

UM MODELO DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS APLICADO À DECISÃO DE SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS: UM ESTUDO DE CASO DO MERCADO AUTOMOBILÍSTICO BRASILEIRO

Ricardo de La Vega (UFABC)

eder.abensur@ufabc.edu.br

Eder Oliveira Abensur (UFABC)

eder.abensur@ufabc.edu.br



Praticamente todas as empresas possuem parte do seu capital imobilizado. Esses bens possuem vida útil finita e estimada. Ao final da vida útil dos equipamentos as empresas precisam tomar uma decisão de extrema importância, que é a sua substituição. Se essa decisão for equivocada a organização arcará com custos desnecessários e elevados que podem comprometer a sua estabilidade financeira. Um modelo alternativo foi apresentado recentemente com o uso de uma conhecida técnica da pesquisa operacional baseada no Problema de Roteamento de Veículos (PRV). A apresentação de novos modelos que solucionem o problema da substituição de equipamentos é importante, pois podem fornecer a solução com mais credibilidade e maior flexibilidade. O presente trabalho testou este modelo alternativo para múltiplas opções de substituição do bem em uso. O problema de substituição escolhido foi uma decisão muito comum não só nas organizações, mas também às pessoas físicas em geral, que é a substituição de um automóvel. Seus resultados foram comparados aos métodos tradicionais de análise e mostraram ser uma promissora ferramenta de apoio à decisão.

Palavras-chaves: Engenharia Econômica, Substituição de Equipamentos, Problema de Roteamento de Veículos

1. Introdução

Praticamente todas as empresas possuem parte do seu capital imobilizado. Esses bens possuem vida útil finita e estimada. Ao final da vida útil dos equipamentos as empresas precisam tomar uma decisão de extrema importância, que é a sua substituição. Se essa decisão for equivocada a organização arcará com custos desnecessários e elevados que podem comprometer a sua estabilidade financeira.

O problema da substituição de equipamentos (PSE) é um tema crítico a ser considerado, uma vez que em muitos casos as decisões tomadas não retratam as melhores opções e em longo prazo, uma política errada de substituição pode levar a empresa à falência (CONTADOR et al, 1998). Para tanto são utilizados conceitos de engenharia econômica e pesquisa operacional com o propósito de minimizar as perdas ou maximizar os lucros.

O PSE exige a mensuração de resultados econômicos para avaliar diferentes alternativas para a tomada de decisão representando um campo fértil de aplicação da engenharia econômica. As principais técnicas empregadas são: (i) valor presente líquido (VPL) ; (ii) custo anual equivalente (CAE) e (iii) taxa interna de retorno (TIR).

A pesquisa operacional pode ser definida como a aplicação de métodos científicos a problemas complexos para auxiliar no processo de tomada de decisões, em situações que requerem alocações eficientes de recursos escassos (MORABITO, 2008). Para a utilização de suas técnicas de resolução faz-se necessário a construção de um modelo matemático, a partir da observação e definição de um sistema real. Um modelo conhecido e muito utilizado é o Problema de Roteamento de Veículos (PRV), geralmente aplicado a problemas de transporte de bens. Ainda é recente e pouco explorada na literatura aplicações da lógica do modelo PRV a situações distintas de transporte.

A apresentação de novos modelos que solucionem o PSE é importante, pois podem fornecer soluções com mais credibilidade e maior flexibilidade. O PRV foi testado e apresentou bons resultados para problemas de substituição de equipamentos com apenas um bem avaliado para a substituição (ABENSUR, 2010).

O presente trabalho tem como objetivo adaptar e testar este modelo alternativo para múltiplas opções de substituição do bem em uso. O problema de substituição escolhido foi uma decisão muito comum não só nas organizações, mas também às pessoas físicas em geral, que é a

substituição de um automóvel. Seus resultados foram comparados aos métodos tradicionais de análise e mostraram ser uma promissora ferramenta de apoio à decisão.

Os dados sobre valores dos bens avaliados são dados públicos de fácil acesso, a partir de revistas e jornais especializados. Os valores levantados foram de veículos novos e usados, o valor do veículo novo foi utilizado como parâmetro para a substituição, e os valores de veículos usados foram a base para a desvalorização do mesmo. A fonte de dados utilizada foi o caderno de Classificados de Autos (2011-2012) do jornal O Estado de São Paulo.

A amostra selecionada foi baseada nos dados do mercado brasileiro de automóveis populares, que, em 2012, já vendeu mais de 250 mil veículos, e entre eles pode-se destacar três modelos, que juntos, possuem mais de 50% do mercado. Por esse motivo eles foram os modelos analisados. Com isso, observa-se que a amostra escolhida não é aleatória, e sim baseada nos modelos de veículos que possuem uma representatividade elevada no setor. Os modelos escolhidos são bens substitutos, se levarmos em consideração a potência dos motores, número de portas, acessórios, porte e até mesmo o preço. Por serem concorrentes diretos e para manter a imparcialidade na condução da análise dos resultados observados, os nomes dos veículos e marcas foram omitidos.

Para o cálculo da desvalorização dos veículos, construiu-se um intervalo de confiança de 95% e adotou-se, por conservadorismo, o limite inferior de cada faixa. Desta forma os limites inferiores de cada faixa definem os valores que o consumidor receberá pela venda do bem atual para a compra do novo carro.

A solução do modelo foi possível com a utilização de *softwares* de otimização, tanto livres quanto pagos, ou com o auxílio de planilhas eletrônicas. Neste caso a planilha eletrônica Excel foi utilizada juntamente com um de seus suplementos de otimização, chamado Solver. Os dados sobre os valores de revenda e 0 Km dos automóveis analisados são apresentados nas figuras 1, 2 e 3 a seguir.

