



ISSN 2317-3122



GRUPO VERDE DE AGROECOLOGIA E AGRICULTURA

## Modelo de otimização na substituição de ônibus no transporte público

### *Optimization model in the bus replacement of public transport*

William Machado Emiliano<sup>1</sup>, Edgar Augusto Lanzer<sup>2</sup>, José Telhada<sup>3</sup>, Antônio Vitor Machado<sup>4</sup>

**Resumo:** Ao longo do tempo, o desgaste pelo uso de um equipamento tende a elevar cada vez mais os seus custos de operação e manutenção. A partir de um ponto torna-se economicamente interessante substituir o equipamento por um novo, mesmo na ausência de qualquer melhoramento tecnológico significativo. Esta observação genérica se aplica também a equipamentos tais como ônibus de transporte urbano. Pela sua natureza de serviço público, o transporte urbano de passageiros é geralmente regulado pelo poder municipal. Na cidade de Joinville (Santa Catarina) a Lei 3806/1998 determina a substituição de qualquer ônibus urbano que complete dez anos de uso. Neste contexto, este trabalho visa avaliar a racionalidade desta legislação sob a ótica da otimização econômica no uso de recursos privados. Adota-se a hipótese de que o agente privado busca substituir seus ônibus naquela idade (anos de uso) que conduza a minimização do fluxo de custos para a prestação dos serviços de transporte urbano, uma vez que o preço e o nível de serviço são fixados pela prefeitura. Portanto, a regulação define a receita da empresa. Os dados para esse estudo foram obtidos diretamente com uma das empresas permissionárias na cidade de Joinville-SC. O problema de otimização para um dado tipo de ônibus foi modelado como um problema de programação inteira, tipo caminho mais curto (*shortest path*). Portanto, as resoluções dos modelos correspondem a cinco diferentes tipos de ônibus, os quais foram otimizados por meio do software IBM ILOG CPLEX. Os modelos contemplaram financiamento do programa FINAME em cenários com taxas de inflação distintas e variações nos custos de manutenção. Os resultados mostraram divergências entre as idades ótimas de substituição dos ônibus e o preconizado pela legislação municipal. Todavia, as diferenças entre os custos mínimos otimizados e os do preceito legal não foram além de 5% no caso estudado.

**Palavras-chaves:** Programação Linear Inteira. Transporte Urbano. Serviço público.

**Abstract:** Over time, wear in the use of equipment tends to raise its operating costs and maintenance. From one point, it became economically interesting to replace the old equipment with a new one, even without any technological improvement. This observation also applies to equipment such as buses for urban transport. By the nature of public service, urban passenger transport is control by the municipal government. The city of Joinville, for example has the Law 3806/1998, in charge of determining that any urban bus is replacement with after ten years of use. In this context, the objective of this study is to evaluate the rationality of this legislation from the perspective of economic optimization in the use of private funds. Adopt the hypothesis that the private company seeks to replace their buses at the age (years of use) that lead to minimizing the flow of costs for the provision of urban transport services. This because the city hall sets once the price and level of service. Data from this study were to obtain directly from one of the licensees companies of the city. The optimization problem was model as a problem of integer linear programming type shortest path. For this model, we considered five different types of buses. This model was to solve with IBM CPLEX software. The data were to optimize in five different scenarios with different inflation rates and variations in maintenance costs. The results show differences between the optimum ages of replacing buses and required by municipal law. However, the results reached only 5% difference in relation to costs according to municipal law.

**Key words:** *Integer Linear Programming. Urban Transport. Public service.*

\* Autor para correspondência

Recebido para publicação em 12/12/2016; aprovado em 21/04/2017

<sup>1</sup> Aluno de Doutorado em Engenharia Industrial, Universidade do Minho, Braga; id6022@alunos.uminho.pt

<sup>2</sup> Professor Ph.D, UNISOCIESC, edgar.lanzer@sociesc.org.br

<sup>3</sup> Professor Doutor, Universidade do Minho, telhada@dps.uminho.pt

<sup>4</sup> Professor Doutor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, machadoav@ufersa.edu.br

## INTRODUÇÃO

Observa-se que várias prefeituras no país aplicam leis que definem limites de tempo de uso (vida útil) para ônibus urbanos. Uma busca na internet, feita pelos autores, usando as palavras-chave (vida útil máxima, ônibus urbano, lei municipal) observou-se que muitas prefeituras estabelecem uma vida útil máxima para os ônibus urbanos usados no transporte municipal. Alguns municípios preferem limitar a idade média da frota de ônibus urbanos das empresas concessionárias, como por exemplo, em Alvorada/RS, no qual o limite de idade média da frota é de 10 anos (Lei Municipal 1.003/1999). Porém, a maioria dos legisladores municipais parece preferir limitar a idade máxima de uso dos ônibus em base individual, situando-a entre 6 anos (ex.: Manaus/AM; Lei Orgânica de Manaus, Art. 258) e 25 anos (ex.: Goiatuba/GO; Lei Municipal 2.660/2011). Em Chapecó/SC, a vida útil máxima de um ônibus urbano pode ser 10 ou 15 anos, dependendo da marca do fabricante do chassi (DL 2171/1991).

