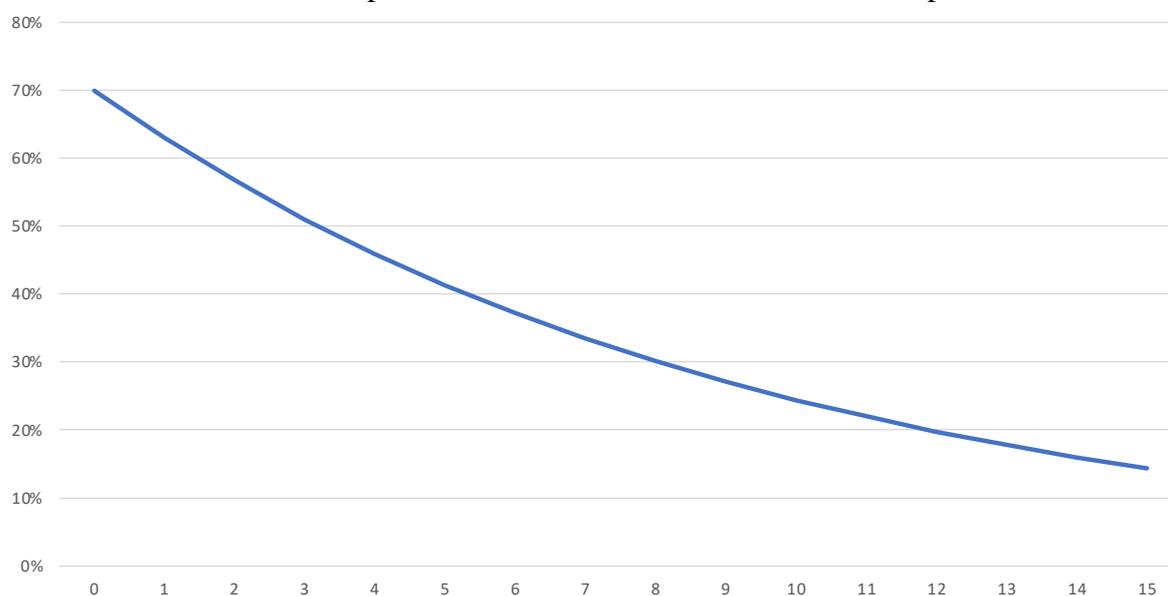
##### *4.1.2.1 Gerenciamento Integral da frota*

O preço de compra de todos os modelos de ônibus a diesel, CNG e híbrido são baseados em Ambrose et al. (2017), assumindo que permanecem o mesmo durante todo horizonte de planejamento. Para os ônibus elétricos de 40 pés, utilizou-se os mesmos preços de compra apresentados em Finance (2018). Já para o modelo de ônibus elétrico de 60 pés, foi utilizado o valor médio de compra calculado por Ambrose et al. (2017). Assume-se que o preço

de compra dos veículos elétricos diminui ao longo do tempo em função da redução do custo da bateria. Em 2019, o valor da bateria é \$600/kWh (FINANCE, 2018) e segue a projeção de preços realizada por Schmidt et al. (2017) até o fim do horizonte de planejamento.

Pelletier et al. (2019) considera os valores de venda como nulos, alegando dificuldade em encontrar os valores residuais confiáveis para os ônibus elétricos e irrelevância dessa receita no processo de transição de frota (Laver et al., 2007). Para este trabalho, considerou-se interessante incluir uma estimativa dos valores de venda, pois trata-se de uma receita que a modalidade de Gerenciamento Parcial só possui em relação aos 100 ônibus do início do horizonte de planejamento. Assim, a comparação entre as duas modalidades torna-se mais justa. Os valores foram estimados com base nos valores de compra do primeiro período do horizonte de planejamento ( $t = 2019$ ). Um ônibus de modelo  $k$  e idade  $j = 0$  possui valor de venda de 70% do valor de compra. Para as idades seguintes, o valor de venda reduz 10% em relação ao período anterior. O Gráfico 1 ilustra o comportamento do valor de venda de todos os modelos em relação ao valor de compra, de acordo com a idade  $j$ .

Gráfico 1 – Comportamento do valor de venda dos veículos por idade



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a modalidade de Gerenciamento Integral da frota, o custo do *leasing* é nulo, visto que todos os veículos serão comprados, vendidos e gerenciados pela própria operadora de ônibus.

#### 4.1.2.2 Gerenciamento Parcial da frota

Os valores de compra dos veículos a diesel são definidos como inalcançáveis para tornar inviável a incorporação desses modelos de ônibus na frota. Os outros modelos possuem valor de compra igual a 5% do valor declarado na modalidade de Gerenciamento Integral da frota. Esse valor corresponde ao custo de *setup* do veículo e evita que os ônibus sejam substituídos por novos em todos os períodos.

Os valores de venda dos modelos de ônibus a diesel são iguais aos valores apresentados na modalidade de Gerenciamento Integral da frota. O motivo da utilização desses valores é garantir que a operadora de ônibus receba a quantia referente aos ônibus que possuía no início do horizonte de planejamento. Os valores de venda dos outros modelos de ônibus são nulos, visto que todos os veículos serão parte do contrato de *leasing* e, portanto, não serão propriedade da operadora de ônibus.

Para definir o custo periódico do *leasing* para cada modelo, assumiu-se que os ônibus completos (incluindo a bateria) serão disponibilizados pelo fabricante, sendo os custos de energia e manutenção responsabilidade da operadora de ônibus. Como base de cálculo para custo de *leasing*, considerou-se o valor de compra de cada modelo em 2019, vida útil de 15 anos e uma taxa periódica de 3%. Além disso, assumiu-se que o custo de *leasing* reduz a medida em que a idade do veículo aumenta.

## 4.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Decidiu-se apresentar a distribuição da frota ao longo do horizonte de planejamento através da quantidade de veículos e carregadores por modelo. Os períodos foram agrupados em lotes de 5 anos para facilitar a visualização, assim como é feito em Pelletier et al. (2019). Além disso, os valores são descritos individualmente em cada modalidade e depois é feita uma comparação entre elas.

### 4.2.1 Modalidade de Gerenciamento Integral

A função objetivo da modalidade de Gerenciamento Integral teve como resultado o valor de aproximadamente 127 milhões de dólares, com um erro relativo de 0,06% na comparação entre o valor ótimo obtido e o limite inferior estimado pelo GAMS.. O modelo resultou em 544514 equações e 541249 variáveis, gerando 62220 interações. O tempo de resolução foi de 10,8 segundos.

Ao longo dos 32 períodos do horizonte de planejamento, ocorreu a substituição de 262 veículos. Logo no primeiro período, todos os veículos a diesel de 40 pés foram substituídos por veículos elétricos e baterias de 110 kW com a tecnologia *wireless* de carregamento. Os ônibus a diesel de 60 pés que estavam na frota no início do horizonte de planejamento são substituídos gradativamente por ônibus híbridos de 60 pés até 2026. O modelo E250-40-FC substitui o modelo E110-40-WC no ano 2034 e permanece até 2050. Ao fim do horizonte de planejamento, a frota é distribuída somente entre os modelos H-60 e E250-40-FC e a idade média é de 7,5 anos, respeitando o valor declarado em  $\Gamma$ . A Tabela 5 ilustra a transição da frota ao longo do tempo.