Figura 1 – Tabela de valores do veículo em uso

Edição	Valor do Novo	Veículo em uso				
		2011	2010	2009	2008	2007
19/06/2011	R\$ 23.220,00		R\$ 20.234,00	R\$ 19.417,00	R\$ 18.224,00	R\$ 16.754,00
17/07/2011	R\$ 23.320,00		R\$ 19.319,00	R\$ 18.382,00	R\$ 17.418,00	R\$ 16.596,00
21/08/2011	R\$ 24.030,00	R\$ 21.365,00	R\$ 20.234,00	R\$ 19.112,00	R\$ 18.009,00	R\$ 17.061,00
04/09/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.252,00	R\$ 20.234,00	R\$ 19.112,00	R\$ 17.372,00	R\$ 16.851,00
25/09/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.252,00	R\$ 20.234,00	R\$ 19.112,00	R\$ 17.372,00	R\$ 16.851,00
09/10/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 20.769,00	R\$ 19.420,00	R\$ 18.530,00	R\$ 17.061,00	R\$ 16.239,00
16/10/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.220,00	R\$ 19.775,00	R\$ 18.843,00	R\$ 17.271,00	R\$ 16.449,00
23/10/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.600,00	R\$ 20.069,00	R\$ 19.260,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.449,00
06/11/2011		R\$ 21.600,00	R\$ 19.881,00	R\$ 18.951,00	R\$ 17.674,00	R\$ 16.449,00
13/11/2011		R\$ 21.350,00	R\$ 19.679,00	R\$ 18.775,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.239,00
20/11/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.083,00	R\$ 19.461,00	R\$ 18.530,00	R\$ 17.280,00	R\$ 16.161,00
27/11/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.350,00	R\$ 19.679,00	R\$ 18.775,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.307,00
04/12/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.350,00	R\$ 19.931,00	R\$ 18.775,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.502,00
11/12/2011		R\$ 21.350,00	R\$ 19.679,00	R\$ 18.775,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.239,00
25/12/2011	R\$ 23.490,00	R\$ 21.338,00	R\$ 19.668,00	R\$ 18.762,00	R\$ 17.493,00	R\$ 16.228,00
08/01/2012	R\$ 23.490,00	R\$ 21.153,00	R\$ 19.527,00	R\$ 18.659,00	R\$ 17.247,00	R\$ 16.091,00
15/01/2012		R\$ 21.350,00	R\$ 19.679,00	R\$ 18.775,00	R\$ 17.506,00	R\$ 16.239,00
12/02/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.610,00	R\$ 19.033,00	R\$ 18.467,00	R\$ 17.030,00	R\$ 16.346,00
26/02/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.610,00	R\$ 19.033,00	R\$ 18.467,00	R\$ 16.911,00	R\$ 16.346,00
11/03/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.610,00	R\$ 19.033,00	R\$ 18.467,00	R\$ 16.911,00	R\$ 16.050,00
25/03/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.443,00	R\$ 18.973,00	R\$ 18.205,00	R\$ 16.911,00	R\$ 16.050,00
01/04/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.050,00	R\$ 18.947,00	R\$ 17.845,00	R\$ 16.911,00	R\$ 15.780,00
15/04/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.529,00	R\$ 18.860,00	R\$ 17.790,00	R\$ 16.628,00	R\$ 15.587,00
22/04/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.529,00	R\$ 18.860,00	R\$ 17.790,00	R\$ 16.628,00	R\$ 15.587,00
29/04/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.920,00	R\$ 19.411,00	R\$ 18.206,00	R\$ 16.629,00	R\$ 15.730,00
06/05/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 20.615,00	R\$ 19.206,00	R\$ 18.205,00	R\$ 16.333,00	R\$ 15.559,00
13/05/2012	R\$ 23.650,00	R\$ 21.005,00	R\$ 19.503,00	R\$ 18.647,00	R\$ 16.516,00	R\$ 15.696,00

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 2 – Tabela de valores do bem substituto 1

Opção de substituição 1						
Edição	Valor do Novo	2011	2010	2009	2008	2007
04/09/2011	R\$ 26.450,00					
25/09/2011	R\$ 26.450,00					
09/10/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 23.426,00	R\$ 22.217,00	R\$ 21.663,00	R\$ 20.170,00	R\$ 19.553,00
16/10/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 23.793,00	R\$ 22.000,00	R\$ 21.277,00	R\$ 19.849,00	R\$ 19.071,00
23/10/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 23.399,00	R\$ 21.598,00	R\$ 20.889,00	R\$ 19.526,00	R\$ 18.721,00
06/11/2011		R\$ 23.636,00	R\$ 21.070,00	R\$ 20.525,00	R\$ 19.756,00	R\$ 19.070,00
13/11/2011		R\$ 23.218,00	R\$ 20.677,00	R\$ 20.224,00	R\$ 19.507,00	R\$ 18.703,00
20/11/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 22.878,00	R\$ 20.677,00	R\$ 19.954,00	R\$ 19.086,00	R\$ 18.246,00
27/11/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 23.218,00	R\$ 21.070,00	R\$ 20.426,00	R\$ 19.507,00	R\$ 18.703,00
04/12/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 23.218,00	R\$ 21.070,00	R\$ 20.224,00	R\$ 19.507,00	R\$ 18.703,00
11/12/2011		R\$ 22.738,00	R\$ 20.677,00	R\$ 19.954,00	R\$ 19.222,00	R\$ 18.338,00
25/12/2011	R\$ 26.450,00	R\$ 22.925,00	R\$ 21.000,00	R\$ 20.191,00	R\$ 19.322,00	R\$ 18.307,00
08/01/2012	R\$ 26.715,00	R\$ 22.504,00	R\$ 21.000,00	R\$ 20.381,00	R\$ 19.456,00	R\$ 18.557,00
15/01/2012		R\$ 22.697,00	R\$ 21.000,00	R\$ 20.191,00	R\$ 19.174,00	R\$ 18.135,00
12/02/2012	R\$ 26.715,00	R\$ 22.617,00	R\$ 20.000,00	R\$ 19.298,00	R\$ 18.225,00	R\$ 17.400,00
26/02/2012	R\$ 26.715,00	R\$ 21.500,00	R\$ 19.993,00	R\$ 19.255,00	R\$ 18.246,00	R\$ 17.559,00
11/03/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.500,00	R\$ 19.643,00	R\$ 18.767,00	R\$ 18.074,00	R\$ 17.358,00
25/03/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.500,00	R\$ 19.539,00	R\$ 18.767,00	R\$ 17.753,00	R\$ 16.900,00
01/04/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.500,00	R\$ 19.716,00	R\$ 18.928,00	R\$ 18.074,00	R\$ 17.250,00
15/04/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.250,00	R\$ 19.729,00	R\$ 18.759,00	R\$ 17.848,00	R\$ 16.988,00
29/04/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.250,00	R\$ 19.656,00	R\$ 18.670,00	R\$ 17.430,00	R\$ 16.900,00
06/05/2012	R\$ 26.960,00					
13/05/2012	R\$ 26.960,00	R\$ 21.000,00	R\$ 19.476,00	R\$ 18.354,00	R\$ 17.185,00	R\$ 16.500,00

