

GLÁUCIO MARCELINO MARQUES

**TRANSFORMAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS
UTILIZANDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS E PROGRAMAÇÃO
DINÂMICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

GLÁUCIO MARCELINO MARQUES

**TRANSFORMAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS
UTILIZANDO EQUAÇÕES DIFERENCIAIS E PROGRAMAÇÃO
DINÂMICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de julho de 2003

Prof. Helio Garcia Leite
(Conselheiro)

Prof. Sebastião Renato Valverde
(Conselheiro)

Prof. Laércio Antonio Gonçalves
Jacovine

Prof. Flávio Lopes Rodrigues

Prof. Márcio Lopes da Silva
(Orientador)

A Deus.

À minha amada esposa, Iscyomara.

Aos meus filhos, Júlia e Mateus.

À minha mãe e ao meu pai.

Aos meus irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Márcio Lopes da Silva, que, além de professor e orientador, acabou se transformando em um amigo.

Aos conselheiros Hélio Garcia Leite e Sebastião Renato Valverde, pela paciência, pelos conselhos muitas vezes decisivos e pela amizade conseguida no decorrer da caminhada.

À minha família: minha mãe Adelaide, meu pai Bené, meus irmãos Gleice, Gleimir, Claudia, Cleimar, Binho, Nayara e Nathália, meus grandes incentivadores e amigos. Em especial, à minha nova família, minha esposa Iscyomara e meus filhos Júlia e Mateus, que sempre estiveram de mãos dadas comigo nesse processo.

Ao amigo Laércio Jacovine e à sua esposa Madalena, pelas confraternizações realizadas em sua casa.

Ao amigo Carlos Machado, pelas oportunas viagens técnicas, em que sempre sobrava uma vaga para mim.

Aos meus amigos Ciro, Gabriel, Alessandro, Marcinho e Josuel, pelo apoio e pela amizade desinteressada no decorrer do caminho.

A Frederico e Ritinha, que sempre estiveram prontos para esclarecer minhas dúvidas.

Aos meus amigos e vizinhos da rua Nossa Senhora das Graças, pela calorosa acolhida quando aqui cheguei.

Ao meu sogro e à minha sogra, que me deram muito apoio durante a caminhada.

Aos meus cunhados, que nunca deixaram de acreditar em meu potencial.

Aos meus tios e primos, pela força presente a todo instante.

Aos meus sobrinhos Ana Beatriz, Gabriel e João Gabriel, pelo constante sorriso proporcionado por suas presenças.

Ao Departamento de Engenharia florestal, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa, sem a qual o meu objetivo não seria alcançado.

Ao meu PAI CELESTIAL, que sempre me deu força para crer que para realizarmos um sonho é preciso, sobretudo, darmos as mãos e seguirmos juntos durante toda a caminhada.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Principais Métodos Utilizados na Transformação, Reforma e Substituição de Equipamentos	7
2.1.1. Método do Custo Médio Total – CMT	7
2.1.2. Método do Custo Anual Equivalente – CAE	8
2.1.3. Uso de Equações Diferenciais	8
2.1.4. Programação Dinâmica - (PD)	8
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	11
USO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO MOMENTO ÓTIMO DA TRANSFORMAÇÃO DE VEÍCULOS	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	16
2.1. O Modelo	16
2.2. Estudo de Caso	17
2.3. Comparação das Alternativas	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1. O Modelo Proposto	19
3.2. Análise de Sensibilidade	28
4. CONCLUSÕES	30
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS	32
1. INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	35
2.1. Modelo de Programação Dinâmica para Substituição de Equipamentos Minimizando Custo	35
2.2. Modelo com Programação Dinâmica Incluindo Receita do Equipamento.....	37
2.3. Estudo de Caso	38
2.4. Pós-otimização.....	38
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
3.1. Aplicação dos Modelos.....	39
3.2. Pós-otimização.....	42
4. CONCLUSÕES	44
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
3. RESUMO E CONCLUSÕES	47

RESUMO

MARQUES, Gláucio Marcelino, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2003. **Transformação e substituição de equipamentos utilizando equações diferenciais e programação dinâmica.** Orientador: Márcio Lopes da Silva
Conselheiros: Helio Garcia Leite e Sebastião Renato Valverde.

Este trabalho teve como objetivo apresentar dois estudos: um relacionado com a transformação de um veículo transportador de madeira e o outro com a substituição de equipamentos e máquinas. No primeiro foi utilizado um modelo matemático constituído por equações diferenciais para a determinação do momento ótimo de transformação de um veículo transportador florestal que passaria por duas transformações durante sua vida útil. A importância deste estudo deve-se a uma situação que vem sendo verificada no setor de transporte rodoviário, em que veículos estão sendo transformados e continuam trabalhando em outro ramo de atividade, porém a decisão quanto ao momento ótimo de se fazer tais transformações tem sido tomada de forma arbitrária, sem preocupação com a viabilidade econômica. Para tanto desenvolveu-se um modelo utilizando equações diferenciais que possibilitou a definição dos momentos ótimos das transformações de uma carreta (cavalo mecânico + semi-reboque de três eixos), em caminhão *truck* (6x4) e posteriormente em caminhão toco (4x2), que seria

retirado do processo. Os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que, ao se comparar o método do ciclo terminal com o método proposto, observou-se um valor anual equivalente de R\$4.084,06 para uma carreta que seria utilizada por nove anos e seria substituída e um valor anual equivalente de R\$10.555,04 para o sistema de transformação com duração de 31 anos. A metodologia proposta se mostrou eficiente para dar suporte à tomada de decisão no que se refere aos veículos de transporte pesado, que representam um importante ativo nas empresas do ramo florestal. É possível maximizar o lucro do conjunto de versões utilizadas: carreta, *truck* e toco. No segundo estudo utilizou-se um modelo de programação dinâmica para avaliar a substituição de equipamentos. O problema foi avaliado através de um estudo de caso, com um horizonte de planejamento de dez anos. Foram considerados dois modelos utilizando programação dinâmica: em um deles a função objetivo foi de minimização dos custos e, no outro, de maximização dos lucros, no qual foi inserida a receita gerada pelo equipamento. Desse modo, foi possível definir o momento ótimo de substituição do equipamento e a decisão mais lucrativa dentro do horizonte de planejamento, o que foi observado por meio de uma “árvore de decisão” confeccionada a partir dos resultados obtidos na resolução. O modelo com receita utilizado no segundo trabalho é mais indicado para situações em que o equipamento gera receitas diretas, como no caso de aluguel ou frete do equipamento; outrossim, aquele que inclui apenas os custos é mais indicado para situações em que o equipamento é utilizado sem se preocupar com a geração de receitas anuais. Por meio de uma análise de sensibilidade, notou-se que, na situação em que não se inclui a receita, a decisão é mais afetada pela variação da taxa de juros utilizada. Portanto, chama-se a atenção nesses modelos para a escolha da taxa de juros, que deve ser criteriosa, pois ela afeta a rentabilidade do investimento, e também para o fato de processo de substituição apresentar coerência com a realidade do problema.

ABSTRACT

MARQUES, Gláucio Marcelino, M.S., Universidade Federal de Viçosa, July 2003. **Transformation and replacement of equipment using differential equations and dynamic programming.** Adviser: Márcio Lopes da Silva. Committee Members: Helio Garcia Leite and Sebastião Renato Valverde.