Por outro lado, a pesquisa sobre políticas de Substituição de Equipamentos (SE), entre os quais evidentemente se incluem os ônibus urbanos, foi bastante impulsionada pelos trabalhos de Bellman (1955) e Alchian (1958), pesquisadores da Rand Corporation. Nestes trabalhos, políticas ótimas de SE foram definidas a partir de processos de otimização econômica tais como a minimização do valor presente do custo de operação e substituição de um equipamento dado um horizonte de T unidades de tempo. A variável de decisão é o tempo de uso (idade) do equipamento. Howard (1962) estendeu os procedimentos de Bellman – denominados de Programação Dinâmica – para sistemas estocásticos representáveis por cadeias de Markov. Desde então, as ferramentas criadas por Alchian, Bellman e Howard vem sendo aplicadas em distintos contextos. De fato, políticas ótimas de substituição têm sido determinadas para equipamentos que incluem desde aviões militares (Keating e Dixon, 2003) até vacas leiteiras (Nielsen et al., 2010).

Portanto, a substituição de veículos está vinculada às obrigações legais e/ou à elevação de custos e a probabilidade de quebras, devido aos desgastes por utilização (Valente et al., 2008).

Neste trabalho apresenta-se um estudo de caso relacionado à avaliação da racionalidade econômica da Lei Municipal 3.806/1998, de Joinville/SC, pela qual é fixado um prazo máximo de 10 anos de uso para os ônibus urbanos. O sistema de transporte coletivo da cidade de Joinville é operado por duas empresas permissionárias que dividem as operações entre a região sul e norte desde 1971. Atualmente, ambas as empresas, não utilizam sistemas de otimização para definir o melhor momento para substituição de seus veículos, elas seguem apenas a legislação. Para as operações da cidade, ambas as empresas, utilizam 5 tipos de ônibus: micro, midi, convencional, padron e articulado. Em Joinville existem 3 tipos de linhas, troncal (estação de bairro – centro), alimentadora (bairro – estação de bairro) e inter-estações (estação de bairro – estação de bairro). Os ônibus tipo micro operam linhas de baixa demanda de passageiros, os midi operam linhas inter-estações, os convencionais atuam nas linhas alimentadoras e troncais, os tipos padron BRS (*Bus Rapid Service*) apenas em linhas troncais com corredores

exclusivos, e por último os articulados que atendem apenas em linhas de alta demanda de passageiros.

A temática específica de otimização econômica da substituição de ônibus urbano aparenta ter sido relativamente pouco estudada no Brasil. Vey e Rosa (2003), apresentaram um estudo utilizando o método de comparação de CAUEs (Custo Anualizado Uniforme Equivalente) para três ônibus urbanos de uma empresa de transportes de Santa Maria/RS, para os quais dispunham de histórico detalhado das despesas a ele associados por mais de uma década. Concluíram que o CAUE mínimo era obtido pela substituição do ônibus entre o seu segundo e quarto ano de uso no primeiro caso, entre o terceiro e o quinto ano nos outros dois casos.

Em Feldens et al. (2010), eles utilizaram um modelo de teoria da decisão multicritério para analisar sub-frotas de uma empresa estatal de transportes urbanos em Porto Alegre/RS. Na análise estritamente econômica, os autores encontraram faixas de troca entre 4 e 10 anos e entre 6 e 10 anos na maior parte dos casos, com poucas ocorrências destoantes: algumas sub-frotas onde o ideal indicado para substituição ficou entre 9 e 10 anos e outras onde a indicação caía para 2 a 4 anos. A inclusão de critérios não econômicos levou a conclusão de que boa parte das sub-frotas com indicação de substituição entre 2 e 4 anos de idade tinha desempenho geral considerado “Fracó” ou “Muito Fraco”.

Por fim, Costa et al. (2014), utilizaram a Teoria de Opções Reais para avaliar a idade ótima de compra ou venda de ônibus urbanos, utilizando informações de uma concessionária de transporte urbano na cidade de Vitória/ES. Os autores concluíram pela indicação de compra do ônibus usado após seu 2º. ano de uso (no sentido de que o valor presente marginal de suas receitas excediam seus custos). Esta indicação é algo difícil de aplicar na prática, sobretudo porque o estudo não apontou um momento de venda do ônibus usado e nem levou em conta que muitas linhas de financiamento subsidiado para transporte urbano exigem a aquisição de veículos novos.