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 3 – Tabela de valores do bem substituto 2

Opção de Substituição 2						
Edição	Valor do Novo	2011	2010	2009	2008	2007
19/06/2011	R\$ 26.350,00		R\$ 22.017,00	R\$ 20.700,00	R\$ 19.650,00	R\$ 18.667,00
17/07/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.521,00	R\$ 21.560,00	R\$ 20.148,00	R\$ 19.395,00	R\$ 17.956,00
21/08/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.545,00	R\$ 21.118,00	R\$ 20.074,00	R\$ 19.253,00	R\$ 18.276,00
04/09/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.180,00	R\$ 20.947,00	R\$ 19.640,00	R\$ 18.671,00	R\$ 17.827,00
25/09/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.180,00	R\$ 20.947,00	R\$ 19.640,00	R\$ 18.671,00	R\$ 17.827,00
09/10/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.571,00	R\$ 21.128,00	R\$ 20.021,00	R\$ 19.062,00	R\$ 18.189,00
16/10/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.269,00	R\$ 21.003,00	R\$ 19.627,00	R\$ 18.724,00	R\$ 17.976,00
23/10/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.571,00	R\$ 21.128,00	R\$ 20.021,00	R\$ 19.062,00	R\$ 18.275,00
06/11/2011		R\$ 22.226,00	R\$ 20.902,00	R\$ 19.853,00	R\$ 18.703,00	R\$ 18.275,00
13/11/2011		R\$ 22.571,00	R\$ 21.128,00	R\$ 19.662,00	R\$ 18.703,00	R\$ 17.900,00
20/11/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.543,00	R\$ 20.881,00	R\$ 19.800,00	R\$ 19.070,00	R\$ 18.290,00
27/11/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.543,00	R\$ 20.404,00	R\$ 19.265,00	R\$ 18.576,00	R\$ 17.845,00
04/12/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 21.965,00	R\$ 19.935,00	R\$ 18.858,00	R\$ 18.140,00	R\$ 17.464,00
11/12/2011		R\$ 22.314,00	R\$ 20.013,00	R\$ 19.030,00	R\$ 18.340,00	R\$ 17.671,00
25/12/2011	R\$ 26.350,00	R\$ 22.543,00	R\$ 20.013,00	R\$ 18.942,00	R\$ 18.260,00	R\$ 17.671,00
08/01/2012	R\$ 26.350,00	R\$ 22.543,00	R\$ 20.013,00	R\$ 19.030,00	R\$ 18.033,00	R\$ 17.464,00
15/01/2012		R\$ 22.543,00	R\$ 20.013,00	R\$ 19.030,00	R\$ 18.033,00	R\$ 17.260,00
12/02/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 22.317,00	R\$ 20.025,00	R\$ 18.760,00	R\$ 17.623,00	R\$ 16.713,00
26/02/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 22.513,00	R\$ 20.357,00	R\$ 18.961,00	R\$ 17.755,00	R\$ 16.885,00
11/03/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 22.557,00	R\$ 20.094,00	R\$ 19.000,00	R\$ 18.087,00	R\$ 17.097,00
25/03/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 22.220,00	R\$ 19.861,00	R\$ 18.521,00	R\$ 17.510,00	R\$ 16.596,00
01/04/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 21.829,00	R\$ 19.528,00	R\$ 18.011,00	R\$ 17.078,00	R\$ 16.278,00
15/04/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 20.998,00	R\$ 18.988,00	R\$ 18.011,00	R\$ 17.428,00	R\$ 16.808,00
22/04/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 20.998,00	R\$ 18.988,00	R\$ 18.011,00	R\$ 17.428,00	R\$ 16.808,00
29/04/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 21.756,00	R\$ 19.568,00	R\$ 18.481,00	R\$ 17.902,00	R\$ 16.842,00
06/05/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 22.125,00	R\$ 19.921,00	R\$ 18.749,00	R\$ 18.204,00	R\$ 17.212,00
13/05/2012	R\$ 26.008,00	R\$ 21.742,00	R\$ 19.568,00	R\$ 18.451,00	R\$ 17.950,00	R\$ 16.955,00

Fonte: Elaborado pelos autores

2. Fundamentação teórica

Esta seção apresenta a fundamentação teórica que servirá como base para a apresentação e compreensão do tema do trabalho. A primeira subseção aborda os conceitos da engenharia econômica utilizados para o PSE. A segunda subseção mostra os conceitos básicos da pesquisa operacional assim como os modelos matemáticos utilizados para a solução deste tipo de problema.

2.1 Aplicação dos conceitos de engenharia econômica para o PSE

O método do Valor Presente Líquido é um dos mais utilizados na análise de investimentos. O método consiste em calcular o valor presente equivalente de todas as entradas e saídas de capital do fluxo de caixa durante a vida útil estimada do projeto, reduzindo-o do investimento inicial. Os valores do fluxo de caixa são descontados com o passar do tempo em relação a uma taxa de juros chamada de taxa mínima de atratividade (TMA), que é a menor taxa que o investidor considera que está obtendo ganhos financeiros, o cálculo desta taxa está relacionado a vários fatores como o custo de oportunidade (FLEISCHER, 1987). Caso o valor do VPL seja maior do que zero o investimento é dito rentável, uma comparação possível entre dois investimentos diferentes, mas de mesma vida útil, é avaliar qual possui o maior VPL.

Outro método comum da engenharia econômica é a Taxa Interna de Retorno (TIR). Este método calcula qual seria a taxa aplicada no método do VPL que o igualaria a zero. Este método é bastante controverso devido a algumas complicações matemáticas e conceituais (ABENSUR, 2009). Apesar disto a TIR é muito utilizada na análise de investimentos pelos gestores das empresas. A taxa calculada deve ser comparada com a TMA, os investimentos que apresentarem TIR maior do que a TMA são considerados aceitos.