The objective of this work was to present two studies: one related to the transformation of a wood transport vehicle and the other related to the replacement of equipment and machines. In the first study a mathematic model composed by differential equations was used to determine the optimal time of transportation of a forest transport vehicle which would go through two transformations during its useful lifetime. The importance of this study is based on the circumstances observed in the road transport sector, in which vehicles are transformed into other uses but the decision of the optimal time to make the transformation has been done under arbitrary conditions, with no concern as to the economic feasibility. To overcome this a model using differential equations was developed to enable the definition of optimal times for the transformations of a cart (mechanic horse + semitrailer with three axes), into a truck (6x4), and later into a two-wheeled cart without springs (4x2) which would be removed of the process. The results obtained were satisfactory because by comparing the

terminal cycle method, with the proposed method an annual value equivalent to R\$4,084.06 was observed for a cart used during nine years and then replaced and an annual value equivalent to R\$10,555.04 for the transformation system for a 31 year duration. The proposed methodology showed to be efficient to support the decision making related to heavy transport vehicles, which are important assets in forest enterprises. It is possible to maximize the profit of the set of versions if they are cart, truck and two-wheeled cart without springs. In the second study a dynamic programming model was used to evaluate the equipment replacement. The problem was evaluated through a case study for a ten years plan. Two models using dynamic programming were evaluated and in one of the models the objective was to minimize costs and in the other one the objective was to maximize profits, in which the incomes generated by the equipment were used. Through these models it was possible to define the optimal time for the equipment replacement and the most profitable decision within the ten years plan. This was observed through a “decision tree” based on the results obtained from the decision. The model with incomes used in the second work is best recommended for situations where the equipment generates direct incomes, as is the case of equipment rent or freight. The other one which includes only the costs is but recommended where the equipment is used without concern of generating annual income. Through a sensibility analysis, it was observed that in the situation where the income is not included, the decision is most affected by the variation of the interest rates used. Therefore, in this models attention must be paid to a very careful interest rate choice, because it affects investment rentability and also so that the replacement process shows coherence with reality of the problem.

1. INTRODUÇÃO

A crise econômica e financeira que o Brasil tem enfrentado nos últimos anos vem penalizando vários setores da economia nacional, especificamente o setor produtivo, no qual se tem verificado aumento nos custos de produção devido à grande carga tributária e às altas taxas de juros, um grande aumento na competitividade por serviços e produtos, desencadeado nos últimos anos por causa da onda de globalização e da conseqüente diminuição da margem de lucro, uma vez que, aumentando os custos e a competitividade do mercado, ocorre a necessidade de baixar os preços para continuar operando, entre outros efeitos danosos.

As indústrias de bases florestais, assim como as de outros setores, têm sofrido essas pressões do mercado. Para enfatizar a importância deste setor, ressalta-se que a indústria de produtos florestais representa aproximadamente cerca de 3% do produto econômico bruto mundial (Best e Jenkins, 1999). No Brasil, o setor florestal representa cerca de 4% do produto interno bruto de 21 bilhões de dólares, sendo responsável por 10% do valor das exportações em 2001, totalizando 5,4 bilhões de dólares, gerando 2 milhões de empregos diretos e indiretos (florestas plantadas e nativas) e recolhendo 2 bilhões de dólares em impostos (SBS, 2002).

As empresas que atuam no setor florestal brasileiro têm investido pesado em aquisição de máquinas e equipamentos de alta tecnologia, o que tem aumentado a produtividade e garantido a qualidade do produto final nos mercados interno e externo. Atualmente esses equipamentos, muitas vezes, são submetidos a condições adversas, trabalhando em geral dois a três turnos, levando a um processo de depreciação mais acentuado. Em razão do desgaste no decorrer de sua vida útil, o equipamento sofre redução significativa na sua capacidade técnica de produção, tornando-se inviável economicamente; assim, ele deverá ser substituído por outro que ofereça uma produtividade mais interessante. Neste caso, pode-se substituir o equipamento por completo ou apenas os componentes que se desgastaram ou apresentaram falhas de funcionamento.

Há ainda uma outra alternativa que tem sido adotada por algumas empresas: a transformação do equipamento, adaptando-o para outro serviço, ou, ainda, submetendo-o a uma reforma completa, com o intuito de torná-lo mais eficiente e aumentar sua vida útil. Salienta-se que, ao se fazer a transformação, conseqüentemente ocorrerão algumas mudanças, como redução na capacidade de carga, mudança no tipo de atividade e menor rendimento do transporte. Em contrapartida, a transformação traria benefícios, visto que o caminhão é mais ágil em curtas viagens e cargas rápidas, consome menos combustível, apresenta custo operacional menor, sendo estas algumas das vantagens de se fazer a transformação.

As decisões de efetuar essas operações são tomadas de forma arbitrária, ou seja, não se conhece até o presente momento nenhum estudo técnico ou econômico para verificar a viabilidade da transformação. Uma questão importante a ser resolvida pelas empresas é decidir o melhor momento de realizar essas mudanças no processo, visando maximizar lucros sem prejudicar a produção e qualidade do serviço.

Em virtude dessas situações, é de grande importância a determinação da vida útil econômica desses equipamentos, para que sua transformação, reforma ou substituição sejam feitas no momento certo.

A determinação desse momento é de extrema importância, uma vez que tanto uma substituição ou transformação tardia ou prematura causam resultados técnicos e econômicos indesejáveis.

Vários métodos têm sido utilizados para análise de substituição de máquinas e equipamentos, dentre os quais citam-se: método do Custo Médio Total (CMT), método do Custo Anual Equivalente (CAE), uso de equações diferenciais, retirada na sua forma pura (ciclo terminal), substituição parcial e retirada, cadeia de substituição e uso da programação dinâmica.

Este trabalho versa sobre transformação e substituição de equipamentos e apresenta dois artigos. O primeiro teve como objetivo desenvolver um modelo matemático com o uso de equações diferenciais para definir o momento ótimo de se fazer a transformação de um equipamento utilizado no transporte de madeira. O propósito do segundo artigo foi de comparar um modelo de programação dinâmica para determinação do momento ótimo de substituição de equipamentos com variações na sua função objetivo (maximização de lucros e minimização de custos), a fim de proporcionar ao planejador florestal subsídios relativos à inversão de capital em novos equipamentos ao longo do horizonte de planejamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O problema de substituição de ativos não é tão simples quanto, em princípio, se imagina; há conseqüências tanto na substituição prematura quanto na tardia. Numa substituição prematura o proprietário pode se desfazer de um bem antes do período de recuperação do capital e, numa tardia, esse bem pode se descapitalizar, em virtude de elevados custos operacionais e de manutenção, além do reduzido valor de revenda do equipamento. Dessa forma, é importante conhecer o momento ótimo de substituição de um ativo (máquinas e equipamentos) (Valverde e Rezende, 1997).

Segundo Gupta e Cozzolino (1974), a mais simples estrutura de substituição de um equipamento é caracterizada quando o processo de deterioração é conhecido e representado por um aumento de custo operacional, com possível diminuição do valor de revenda da máquina e com sua capacidade de trabalho constante ou decrescente com o tempo.

De acordo com Filgueiras (1997), o problema de substituição de uma máquina surge, geralmente, em decorrência do processo de deterioração do equipamento com o decorrer do tempo. Como conseqüência natural desse processo, a capacidade de trabalho da máquina decresce, enquanto seus custos operacionais se tornam crescentes.

O caso em que as unidades se desgastam é típico dos equipamentos cuja eficiência decresce gradativamente com o tempo e, ou, com o uso, provocando aumento nos custos operacionais e de manutenção, além de prejudicar a qualidade do serviço realizado e diminuir a eficiência produtiva (Hirschfeld, 1992).

Segundo Massé (1962), ao se tratar de equipamentos e máquinas, a substituição normalmente é efetuada quando o equipamento inicia um processo de incapacidade de realização das funções para as quais foi construído ou designado. Entretanto, um equipamento pode ser substituído, estando ele em condições de desempenhar suas funções, por outro mais moderno e funcional; esta substituição ocorre em virtude do avanço tecnológico e visa a redução dos custos operacionais e aumento de eficiência e qualidade do produto ou serviço (Grant, 1960; Jelen, 1970).