A nível internacional o tema de substituição de ônibus foi estudado por Rashid (2011), e Amiens et al. (2015), com otimização da idade de substituição por Programação Dinâmica. Em Feng e Figliozzi (2013), o método MILP foi proposto para uma frota de caminhões. Nesse estudo foram analisados cinco cenários distintos em um horizonte de planejamento de 30 anos. Isso permitiu a composição de uma frota heterogênea, composta por veículos de tecnologias distintas (diesel e elétrico). A função multi-objetivo de programação linear (MOLP) foi utilizada em Ercan et al. (2015), cujo, os objetivos foram minimizar os custos do ciclo de vida (LCC) e os relacionados aos gases de efeito estufa (GEE). Para esse estudo os autores utilizaram MOLP com a função MINIMAX, responsável pela minimização da distância relativa entre uma solução candidata e uma solução ideal.

Em Feng e Figliozzi (2014), eles utilizaram a Programação Linear Multiperiódica para avaliar o problema de substituição de sub-frotas de ônibus urbanos de mudança tecnológica (diesel por híbridos). Estes últimos autores consideraram também custos de externalidades ambientais (custos sociais) além dos custos privados internalizados pela empresa, estendendo o período de análise para um horizonte

de uma centena de anos e examinando distintos cenários de preços de combustíveis e graus de subsídio.

Já em Mishra et al. (2013), ele examinou um problema semelhante incluindo condições de restrição de capital na substituição dos ônibus.

O presente estudo, ao avaliar eventuais distorções na racionalidade econômica das empresas concessionárias de transporte urbano, impostas pela legislação municipal, pretende contribuir para melhor entendimento desta temática mais geral, abordando um estudo de caso na cidade de Joinville/SC.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Coleta e análise de dados

Os dados da Tabela 1 foram coletados junto a uma empresa permissionária de transporte coletivo da cidade em Fevereiro de 2014, referente às operações do ano de 2013. O

custo de operação (C\_OP) engloba apenas os gastos com combustíveis, onde em média cada veículo percorre cerca de 16.700 km mensalmente. Já o custo de manutenção (C\_Manut), engloba os seguintes itens: pneus (troca após 60.000 km em primeira vida e 30.000 km na segunda vida ou recapagem), motor (vida útil de 500.000 km), caixa de direção (400.000 km), caixa de câmbio (300.000 km), embreagem (150.000 km a original e 100.000 km a manufaturada), bomba injetora (250.000 km), bolsa de ar (50.000 km), suspensão (molas 20.000 km, buchas do estabilizador 30.000 km, manga do eixo 40.000 km e amortecedor 100.000 km), diferencial (400.000 km), turbina (200.000 km), parte elétrica (revisão a cada 20.000 km), alternador (70.000 km), bateria (85.000 km) e motor de partida (50.000 km). As informações presentes na Tabela 1 esconde alguma variação entre chassis e carrocerias de fabricantes distintos, os quais não foram objeto de análise específica neste trabalho.

**Tabela 1.** Levantamento de dados junto à empresa permissionária.

C_OP <sup>1</sup>	C_Manut <sup>2</sup>	TAM <sup>3</sup>	Idade <sup>4</sup>	C_Total <sup>5</sup>
477.876	122.524	145	12	590.400
111.801	94.599	40	11	206.400
144.772	49.628	40	10	194.400
181.818	210.822	75	8	392.640
203.774	103.426	73	8	307.200
197.080	54.290	75	7	252.000
206.897	97.903	75	7	304.800
180.000	67.200	75	6	247.200
222.222	68.178	75	6	290.400
200.000	42.400	75	5	242.400
190.141	88.259	75	5	278.400
200.000	28.000	75	4	228.000
223.140	26.460	75	4	249.600
335.404	46.196	131	4	381.600
202.247	25.753	86	3	228.000
250.000	71.600	86	3	321.600
130.435	37.565	39	2	168.000
282.723	17.277	93	2	300.000
166.667	34.933	68	1	201.600
241.071	34.929	86	1	276.000

Onde:

<sup>1</sup> Custo de Operação (R\$/ônibus/ano).

<sup>2</sup> Custo de Manutenção (R\$/ônibus/ano).

<sup>3</sup> Tamanho do ônibus (capacidade máxima de passageiros sentados e em pé).

<sup>4</sup> Idade do ônibus (em anos de operação).

<sup>5</sup> Custo Total do ônibus (anual).

Fizeram-se, inicialmente, correlações de cada tipo de custo (operação e manutenção) com as variáveis idades (em anos) e tamanho (número de passageiros em lotação máxima). Conforme presente na Tabela 2.

**Tabela 2** - Correlações entre os custos de operação e manutenção.

R2		
Tipos de custos	TAM	Idade
C_OP	0,89	0,02
C_MANUT	0	0,37

Observou-se a inexistência de correlação entre Custo de Operação (C\_OP) e Idade, bem como Custo de Manutenção (C\_Manut) e Tamanho (TAM). Dito de outro modo: aparentemente apenas o tamanho dos ônibus (lotação máxima), afetam os custos de operação, enquanto apenas a idade afeta o custo de manutenção.