O método do Custo Anual Equivalente (CAE) é muito utilizado na análise de investimentos por possibilitar a comparação de métodos com horizontes de planejamento (HP) diferentes. O CAE consiste em distribuir o VPL da opção em um fluxo de caixa constante e uniforme durante a vida útil do projeto. O CAE pode ser calculado utilizando-se a seguinte equação (SAMANEZ, 2009).

$$CAE = \frac{VPL}{\frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n i}} = VPL \frac{(1+i)^n i}{(1+i)^n - 1} = VPL \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \quad (1)$$

Onde n equivale à duração do investimento e i é a TMA. Com a análise em questão envolve a seleção do projeto de menor custo, seleciona-se o que apresentar o menor valor de CAE.

Fleischer (1987) apresentou uma abordagem para o CAE com algumas alterações, a mais significativa deles é uma diferenciação no cálculo para substituição por bens não idênticos. Partindo do pressuposto de que a alteração por bens idênticos é pouco provável considerando avanços tecnológicos que, possivelmente, acarretam em menores custos operacionais e ganhos de eficiência. Neste modelo compara-se essencialmente a retenção do bem atual com a substituição do bem pelo melhor substituto disponível. O bem atual é chamado de “defensor” e os bens substitutos são chamados de “desafiantes” e as características dos mesmos variam de acordo com os períodos do modelo, em resumo, um desafiante com uma vida útil de n períodos pode ser descrito como n desafiante com um ano de vida útil. Para cada um desses “novos desafiante”, haverá um custo anual equivalente (CAE) e, com isso, haverá um CAE mínimo durante o horizonte de planejamento. Com base nisto, compara-se o CAE mínimo do defensor com o CAE mínimo dos desafiante para a decisão de substituição do bem atual.

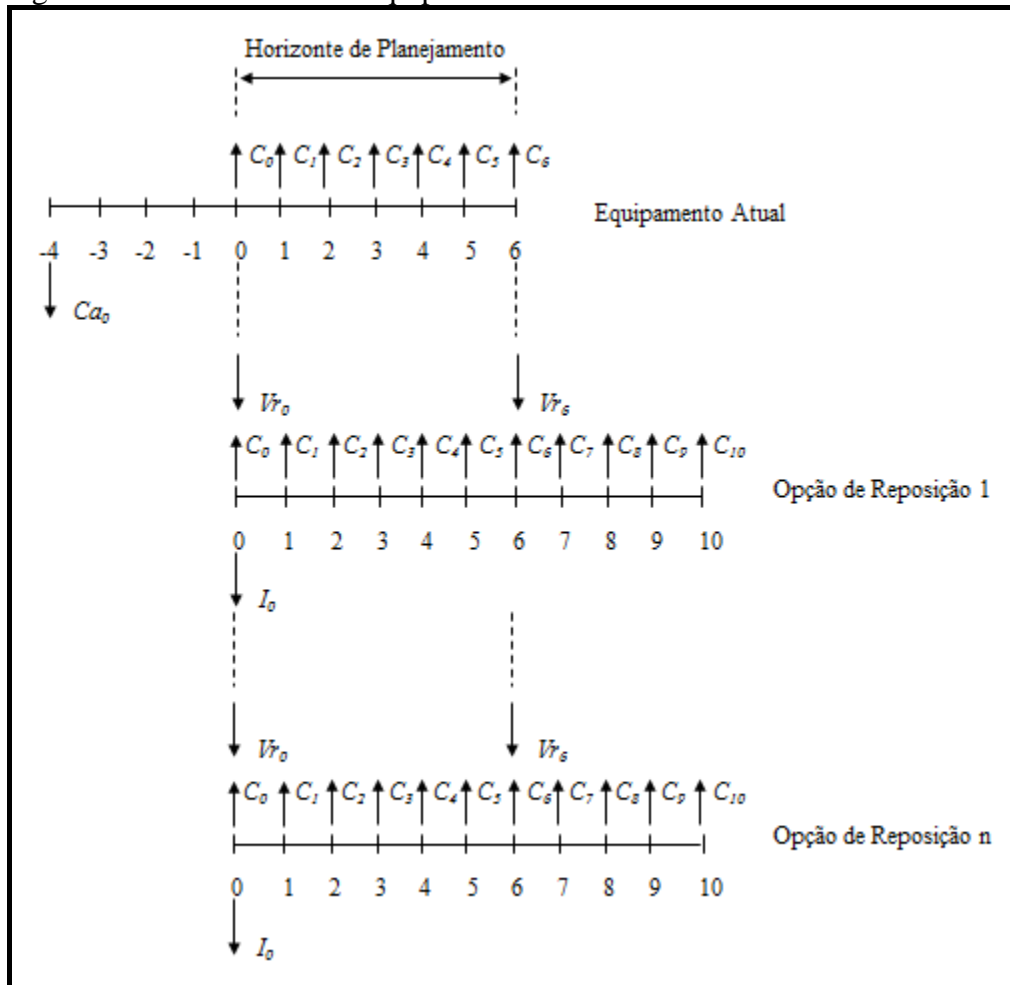
Todos estes métodos são muito conhecidos e utilizados para análise do PSE. Todos eles dependem de vários fatores que serão calculados por quem está tomando a decisão. Ao se comprar um veículo muitas das informações necessárias para a tomada de decisão não são conhecidas. De início, o que é possível saber sobre o bem é seu valor atual, sua idade atual e a sua vida útil, sendo que esse último dado é apenas estimado por técnicas especializadas ou pelo uso de algumas tabelas fiscais de depreciação. O horizonte de planejamento, geralmente, é dado pela vida útil remanescente do bem. Outro dado possível de se estimar logo de início é o custo de oportunidade, tanto da não venda quanto da compra. O custo de oportunidade da compra é o rendimento que o capital utilizado na compra do bem poderia gerar para a organização/pessoa em algum outro tipo de aplicação financeira. Para a análise, muitas vezes esses dados são desconsiderados devido à baixa liquidez de alguns itens, ou seja, a dificuldade de transformar aquele bem em capital monetário novamente (BIEGER; PUDEL, 2010).