Tabela 5 – Distribuição da frota utilizando a modalidade de Gerenciamento Integral

<i>T</i>	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>ÔNIBUS</b>							
D-40	-	-	-	-	-	-	-
D-60	38	7	-	-	-	-	-
H-40	-	-	-	-	-	-	-
H-60	-	31	38	38	38	38	38
CNG-40	-	-	-	-	-	-	-
CNG-60	-	-	-	-	-	-	-
E250-40	-	-	-	-	-	-	-
E350-40	-	-	-	-	-	-	-
E650-60	-	-	-	-	-	-	-
E250-40-FC	-	-	-	62	62	62	62
E110-40-PC	-	-	-	-	-	-	-
E110-40-WC	62	62	62	-	-	-	-
<b>CARREGADORES</b>							
DC	31	49	50	50	50	50	50
FC	-	-	-	4	4	4	4
PC	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do objetivo de eletrificação da frota ser de 50% em 2035, percebe-se que desde 2019 essa porcentagem já é superada e se mantém constante até o fim do horizonte de planejamento. Esse fato mostra que, apesar dos valores de compra dos modelos elétricos serem significativamente maiores que os valores de compra dos modelos a diesel, a economia obtida com o custo operacional é mais relevante.

Quanto aos carregadores, observa-se que são adquiridos os tipos e quantidades à medida que os ônibus elétricos integram a frota. Até 2034, todos os ônibus elétricos são compatíveis com o carregador do tipo DC, não havendo necessidade de compra de outros tipos de carregadores. Neste mesmo período, ônibus compatíveis com o carregador FC são adquiridos e, paralelamente, carregadores deste tipo também são incorporados na proporção correta.

#### 4.2.2 Modalidade de Gerenciamento Parcial

Utilizando o *leasing* para resolver o EBFTP, a função objetivo teve como resultado o valor de 113 milhões de dólares. Foram necessárias 544514 equações, 541249 variáveis e 9492 interações para solucionar o problema. O tempo de solução foi 5,4 segundos. Para a modalidade de Gerenciamento Parcial da Frota, o erro relativo foi de 0%, ou seja, encontrou-se a solução ótima para o modelo descrito.

Logo no primeiro período do horizonte de planejamento, a frota inicial já é totalmente substituída. Os modelos D-40 e D-60 são substituídos pelos modelos E110-40-WC e H-60, respectivamente. Essa configuração é mantida do início ao fim do horizonte de planejamento, apenas substituindo veículos antigos por novos do mesmo modelo. Além disso, são instalados carregadores DC na garagem dos ônibus para atender os ônibus elétricos da frota. O fato de não utilizar modelos de ônibus que necessitam de outro tipo de carregador faz com que o carregador DC seja o único tipo instalado. A Tabela 6 apresenta a distribuição da frota ao longo dos anos para a modalidade de Gerenciamento Parcial da frota.

Assim como na modalidade de Gerenciamento Integral, a proporção de veículos elétricos ultrapassa 50% desde o início do horizonte de planejamento. A taxa se mantém constante durante os 32 anos. Ao final do último período, a idade média da frota é de 6,4 anos. De 2019 a 2050, foram substituídos 462 veículos.

Tabela 6 – Distribuição da frota utilizando a modalidade de Gerenciamento Parcial

<i>T</i>	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>ÔNIBUS</b>							
D-40	-	-	-	-	-	-	-
D-60	-	-	-	-	-	-	-
H-40	-	-	-	-	-	-	-
H-60	38	38	38	38	38	38	38
CNG-40	-	-	-	-	-	-	-
CNG-60	-	-	-	-	-	-	-

E250-40	-	-	-	-	-	-	-
E350-40	-	-	-	-	-	-	-
E650-60	-	-	-	-	-	-	-
E250-40-FC	-	-	-	-	-	-	-
E110-40-PC	-	-	-	-	-	-	-
E110-40-WC	62	62	62	62	62	62	62
<b>CARREGADORES</b>							
DC	50	50	50	50	50	50	50
FC	-	-	-	-	-	-	-
PC	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.3 Comparação dos resultados

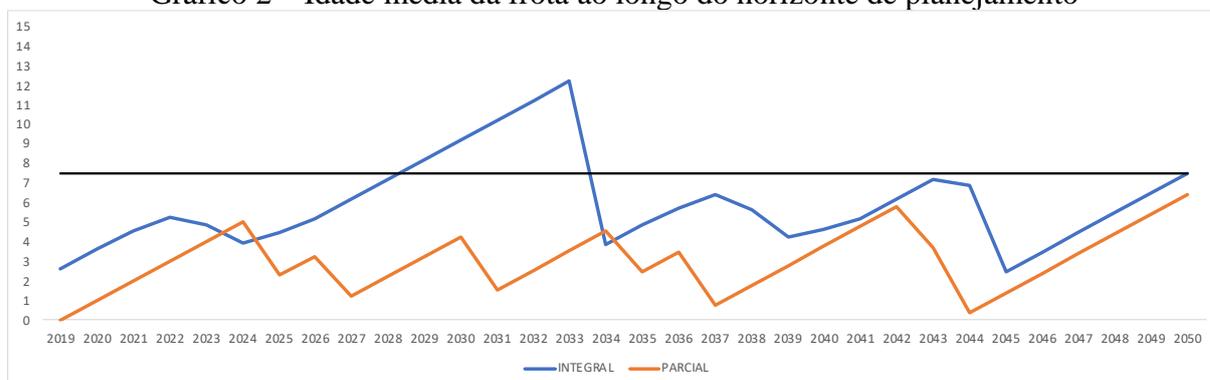
Os resultados obtidos com a aplicação numérica foram de extrema importância para possibilitar uma análise do comportamento do modelo e da eficiência das duas modalidades de gerenciamento de frota. Entretanto, as modalidades são operadas de maneiras diferentes e não devem ser comparadas diretamente. Além disso, os resultados encontrados são referentes aos dados utilizados. Portanto, as análises e comparações devem ser feitas individualmente para cada conjunto de dados.

Em relação aos principais resultados em cada modalidade, observou-se que a substituição da frota através da modalidade de Gerenciamento Parcial da frota apresenta uma economia de aproximadamente 12% em relação à modalidade de Gerenciamento Integral da frota. A partir da quantidade de veículos substituídos, é possível concluir que o *leasing* viabiliza a substituição de ônibus com maior frequência, resultando em uma frota com idade média inferior em relação a modalidade de Gerenciamento Integral.

O principal motivo do *leasing* apresentar resultados financeiros melhores para o conjunto de dados utilizado é a acessibilidade a melhores condições de tomada de empréstimo por parte da empresa arrendadora. Na modalidade de Gerenciamento Integral, a operadora de ônibus compra os veículos através de financiamentos com taxa de juros de 10% ao ano. A fabricante que empresta os veículos através do contrato de *leasing* possui acesso a taxas menores, repassando apenas 3% ao ano para a operadora de ônibus. No cenário brasileiro atual, uma empresa que utiliza financiamento nacional para operar provavelmente estará em desvantagem em relação a empresas que tem acesso a empréstimos no mercado internacional, visto que o custo de capital neste mercado é mais barato.

Os resultados mostram que o modelo respeitou todas as restrições, com destaque para a meta de eletrificação e idade média da frota ao fim do horizonte de planejamento. Em ambas as modalidades, a proporção de veículos elétricos na frota é 62% desde o primeiro período, mantendo-se constante até o fim do horizonte de planejamento. Apesar da idade média máxima no último período ser respeitada nas duas modalidades de gerenciamento, é possível observar no Gráfico 2 que a modalidade de Gerenciamento Parcial opera com uma frota mais nova do que a modalidade de Gerenciamento Integral durante a maior parte dos períodos do horizonte de planejamento. Esse fato se explica pela quantidade de veículos substituídos na modalidade de Gerenciamento Parcial ser superior que a quantidade na modalidade de Gerenciamento Integral, conforme mostra a Tabela 7.