A partir daí fizeram-se então duas análises de regressão utilizando-se o modelo exponencial ( $y = e^{a + bx}$ ), no qual o coeficiente  $b$  indica a taxa de variação em  $y$  com relação a uma variação em  $x$  (observe que o modelo é estimável por regressão linear tomando-se o logaritmo neperiano em ambos os lados da Equação 1:

$$\ln(y) = a + bx \quad (1)$$

As regressões, cujos resultados são apresentados a seguir, foram realizadas com o auxílio da planilha MS Excel. Na primeira regressão utilizou-se custo de operação anual (C\_OP) como variável explicada e a capacidade de lotação do ônibus (TAM) como variável explicativa. O resultado obtido, segue representado na Equação 2.

$$\ln(C\_OP) = 11,31 + 0,012 * TAM \quad (2)$$

(R2 = 0,92) (161,8) (14,0)

Os valores  $t$ , entre parênteses, abaixo dos coeficientes de regressão (Equação 2), são bastante elevados, garantindo estimativas confiáveis dos coeficientes de regressão. Do mesmo modo o R2 entre os valores estimados e observados indica um elevado ajuste na regressão. O coeficiente do regressor TAM indica que cada passageiro adicionado na capacidade de lotação do ônibus acrescenta 1,2% no seu custo de operação anual, conforme Figura 1.

Na segunda regressão utilizou-se o custo de manutenção C\_MAN como variável explicada e a idade do ônibus (Idade)

como variável explicativa. O resultado obtido segue abaixo na Equação 3.

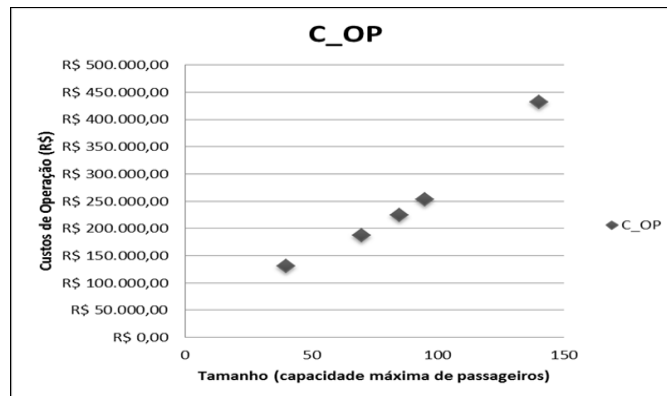
$$\ln(C\_MAN) = 10,1 + 0,134 * Idade \quad (3)$$

(R2 = 0,48) (42,6) (4,08)

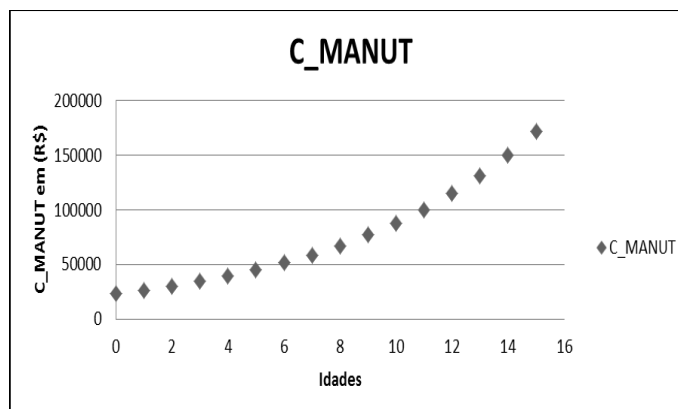
Novamente os valores  $t$  (entre parênteses, abaixo dos coeficientes de regressão), indicam elevada estabilidade nas estimativas (erros-padrão relativamente pequenos em relação às estimativas). O coeficiente R2, de intensidade média, indica que embora a regressão estime valores médios de custos de manutenção para cada idade com razoável precisão, existe uma flutuação considerável em torno de tais médias. O coeficiente 0,134, associado à regressão Idade do ônibus, indica que cada ano adicional de uso do ônibus acrescenta 13,4% no seu custo de manutenção anual, conforme Figura 2.

As regressões acima foram usadas para estimar o custo anual de operação para cinco tamanhos distintos de ônibus (lotação 40, 70, 85, 95 e 140 passageiros), correspondendo respectivamente aos tipos (micro-ônibus, ônibus midi, ônibus convencional, ônibus padron e ônibus articulado) e também para estimar o custo anual de manutenção para ônibus com idade entre 1 e 12 anos. A soma destes dois custos representa as despesas anuais estimadas para um tipo de ônibus com um determinado tamanho e idade. E constituindo-se em uma das informações necessárias para instanciar o modelo de otimização matemática descrito na próxima seção.

**Figura 1.** Gráfico representando o aumento de 1,2 % sobre os custos operacionais conforme tamanho.



**Figura 2.** Gráfico representando o aumento anual de 13,4% nos custos de manutenção de acordo a idade.



Outra informação requerida pelo modelo é o preço de mercado de um ônibus com lotação máxima de 40, 70, 85, 95 e 140 passageiros e idade 0, 1, 2,..., 12 anos de uso. Esta informação também foi coletada junto à empresa de ônibus, o qual avalia o preço de mercado de seus ônibus conforme a tabela de depreciação acelerada utilizada pela contabilidade formal. Os resultados obtidos estão disponíveis na Tabela 3.