Independentemente do método da engenharia econômica utilizado é imprescindível elaborar um fluxo de caixa comparativo entre as opções. A figura 4 apresenta o fluxo de caixa de um bem qualquer atual e de duas possíveis opções de substituição. Para o modelo adotado, considerou-se a existência de um bem atual que ainda possuía uma vida útil assim como um valor residual, proveniente da venda do mesmo (representado por Vr_0). Além disso, considerou-se como horizonte de planejamento do novo veículo, o tempo de vida útil

remanescente do veículo atual. Dentro desse horizonte, existem os custos de operação do bem J no ano I , representado na figura 4 por C_{JI} , sendo C_{J0} o desembolso inicial para aquisição do bem. Além disso, ao final do horizonte de planejamento, considera-se uma entrada no fluxo de caixa representando o valor residual do bem substituto obtido pela venda do mesmo.

A análise da figura 4 é, geralmente, feita separadamente, opção a opção (bem atual versus bem substituto), e após isso verifica-se qual das soluções apresenta melhor resultado, poderiam ser adicionados n equipamentos que o método de solução não se alteraria. Essa é uma das dificuldades desse tipo de análise, a obrigatoriedade de resolver os problemas separadamente. Além disso, este tipo de análise só fornece a resposta de substituir o bem em uso ou não, ela não possibilita, por exemplo, a opção de várias substituições ao longo do horizonte.

Figura 4: Fluxo de caixa do equipamento atual e dos candidatos a substituí-lo



Fonte: Adaptado de Abensur (2010)

2.2 Pesquisa operacional aplicada ao PSE

2.2.1 Programação Dinâmica

A programação dinâmica (PD) é uma técnica muito empregada em problemas multivariáveis passíveis de decomposição em uma sequência de estágios, cada um com sua respectiva decisão, as quais são determinantes na transição do estado corrente para o estado associado ao estágio anterior. Pode-se dizer que a PD é uma técnica matemática útil para fornecer um procedimento sistemático para determinar a combinação de decisões ótimas (HILLIER e LIEBERMAN, 2006).

Para facilitar a compreensão dos termos apresentados, segue uma breve explicação de cada um, além da apresentação de outros auxiliares sob a ótica do PSE:

- a) Horizonte de planejamento: o prazo restante de duração do veículo, durante o qual existe a possibilidade de substituição. Corresponde ao número de estágios;
- b) Estágios: períodos (ano) em que ocorre a necessidade da tomada de decisão sobre a retenção ou substituição do veículo;
- c) Estado: é caracterizado pela substituição ou a retenção do bem em cada estágio;
- d) Transição: representa a mudança de valores das variáveis de um estágio para outro, os custos de retenção ou substituição (c_{ij});
- e) Decisão: é o ato de reter ou substituir o bem em questão;
- f) Política: conjunto das decisões ao longo do horizonte de planejamento.

Ao contrário da programação linear, não existe uma formulação matemática padrão para um problema de programação dinâmica. Para PD é necessário um tipo genérico de metodologia para a resolução do problema e as equações particulares usadas têm de ser desenvolvidas para cada situação (HILLIER e LIEBERMAN, 2006). Abensur (2010) adaptou o modelo desenvolvido por Fisher e Jaikumar (1981), tal formulação pode ser vista a seguir:

Função Objetivo: $\min Z = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n \sum_{i \in A} \sum_{k=1}^n \sum_{k \neq i} \sum_{k \in A} (-c_{jik} x_{jik})$ (Custo mínimo)

c_{ijk} = custo de transição de aresta que sai de i e vai para k , podendo assumir os valores:

$$\{[-C(t)(1-IR) + D_j(IR)](1+r)^j \quad \text{Retenção}\}$$

$$\{[-C(0)+VR_j-VC_j - I_0)(1-IR) + D_j(IR)](1+r)^j \quad \text{Substituição}\}$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ik} = \sum_i x_{ki} = y_i \quad i = 1, \dots, w \quad \text{Restrição da Continuidade} \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_j \sum_s \sum_k x_{sijk} Q_j \geq ds \quad \text{Restrição da demanda} \quad (3)$$

$$\sum_w y_w \leq R \quad \text{Número máximo de trocas} \quad (4)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}$$

$$Y_i \in \{0,1\}$$

Onde:

x_{jik} = arco de i para k usado pelo veículo j

y_j = o nó i faz parte da solução

J = número de veículos analisados

W = número de nós

A = arcos do estágio

M = conjunto de nós de substituição

S = número de estágios

n = número de arcos

Q_j = capacidade do veículo j

d_s = demanda do estágio

R = número máximo de substituições previstas durante o horizonte de planejamento

t = idade do equipamento no início de estágio

I_0 = custo inicial da melhor alternativa

C_j = custo anual operacional no início do estágio

D = cota de depreciação

VC = valor contábil do veículo no início do estágio

VR = valor de mercado do veículo

r = TMA (%aa)

IR = impostos (%)

2.2.2 O problema de roteamento de veículos

O Problema do Roteamento de Veículos (PRV) é um típico exemplo de análise combinatória. Um sistema de roteamento é definido como um conjunto de meios organizados de forma a atender às demandas localizadas nos arcos ou nós de uma rede de transporte (GOLDBARG; LUNA, 2005). O PRV geralmente é um passeio sobre um grafo à procura de pontos. Esses pontos podem ser cidades, depósitos, postos de trabalho, entre outros. Os primeiros estudos sobre o PRV foram feitos no final da década de 50 do século XX por Dantzig e Ramser (1959), formulando uma aplicação do modelo à distribuição de gasolina para estações de venda de combustíveis.

O PRV pode ser representado como um problema da teoria dos grafos. Ele consiste no atendimento de um conjunto de cidades, depósitos ou consumidores por meio de uma frota de veículos, que partem de um ou mais pontos (BALDACCI et al., 2009). Todos os veículos possuem uma capacidade definida, e a soma de todas as demandas atendidas por esse veículo não pode ultrapassar essa capacidade. No modelo utilizado no presente trabalho todos os veículos partirão do mesmo ponto, ou seja, da mesma data inicial de análise. A função

objetivo do PRV depende do tipo de problema que está sendo proposto ao método, porém os mais comuns são minimizar o custo total, o tempo total, a utilização de veículos, equilibrar a utilização dos mesmos, entre outros, durante toda a operação (MARQUES et al., 2005).