Gráfico 2 – Idade média da frota ao longo do horizonte de planejamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados indicam uma ótima performance do modelo. Apesar da elevada quantidade de equações, variáveis e interações, a solução foi dada em poucos segundos. A informação do erro relativo máximo indica que a solução referente à modalidade de Gerenciamento Parcial da frota é completamente otimizada. Já para a modalidade de Gerenciamento Integral da frota, o erro relativo foi muito próximo de zero, garantindo confiança aos resultados obtidos. Portanto, conclui-se que o comportamento do modelo representa a realidade de forma satisfatória. A Tabela 7 resume toda a discussão realizada nessa seção.

Tabela 7 – Comparação dos resultados entre as modalidades de gerenciamento da frota

	MODALIDADE DE GERENCIAMENTO	
	INTEGRAL	PARCIAL
Custo total (em milhões de dólares)	127,1	113,6
Idade média em 2050	7,5 anos	6,4 anos
Quantidade de veículos substituídos	262	462
$p^{2035}$	62%	62%
Erro relativo	0,06%	0%
Erro absoluto	\$ 76789,11	\$ 0,00
Equações	544514	544514
Variáveis	541249	541249
Interações	62220	9492
Tempo de solução	10,8 segundos	5,4 segundos

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O modelo desenvolvido neste trabalho, a partir da adaptação do modelo apresentado por Pelletier et al (2019), representou a realidade de maneira satisfatória, conforme discutido na seção anterior. A restrição que corresponde a porcentagem de veículos na frota foi respeitada, assim como todas as outras restrições declaradas no modelo. O modelo correspondeu à utilização de ambas as modalidades de gerenciamento da frota. Assim, conclui-se que o objetivo geral do trabalho foi atingido.

As modalidades de gerenciamento da frota estudadas neste trabalho foram descritas e detalhadas. Além disso, definiu-se como devem ser inseridas no modelo para que representem a realidade da maneira esperada. Com isso, o primeiro objetivo específico é satisfeito.

Com base nos principais trabalhos da literatura e na metodologia adotada para a execução do trabalho, todos os conjuntos e parâmetros que estão envolvidas no EBFTP foram incluídos no modelo matemático. Isso faz com que o segundo objetivo específico tenha sido atendido.

As restrições operacionais de frota de ônibus de transporte coletivo foram levantadas na adaptação do modelo e também na aplicação numérica. Ainda, o objetivo do modelo foi caracterizado, garantindo o cumprimento do terceiro e quarto objetivo específico.

Por fim, o modelo foi aplicado com dados reais e estimados a fim de verificar seu comportamento. Conforme discutido na seção anterior, apesar de ser um modelo com muitas variáveis e restrições, o tempo de resolução foi curto e os resultados correspondem ao que se esperava. Logo, o último objetivo específico também foi cumprido.

Conforme mencionado na seção 1.4, o modelo desenvolvido neste trabalho permite à operadora de transporte escolher apenas uma das modalidades de gerenciamento para conduzir a substituição da frota de ônibus. No entanto, existe a possibilidade de a solução ótima para o problema real ser obtida mesclando as alternativas financeiras. Assim, sugere-se o desenvolvimento de trabalhos que adaptem o modelo para unir as alternativas financeiras.

Recomenda-se a utilização de dados de um caso prático real, para que seja possível uma comparação assertiva a cerca das modalidades de gerenciamento da frota, e assim validar na prática o modelo.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, observou-se, tanto na literatura quanto em casos reais, as variações dos contratos de *leasing*. Essa alternativa financeira auxilia na mitigação dos efeitos das incertezas, como o preço dos veículos, preço dos combustíveis e novas tecnologias. O presente trabalho utilizou o *leasing* somente para os ônibus, ficando sob responsabilidade da operadora de transporte todos os custos operacionais. Sugere-se uma simulação com as diversas possibilidades que o contrato de *leasing* pode oferecer. Por exemplo: locação somente das baterias, inclusão dos custos operacionais no valor do *leasing*, opção de compra ao final do contrato, entre outros.

## REFERÊNCIAS

- ADLER, Jonathan D.; MIRCHANDANI, Pitu B. The vehicle scheduling problem for fleets with alternative-fuel vehicles. **Transportation Science**, v. 51, n. 2, p. 441-456, 2017.
- ALCHIAN, Armen. **ECONOMIC REPLACEMENT POLICY. AN ABBREVIATED VERSION OF R-224**. RAND CORP SANTA MONICA CALIF, 1958.
- AMBROSE, Hanjiro; PAPPAS, Nicholas; KENDALL, Alissa. Exploring the costs of electrification for California's transit agencies. **ITS Reports**, v. 2017, n. 03, 2017.
- ANSARIPOOR, Amir H.; OLIVEIRA, Fernando S. Flexible lease contracts in the fleet replacement problem with alternative fuel vehicles: A real-options approach. **European Journal of Operational Research**, v. 266, n. 1, p. 316-327, 2018.
- BEAN, James C.; LOHMANN, Jack R.; SMITH, Robert L. A dynamic infinite horizon replacement economy decision model. **The Engineering Economist**, v. 30, n. 2, p. 99-120, 1984.
- BELLMAN, Richard. Equipment replacement policy. **Journal of the society for industrial and applied Mathematics**, v. 3, n. 3, p. 133-136, 1955.
- BETHUYNE, Gerrit. Optimal replacement under variable intensity of utilization and technological progress. **The Engineering Economist**, v. 43, n. 2, p. 85-105, 1998.
- BLYNN, Kelly Kelly Mavis. **Accelerating bus electrification: Enabling a sustainable transition to low carbon transportation systems**. 2018. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.
- BYD MOTORS. **K11 electric transit bus**. 2018.
- CAUCHICK MIGUEL, Paulo Augusto et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. **Rio de Janeiro: Elzevir**, 2010.
- CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **California transitioning to all-electric public bus fleet by 2040**. 2018
- CHAND, Suresh; MCCLURG, Tim; WARD, Jim. A model for parallel machine replacement with capacity expansion. **European Journal of Operational Research**, v. 121, n. 3, p. 519-531, 2000.
- CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso Celso. **Modelagem e simulação de eventos discretos**. Afonso C. Medina, 2006.
- COPENHAGEN CAPACITY. Copenhagen city buses will be electric by 2025. 2019
- FENG, Wei; FIGLIOZZI, Miguel. An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 26, p. 135-145, 2013.

FENG, Wei; FIGLIOZZI, Miguel A. Bus fleet type and age replacement optimization: a case study utilizing king county metro fleet data. 2012.

FENG, Wei; FIGLIOZZI, Miguel. Vehicle technologies and bus fleet replacement optimization: Problem properties and sensitivity analysis utilizing real-world data. **Public Transport**, v. 6, p. 137-157, 2014.

FIGLIOZZI, Miguel A.; BOUDART, Jesse A.; FENG, Wei. Economic and environmental optimization of vehicle fleets: impact of policy, market, utilization, and technological factors. **Transportation research record**, v. 2252, n. 1, p. 1-6, 2011.

FINANCE, Bloomberg New Energy. Electric buses in cities: Driving towards cleaner air and lower CO2. **Bloomberg New Energy Finance: London, UK**, p. 63, 2018.

GALARZA, S. **From pilots to scale** – lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile. Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator, 2020. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-buscase-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

GALLO, Jean-Baptiste; BLOCH-RUBIN, Ted; TOMIĆ, Jasna. Peak demand charges and electric transit buses. **US Department of Transportation, Tech. Rep.**, 2014.