Assim, no custo anual de um ônibus, foram incluídas as prestações de sua aquisição obedecendo às regras do FINAME (um programa de financiamento do governo para renovação de frotas com uma taxa de juros de 3,25% a.a.). Estas regras contemplam amortização da dívida em 10 anos e taxa de juros fixa de 3,25% a.a. No caso de venda antes de completar a amortização do financiamento, os valores dos ônibus usados da Tabela 3 foram utilizados como receita da empresa para quitação necessária da dívida, de modo a permitir um novo financiamento para aquisição de um veículo novo (zero uso).

Este modelo foi denominado de M1 (Modelo Básico). O M1, portanto, contempla os custos anuais totais de um ônibus, que incluem o seu custo de operação e de manutenção estimados, conforme as equações de regressão acima apresentadas e o pagamento de aquisição de veículos novos (deduzindo a receita da venda do veículo substituído) com regras do financiamento do FINAME.

Além do Modelo Básico M1 foram realizadas algumas simulações fazendo variações no custo de manutenção (variações relativamente uniformes por tipo e por idade dos ônibus, essencialmente equivalentes a variações diferenciais nos preços derivados de petróleo). Estas variações foram de 10 e 20% de elevação sobre os custos reais de manutenção obtidos nas regressões. Fizeram-se também variações no sistema de financiamento para aquisição, analisando uma possibilidade de tomada de um financiamento comercial com juros anuais de 20% a.a. e prazo de 10 anos para o pagamento.

**Tabela 3** - Valores de mercado de ônibus conforme sua Idade (anos de uso) e TAM (lotação máxima nº de passageiros).

IDADE ↓ TAM →	40	70	85	95	140
0	R\$ 243.069,54	R\$ 298.464,31	R\$ 312.135,13	R\$ 470.441,76	R\$ 646.441,76
1	R\$ 194.455,63	R\$ 238.771,45	R\$ 249.708,10	R\$ 393.460,55	R\$ 540.660,62
2	R\$ 160.425,90	R\$ 196.986,44	R\$ 206.009,19	R\$ 335.514,83	R\$ 461.036,45
3	R\$ 139.424,70	R\$ 171.199,15	R\$ 179.040,73	R\$ 291.592,92	R\$ 400.682,63
4	R\$ 118.511,00	R\$ 145.519,27	R\$ 152.184,62	R\$ 258.192,41	R\$ 354.786,43
5	R\$ 103.697,12	R\$ 127.329,36	R\$ 133.161,54	R\$ 232.842,56	R\$ 319.952,79
6	R\$ 93.327,41	R\$ 114.596,43	R\$ 119.845,39	R\$ 213.791,85	R\$ 293.774,90
7	R\$ 86.327,85	R\$ 106.001,70	R\$ 110.856,98	R\$ 199.798,10	R\$ 274.545,86
8	R\$ 82.011,46	R\$ 100.701,61	R\$ 105.314,13	R\$ 189.989,81	R\$ 261.068,13
9	R\$ 79.961,18	R\$ 98.184,07	R\$ 102.681,28	R\$ 183.772,02	R\$ 252.524,15
10	R\$ 78.761,76	R\$ 96.711,31	R\$ 101.141,06	R\$ 180.764,77	R\$ 248.391,85
11	R\$ 77.772,51	R\$ 95.496,62	R\$ 99.870,73	R\$ 178.494,37	R\$ 245.272,05
12	R\$ 70.384,12	R\$ 86.424,44	R\$ 90.383,01	R\$ 176.709,42	R\$ 242.819,32

Por fim, foi analisado um cenário sem financiamento ou compra à vista. Em resumo foram desenvolvidos os seguintes modelos ou cenários:

M1: Custos estimados por regressão; juros FINAME 3,25% a.a. (fixo).

M2: Aumento de 10% nos custos de manutenção de M1; juros FINAME 3,25% a.a. (fixo).

M3: Aumento de 20% nos custos de manutenção de M1; juros FINAME 3,25% a.a. (fixo).

M4: Custos = custos de M1; juros financiamento comercial com 20% a.a. (fixo).

M5: Custos = custos de M1; aquisição sem financiamento (compra à vista).

Além disso, para cada uma das situações acima, a otimização da idade de substituição foi feita sob três hipóteses distintas de inflação: 0% ao ano (a.a.), 5% a.a. e 10% a.a. A inflação foi considerada apenas sobre o financiamento, nesse caso uma inflação de 5% a.a. tem como consequência uma taxa de juros negativo (subsidiado) de 1,75% a.a. Para os demais custos admitiu-se que manteriam uma relação constante com as receitas da empresa. Neste caso não há necessidade de ajustes.