Um dos modelos de PRV mais populares foi formulado por Fisher e Jaikumar (1981) e é dado por:

$$\min Z = \sum_{i,j} c_{ij} \sum_{k=1} (-x_{ijk})$$

Sujeito a:

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad \text{Para } i = 2,3,\dots, n-1, n; \quad (5)$$

$$\sum_k y_{ik} = m \quad \text{Para } i = 1; \quad (6)$$

$$\sum_i q_i y_{ik} \leq Q_k \quad \text{Para } k = 1, 2,\dots, m-1, m; \quad (7)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_{i=1} x_{jik} = y_{ik} \quad \text{Para } i = 1,\dots, n-1, n; \text{ e } k = 1,\dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{ij \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq \{2, \dots, n\} \text{ para } k = 1,\dots, m \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{Para } i, j = 1,\dots, n \text{ e } k = 1,\dots, m$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \text{Para } i, j = 1,\dots, n \text{ e } k = 1,\dots, m$$

Onde:

x_{ik} = variável que assume 1 quando o veículo k visita o cliente j depois de ter visitado o cliente i , se não, ela assume valor zero.

y_{ik} = variável que assume 1 se o cliente i é visitado pelo veículo k , senão, assume valor zero.

q_i = demanda do cliente i .

Q_k = capacidade do veículo k .

c_{ij} = custo do arco ij .

S = circuitos legais formados conforme o número de nós.

3. O modelo alternativo de otimização

A origem da formulação do modelo proposto foi apresentada nas seções 2.2.1 e 2.2.2. As principais razões para essa escolha, segundo Abensur (2010), foram: (i) modelo genérico

clássico usado para formulação de muitos outros modelos (LAPORTE et al., 2000); (ii) modelo de programação linear inteira com garantia de solução exata e (iii) permite a inclusão de restrições lógicas mais sofisticadas.

O modelo proposto por Abensur (2010) foi desenvolvido para a solução de um problema basicamente de empresas sob uma ótica de fluxo de caixa incremental (receitas menos custos), por isso, algumas adaptações devem ser feitas para a aplicação às pessoas físicas. A primeira adaptação é a exclusão da depreciação do bem do cálculo dos estados, pois a mesma não existe para o público em questão. Outra adaptação será a exclusão da capacidade dos veículos, pois esse dado não se aplica ao modelo proposto. Além disso, deve-se considerar um possível lucro na venda dos veículos e, caso isso ocorra, deve ser recolhido o IR sobre essa transação. Por fim, serão considerados apenas os custos na análise, pois considera-se que os bens não geram receitas diretas.

Com essas modificações, a formulação genérica utilizada para uma pessoa física pode ser retratada da seguinte forma:

Função Objetivo: $\min Z = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n / i \in A \sum_{k=1}^n / k \neq i / k \in A (-c_{jik} x_{jik})$ (Custo mínimo)

c_{ijk} = custo de transição de aresta que sai de i e vai para k , podendo assumir os valores:

$\{[-C(t) - (r(VRBU_j) + (VRBU_j - VRBU_0))] (1 + r)^j$ Retenção}

$\{[-C(0) - ((VRBS_j - VRBU_j) + (VRBU_j - VRBU_0))] (1 + r)^j$ Substituição}

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ik} = \sum_i x_{ki} = y_i \quad i = 1, \dots, w \quad \text{Restrição da Continuidade} \quad (10)$$

$$\sum_{w=1/w \in \{M\}}^w y_w \leq R \quad \text{Número máximo de trocas} \quad (11)$$

$$x_{ik} \in \{0,1\}$$

$$Y_i \in \{0,1\}$$

Onde:

x_{ik} = arco de i para k

y_i = o nó i faz parte da solução

J = número de veículos analisados

W = número de nós

A = arcos do estágio

M = conjunto de nós de substituição

S = número de estágios

n = número de arcos

t = idade do equipamento no início de estágio

C_j = custo anual operacional no início do estágio

$VRBU$ = valor residual do veículo em uso no início do estágio

$VRBU_0$ = valor de aquisição do veículo em uso

$VRBS$ = valor residual do bem substituto no início do estágio

$VRBU_0$ = valor de aquisição do veículo substituto

r = TMA (%aa), que será representada como sendo o rendimento da poupança antiga no início dos trabalhos (6% a.a.)

IR = imposto sobre o lucro da venda (15 %) quando houver.

O IR incidente sobre o lucro na venda de bens só será considerada caso o valor da operação ultrapasse R\$ 35.000,00, já que valores inferiores a esse são considerados bens de pequeno porte isentos de IR. Como se pode observar pelas figuras 1, 2 e 3 não há nenhum bem que ultrapasse esse valor na venda, com isso, o valor do IR pode ser desconsiderado, mas será mantido no modelo atual para facilitar a utilização em diferentes cenários futuros.

Como a rede do problema avança de forma cronológica, não há possibilidade de cairmos em circuitos fechados, facilitando a elaboração do modelo.

Para permitir a comparação com o método CAE, será feita uma abordagem de engenharia com foco em custos, partindo do pressuposto que a minimização dos custos resulta na maximização do resultado.

Os custos considerados serão todos os custos diretos, tanto os econômicos quanto os contábeis. Sendo que os custos econômicos são os relacionados aos custos de capital e de oportunidade, os custos contábeis envolvem todos os gastos operacionais.

Foi elaborada uma pesquisa de mercado para determinar os custos operacionais. O consumo de combustível médio adotado foi o presente nos manuais dos fabricantes dos veículos, foi considerada uma distância percorrida de 10.000km por ano e o valor do litro do combustível

de R\$ 2,50. Nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, 7 e 8, estes custos estão devidamente expressos.

4. Resultados

A figura 5 apresenta um fragmento da planilha de otimização informando que a política ótima seria a substituição imediata do bem atual pelo bem substituto 1 e, após isso, mantê-lo até o final do horizonte de planejamento. O custo total da política é de R\$ 30632.