Teoricamente, a análise econômica do processo de substituição de equipamentos consiste na determinação do momento ótimo de se proceder à substituição e, no sentido prático, de determinar se a redução dos custos decorrentes do processo compensa o investimento que se faz necessário.

O aumento nos custos operacionais de um equipamento é um fator determinante de sua substituição.

Grant (1960) listou algumas causas de substituição de equipamentos, entre elas: melhores alternativas, mudanças nos requerimentos dos serviços e nos próprios equipamentos, mudança na legislação e casualidades.

Nos estudos de substituição de equipamentos, alguns aspectos específicos se configuram como de grande importância para a análise, sendo o de maior relevância a determinação da vida útil e os valores de aquisição e residual dos sistemas envolvidos.

De acordo com Churchman et al. (1976), dependendo do padrão de vida do equipamento, o processo de substituição se divide em duas situações:

- equipamentos que se deterioram ou se tornam obsoletos em decorrência do uso ou da introdução de novos modelos mais eficientes; e
- equipamentos que não se deterioram, porém estão sujeitos a falhas, o que origina a sua substituição. Ainda, segundo os autores, o problema consiste no

balanço de custo do novo equipamento em relação aos custos operacionais do velho, quando se trata de itens que perdem a eficiência ou que se deterioram com o tempo.

Ao se decidir pela substituição de um equipamento, existirão, certamente, considerações econômicas envolvidas (Szonyi et al., 1982).

Para se determinar o tempo de substituição é preciso definir e conhecer parâmetros como: horizonte de planejamento, eventos futuros, custos operacionais, depreciação, taxa de juros, utilização correta do ativo, programas de manutenção e reparos e critérios econômicos a serem usados. Assim, um problema de substituição envolve um conjunto de regras e princípios econômicos que indicam se deve manter ou substituir um equipamento. Equipamentos são substituídos quando se desgastam ou se destroem. No caso em que as unidades se destroem, pode-se decidir entre efetuar a substituição apenas dos componentes que falham, na ocasião das falhas, ou substituir todo o grupo em intervalos regulares (Valverde e Rezende, 1997).

No setor florestal, nota-se que a maioria dos equipamentos apresenta custos de aquisição elevados, daí a necessidade de eles operarem em jornadas mais extensas de uso intensivo, com o objetivo de reduzir os custos fixos e, conseqüentemente, o custo/hora da máquina. Além disso, as condições de trabalho às quais as máquinas são submetidas, na implantação das florestas e na colheita, de modo geral, são bem adversas, gerando elevados custos de reparos, manutenção e concertos (Silva e Miranda, 2002).

As empresas florestais, por sua vez, têm se preocupado mais com estudos relacionados à viabilidade das operações manuais, semimecanizadas e/ou mecanizadas. Estudos também têm sido desenvolvidos sobre a viabilidade da terceirização das atividades mecanizadas. Entretanto, pouca ênfase tem sido dada às questões de substituição de máquinas e equipamentos.

Nas últimas décadas houve a introdução de modernas técnicas de mecanização, principalmente no que diz respeito à colheita florestal. Grandes empresas começaram a utilizar, experimentalmente, máquinas novas e mais adaptadas aos serviços florestais. Atualmente as máquinas já estão operando em

plena capacidade e já passaram pelas adaptações básicas (Jacovine et al., 1997). Desse modo, várias empresas do segmento florestal estão aumentando seu plantel de máquinas. Assim, estudos sobre substituição de máquinas e equipamentos são fundamentais na tomada de decisão na área florestal.

Uma das situações que merece ser investigada é a transformação de caminhões e outros equipamentos florestais, como, por exemplo, a transformação de uma carreta (cavalo mecânico 4x2 + semi-reboque de três eixos) em caminhão *truck* (6x4) e posteriormente em caminhão toco (4x2), que seria o equipamento terminal. Esse procedimento tem sido utilizado em muitas empresas de transporte, inclusive pequenas e médias empresas do setor florestal, que em sua maioria são empresas empreiteiras nesse setor. No entanto, até o momento não se tem conhecimento de estudos em que se analisa a viabilidade econômica desse processo, ou seja, a transformação do veículo ou equipamento tem se tornado uma prática comum, bem como as reformas destes. Estudos econômicos que investigam tais práticas não são realizados considerando uma análise de projetos em horizontes diferentes; essas mudanças são feitas na maioria das vezes de forma empírica. Massé (1962) apresentou um modelo denominado substituição parcial, no qual considera que a receita do equipamento após a reforma continua a mesma, o que nem sempre ocorre na prática, sendo esta uma das limitações do modelo.

2.1. Principais Métodos Utilizados na Transformação, Reforma e Substituição de Equipamentos

Dentre os métodos utilizados até então na definição do momento ótimo da substituição de máquinas e equipamentos, destacam-se os mencionados a seguir.

2.1.1. Método do Custo Médio Total – CMT

Neste método calcula-se o tempo ótimo de substituição, sem considerar a taxa de juros. Os custos em cada período são plotados no final de cada período, $i = 1, 2, 3, \dots, n$. Observa-se que o instante ótimo de substituição é aquele

imediatamente após o n-ésimo período em que for observado o menor valor para o CMT (Valverde e Rezende, 1997).

2.1.2. Método do Custo Anual Equivalente – CAE

Neste método são consideradas as taxas de juros. Os custos são analisados no final de cada período, descapitalizados para o período zero e corrigidos pelo fator de recuperação de capital. O CAE é o valor presente de todos os custos para “n” períodos. O embasamento para a decisão de substituir ou não um ativo é dado pela comparação do CAE de um período com o CAE do período consecutivo, da seguinte forma: se o CAE do período “n” for menor que o CAE do período “n + 1”, deve-se substituir o ativo; caso contrário, o ativo deve ser mantido (Valverde e Rezende, 1997).

2.1.3. Uso de Equações Diferenciais

Para se estudar o problema econômico da reforma, deve ficar esclarecida a diferença entre substituição e reforma. Quando se trata de equipamentos ou máquinas, a substituição é efetuada quando o equipamento começa a ser incapaz de exercer a função para a qual foi designado e construído (Massé, 1962). A reforma seria um reparo nas unidades, de maneira que continuassem a produzir em um nível desejado.

Neste método, supondo-se que os custos e receitas sejam funções contínuas, o tempo de substituição pode ser facilmente determinado com o uso de técnicas de cálculo, observando-se os pontos de maximização dos lucros ou minimização dos custos. Dentro deste método têm-se: retirada na sua forma pura (ciclo terminal); substituição parcial ou Retirada; e cadeia de substituição (Massé, 1962).

2.1.4. Programação Dinâmica - (PD)

A programação dinâmica é um método de decomposição que se baseia no princípio da otimalidade de Bellman, aplicável em situações em que diversas

decisões são requeridas na determinação da solução ótima de um sistema composto de distintos estágios, sendo que as decisões em estágios subsequentes não afetam os resultados de estágios anteriores (Nenhauser, 1966; Beveridge e Schechter, 1970).

Dentre as técnicas de programação matemática, a programação linear e a programação dinâmica são as mais citadas, porém a PD tem sido a mais indicada, por se tratar de decisões em estágios sucessivos. Os modelos de PD aplicados na substituição de equipamentos objetivam minimizar custos, conforme o modelo utilizado por Filgueiras (1997). Contudo, sabe-se que as máquinas e os equipamentos podem gerar receitas (aluguel e fretes). O fato de incluir a receita do equipamento como variável de decisão pode alterar essa decisão.