### Modelo matemático

No modelo do presente estudo a PI (foi combinada com a teoria de caminho mais curto, conforme proposto por Wagner (1975). O modelo matemático usado para otimizar a idade de substituição dos ônibus no problema estudado foi o seguinte:

$$\text{Min } Z = \sum_{ij \in A} C_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j:ij \in A} X_{ij} - \sum_{j:ji \in A} X_{ji} = \begin{cases} 1, \text{ para } k = \text{origem (fonte)} \\ 0 \text{ para todos os } k \neq \text{de } i \text{ e } j \\ -1 \text{ para } k = r \text{ (fim) na rede} \end{cases} \quad (5)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \forall ij \in A \quad (6)$$

Onde:

$C_{ij}$  = custo total acumulado de um veículo adquirido no ano  $i$  e substituído no ano  $j$ .

$j$  = ano de substituição do veículo.

$i$  = ano de aquisição do veículo novo.

O modelo matemático acima propõe uma modelagem, cujo objetivo é a minimização da soma de custos  $C_{ij}$ . Este custo engloba o custo de aquisição do ônibus novo (entrada e prestações do financiamento), de operação, de manutenção e a da quitação do financiamento, menos a receita da venda do ônibus. Analisando desde a aquisição no início do ano  $i$  até a substituição no início do ano  $j$  (a receita da venda do ônibus usado é utilizada para reduzir o saldo devedor do financiamento, que deve ser quitado para aquisição de um veículo novo). O ponto ótimo será representado por uma combinação binária  $X_{ij}$ , onde 0 indica que  $i, j$  não é um arco no caminho ótimo e 1 representa a inclusão do arco <aquisição de veículo novo no ano  $i$  sua venda para substituição no ano  $j$ > no caminho ótimo.

Nesse modelo, um ônibus de único tipo é analisado em um horizonte de planejamento de 50 anos, não havendo consideração por qualquer tipo de restrição orçamentária. Na origem é obrigatória a aquisição de um veículo novo (primeira linha da condição 2). A decisão de manter ou substituir é definido apenas no início do ano. Assumiu-se que em nenhum caso os veículos poderiam ser mantidos por mais de 12 anos. Então um ônibus mantido por 12 anos, será necessariamente substituído no início do décimo terceiro ano. Esta hipótese foi adotada face o objetivo principal ser o de confrontar a idade de substituição otimizada com o parâmetro de 10 anos adotado na legislação municipal. No processo de substituição os veículos usados serão vendidos conforme seu valor residual estipulado pela empresa permissionária.

Esses valores foram utilizados para a pesquisa, pois a tabela FIPE, responsável por expressar o valor médio de veículos no mercado nacional, informa apenas o valor do chassi e não o valor do ônibus por completo (chassi + carroceria). Presumiu-se que o valor recebido junto à venda dos veículos substituídos seria utilizado como pagamento do saldo devedor do financiamento utilizado ou como dedução do custo acumulado no período ( $i, j$ ). Já o valor restante será financiado em 10 anos, a uma taxa anual de juros de 3,25% (linha de financiamento FINAME).

A modelagem foi desenvolvida no *software* OPL CPLEX IBM e resolvida em computador com processador AMD A8-6410 APU with AMD Radeon R5 Graphics (2.00 GHz) e memória (RAM) de 8 GB. O tempo de resolução foi entre 30 a 228 segundos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados referentes aos custos de operação (relacionados ao tamanho do ônibus) com percentuais entre 10 e 20% de aumento, não impactaram na solução ótima (mantiveram-se os mesmos resultados da modelo base). Então os custos de operação foram desconsiderados devido a não interferência nos resultados. As substituições ocorrem no dia 31 de dezembro de cada ano, já o novo veículo inicia suas operações no dia 1 de janeiro do ano seguinte.

O ônibus tipo Micro, com capacidade de 40 lugares e responsável pela realização de linhas de baixa demanda de passageiros, obteve a menor faixa ideal de troca. No modelo

(M1) foi sugerido à substituição no décimo ano. Se a inflação sobe de 0% para 5% ou 10%, o ponto ótimo de substituição cai para 9 anos. No cenário de aumento de 10% nos custos de manutenção (M2), a substituição foi sugerida no oitavo ano. Já quando a inflação aumenta de 0% para 5% ou 10%, a substituição é adiantada para o sétimo ano. No cenário M3 (aumento de 20% nos custos de manutenção), o ponto ótimo de substituição cai para o sexto ano (quando a inflação é 0%) e para o início do quinto ano, quando a taxa de inflação chega a 5% ou 10%. O resultado se mantém o mesmo do cenário M1 (inflação 0%), quando há necessidade de um pagamento à vista, como no cenário (M5). A Tabela 4 resume estes resultados, que em síntese, são todos consistentes com a legislação atual (troca com até 10 anos de uso).