A figura 6 a seguir mostra os resultados da aplicação do CAE comparando os bens 2 a 2. Também há recomendação de substituição imediata do bem em uso pelo bem substituto 1. A escolha foi feita com base nos valores de CAE mínimo de cada uma das opções de substituição comparada com o bem em uso.

Figura 5 – Planilha de resultados da situação analisada

		POLÍTICA ÓTIMA										
Ano		0	1	2	3	4						
Decisão		S1	R	R	R	R						
VARIÁVEIS		Custo da						RESTRITÕES			FOBJETIVO	
Estágio	Bem	Origem	Destino	Decisão	Decisão	Variável	Valor	Descrição	Vértice	Equação	Valor	
0	Atual	1	2	R	-10.349	X1	0,00	Arcos que chegam ao nó	1	0		
0	Atual	1	3	S1	-9.489	X2	1,00	Arcos que saem do nó	1	1	1,00	
0	Atual	1	4	S2	-13.745	X3	0,00	Arcos que chegam ao nó	2	0	0,00	
1	Atual	2	5	R	-7.281	X4	0,00	Arcos que saem do nó	2	0	0,00	
1	Atual	2	6	S1	-8.670	X5	0,00	Arcos que chegam ao nó	3	1	1,00	
1	Atual	2	7	S2	-8.468	X6	0,00	Arcos que saem do nó	3	1	1,00	
1	S1	3	8	R	-5.982	X7	1,00	Arcos que chegam ao nó	4	0	0,00	
1	S1	3	7	S2	-12.903	X8	0,00	Arcos que saem do nó	4	0	0,00	
1	S2	4	9	R	-7.445	X9	0,00	Arcos que chegam ao nó	5	0	0,00	
1	S2	4	6	S1	-8.426	X10	0,00	Arcos que saem do nó	5	0	0,00	
2	Atual	5	10	R	-5.818	X11	0,00	Arcos que chegam ao nó	6	0	0,00	
2	Atual	5	11	S1	-8.493	X12	0,00	Arcos que saem do nó	6	0	0,00	
2	Atual	5	12	S2	-13.250	X13	0,00	Arcos que chegam ao nó	7	0	0,00	
2	S1	6	13	R	-5.644	X14	0,00	Arcos que saem do nó	7	0	0,00	
2	S1	6	12	S2	-12.172	X15	0,00	Arcos que chegam ao nó	8	1	1,00	
2	S2	7	14	R	-7.023	X16	0,00	Arcos que saem do nó	8	1	1,00	
2	S2	7	11	S1	-5.596	X17	0,00	Arcos que chegam ao nó	9	0	0,00	
2	S1	8	15	R	-4.866	X18	1,00	Arcos que saem do nó	9	0	0,00	
2	S1	8	12	S2	-12482	X19	0,00	Arcos que chegam ao nó	10	0	0,00	
2	S2	9	16	R	-5.685	X20	0,00	Arcos que saem do nó	10	0	0,00	
2	S2	9	11	S1	-5.360	X21	0,00	Arcos que chegam ao nó	11	0	0,00	
3	Atual	10	17	R	-8.066	X22	0,00	Arcos que saem do nó	11	0	0,00	
3	Atual	10	18	S1	-8436	X23	0,00	Arcos que chegam ao nó	12	0	0,00	
3	Atual	10	19	S2	-13.502	X24	0,00	Arcos que saem do nó	12	0	0,00	
3	S1	11	20	R	-5324	X25	0,00	Arcos que chegam ao nó	13	0	0,00	
3	S1	11	19	S2	-11.483	X26	0,00	Arcos que saem do nó	13	0	0,00	
3	S2	12	21	R	-6626	X27	0,00	Arcos que chegam ao nó	14	0	0,00	
3	S2	12	18	S1	-7.499	X28	0,00	Arcos que saem do nó	14	0	0,00	
3	S1	13	22	R	-4.591	X29	0,00	Arcos que chegam ao nó	15	1	1,00	
3	S1	13	19	S2	-11.776	X30	0,00	Arcos que saem do nó	15	1	1,00	
3	S2	14	23	R	-5.363	X31	0,00	Arcos que chegam ao nó	16	0	0,00	
3	S2	14	18	S1	-7.277	X32	0,00	Arcos que saem do nó	16	0	0,00	
3	S1	15	24	R	-5219	X33	1,00	Arcos que chegam ao nó	17	0	0,00	
3	S1	15	19	S2	-13.374	X34	0,00	Arcos que saem do nó	17	0	0,00	
3	S2	16	25	R	-5838	X35	0,00	Arcos que chegam ao nó	18	0	0,00	
3	S2	16	18	S1	-8.235	X36	0,00	Arcos que saem do nó	18	0	0,00	

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 6 – Análise da substituição pelo CAE

Vida Econômica do Bem Substituto 1 =	5	CAUE min = 6.850				
Ano		1	2	3	4	5
Valor de aquisição (a)	23.494					
TMA (% aa)	6,0%					
IR	0%					
Redução anual (%)		16%	7%	5%	3%	3%
Valor residual		20.850	19.370	18.456	17.047	16.086
Custo de capital (a)		2.644	1.480	914	1.408	961
Custos operacionais		3.817	3.699	3.446	3.784	4.482
VP Custos operacionais		3.817	3.490	3.067	3.177	3.550
VP Acumulado Custos operacionais (b)		3.817	7.307	10.374	13.550	17.100
Custo de oportunidade (c)		1.251	1.162	1.107	1.023	965
Depreciação		4.699	4.699	4.699	4.699	4.699
IR depreciação (ganho) (d)		0	0	0	0	0
IR custos operacionais (ganho) (e)	1	0	0	0	0	0
Depreciação acumulada		4.699	9.398	14.096	18.795	23.494
Lucro Contábil		2.055	5.274	9.058	12.349	16.086
IR Lucro Contábil (f)		0	0	0	0	0
FCI (g = a+c-d-e+f)		3.895	2.642	2.022	2.431	1.926
VP do FCI (h)		3.895	2.493	1.799	2.041	1.526
VP FCI acumulado		3.895	6.388	8.187	10.228	11.754
VP FCI acumulado (b + h)		7.712	13.695	18.561	23.779	28.854
CAUE		8.175	7.469	6.944	6.862	6.850