Sethi e Chand (1979) desenvolveram um algoritmo de PD *forward* eficiente em resultados de horizonte de planejamento para vários modelos de substituição de equipamentos. Tufts e Mills Jr. (1982) realizaram uma análise financeira em substituição de equipamentos e Goldstein et al. (1986) desenvolveram um modelo dual de substituição de máquinas e procedimentos de horizontes de planejamento.

O uso da programação dinâmica como método de otimização em fenômenos seqüenciais encontrados em estudos econômicos e realizações técnicas de ponta é atribuído, inicialmente, aos grupos de pesquisadores coordenados por Richard Bellman, nos EUA, e Pontryagin, na União Soviética (Dreyfus e Law, 1977). Usualmente utilizam-se alguns termos básicos, definidos a seguir:

Horizonte de Planejamento: conjunto de períodos sucessivos no decorrer do qual há interesse em se otimizar determinada variável ou função; corresponde ao número de estágios.

Estágios: representa o número de anos futuros nos quais a capacidade do equipamento é necessária.

Estado: situação do sistema em determinado estágio, caracterizada por uma ou mais variáveis quantitativas ou qualitativas.

Transição: passagem do sistema do estado em que se encontra um determinado estágio para um estado associado ao estágio seguinte; a transição de estados é caracterizada pela mudança dos valores especificativos das variáveis de um estado para outro.

Decisão: escolha de uma das alternativas possíveis, em cada estágio e cada estado, que resulta na mudança de estado.

Política: conjunto de decisões sucessivas ao longo do horizonte de planejamento.

A vantagem do uso da programação dinâmica é permitir a abordagem de processos seqüenciais de grandes dimensões, nos quais se mostram várias alternativas de decisões e um grande número de estágios e estados. Esses problemas, quando desenvolvidos pela simulação, apresentam alto grau de complexidade, em face de a estimação do número de combinações ser determinada pelo produto decorrente do número de alternativas de decisões, número de estados e número de estágios, segundo Kitamura et al. (1982), citados por Nadal (1983).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEST, C.; JENKINS, M. B. **Opportunities for Investment: Capital Markets and Sustainable Forestry.** Chicago: The John D. and Catherine T. MacArthur Foundation, 1999. 80 p.

BEVERIDGE, G. S. D.; SCHECHTER, R. S. **Optimization: theory and practice.** Tóquio: 1970. 773 p.

CHURCHMAN, C. W.; ACKOFF, R. L.; ARNOFF, E. L. **Introduction to operations research.** New York: 1976. 645 p.

DREYFUS, S. E.; LAW, A. M. **The art and theory of dynamic programming.** San Diego: 1977. 284 p.

FILGUEIRAS, J. F. **Um modelo de substituição de equipamentos para minimizar custos operacionais em uma empresa florestal.** 1997. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

GOLDSTEIN, T.; LADANY, S.P.; MEHREZ, A. A dual machine replacement model: a note on planning horizon procedures for machine replacements. **Operations Research**, v. 34, n. 6, p. 938-41, 1986.

GRANT, E. L. **Principles of engineering economy.** New York: 1960. 623 p.

GUPTA, S. K.; COZZOLINO, J. M. **Fundamentals of operations research for management: an introduction to quantitative methods.** San Francisco: 1974. 405 p.

HIRCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1992. 465 p.

JACOVINE, L. A. G. et al. Reflexos da má qualidade na colheita florestal semimecanizada. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE COLHEITA E TRANSPORTE FLORESTAL, 3., 1997, Vitória-MG. **Anais...** Vitória-MG, SIF/UFV, 1997. p. 298-308.

JELEN, F. C. **Cost and optimization engineering**. New York: 1970. 490 p.

MASSÉ, P. **Optimal investment decisions: rules for action and criteria for choice**. New Jersey: 1962. 500 p.

NADAL, R. **Análise econômica da recuperação das condições físicas e químicas do solo Santo Ângelo em lavoura mecanizada**. 1983. 149 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

NENHAUSER, G. L. **Introduction to dynamic programming**. New York: 1966. 256 p.

SETHI, S.; CHAND, S. Planning horizon procedures for machine replacement models. **Management Science**, v. 25, n. 2, p. 140-151, 1979.

SILVA, M. L.; MIRANDA, G. M. Custos. In: MACHADO, C C. **Colheita florestal**. Viçosa: UFV, 2002. p. 215-242.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. **Setor Florestal Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/secure/estatisticas.htm>>. Acesso em: 11. Jun. 2002.

SZONYI, J. et al. **Principles of engineering economic analysis**. Toronto: 1982. 496 p.

TUFTS, R. A.; MILLS JR., W. L. Financial analysis of equipment replacement. **Forest Products Journal**, v. 32, n. 10, p. 45-52, 1982.

VALVERDE, S. R.; REZENDE, J. L. P. Princípio de substituição de máquinas e equipamentos. **Revista Árvore**, v. 21, n. 3, p. 353-364, 1997.

USO DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO MOMENTO ÓTIMO DA TRANSFORMAÇÃO DE VEÍCULOS

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade econômica da transformação de veículos de transporte florestal. Foram avaliadas duas situações: uma em que a carreta é utilizada e retirada do processo após o fim de sua vida útil e outra em que ela passa por duas transformações; a equação diferencial foi utilizada para definir o momento ótimo das transformações. Os resultados obtidos mostraram que, no modelo sem transformação, obteve-se um tempo ótimo de utilização de nove anos, apresentando um Valor Anual Equivalente (VAE) de R\$4.084,06. No modelo com transformação (carreta/truck/toco) obteve-se um Valor Anual Equivalente de R\$10.555,04, indicando a viabilidade no sistema de transformação. Os modelos desenvolvidos mostraram-se adequados no que se refere ao suporte à tomada de decisão referente à substituição de veículos de transporte. É possível maximizar o lucro do conjunto de versões (carreta/truck/toco). Com base nos dados de custo e receita utilizados, a transformação mostrou-se a melhor alternativa.

Palavras-chave: equações diferenciais, substituição de equipamento, veículo transportador.

THE USE OF DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR THE DETERMINATION OF THE OPTIMAL TIME FOR THE TRANSFORMATION OF VEHICLES

ABSTRACT – The objective of this work was to analyse the economic feasibility of the transformation of forest transport vehicles. Two situations were evaluated, and in one the cart was used and removed after its useful lifetime, and in the other one the cart is transformed twice and the differential equation was used to define the optimal time of the transformations. The results obtained showed that in the model without transformation an optimal time mine years

used was defined, presenting an Equivalent Annual Value (VAE) of R\$4, 084.06. In the model with transformation (cart/truck-wheeled cart without springs), an Equivalent Annual Value of R\$10,555.04 was obtained, indicating the viability of the transformation system. The models developed showed to be suitable in supporting the decision making related to the replacement of transport vehicles. It is possible to maximize the profit of the set of versions (cart/truck/two-wheeled cart without springs). Based on data of costs and incomes used the transformation showed to be best alternative.

Key words: differential equations, equipment transport vehicle.

1. INTRODUÇÃO

Equipamentos, máquinas e veículos são substituídos quando se desgastam ou são destruídos, completamente ou não. No caso em que as unidades são destruídas parcialmente, pode-se decidir entre efetuar a substituição apenas dos componentes que falham e a substituição completa. Este segundo caso é típico dos equipamentos cuja eficiência decresce gradativamente com o tempo e, ou, com o uso, provocando aumento nos custos operacionais e de manutenção, que, além de prejudicar a qualidade dos serviços realizados, pode diminuir a eficiência produtiva (Hirschfeld, 1992). Todo o processo de substituição envolve um conjunto de regras e princípios econômicos (Valverde e Rezende, 1997).