GOBIERNO DE CHILE. **Estrategia nacional de electromovilidad** – un camino para los vehículos eléctricos. Ministerio de Energía, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Ministerio del Medio Ambiente, 2017. Disponível em: <[http://www.dtpm.cl/descargas/estudios/Satisfacci%C3%B3n-Nuevo-Est%C3%A1ndar\\_vF.pdf](http://www.dtpm.cl/descargas/estudios/Satisfacci%C3%B3n-Nuevo-Est%C3%A1ndar_vF.pdf)>. Acesso em: 18 jun. 2023.

HARTMAN, Joseph C. A general procedure for incorporating asset utilization decisions into replacement analysis. **The Engineering Economist**, v. 44, n. 3, p. 217-238, 1999.

HARTMAN, Joseph C. The parallel replacement problem with demand and capital budgeting constraints. **Naval Research Logistics (NRL)**, v. 47, n. 1, p. 40-56, 2000.

HARTMAN, Joseph C. An economic replacement model with probabilistic asset utilization. **IIE Transactions**, v. 33, n. 9, p. 717-727, 2001.

HARTMAN, Joseph C. Multiple asset replacement analysis under variable utilization and stochastic demand. **European Journal of Operational Research**, v. 159, n. 1, p. 145-165, 2004.

HARTMAN, Joseph C.; MURPHY, Alison. Finite-horizon equipment replacement analysis. **IIE Transactions**, v. 38, n. 5, p. 409-419, 2006.

HINOMOTO, Hirohide. Capacity expansion with facilities under technological improvement. **Management Science**, v. 11, n. 5, p. 581-592, 1965.

HOTELLING, Harold. A general mathematical theory of depreciation. **Journal of the American Statistical Association**, v. 20, n. 151, p. 340-353, 1925.

KARABAKAL, Nejat; LOHMANN, Jack R.; BEAN, James C. Parallel replacement under capital rationing constraints. **Management Science**, v. 40, n. 3, p. 305-319, 1994.

KELES, Pinar; HARTMAN, Joseph C. Case study: bus fleet replacement. **The Engineering Economist**, v. 49, n. 3, p. 253-278, 2004.

KLEINDORFER, Paul R. et al. Fleet renewal with electric vehicles at La Poste. **Interfaces**, v. 42, n. 5, p. 465-477, 2012.

LACERDA, Daniel Pacheco et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, v. 20, p. 741-761, 2013.

LAVIER, Richard et al. **Useful life of transit buses and vans**. 2007.

LI, Lu et al. Mixed bus fleet management strategy for minimizing overall and emissions external costs. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 60, p. 104-118, 2018.

LI, Zhe; OUYANG, Minggao. A win-win marginal rent analysis for operator and consumer under battery leasing mode in China electric vehicle market. **Energy Policy**, v. 39, n. 6, p. 3222-3237, 2011

MONTREAL GAZETTE. **Montreal, Laval team up in Canada's largest order of electric buses**. 2018.

OAKFORD, Robert V.; LOHMANN, Jack R.; SALAZAR, Arturo. A dynamic replacement economy decision model. **IIE transactions**, v. 16, n. 1, p. 65-72, 1984.

PELLETIER, Samuel et al. The electric bus fleet transition problem. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 109, p. 174-193, 2019.

SCHMIDT, Oliver et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. **Nature Energy**, v. 2, n. 8, p. 1-8, 2017.

SIMMS, B. W. et al. Optimal buy, operate and sell policies for fleets of vehicles. **European Journal of Operational Research**, v. 15, n. 2, p. 183-195, 1984.

STEER. **Chile's experience with electromobility: The introduction of electric buses in Santiago**. Report, 2020.

TAYLOR, James S. A statistical theory of depreciation: Based on unit cost. **Journal of the American Statistical Association**, v. 18, n. 144, p. 1010-1023, 1923.

TORONTO TRANSIT COMMISSION. **TTC Green Initiatives**. 2019.

TOLEDO FILHO, Jorge Ribeiro de. **Mercado de capitais brasileiro uma introdução**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

TRANSPORT & ENVIRONMENT. **Electric Buses Arrive on Time**. 2018.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Annual Energy Outlook 2019**. 2019.

XYLIA, Maria et al. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 78, p. 183-200, 2017.

WEINGARTNER, H. Martin. Equipment Replacement Analysis. **IMR; Industrial Management Review (pre-1986)**, v. 7, n. 1, p. 45, 1965.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **How to enable electric bus adoption in cities worldwide: a guiding report for city transit agencies and bus operating entities**. Ross Center for Sustainable Cities program. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/publication/how-to-enable-electric-bus-adoption-in-cities-worldwide>>. Acesso em: 18 jun. 2023

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Como Santiago se tornou líder global em ônibus elétricos**. Jan. 2019. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/como-santiago-se-tornou-lider-global-em-onibus-eletricos>>. Acesso em: 18 jun. 2023.

## APÊNDICE A – Modelo para Gerenciamento Integral

```
option limrow = 0;
option limcol = 0;
option optcr = 0.05;
```

### SETS

```
k    Conjunto de modelos de onibus /D-40,D-60,H-40,H-60,CNG-40,CNG-60,E250-40,E350-
40,E650-60,E250-40-FC,E110-40-PC,E110-40-WC/
kE(k) Conjuntos de possiveis modelos de onibus eletricos /E250-40,E350-40,E650-
60,E250-40-FC,E110-40-PC,E110-40-WC/
R    Conjunto de tipos rotas /R1*R84,RES40,RES60/
T    Conjunto de periodos do horizonte de planejamento /2019 * 2050/
J    Conjunto de possiveis idades para os onibus da frota /0 * 15/
C    Conjunto de possiveis tipos de carregadores /DC,FC,PC/;
```

TABLE a(k,j) Quantidade de onibus do modelo k e idade j na frota no inicio do horizonte de planejamento

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D-40	0	0	1	4	5	6	7	8	8	7	6	5	4	1	0	0
D-60	0	0	0	1	2	4	8	8	8	4	2	1	0	0	0	0

TABLE f(k,t) Valor de compra do oibus de modelo k no periodo t

	2019	2020	2021	2022	...
D-40	446651	446651	446651	446651	...
D-60	724442	724442	724442	724442	...
H-40	619439	619439	619439	619439	...
H-60	850000	850000	850000	850000	...
CNG-40	485038	485038	485038	485038	...
CNG-60	802000	802000	802000	802000	...
E250-40	720000	709318	698636	687955	...
E350-40	700000	685045	670091	655136	...
E650-60	2243745	2215972	2188200	2160427	...
E250-40-FC	570000	559318	548636	537955	...
E110-40-PC	530000	525300	520600	515900	...
E110-40-WC	530000	525300	520600	515900	...

TABLE HP(k,r) Parametro binario igual a 1 se um onibus do modelo k e compativel com a rota do tipo r

	R1	R2	R3	R4	R5	...	R32	RES60
D-60		1	1	1	1	...	1	1
H-60		1	1	1	1	...	1	1
CNG-60	1	1	1	1	1	...	1	1
E650-60	1	1	1	1	1	...	1	1

+

	R33	R34	R35	R35	R36	...	R84	RES40	
D-40	1	1	1	1	1	1	...	1	1
H-40	1	1	1	1	1	1	...	1	1
CNG-40	1	1	1	1	1	...	1	1	1
E250-40	1	1	1	1	1	...	1	1	1
E350-40	1	1	1	1	1	...	1	1	1
E250-40-FC	1	1	1	1	1	...	1	1	1
E110-40-PC	1	1	1	1	1	...	1	1	1
E110-40-WC	1	1	1	1	1.	...	1	1	1

TABLE MC(k,t) Custo de manutencao preventiva quando um onibus do modelo k atinge a idade de meia-vida no periodo t

	2019	2020	2021	2022	2023	...
D-40	0	0	0	0	0	...
D-60	0	0	0	0	0	...
H-40	0	0	0	0	0	...
H-60	0	0	0	0	0	...
CNG-40	0	0	0	0	0	...
CNG-60	0	0	0	0	0	...
E250-40	0	0	0	0	0	...
E350-40	0	0	0	0	0	...
E650-60	0	0	0	0	0	...
E250-40-FC	0	0	0	0	0	...
E110-40-PC	0	0	0	0	0	...
E110-40-WC	0	0	0	0	0	...