**Tabela 4 - Resultados do ônibus tipo micro.**

Ônibus tipo Micro			
Análises de Sensibilidade	Taxa de Inflação		
Variações de Custos e Juros	0%	5%	10%
M1	10	9	9
M2	8	7	7
M3	6	5	5
M4	10	9	9
M5	10	-	-

Situação semelhante ocorre para os ônibus midi (Tabela 5). O único caso de inconsistência com a legislação é o do modelo M4 (juros comerciais de 20% a.a.) com taxa de inflação zero. No caso deste modelo, com taxa de inflação nula, a vida útil ótima aumenta para 12 anos, voltando a cair para 10 anos em condições de inflação de 5% a.a. ou superior (Tabela 5).

**Tabela 5 - Resultados do modelo tipo Midi.**

Ônibus tipo Midi			
Análises de Sensibilidade	Taxa de Inflação		
Variações de Custos e Juros	0%	5%	10%
M1	10	9	9
M2	9	8	7
M3	6	6	5
M4	12	10	10
M5	10		

O modelo convencional, tipo de ônibus com maior representatividade na frota (35 veículos), possui capacidade para 85 pessoas. Os resultados da sua análise de substituição estão sintetizados na Tabela 6, abaixo. As conclusões gerais são praticamente as mesmas do caso anterior.

**Tabela 6. Resultados do modelo de ônibus tipo convencional.**

Ônibus tipo Convencional			
Análises de Sensibilidade	Taxa de Inflação		
	0%	5%	10%
Variações de Custos e Juros			
M1	10	9	9
M2	9	8	7
M3	7	6	5
M4	12	10	10
M5	10		

Os ônibus tipo Padron responsáveis pelas operações de linhas troncais, cujo sua capacidade se limita a 95 pessoas, são considerados mais confortáveis e adequados para linhas de trânsito rápido (onde há corredores exclusivos de ônibus). Conclui-se que os ônibus tipo Padron poderão ser mantidos até o décimo segundo ano (Tabela 7). Os resultados dos modelos M1, M2, M3 e M5 são consistentes com a legislação atual de vida útil máxima. Todavia, no cenário M4, ao contrário dos casos anteriores, a queda no juro fixo adotado (20% a.a.) devido a inflação presumida (5 ou 10% aa), não é suficiente para antecipar a solução econômica ótima de substituição.

De qualquer modo, fez-se uma avaliação do impacto de fixar a vida útil em 12 anos ao invés de 10 anos sobre o custo otimizado no modelo M1. Os resultados obtidos indicaram aumentos inferiores a 5% no custo total, sugerindo uma função de custo relativamente achatada, e em idades de substituição próximas as idades encontradas no resultado de minimização de custo.

**Tabela 7** - Resultados do modelo de ônibus tipo Padron.

Ônibus tipo Padron			
Análises de Sensibilidade	Taxa de Inflação		
	0%	5%	10%
Variações de Custos e Juros			
M1	10	9	9
M2	9	8	7
M3	7	6	5
M4	12	12	12
M5	10		

O ônibus tipo articulado responsável pela operação de linhas de alta demanda de pessoas, comportam até 140 pessoas em uma viagem. Os resultados da análise de otimização deste caso (Tabela 8), definem que esses tipos de veículo deverão ser mantidos de 6 a 12 anos, dependendo do cenário e a taxa de inflação.

**Tabela 8** - Resultados do modelo de ônibus tipo articulado.

Ônibus tipo Articulado			
Análises de Sensibilidade	Taxa de Inflação		
	0%	5%	10%
Variações de Custos e Juros			
M1	12	10	10
M2	10	9	9
M3	7	7	6
M4	12	12	12
M5	10		

Os resultados obtidos nesse estudo, quando comparados com os de autores como Feng e Figliozzi (2014), Rashid (2011) e Amiens et al. (2015), apresentam algumas diferenças

importantes. No estudo de Feng e Figliozzi (2014), o ponto ótimo de substituição é 20 anos para veículos a diesel e 16 anos para veículos híbridos (diesel + elétrico). Já os modelos de Rashid (2011) e Amiens et al. (2015), recomenda-se uma faixa ideal de troca de até 6 anos.

De acordo com esses resultados fica visível a diferença em anos entre o ponto ótimo dos modelos. Uma conclusão técnica sobre essas diferenças poderá estar relacionada com a infraestrutura local. O primeiro estudo de Feng e Figliozzi (2014) foi realizado nos Estados Unidos, um país que oferece boas condições para o transporte público. Já os outros dois estudos foram elaborados em Gana e Nigéria, países que assim como Brasil sofrem com as más condições de infraestrutura nos grandes centros urbanos. Esses fatores diminuem a vida útil do veículo devido a quebras constantes. Além disso, nos estudos de Rashid (2011), e Amiens et al. (2015), os ônibus também eram utilizados para operação de linhas rurais (estradas sem pavimentação).