Na área florestal, muitos equipamentos e máquinas apresentam custos elevados, daí a necessidade de eles operarem em jornadas extensas de uso intensivo, visando minimizar esses custos. Por outro lado, as condições de trabalho às quais as máquinas são submetidas, em especial nas atividades de plantio e de colheita, muitas vezes são adversas, resultando na necessidade de reparos, manutenções, consertos e, em última análise, substituição total ou parcial de máquinas e equipamentos.

As empresas florestais brasileiras têm se preocupado mais com estudos relacionados à viabilidade das operações manuais, semimecanizadas e, ou,

mecanizadas, bem como com a terceirização de determinadas atividades. Pouca ênfase tem sido dada às questões de substituição de máquinas e equipamentos.

Outro aspecto importante é que nas últimas décadas houve a introdução de modernas técnicas de mecanização, principalmente no que diz respeito à colheita florestal. Grandes empresas começaram a utilizar, experimentalmente, máquinas novas e mais adaptadas aos serviços florestais. Atualmente as máquinas já estão operando em plena capacidade e já passaram pelas adaptações básicas. Desse modo, várias empresas do segmento florestal estão aumentando seu maquinário. Assim, estudos sobre substituição de máquinas e equipamentos são fundamentais na tomada de decisão na área florestal.

Uma alternativa para determinar a necessidade de substituição de equipamentos e máquinas consiste no uso de equações diferenciais, adotando critérios de cálculo de substituição, como a retirada do equipamento, a substituição parcial, a cadeia de substituição constante e a cadeia de substituição considerando o progresso tecnológico (Valverde e Rezende, 1997).

Uma situação que merece ser investigada é a transformação de caminhões utilizados no setor florestal em outros tipos de veículos. Um exemplo é a possível transformação de uma carreta com semi-reboque de três eixos em um caminhão *truck* e, posteriormente, em um caminhão *toco*, que seria o equipamento terminal. Embora esse procedimento já tenha sido utilizado por algumas empresas, na maioria das vezes empreiteiras, não foram encontrados relatos sobre a sua viabilidade econômica.

Salienta-se que, ao se fazer a transformação, conseqüentemente ocorrerão algumas mudanças, como: redução na capacidade de carga, mudança no tipo de atividade e menor rendimento do transporte. Em contrapartida, a transformação traria benefícios, visto que o caminhão é mais ágil em curtas viagens e cargas rápidas, consome menos combustível e apresenta custo operacional menor, sendo estas algumas das vantagens em se fazer a transformação.

Massé (1962) apresentou um modelo denominado substituição parcial, no qual considerava que a receita do equipamento, após a reforma, continuava sendo a mesma, porém isso nem sempre ocorre. Neste estudo é proposto um modelo

que permite alterações nas receitas e custos ao longo da vida útil do equipamento. O estudo teve como objetivo desenvolver uma equação diferencial para decidir sobre o momento ótimo de se proceder às transformações de um equipamento, por meio das derivadas parciais. Especificamente, pretende-se decidir sobre o momento ótimo de transformar uma carreta em caminhão *truck* e, posteriormente, em caminhão toco.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. O Modelo

O modelo matemático utilizado – equação (1) – consiste no uso de equações diferenciadas e foi adaptado de Massé (1962). Este modelo baseia-se no ciclo terminal, ou seja, situação em que se compra um equipamento e limita seu horizonte de planejamento de acordo com sua vida útil econômica. O processo de substituição termina quando o equipamento se desgasta e é vendido como sucata (Massé, 1962).

O modelo utilizado nesse processo é proveniente da fórmula a seguir:

$$B(t) = \int_0^T Q(t)e^{-i(t)} dt + S(T)e^{-i(T)} - C \quad (1)$$

em que

$B(t)$ = lucro total descontado do equipamento;

T = tempo de substituição desconhecido;

$Q(t)dt$ = renda líquida (frete–custo operacional) anual gerada pelo equipamento;

$S(T)$ = valor de revenda (sucata) do equipamento no instante T ;

C = valor de aquisição do equipamento novo;

$i(t)$ = taxa de juros contínua; e

e = base dos logaritmos neperianos.

O momento ótimo para substituição do equipamento é obtido pela derivação de $B(t)$ em relação a t :

$$dB/dt = 0 = [Q(T) - i(T) + S'(T)]e^{-i(T)} \quad (2)$$

$$= Q(t) = i(T)S(T) - S'(T) \quad (3)$$

$$d^2B/dT^2 < 0 \quad (4)$$

$$Q = iS - S' \quad (5)$$

$$iS = Q + S' \quad (6)$$

A expressão (5) indica que o momento ótimo de retirada (T) ocorre quando o lucro potencial (Q) se igualar aos juros sobre o valor residual (iS) menos a perda do valor residual (S'), ou seja, a receita marginal (recebimentos marginais) é igual ao custo de oportunidade marginal (juros que seriam recebidos pela venda do equipamento menos a perda no valor residual).

2.2. Estudo de Caso

A partir do modelo de Massé (1962), expressão (1), desenvolveu-se um novo modelo, considerando-se duas transformações de uma carreta que foi transformada em caminhão *truck* e posteriormente em caminhão toco. Este novo modelo é apresentado nos resultados (item 3).

Para comparar os modelos, foram utilizados dados de um conjunto (cavalo-mecânico + semi-reboque de três eixos) que, após trabalhar um certo período, seria transformado em caminhão *truck*, o qual também trabalharia um determinado período e, posteriormente, seria transformado em caminhão toco; este, após alguns anos trabalhando, seria finalmente retirado do processo.

Para testar a aplicabilidade dos modelos, desenvolveu-se um estudo de caso. Para isso, considerou-se o valor de aquisição da carreta *Scania P – 124 GA 360 4x2* igual a R\$206.000,00 e uma taxa de juros anual de 10%.

O valor residual da carreta foi obtido no *site* Economia e Transporte, observando o valor de mercado do equipamento com diferentes idades.

O custo operacional foi calculado considerando os custos fixos e variáveis do equipamento, excluindo a depreciação.

A renda bruta foi obtida considerando um valor médio pago por quilômetro rodado por ano.

As análises foram feitas numa planilha do EXCEL.

Para confecção da planilha foram considerados:

- O custo operacional do *truck* de aproximadamente 78% do custo operacional da carreta.
- O custo operacional do toco de aproximadamente 78% do custo operacional do *truck*.
- A renda bruta do *truck* de aproximadamente 80% da renda bruta da carreta.
- A renda bruta do toco de aproximadamente 90% da renda bruta do *truck*.
- O valor residual do semi-reboque e do toco foram obtidos do *site* Economia e Transporte.

Os dados utilizados no presente trabalho foram obtidos nas revistas TM (Transporte Moderno, de maio de 2000 e agosto de 2003), nos sites ECONOMIA E TRANSPORTE (2003) e AUTOMÓVEL (2003), e através de contatos feitos por e-mails com empresas transportadoras que utilizam e revendem veículos *Scania*, sobre os valores de aquisição, revenda e custos operacionais de um veículo *Scania* P 124 GA 360 4x2. Os valores obtidos foram corrigidos para R\$, sendo U\$1,00 = R\$3,40 em março de 2003.

2.3. Comparação das Alternativas

Para comparar as duas alternativas (uso da carreta sem transformação e o conjunto transformado), utilizou-se o Valor Anual Equivalente (VAE), que representa o lucro anual que o veículo proporcionaria ao longo de sua vida útil.

Esse critério permite comparar projetos ou alternativas com durações diferentes como o estudo em questão. A fórmula utilizada para obter o VAE foi a seguinte:

$$VAE = \frac{VPL * i}{[1 - (1 + i)^{-n}]}$$

em que

VAE = Valor Anual Equivalente (R\$/ano);

VPL = Valor Presente Líquido (R\$);

i = taxa anual de juros; e

n = duração do projeto ou tempo ótimo de utilização do equipamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. O Modelo Proposto

A partir do modelo de Massé (1962), expressão (1), desenvolveu-se um novo modelo, considerando-se duas transformações de uma carreta que foi transformada em caminhão *truck* e posteriormente em caminhão toco.