TABLE S(k,j) Valor de venda do onibus de modelo k com idade j

	0	1	2	3	4	...
D-40	312656	281390	253251	227926	205133	...
D-60	507109	456398	410759	369683	332714	...
H-40	433607	390247	351222	316100	284490	...
H-60	595000	535500	481950	433755	390380	...
CNG-40	339527	305574	275017	247515	222763	...
CNG-60	561400	505260	454734	409261	368335	...
E250-40	504000	453600	408240	367416	330674	...
E350-40	490000	441000	396900	357210	321489	...
E650-60	1570622	1413559	1272203	1144983	1030485	...
E250-40-FC	399000	359100	323190	290871	261784	...
E110-40-PC	371000	333900	300510	270459	243413	...
E110-40-WC	371000	333900	300510	270459	243413	...

TABLE CK(k,c) Parametro binario igual a 1 se um onibus do modelo k pode utilizar um carregador do tipo c

	DC	FC	PC
D-40	0	0	0
D-60	0	0	0

H-40	1	0	0
H-60	1	0	0
CNG-40	0	0	0
CNG-60	0	0	0
E250-40	1	0	0
E350-40	1	0	0
E650-60	1	0	0
E250-40-FC	1	1	0
E110-40-PC	1	0	1
E110-40-WC	1	0	0 ;

TABLE Enr(k,t) custo total de energia por tipo de onibus k em cada periodo t

	2019	2020	2021	2022	2023	...
D-40	34425	36404	38383	40362	42341	...
D-60	48195	50966	53736	56507	59277	...
H-40	18187	19232	20278	21323	22369	...
H-60	27540	29123	30706	32290	33873	...
CNG-40 68571	69740	70909	72078	73247	...	...
CNG-60 96000	97636	99273	100909	102545	...	...
E250-40	11160	10909	10658	10407	10156	...
E350-40	11625	11364	11102	10841	10580	...
E650-60	15943	15584	15226	14868	14509	...
E250-40-FC	11160	10909	10658	10407	10156	...
E110-40-PC	10731	10490	10248	10007	9766	...
E110-40-WC	10731	10490	10248	10007	9766	...

TABLE Lsg(k,j) custo total de leasing para cada tipo de onibus k no periodo t

	0	1	2	3	4	...
D-40	0	0	0	0	0	...
D-60	0	0	0	0	0	...
H-40	0	0	0	0	0	...
H-60	0	0	0	0	0	...
CNG-40 0	0	0	0	0	...	...
CNG-60 0	0	0	0	0	...	...
E250-40	0	0	0	0	0	...
E350-40	0	0	0	0	0	...
E650-60	0	0	0	0	0	...
E250-40-FC	0	0	0	0	0	...
E110-40-PC	0	0	0	0	0	...
E110-40-WC	0	0	0	0	0	...;

## PARAMETER

Mnt(k,j) custo de manutencao total de um periodo do onibus de modelo k e idade j

E(c) Quantidade de carregadores do tipo c disponiveis no inicio do horizonte de planejamento

/ DC 0  
FC 0  
PC 0 /

GC(c) Consumo de energia em kW do carregador de tipo c

/ DC 50  
FC 120  
PC 300 /

PCC(c) Valor de compra do carregador de tipo c

/ DC 50000  
FC 110000  
PC 230000 /

Teta(c) Proporcao minima de carregadores do tipo c em relacao ao total de onibus eletricos na frota

/ DC 0.5  
FC 0.05  
PC 0.15 /

P(t) Proporcao minima de onibus eletricos em relacao a frota no periodo t

/ 2019 0  
2020 0  
2021 0  
2022 0  
2023 0  
2024 0  
2025 0  
2026 0  
2027 0  
2028 0  
2029 0  
2031 0  
2032 0  
2033 0  
2034 0  
2035 0.50  
2036 0.50  
2037 0.50  
2038 0.50  
2039 0.50  
2040 0.50  
2041 0.50  
2042 0.50

2043 0.50  
 2044 0.50  
 2045 0.50  
 2046 0.50  
 2047 0.50  
 2048 0.50  
 2049 0.50  
 2050 0.50 /

$q(r)$  Quantidade de onibus que devem ser atribuidos na rota  $r$

/ R1 1  
 R2 1  
 R3 1  
 R4 1  
 R5 1  
 R6 1  
 R7 1  
 .  
 .  
 .  
 R84 1  
 RES40 10  
 RES60 6 /

$Kapa(k)$  Idade em que o onibus do modelo  $k$  deve ser retirado da frota

$B(t)$  Orcamento disponivel para compras e operacao no periodo  $t$ ;

$Kapa(k) = 15$ ;

$B(t) = 9999999999999999$ ;

$Mnt('D-40',j) = (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('D-60',j) = (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('CNG-40',j) = (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('CNG-60',j) = (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('H-40',j) = (0.372 + 0.0673*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('H-60',j) = (0.372 + 0.0673*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E250-40',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E350-40',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E650-60',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E250-40-FC',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E110-40-PC',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

$Mnt('E110-40-WC',j) = 0.6 * (0.53 + 0.0867*(ORD(j)-1)) * 60000$ ;

PARAMETER TOC(k,j,t) Custo total de operacao do onibus do modelo k com idade j no periodo t;

$$\text{TOC}(k,j,t) = \text{Enr}(k,t) + \text{Lsg}(k,j) + \text{Mnt}(k,j);$$

SCALAR

PDC Custo de demanda periodica em \$ por kW / 144 /

G Restricao da rede de energia na garagem dos onibus (kW) /9999999999999999/

H Restricao de espaco fisico na garagem dos onibus /9999999999999999/

Taxa taxa de minima atratividade /0.10/

Beta Fator de correcao economico

Gama Idade media maxima dos onibus no ultimo periodo do horizonte de planejamento /7.5/;

$$\text{Beta} = 1/(1+\text{Taxa});$$

VARIABLES

u(c,t) Quantidade de carregadores do tipo c comprados e instalados no periodo t

v(c,t) Quantidade de carregadores do tipo c disponiveis durante o periodo t

w(k,j,t,r) Quantidade de onibus do modelo k com idade j atribuidos a rota do tipo r no periodo t

x(k,t) Quantidade de onibus do modelo k comprados no periodo t

y(k,j,t) Quantidade de onibus do modelo k com idade j vendidos no periodo t

z(k,j,t) Quantidade de onibus do modelo k com idade j disponiveis no periodo t

Zobj Função objetiva;

INTEGER VARIABLES u,v,w,x,y,z;

EQUATIONS

Eq01 funcao objetiva

Eq02(t) cumprimento do objetivo de eletrificacao

Eq03(t,r) respeito a quantidade de onibus necessaria para cada corrida

Eq04(k,j,t,r) garantia de que as rotas serao percorridas por onibus compatíveis

Eq05(k,j,t) todos os onibus disponiveis devem estar atribuidos a alguma rota durante todos os periodos

Eq06(k,t) quantidade de onibus novos disponiveis na frota e igual a quantidade de onibus adquiridos no inicio deste periodo menos o numero de onibus novos que foram vendidos neste periodo