Vida Econômica do bem em uso =	5	CAUE
Ano		1
Valor de aquisição (a)	26.272	
TMA (% aa)	6,0%	
IR	0%	
Redução anual (%)		16%
Valor residual		22.000
Custo de capital (a)		4.222
Custos operacionais		4.800
VP Custos operacionais		4.800
VP Acumulado Custos operacionais (b)		4.800
Custo de oportunidade (c)		1.322
Depreciação		5.250
IR depreciação (ganho) (d)		0
IR custos operacionais (ganho) (e)	1	0
Depreciação acumulada		5.250
Lucro Contábil		1.030
IR Lucro Contábil (f)		0
FCI (g = a+c-d-e+f)		5.542
VP do FCI (h)		5.542
VP FCI acumulado		5.542
VP FCI acumulado (b + h)		10.384
CAUE		10.900

Vida Econômica do Bem Substituto 2 =	5	CAUE min = 8.397				
Ano		1	2	3	4	5
Valor de aquisição (a)	26.575					
TMA (% aa)	6,0%					
IR	0%					
Redução anual (%)		16%	7%	5%	3%	3%
pneus						526
bateria					300	
combustível	10,0	2.500	2.500	2.500	2.500	2.500
VP Custos operacionais		4.992	4.542	3.935	4.093	4.149
VP Acumulado Custos operacionais (b)		4.992	9.534	13.469	17.562	21.712
Custo de oportunidade (c)		1.326	1.215	1.167	1.108	1.061
Depreciação		5.315	5.315	5.315	5.315	5.315
IR depreciação (ganho) (d)		0	0	0	0	0
IR custos operacionais (ganho) (e)	1	0	0	0	0	0
Depreciação acumulada		5.315	10.630	15.945	21.260	26.575
Lucro Contábil		845	4.297	8.813	13.158	17.683
IR Lucro Contábil (f)		0	0	0	0	0
FCI (g = a+c-d-e+f)		5.796	3.077	1.965	2.079	1.850
VP do FCI (h)		5.796	2.903	1.749	1.746	1.466
VP FCI acumulado		5.796	8.699	10.449	12.194	13.660
VP FCI acumulado (b + h)		10.788	18.233	23.918	29.756	35.371
CAUE		11.435	9.945	8.948	8.587	8.397

Vida Econômica do bem em uso =	5	CAUE
Ano		1
Valor de aquisição (a)	26.272	
TMA (% aa)	6,0%	
IR	0%	
Redução anual (%)		16%
pneus		
bateria		
combustível	10,7	2.330
VP Custos operacionais		4.800
VP Acumulado Custos operacionais (b)		4.800
Custo de oportunidade (c)		1.322
Depreciação		5.250
IR depreciação (ganho) (d)		0
IR custos operacionais (ganho) (e)	1	0
Depreciação acumulada		5.250
Lucro Contábil		1.030
IR Lucro Contábil (f)		0
FCI (g = a+c-d-e+f)		5.542
VP do FCI (h)		5.542
VP FCI acumulado		5.542
VP FCI acumulado (b + h)		10.384
CAUE		10.900

Fonte: Elaborado pelos autores

6. Conclusões

A utilização de metodologias alternativas para abordar problemas comuns à engenharia é interessante, pois estimula novas linhas de pesquisa que possivelmente resultam no desenvolvimento de técnicas mais robustas, confiáveis, ágeis e flexíveis. Neste sentido, o presente trabalho se mostra relevante, já que demonstra que a técnica aplicada apresentou resultados muito satisfatórios se comparada a metodologias clássicas já consolidadas tanto no meio empresarial quanto no meio acadêmico. Algumas vantagens da utilização do modelo de otimização do PSE em relação às técnicas clássicas da engenharia econômica podem ser destacadas, tais como: (i) flexibilidade tanto para alterações no cenário quanto para correções do modelo; (ii) avalia todas as combinações possíveis de substituições dentro do horizonte de planejamento; (iii) possibilidade de avaliar múltiplos substitutos em múltiplos anos e (iv) independe do comportamento de custos ao contrário do método CAE.

Referências

ABENSUR, E. O. **Finanças Corporativas: Fundamentos, Práticas Brasileiras e Aplicações em Planilha Eletrônica e Calculadora Financeira**. São Paulo: Scortecci, 2009.

_____. Um modelo alternativo de otimização para a política de substituição de equipamentos. **Sinergia**, v. 11, n. 2, p.140-150, 2010.

BALDACCI, R.; BARTOLINI, E; LAPORTE, G. Some applications of the generalized vehicle routing problem. **Journal of the Operational Research Society**, v.51, p 1-6, 2009.

BIEGER, M.; PUDEL, V. Análise de decisão de investimento: Um estudo de caso em indústrias do setor metal mecânico de médio porte da região da grande Santa Rosa do Rio Grande do Sul. In: **VII Congresso Virtual Brasileiro de Administração**. 2010. Disponível em: <http://www.convibra.com.br/upload/paper/adm/adm_1271.pdf> Acessado em 24 de abril 2012.

CLASSIFICADOS DE AUTOS. **O Estado de S. Paulo**. São Paulo, 1 jan, 2013. Suplemento.

CONTADOR, J. et al. **Gestão de Operações: A engenharia de produção a serviço da modernização da empresa**. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

DANTZIG, G. B., RAMSER, R. H.; The Truck Dispatching Problem. **Management Science**. v. 6, p. 80, 1959.

FISHER, M; JAIKUMAR, R; Generalized assignment heuristic for vehicle routing. **Networks**, v. 11, p. 109-124, 1981.

FLEISCHER, G. A. **Teoria da aplicação do capital: um estudo das decisões de investimento**. São Paulo. Edgard Blucher, 1987.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

LAPORTE, G. Fifty Years of Vehicle Routing. *Transportation Science*, v.43, n.4, p. 408-416, 2009.

MARQUES, G. M. et al. Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5 p. 749-756, 2005.

MORABITO, R. Pesquisa Operacional. In: BATALHA, M. O. et al (Org.). **Introdução à Engenharia de Produção**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

SAMANEZ, C. P. **Engenharia Econômica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.