A função de lucro utilizada para representar esta transformação foi:

$$L = L_{S3} + L_{TR} + L_{To} \quad (7)$$

em que

L = lucro total do equipamento transformado;

L_{S3} = lucro obtido com a carreta (cavalo mecânico 4x2 + semi-reboque de 3 eixos);

L_{TR} = lucro obtido com a carreta transformada em *truck* (6x4); e

L_{To} = lucro obtido com o equipamento transformado em caminhão toco (4x2).

As equações diferenciais para cada etapa do processo são dadas por:

a) Lucro obtido com a carreta

$$L_{S3} = \int_0^a R_{S3}(t)e^{-i(t)} dt + S_{S3}(a)e^{-i(a)} - C_0 \quad (8)$$

em que

L_{S3} = lucro obtido com a carreta;

$R_{S3}(t)$ = receita líquida da carreta no ano t ;

$S_{S3}(\mathbf{a})$ = valor residual do semi-reboque no momento \mathbf{a} ;

C_o = valor de aquisição do veículo novo;

i = taxa de desconto; e

\mathbf{a} = momento ótimo para transformação (carreta em *truck*).

b) Lucro obtido com a transformação de carreta em *truck*

$$L_{Tr} = \int_a^b R_{Tr}(t_a) e^{-i(tab)} dt - C_{Tr}(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{a})} \quad (9)$$

em que

L_{Tr} = lucro obtido com o caminhão *truck*;

$R_{Tr(tab)}$ = receita líquida do *truck* no período de α a β ;

$C_{Tr}(\mathbf{a})$ = custo de conversão da carreta em *truck*; e

\mathbf{b} = momento ótimo para transformação (*truck* em toco).

c) Lucro obtido com a transformação do *truck* em toco

$$L_{To} = \int_b^T R_{To}(t) e^{-i(t)} dt + S_{To}(T) e^{-i(T)} - C_{To}(\mathbf{b}) e^{-i(\mathbf{b})} \quad (10)$$

em que

L_{To} = lucro obtido com o caminhão toco;

R_{To} = receita líquida do caminhão toco do período de β a T ;

S_{To} = receita da venda do caminhão toco no ano T ;

C_{To} = custo de conversão do *truck* em caminhão toco; e

T = momento ótimo para retirada do caminhão.

As derivadas parciais da função de lucro total (7) em função de \mathbf{a} , \mathbf{b} e T e igualadas a zero indicam o momento ótimo de transformação (\mathbf{a} , \mathbf{b}) e de retirada (T) do veículo.

$$dL/d\mathbf{a} = R_{S3}(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{a})} + S'_{S3}(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{a})} S_{S3} - C'_{Tr}(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{a})} + i(\mathbf{a}) e^{-i(\mathbf{a})} C_{Tr}(\mathbf{a}) = 0 \quad (11)$$

Colocando o termo $e^{-i(\mathbf{a})}$ em evidência, tem-se:

$$dL/d\mathbf{a} = [R_{S_3}(\mathbf{a}) + S'_{S_3}(\mathbf{a}) - i(\mathbf{a})S_{S_3} - C'_{Tr}(\mathbf{a}) + i(\mathbf{a})C_{Tr}(\mathbf{a})]e^{-i(\mathbf{a})} = 0. \quad (12)$$

$$R_{S_3}(\mathbf{a}) + S'_{S_3}(\mathbf{a}) + i(\mathbf{a})C_{Tr}(\mathbf{a}) = i(\mathbf{a})S_{S_3} + C'_{Tr}(\mathbf{a}) = 0 \quad (13)$$

ou, simplificando a expressão, tem-se:

$$R_{S_3} = iS_{S_3} - S'_{S_3} - iC_{Tr} + C'_{Tr} \quad (14)$$

admitindo-se que:

$$d^2L/d\mathbf{a}^2 < 0 \quad (15)$$

em que

S_{S_3} = valor de revenda do semi-reboque;

S'_{S_3} = variação do valor de revenda do semi-reboque;

C_{Tr} = custo de transformação de semi-reboque em *truck* (2 eixos); e

C'_{Tr} = variação do custo de transformação para *truck* (2 eixos).

A equação (14) mostra que o tempo \mathbf{a} ótimo que maximiza o lucro ocorrerá quando a receita líquida se igualar aos juros sobre o valor residual do semi-reboque, menos a perda do valor residual, menos os juros sobre o custo de transformação da carreta em *truck*, mais a variação do custo de transformação, ou seja, quando a receita marginal se igualar aos custos marginais.

Para se obter o tempo ótimo de serviço do caminhão *truck* (\mathbf{b}), ou seja, o momento em que ocorrerá a transformação em caminhão toco, derivou-se a função de lucro (7) e definiu-se a equação subsequente:

$$dL/d\mathbf{b} = +R_{Tr}(\mathbf{b})e^{-i(\mathbf{b})} - \{ C'_{To}(\mathbf{b})e^{-i(\mathbf{b})} + C_{To}(\mathbf{b}) * [-i(\mathbf{b})] e^{-i(\mathbf{b})} \} = 0 \quad (16)$$

Colocando o termo $e^{-i(\mathbf{b})}$ em evidência, tem-se:

$$dL/d\mathbf{b} = [R_{Tr}(\mathbf{b}) - C'_{To}(\mathbf{b}) + C_{To}(\mathbf{b}) * i(\mathbf{b})]e^{-i(\mathbf{b})} = 0 \quad (17)$$

$$R_{Tr}(\mathbf{b}) - C'_{To}(\mathbf{b}) + C_{To}(\mathbf{b}) * i(\mathbf{b}) = 0 \quad (18)$$

ou

$$R_{Tr}(\mathbf{b}) + i(\mathbf{b})C_{To}(\mathbf{b}) = C'_{To}(\mathbf{b}) = 0 \quad (19)$$

$$R_{Tr} = C'_{To} - iC_{To} \quad (20)$$

admitindo-se que:

$$d^2L/d\mathbf{b}^2 < 0 \quad (21)$$

em que C'_{To} = Variação do custo de transformação em toco (4x2).

A equação (20) mostra que o momento, \mathbf{b} ótimo que maximiza o lucro ocorrerá quando a receita líquida do *truck* se igualar à variação do custo de transformação, menos os juros sobre o custo de transformação.

De forma semelhante às antecedentes, derivou-se a função de lucro (7) em relação a (T) para se obter o tempo ótimo de serviço para o caminhão toco (T) ; observa-se também que este é o ponto de retirada do equipamento, ou seja, fecha-se o ciclo.

$$dl/dT = R_{To}(T)e^{-i(T)} + S'_{To}(T)e^{-i(T)} - i(T)e^{-i(T)} * S_{To}(T) = 0 \quad (22)$$

Colocando o termo $e^{-i(T)}$ em evidência; tem-se

$$dl/dT = [R_{To}(T) + S'_{To}(T) - i(T)S_{To}(T)]e^{-i(T)} = 0 \quad (23)$$

$$R_{To}(T) + S'_{To}(T) - i(T)S_{To}(T) = 0 \quad (24)$$

ou

$$R_{To} = iS_{To} - S'_{To} \quad (25)$$

admitindo-se que:

$$d^2L/dT^2 < 0 \quad (26)$$

em que S'_{To} = variação do valor de revenda do toco (4x2) no ano T .

Neste último caso, a equação (25) diz que o momento T ótimo que maximiza o lucro ocorrerá quando a receita do toco se igualar aos juros sobre o valor residual do toco menos a perda do valor residual.