Na relação com o trabalho de Feldens et al. (2010), foram encontradas algumas similaridades nos resultados. A discrepância maior é no veículo tipo padron, para o qual Feldens et al. (2010), determinou uma faixa ideal de troca de até 5 anos. Na prática isto não acontece devido ao seu alto valor de aquisição. Na cidade de Joinville esses veículos são utilizados apenas para linhas troncais de trânsito rápido, onde há corredores exclusivos de ônibus. Esses veículos são conhecidos como BRS (*Bus Rapid Service*), devido as suas características de fácil acessibilidade, segurança e conforto para passageiro e motorista. A alocação desses veículos em linhas não adequadas (o que ocorre em Porto Alegre onde os corredores de ônibus esburacados são frequentes) tende a elevar consideravelmente os custos de manutenção e operação. A faixa ideal de troca sugerida por Feldens et al. (2010), foi testada no modelo M1 do presente estudo e gerou um aumento significativo nos custos. O aumento foi de 292%, passando de um custo total de R\$ 102.519 para R\$ 299.842 a.a. Isto tornaria inviável financeiramente a utilização deste tipo de ônibus, caso aplicada uma política de substituição de 5 anos em vez de 10 anos.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados podemos concluir que: Na comparação entre os dados do modelo de otimização matemática testado e a política de substituição, não foram observados impedimento legais para que a empresa adotasse uma substituição otimizada, exceto se os juros se elevarem acima da taxa de inflação (nível real de 20% ou superior).

As pequenas alterações (1 ou 2 anos) em torno do nível ótimo de vida útil não demonstraram uma associação a um alto custo de decisão errada.

A vida útil dos ônibus apresentou ser bastante afetada pelas condições dos caminhos itinerários em que trafegam, devido à elevação de seus custos de manutenção, demonstrando forte associação entre custo com o tempo de uso do veículo. Já o custo de manutenção se mostrou dependente apenas ao tamanho do ônibus.

As equações de regressão testadas para estimar os custos não demonstraram resultados determinístico como o modelo de otimização. Pressupondo que na maioria dos casos as análises de sensibilidade são provocadas por alterações relativamente pequenas sobre os dados otimizados (em termos de custos totais).

Na legislação sobre limites da vida útil dos ônibus poderão ser inseridas certas tolerâncias. Esta deve estar necessariamente associada às condições técnicas de conservação (mecânica), sendo um dos fatores mais importantes no ciclo de vida de um ônibus.

## REFERÊNCIAS

- ALCHIAN, A. A. Economic replacement policy. Research Memoranda 2153, Santa Monica: Rand Corporation, 1958. 39p.
- AMIENS, E. O.; OISAMOJE, M. D.; INEBENBOR, A. U. A Dynamic Programming Approach to Replacement of Transport Vehicles in Benin City. *British Journal Of Mathematics & Computer Science*, Taiwan, v. 6, n. 3, p.204-214, 2015.
- BELLMAN, R. Equipment Replacement Policy, *Journal of Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol. 3, No. 3, p. 133-136, 1955.
- COSTA, A. P. R.; NOSSA, V.; TEIXEIRA, A. M. C.; TEIXEIRA, A. J. C. Otimização de custos do transporte público urbano: comprar ou vender um ônibus usado?. *Revista de Gestão, Finanças e Contabilidade*, v. 4, n. 2, p. 73-92, 2014.
- ERCAN, T. et al. Optimization of transit bus fleet's life cycle assessment impacts with alternative fuel options. *Energy*, v. 93, p. 323–334, dez. 2015.
- FENG, W.; FIGLIOZZI, M. Vehicle technologies and bus fleet replacement optimization: Problem properties and sensitivity analysis utilizing real-world data. *Public Transport*, v. 6, n.1, p. 137–157, 2014.
- FENG, W.; FIGLIOZZI, M. 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.
- HOWARD, R. *Dynamic Programming and Markov Processes*. New York: Mit Press, 1964. 136p.
- KEATING, E.G.; DIXON, M. Replacement of Aging Air Force Systems. *Defence and Peace Economics*, v 15, n. 5, p. 421-431, 2003.
- MISHRA, S. et al. Preserving an aging transit fleet: An optimal resource allocation perspective based on service life and constrained budget. *Transportation Research: Parte A*. V 47, p.111-123, 2013.
- NIELSEN, L.R. et al. Optimal replacement policies for dairy cows based on daily yield measurements. *Journal of Dairy Science*, v. 93, n. 1, p. 75-92, 2010.
- RASHID, A. Dynamic Programming based bus replacement policy for Metro-Mass Transit Limited-Kumasi Depot. 2011. 103f. Dissertation (Masters in Science Industrial Mathematics) - University Of Science And Technology, Kumasi. 2011.
- VALENTE, A. et al. *Gerenciamento de Transporte e Frotas*. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 352p.
- VEY, I.H. e ROSA, R.M. *Substituição de Frota em Empresa Municipal de Transporte de Passageiros: Um Estudo de Caso*. IX Convenção de Contabilidade do Rio Grande do Sul, Gramado, 2003.
- WAGNER, H. M. *Principles of Operations Research: With Applications to Managerial Decisions*. 2 ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. 1039p.