Eq07(k) quantidade de onibus disponiveis no primeiro periodo

Eq08(k,j,t) quantidade de veiculos disponiveis na frota com idade com idade maior que 0 deve ser igual a quantidade de veiculos disponiveis no periodo anterior menos os vendidos neste periodo

Eq09(k,j,t) obriga a retirada de veiculos com idade maxima da frota

Eq10(k,j) obriga a retirada de veiculos que ja estavam na frota com idade maxima

Eq11(k,j) quantidade de veiculos disponiveis no primeiro periodo deve ser igual a quantidade inicial menos a quantidade vendida no inicio do periodo

Eq12(t) respeito ao orcamento para cada periodo

Eq13(c,t) respeito ao rateio dos tipos carregadores por onibus eletrico

Eq14(t) garantia de cumprimento da restricao da rede de energia da garagem dos onibus

Eq15(t) garantia de cumprimento da restricao de espaco fisico da garagem dos onibus

Eq16(c) quantidade de carregadores no primeiro periodo deve ser igual a quantidade inicial mais a quantidade comprada no periodo

Eq17(c,t) quantidade de carregadores no periodo t deve ser igual a quantidade disponivel do periodo anterior mais a quantidade adquirida no periodo atual

Eq18 respeito a idade media maxima ao final do ultimo periodo do horizonte de planejamento

Eq19(k,t) somente vender veiculos novos se for comprado no mesmo ano;

Eq01 ..  $Z_{obj} = E = \text{SUM}((k,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * f(k,t) * x(k,t)) - \text{SUM}((k,j,t) \$(\text{ORD}(j) \text{ GT } 1), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * S(k,j) * y(k,j,t)) + \text{SUM}((k,j,t,r), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{TOC}(k,j,t) * w(k,j,t,r)) + \text{SUM}((c,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{PCC}(c) * u(c,t)) + \text{SUM}((c,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{PDC} * \text{GC}(c) * v(c,t));$

Eq02(t) ..  $\text{SUM}((kE,j), z(kE,j,t)) = G = P(t) * \text{SUM}((k,j), z(k,j,t));$

Eq03(t,r) ..  $\text{SUM}((k,j), w(k,j,t,r)) = E = q(r);$

Eq04(k,j,t,r) ..  $w(k,j,t,r) = L = \text{HP}(k,r) * z(k,j,t);$

Eq05(k,j,t) ..  $\text{SUM}(r, w(k,j,t,r)) = E = z(k,j,t);$

Eq06(k,t)\$(\text{ORD}(t) \text{ GT } 1) ..  $z(k, '0', t) = E = x(k,t) - y(k, '0', t);$

Eq07(k) ..  $z(k, '0', '2019') = E = a(k, '0') + x(k, '2019') - y(k, '0', '2019');$

Eq08(k,j,t)\$(\text{ORD}(j) \text{ GT } 1) \text{ AND } (\text{ORD}(t) \text{ GT } 1) ..  $z(k,j,t) = E = z(k,j-1,t-1) - y(k,j,t);$

Eq09(k,j,t)\$(\text{ORD}(t) \text{ GT } 1) \text{ AND } (\text{ORD}(j) \text{ EQ } \text{Kapa}(k)) ..  $y(k,j+1,t) = E = z(k,j,t-1);$

Eq10(k,j)\$(\text{ORD}(j) \text{ EQ } \text{Kapa}(k)) ..  $y(k,j+1, '2019') = E = a(k,j+1);$

Eq11(k,j)\$(\text{ORD}(j) \text{ GT } 1) ..  $z(k,j, '2019') = E = a(k,j) - y(k,j, '2019');$

Eq12(t) ..  $\text{SUM}(k, f(k,t) * x(k,t) - \text{SUM}(j \$(\text{ORD}(j) \text{ LE } \text{Kapa}(k)+1), s(k,j) * y(k,j,t))) + \text{SUM}(c, \text{PCC}(c) * u(c,t)) = L = B(t);$

```

Eq13(c,t) .. v(c,t) =G= Teta(c) * SUM((k,j),CK(k,c)*z(k,j,t));

Eq14(t) .. SUM(c, GC(c) * v(c,t)) =L= G;

Eq15(t) .. SUM(c, v(c,t)) =L= H;

Eq16(c) .. v(c,'2019') =E= E(c) + u(c,'2019');

Eq17(c,t)$ (ORD(t) GT 1) .. v(c,t) =E= v(c,t-1) + u(c,t);

Eq18 .. SUM((k,j)$ (ORD(j) LE Kapa(k)), (ORD(j)-1)*z(k,j,'2050')) =L= SUM((k,j)$ (ORD(j)
LE Kapa(k)),Gama*z(k,j,'2050'));

Eq19(k,t) .. y(k,'0',t) =L= x(k,t);

MODEL Laporte /ALL/;

SOLVE Laporte USING MIP MINIMIZING Zobj;

DISPLAY u.l,v.l,x.l,y.l,z.l;

PARAMETER
  INICIAL(k) Inicial
  COMPRAS(k) Veiculos comprados
  VENDAS(k) Veiculos vendidos
  FINAL(k) Final;
* DISPONIVEIS(t,j,k) Veiculos disponiveis
* ALOCADOS(t,j,k) Veiculos alocados;

INICIAL(k) = SUM(j,A(k,j));
COMPRAS(k) = SUM(t,X.L(k,t));
VENDAS(k) = SUM((j,t),Y.L(k,j,t));
FINAL(k) = SUM(j,Z.L(k,j,'2050'));
*DISPONIVEIS(t,j,k) = Z.L(k,j,t);
*ALOCADOS(t,j,k) = SUM(r,W.L(k,j,t,r));

DISPLAY INICIAL,COMPRAS,VENDAS,FINAL;

SET
  L Label / INICIAL,COMPRAS,VENDAS,FINAL /;

PARAMETER
  RESUMO(k,L) Resumo das operacoes;
  RESUMO(k,'INICIAL') = SUM(j,A(k,j));
  RESUMO(k,'COMPRAS') = SUM(t,X.L(k,t));

```

```
RESUMO(k, 'VENDAS') = SUM((j, t), Y.L(k, j, t));  
RESUMO(k, 'FINAL') = SUM(j, Z.L(k, j, '2050'));
```

```
DISPLAY INICIAL, COMPRAS, VENDAS, FINAL, RESUMO;
```

## APÊNDICE B – Modelo para Gerenciamento Parcial

```
option limrow = 0;
option limcol = 0;
option optcr = 0.05;
```

### SETS

```
k    Conjunto de modelos de onibus /D-40,D-60,H-40,H-60,CNG-40,CNG-60,E250-40,E350-
40,E650-60,E250-40-FC,E110-40-PC,E110-40-WC/
kE(k) Conjuntos de possiveis modelos de onibus eletricos /E250-40,E350-40,E650-
60,E250-40-FC,E110-40-PC,E110-40-WC/
R    Conjunto de tipos rotas /R1*R84,RES40,RES60/
T    Conjunto de periodos do horizonte de planejamento /2019 * 2050/
J    Conjunto de possiveis idades para os onibus da frota /0 * 15/
C    Conjunto de possiveis tipos de carregadores /DC,FC,PC/;
```

TABLE a(k,j) Quantidade de onibus do modelo k e idade j na frota no inicio do horizonte de planejamento

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D-40	0	0	1	4	5	6	7	8	8	7	6	5	4	1	0	0
D-60	0	0	0	1	2	4	8	8	8	4	2	1	0	0	0	0

TABLE f(k,t) Valor de compra do onibus de modelo k no periodo t

	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
...							
D-40	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999
D-60	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999	9999999
H-40	30972	30972	30972	30972	30972	30972	30972
...							
H-60	42500	42500	42500	42500	42500	42500	42500
...							
CNG-40	24252	24252	24252	24252	24252	24252	24252
...							
CNG-60	40100	40100	40100	40100	40100	40100	40100
...							
E250-40	36000	35466	34932	34398	33864	33330	32795
...							
E350-40	35000	34252	33505	32757	32009	31261	30514
...							
E650-60	112187	110799	109410	108021	106633	105244	103855
E250-40-FC	28500	27966	27432	26898	26364	25830	25295
...							
E110-40-PC	26500	26265	26030	25795	25560	25325	25090
...							