Verifica-se (Quadro 1) que o frete decresce aproximadamente de forma linear, e a receita líquida é decrescente e positiva do 1º ao 12º ano, sendo, a partir de então, decrescente e negativa. O mesmo comportamento foi observado para receita atualizada.

Quadro 1 – Simulação do método ciclo terminal para carreta *Scania P124 GA 360 4x2*, sem considerar as transformações

Período	Valor residual (S)	Custo operacional	Renda bruta	Receita líquida (Q)	Receita líquida atualizada	Receita atualizada acumulada	Lucro atual (B)	(i.S)	(S')	(i.S - S')
1	137.793,40	35.450,25	83.808,07	48.357,82	43.961,65	43.961,65	-36.771,62	13.779,34	-68.206,60	81.985,94
2	121.974,72	35.584,24	79.817,08	44.232,84	36.556,07	80.517,72	-24.676,73	12.197,47	-15.818,68	28.016,15
3	110.460,30	36.114,27	76.016,14	39.901,87	29.978,87	110.496,59	-12.512,95	11.046,03	-11.514,41	22.560,44
4	101.303,15	36.447,17	72.395,95	35.948,78	24.553,50	135.050,09	-1.758,50	10.130,31	-9.157,16	19.287,47
5	94.860,27	36.947,75	68.948,52	32.000,77	19.869,96	154.920,05	7.820,81	9.486,03	-6.442,88	15.928,91
6	89.785,24	37.747,45	65.665,89	27.918,44	15.759,23	170.679,28	15.360,71	8.978,52	-5.075,02	14.053,55
7	84.703,40	38.794,51	62.538,75	23.744,24	12.184,55	182.863,83	20.330,06	8.470,34	-5.081,85	13.552,18
8	78.333,70	39.945,47	59.560,46	19.614,99	9.150,54	192.014,37	22.557,62	7.833,37	-6.369,69	14.203,07
9	73.586,68	41.874,25	56.724,38	14.850,13	6.297,90	198.312,27	23.520,21	7.358,67	-4.747,02	12.105,69
10	69.105,25	43.875,45	54.022,52	10.147,07	3.912,14	202.224,41	22.867,47	6.910,52	-4.481,43	11.391,95
11	62.201,64	45.675,28	51.320,66	5.645,38	1.978,67	204.203,08	20.004,37	6.220,16	-6.903,61	13.123,78
12	59.626,49	47.985,74	48.618,81	633,07	201,71	204.404,80	17.403,63	5.962,65	-2.575,15	8.537,80
13	55.709,03	49.572,68	45.916,95	-3.655,73	-1.058,93	203.345,86	13.482,78	5.570,90	-3.917,46	9.488,36
14	51.977,92	51.987,58	43.215,09	-8.772,49	-2.310,07	201.035,79	8.723,20	5.197,79	-3.731,11	8.928,90
15	48.417,75	53.678,95	40.513,24	-13.165,71	-3.151,77	197.884,02	3.474,85	4.841,78	-3.560,16	8.401,94

Em que: iS = juros sobre o valor residual; S' = variação do valor residual; $(iS-S'=Q)$ = momento ótimo de substituição do equipamento.

Observou-se alta desvalorização da carreta nos primeiros anos: 33,11, 11,45 e 9,43% nos 1º, 2º e 3º anos, respectivamente. A redução do valor residual diminui nos anos seguintes, tendendo a se estabilizar nos últimos anos. Os custos variáveis comportam-se de forma contrária, ou seja, seguem uma tendência crescente ao longo dos anos, em virtude de maior manutenção e desgastes.

A receita bruta acumulada atinge seu valor máximo no 12º ano. O lucro é negativo até o 4º ano, período até o qual é abatido o investimento inicial para a

compra da carreta. O lucro mostra-se crescente até o 9^o período, em que atinge seu valor máximo, sendo esse momento indicado para substituição da carreta (quando $iS-S'=Q$). O lucro máximo observado foi de R\$23.520,20, com um valor anual equivalente de R\$4.084,06 para o projeto e tempo ótimo de serviço de nove anos (Figura 1).

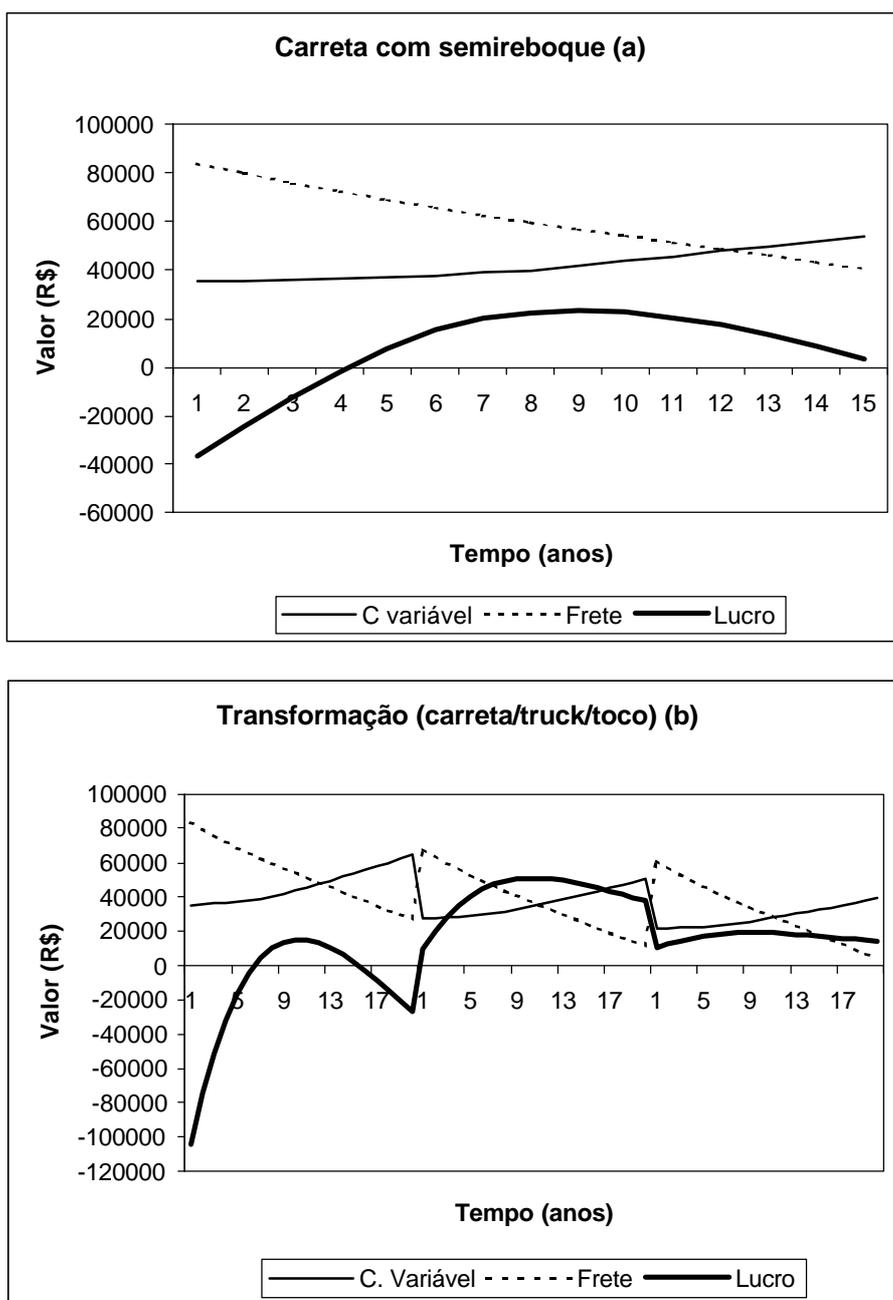


Figura 1 – Simulação de custo variável, frete e lucro acumulado para carreta com semi-reboque (a) e para transformação (carreta/truck/toco)(b).