E110-40-PC 26500            26265            26030            25795            25560            25325            25090  
 ...

TABLE HP(k,r) Parametro binario igual a 1 se um onibus do modelo k e compativel com a rota do tipo r

	R1	R2	R3	R4	R5	...	R32	RES60		
D-60		1	1	1	1		1	...	1	1
H-60		1	1	1	1		1	...	1	1
CNG-60	1	1	1	1	1	...	1		1	
E650-60	1	1	1	1	1	...	1		1	

+

		R33	R34	R35	R35	R36	...	R84	RES40		
D-40			1		1		1	1	...	1	1
H-40			1		1		1	1	...	1	1
CNG-40		1		1		1	1	...	1		1
E250-40		1		1		1	1	...	1		1
E350-40		1		1		1	1	...	1		1
E250-40-FC	1		1		1		1	...	1		1
E110-40-PC	1		1		1		1	...	1		1
E110-40-WC	1		1		1		1	...	1		1

TABLE MC(k,t) Custo de manutencao preventiva quando um onibus do modelo k atinge a idade de meia-vida no periodo t

		2019	2020	2021	2022	2023	...	
D-40		0	0	0	0	0	...	
D-60		0	0	0	0	0	...	
H-40		0	0	0	0	0	...	
H-60		0	0	0	0	0	...	
CNG-40		0	0	0	0	0	...	
CNG-60		0	0	0	0	0	...	
E250-40		0	0	0	0	0	...	
E350-40		0	0	0	0	0	...	
E650-60		0	0	0	0	0	...	
E250-40-FC	0		0		0		0	...
E110-40-PC	0		0		0		0	...
E110-40-WC	0		0		0		0	...

TABLE S(k,j) Valor de venda do onibus de modelo k com idade j

	0	1	2	3	...
D-40	312656	281390	253251	227926	...
D-60	507109	456398	410759	369683	...
H-40	0	0	0	0	...
H-60	0	0	0	0	...
CNG-40	0	0	0	0	...

CNG-60	0	0	0	0	...
E250-40	0	0	0	0	...
E350-40	0	0	0	0	...
E650-60	0	0	0	0	...
E250-40-FC	0	0	0	0	...
E110-40-PC	0	0	0	0	...
E110-40-WC	0	0	0	0	...

TABLE CK(k,c) Parametro binario igual a 1 se um onibus do modelo k pode utilizar um carregador do tipo c

	DC	FC	PC
D-40	0	0	0
D-60	0	0	0
H-40	1	0	0
H-60	1	0	0
CNG-40	0	0	0
CNG-60	0	0	0
E250-40	1	0	0
E350-40	1	0	0
E650-60	1	0	0
E250-40-FC	1	1	0
E110-40-PC	1	0	1
E110-40-WC	1	0	0 ;

TABLE Enr(k,t) custo total de energia por tipo de onibus k em cada periodo t

	2019	2020	2021	2022	2023	...
D-40	34425	36404	38383	40362	42341	...
D-60	48195	50966	53736	56507	59277	...
H-40	18187	19232	20278	21323	22369	...
H-60	27540	29123	30706	32290	33873	...
CNG-40 68571	69740	70909	72078	73247	...	...
CNG-60 96000	97636	99273	100909	102545	...	...
E250-40	11160	10909	10658	10407	10156	...
E350-40	11625	11364	11102	10841	10580	...
E650-60	15943	15584	15226	14868	14509	...
E250-40-FC	11160	10909	10658	10407	10156	...
E110-40-PC	10731	10490	10248	10007	9766	...
E110-40-WC	10731	10490	10248	10007	9766	...

TABLE Lsg(k,j) custo total de leasing para cada tipo de onibus k e idade j

	0	1	2	3
D-40	47783	46391	45040	43728
D-60	77501	75244	73052	70925
H-40	66268	64338	62464	60644
H-60	90933	88285	85713	83217
CNG-40 51890	50378	48911	47486	

CNG-60 85798	83299	80873	78518	
E250-40	77026	74782	72604	70490
E350-40	74886	72705	70588	68532
E650-60	240037	233045	226258	219668
E250-40-FC	60979	59203	57478	55804
E110-40-PC	56700	55048	53445	51888
E110-40-WC	56700	55048	53445	51888

## PARAMETER

Mnt(k,j) custo de manutencao total de um periodo do onibus de modelo k e idade j

E(c) Quantidade de carregadores do tipo c disponiveis no inicio do horizonte de planejamento

/ DC 0  
 FC 0  
 PC 0 /

GC(c) Consumo de energia em kW do carregador de tipo c

/ DC 50  
 FC 120  
 PC 300 /

PCC(c) Valor de compra do carregador de tipo c

/ DC 50000  
 FC 110000  
 PC 230000 /

Teta(c) Proporcao minima de carregadores do tipo c em relacao ao total de onibus eletricos na frota

/ DC 0.5  
 FC 0.05  
 PC 0.15 /

P(t) Proporcao minima de onibus eletricos em relacao a frota no periodo t

/ 2019 0  
 2020 0  
 2021 0  
 2022 0  
 2023 0  
 2024 0  
 2025 0  
 2026 0  
 2027 0  
 2028 0  
 2029 0

2031 0  
 2032 0  
 2033 0  
 2034 0  
 2035 0.50  
 2036 0.50  
 2037 0.50  
 2038 0.50  
 2039 0.50  
 2040 0.50  
 2041 0.50  
 2042 0.50  
 2043 0.50  
 2044 0.50  
 2045 0.50  
 2046 0.50  
 2047 0.50  
 2048 0.50  
 2049 0.50  
 2050 0.50 /

q(r) Quantidade de onibus que devem ser atribuidos na rota r

/ R1 1  
 R2 1  
 R3 1  
 R4 1  
 R5 1  
 R6 1  
 R7 1  
 .  
 .  
 .  
 R84 1  
 RES40 10  
 RES60 6 /

Kapa(k) Idade em que o onibus do modelo k deve ser retirado da frota

B(t) Orcamento disponivel para compras e operacao no periodo t;

Kapa(k) = 15;

B(t) = 999999999999999999;

Mnt('D-40',j) = ((0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1))) \* 60000;

Mnt('D-60',j) = (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('CNG-40',j) = (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('CNG-60',j) = (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('H-40',j) = (0.372 + 0.0673\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('H-60',j) = (0.372 + 0.0673\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E250-40',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E350-40',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E650-60',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E250-40-FC',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E110-40-PC',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

Mnt('E110-40-WC',j) = 0.6 \* (0.53 + 0.0867\*(ORD(j)-1)) \* 60000;

PARAMETER TOC(k,j,t) Custo total de operacao do onibus do modelo k com idade j no periodo t;

TOC(k,j,t) = Enr(k,t) + Lsg(k,j) + Mnt(k,j);

SCALAR

PDC Custo de demanda periodica em \$ por kW / 144 /

G Restricao da rede de energia na garagem dos onibus (kW) /999999999999999999/

H Restricao de espaco fisico na garagem dos onibus /999999999999999999/

Taxa taxa de minima atratividade /0.10/

Beta Fator de correcao economico

Gama Idade media maxima dos onibus no ultimo periodo do horizonte de planejamento /7.5/;

Beta = 1/(1+Taxa);

VARIABLES

u(c,t) Quantidade de carregadores do tipo c comprados e instalados no periodo t

v(c,t) Quantidade de carregadores do tipo c disponiveis durante o periodo t

w(k,j,t,r) Quantidade de onibus do modelo k com idade j atribuidos a rota do tipo r no periodo t

x(k,t) Quantidade de onibus do modelo k comprados no periodo t

y(k,j,t) Quantidade de onibus do modelo k com idade j vendidos no periodo t

z(k,j,t) Quantidade de onibus do modelo k com idade j disponiveis no periodo t

Zobj Funcao objetiva;

INTEGER VARIABLES u,v,w,x,y,z;

EQUATIONS

Eq01 funcao objetiva

Eq02(t) cumprimento do objetivo de eletrificacao

Eq03(t,r) respeito a quantidade de onibus necessaria para cada corrida

- Eq04(k,j,t,r) garantia de que as rotas serao percorridas por onibus compatíveis
- Eq05(k,j,t) todos os onibus disponiveis devem estar atribuidos a alguma rota durante todos os periodos
- Eq06(k,t) quantidade de onibus novos disponiveis na frota e igual a quantidade de onibus adquiridos no inicio deste periodo menos o numero de onibus novos que foram vendidos neste periodo
- Eq07(k) quantidade de onibus disponiveis no primeiro periodo
- Eq08(k,j,t) quantidade de veiculos disponiveis na frota com idade com idade maior que 0 deve ser igual a quantidade de veiculos disponiveis no periodo anterior menos os vendidos neste periodo
- Eq09(k,j,t) obriga a retirada de veiculos com idade maxima da frota
- Eq10(k,j) obriga a retirada de veiculos que ja estavam na frota com idade maxima
- Eq11(k,j) quantidade de veiculos disponiveis no primeiro periodo deve ser igual a quantidade inicial menos a quantidade vendida no inicio do periodo
- Eq12(t) respeito ao orcamento para cada periodo
- Eq13(c,t) respeito ao rateio dos tipos carregadores por onibus eletrico
- Eq14(t) garantia de cumprimento da restricao da rede de energia da garagem dos onibus
- Eq15(t) garantia de cumprimento da restricao de espaco fisico da garagem dos onibus
- Eq16(c) quantidade de carregadores no primeiro periodo deve ser igual a quantidade inicial mais a quantidade comprada no periodo
- Eq17(c,t) quantidade de carregadores no periodo t deve ser igual a quantidade disponivel do periodo anterior mais a quantidade adquirida no periodo atual
- Eq18 respeito a idade media maxima ao final do ultimo periodo do horizonte de planejamento
- Eq19(k,t) somente vender veiculos novos se for comprado no mesmo ano;
- Eq01 ..  $Zobj = E = \text{SUM}((k,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * f(k,t) * x(k,t)) - \text{SUM}((k,j,t) \$(\text{ORD}(j) \text{ GT } 1), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * S(k,j) * y(k,j,t)) + \text{SUM}((k,j,t,r), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{TOC}(k,j,t) * w(k,j,t,r)) + \text{SUM}((c,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{PCC}(c) * u(c,t)) + \text{SUM}((c,t), \text{Beta}^{**}(\text{ORD}(t)-1) * \text{PDC} * \text{GC}(c) * v(c,t));$
- Eq02(t) ..  $\text{SUM}((kE,j), z(kE,j,t)) = G = P(t) * \text{SUM}((k,j), z(k,j,t));$
- Eq03(t,r) ..  $\text{SUM}((k,j), w(k,j,t,r)) = E = q(r);$
- Eq04(k,j,t,r) ..  $w(k,j,t,r) = L = \text{HP}(k,r) * z(k,j,t);$
- Eq05(k,j,t) ..  $\text{SUM}(r, w(k,j,t,r)) = E = z(k,j,t);$
- Eq06(k,t) \$(\text{ORD}(t) \text{ GT } 1) ..  $z(k, '0', t) = E = x(k,t) - y(k, '0', t);$
- Eq07(k) ..  $z(k, '0', '2019') = E = a(k, '0') + x(k, '2019') - y(k, '0', '2019');$

```

Eq08(k,j,t)$((ORD(j) GT 1) AND (ORD(t) GT 1)) .. z(k,j,t) =E= z(k,j-1,t-1) - y(k,j,t);

Eq09(k,j,t)$((ORD(t) GT 1) AND (ORD(j) EQ Kapa(k))) .. y(k,j+1,t) =E= z(k,j,t-1);

Eq10(k,j)$((ORD(j) EQ Kapa(k))) .. y(k,j+1,'2019') =E= a(k,j+1);

Eq11(k,j)$ (ORD(j) GT 1) .. z(k,j,'2019') =E= a(k,j) - y(k,j,'2019');

Eq12(t) .. SUM(k,f(k,t)*x(k,t)-SUM(j$(ORD(j) LE Kapa(k)+1),s(k,j)*y(k,j,t))) +
SUM(c,PCC(c)*u(c,t)) =L= B(t);

Eq13(c,t) .. v(c,t) =G= Teta(c) * SUM((k,j),CK(k,c)*z(k,j,t));

Eq14(t) .. SUM(c, GC(c) * v(c,t)) =L= G;

Eq15(t) .. SUM(c, v(c,t)) =L= H;

Eq16(c) .. v(c,'2019') =E= E(c) + u(c,'2019');

Eq17(c,t)$ (ORD(t) GT 1) .. v(c,t) =E= v(c,t-1) + u(c,t);

Eq18 .. SUM((k,j)$ (ORD(j) LE Kapa(k)), (ORD(j) -1)*z(k,j,'2050')) =L= SUM((k,j)$ (ORD(j)
LE Kapa(k)),Gama*z(k,j,'2050'));

Eq19(k,t) .. y(k,'0',t) =L= x(k,t);

MODEL Laporte /ALL/;

SOLVE Laporte USING MIP MINIMIZING Zobj;

DISPLAY u.l,v.l,x.l,y.l,z.l;

PARAMETER
  INICIAL(k) Inicial
  COMPRAS(k) Veiculos comprados
  VENDAS(k) Veiculos vendidos
  FINAL(k) Final;
* DISPONIVEIS(t,j,k) Veiculos disponiveis
* ALOCADOS(t,j,k) Veiculos alocados;

INICIAL(k) = SUM(j,A(k,j));
COMPRAS(k) = SUM(t,X.L(k,t));
VENDAS(k) = SUM((j,t),Y.L(k,j,t));
FINAL(k) = SUM(j,Z.L(k,j,'2050'));
*DISPONIVEIS(t,j,k) = Z.L(k,j,t);

```

```
*ALOCADOS(t,j,k) = SUM(r,W.L(k,j,t,r));

DISPLAY INICIAL, COMPRAS, VENDAS, FINAL;

SET
  L Label / INICIAL, COMPRAS, VENDAS, FINAL /;

PARAMETER
  RESUMO(k,L) Resumo das operacoes;
  RESUMO(k, 'INICIAL') = SUM(j,A(k,j));
  RESUMO(k, 'COMPRAS') = SUM(t,X.L(k,t));
  RESUMO(k, 'VENDAS') = SUM((j,t),Y.L(k,j,t));
  RESUMO(k, 'FINAL') = SUM(j,Z.L(k,j,'2050'));

DISPLAY INICIAL, COMPRAS, VENDAS, FINAL, RESUMO
```