Conforme demonstrado no Quadro 2, a receita líquida apresenta-se positiva até o 12º ano, o mesmo notado em relação à renda líquida atualizada; a renda bruta acumulada apresenta-se crescente até o 12º ano, a partir do qual torna-se decrescente. O lucro mostra-se negativo até o 6º ano, a partir daí torna-se positivo, atingindo seu valor máximo no 10º ano, sendo de R\$15.182,73. No entanto, tempo ótimo para transformação da carreta em *truck* é o 11º ano (quando $iS_{S3}-S'_{S3}-iC_{tr}+C'_{tr} = R_{S3}$). Esse fato se justifica na pequena diferença do valor do lucro entre o 10º e o 11º ano, que é de 1,38%, e principalmente porque a metodologia busca maximizar a função de lucro total (uso da carreta, do *truck* e do toco ao mesmo tempo) e não as funções de lucros parciais ou de um dos veículos individualmente.

Após transformação da carreta em *truck* aos 11 anos, a equação do modelo que maximiza o lucro do *truck* apresentou tanto a receita líquida como a atualizada positiva até os 21 anos de uso; esses resultados são observados no Quadro 3.

Quadro 2 – Simulação da carreta para transformação em *truck*

Período	Custo operacional	Renda bruta	Receita líquida	Receita atual	Receita atualizada acumulada	Lucro atual	S_{S3}	C_{tr}	S'_{S3}	C'_{tr}	$iS_{S3}-S'_{S3}-iC_{tr}+C'_{tr}$
1	35.450,25	83.808,07	48.357,82	43.961,65	43.961,65	-104.045,62	63.792,00	6.645,00	-2658,00	265,80	8.638,50
2	35.584,24	79.817,08	44.232,84	36.556,07	80.517,72	-74.958,31	61.134,00	6.910,80	-2658,00	265,80	8.346,12
3	36.114,27	76.016,14	39.901,87	29.978,87	110.496,59	-51.569,53	58.476,00	7.176,60	-2658,00	265,80	8.053,74
4	36.447,17	72.395,95	35.948,78	24.553,50	135.050,09	-31.917,74	57.147,00	7.442,40	-1329,00	265,80	6.565,26
5	36.947,75	68.948,52	32.000,77	19.869,96	154.920,05	-16.421,37	55.818,00	7.708,20	-1329,00	265,80	6.405,78
6	37.747,45	65.665,89	27.918,44	15.759,23	170.679,28	-4.563,10	54.489,00	7.974,00	-1329,00	265,80	6.246,30
7	38.794,51	62.538,75	23.744,24	12.184,55	182.863,83	4.143,31	53.160,00	8.239,80	-1329,00	265,80	6.086,82
8	39.945,47	59.560,46	19.614,99	9.150,54	192.014,37	10.193,91	51.831,00	8.505,60	-1329,00	265,80	5.927,34
9	41.874,25	56.724,38	14.850,13	6.297,90	198.312,27	13.730,05	50.502,00	8.771,40	-1329,00	265,80	5.767,86
10	43.875,45	54.022,52	10.147,07	3.912,14	202.224,41	15.182,73	49.173,00	9.037,20	-1329,00	265,80	5.608,38
11	45.675,28	51.320,66	5.645,38	1.978,67	204.203,08	14.972,11	47.844,00	9.303,00	-1329,00	265,80	5.448,90
12	47.985,74	48.618,81	633,07	201,71	204.404,80	13.225,91	46.515,00	9.568,80	-1329,00	265,80	5.289,42
13	49.572,68	45.916,95	-3.655,73	-1.058,93	203.345,86	10.434,63	45.186,00	9.834,60	-1329,00	265,80	5.129,94
14	51.987,58	43.215,09	-8.772,49	-2.310,07	201.035,79	6.584,71	43.857,00	10.100,40	-1329,00	265,80	4.970,46
15	53.678,95	40.513,24	-13.165,71	-3.151,77	197.884,02	2.064,89	42.528,00	10.366,20	-1329,00	265,80	4.810,98
16	55.867,25	37.811,38	-18.055,87	-3.929,48	193.954,54	-3.079,36	41.199,00	10.632,00	-1329,00	265,80	4.651,50
17	57.876,28	35.109,52	-22.766,76	-4.504,28	189.450,26	-8.661,68	39.870,00	10.897,80	-1329,00	265,80	4.492,02
18	59.874,78	32.407,67	-27.467,12	-4.940,20	184.510,06	-14.558,01	38.541,00	11.163,60	-1329,00	265,80	4.332,54
19	62.341,57	29.705,81	-32.635,76	-5.336,21	179.173,85	-20.741,69	37.212,00	11.429,40	-1329,00	265,80	4.173,06
20	64.873,41	27.003,95	-37.869,46	-5.629,05	173.544,79	-27.121,43	35.883,00	11.695,20	-1329,00	265,80	-7.947,42

Em que: S_{S3} = valor residual do semi-reboque; C_{tr} = custo de transformação (carreta em *truck*); S'_{S3} = variação do valor residual do semi-reboque; C'_{tr} = variação do custo de transformação (carreta em *truck*); iS_{S3} = juros sobre o valor residual do semi-reboque; iC_{tr} = juros sobre o custo de transformação; $iS_{S3}-S'_{S3}-iC_{tr}+C'_{tr} = R_{S3}$ = momento ótimo para transformação (carreta em *truck*).

Quadro 3 – Simulação do *truck* para transformação em toco

Período	Custo operacional	Renda bruta	Receita líquida R_{Tr}	Receita atual	Receita atualizada acumulada	Lucro atual	C_{to}	C'_{to}	$C'_{to} - iC_{to}$
12	27.651,20	67.860,07	40.208,87	12.811,79	12.811,79	9.551,14	6.645,00	132,90	-531,60
13	27.755,71	63.869,08	36.113,37	10.460,76	23.272,54	20.011,90	6.777,90	132,90	-544,89
14	28.169,13	60.068,14	31.899,01	8.400,01	31.672,55	28.411,91	6.910,80	132,90	-558,18
15	28.428,79	56.447,95	28.019,15	6.707,56	38.380,11	35.119,47	7.043,70	132,90	-571,47
16	28.819,25	53.000,52	24.181,28	5.262,55	43.642,66	40.382,02	7.176,60	132,90	-584,76
17	29.443,01	49.717,89	20.274,88	4.011,28	47.653,94	44.393,30	7.309,50	132,90	-598,05
18	30.259,72	46.590,75	16.331,04	2.937,28	50.591,22	47.330,58	7.442,40	132,90	-611,34
19	31.157,47	43.612,46	12.455,00	2.036,49	52.627,71	49.367,07	7.575,30	132,90	-624,63
20	32.661,92	40.776,38	8.114,46	1.206,16	53.833,88	50.573,23	7.708,20	132,90	-637,92
21	34.222,85	38.074,52	3.851,67	520,48	54.354,35	51.093,71	7.841,10	132,90	-651,21
22	35.626,72	35.372,66	-254,05	-31,21	54.323,14	51.062,50	7.974,00	132,90	-664,50
23	37.428,88	32.670,81	-4.758,07	-531,37	53.791,77	50.531,13	8.106,90	132,90	-677,79
24	38.666,69	29.968,95	-8.697,74	-883,04	52.908,73	49.648,08	8.239,80	132,90	-691,08
25	40.550,31	27.267,09	-13.283,22	-1.225,99	51.682,74	48.422,10	8.372,70	132,90	-704,37
26	41.869,58	24.565,24	-17.304,35	-1.451,93	50.230,81	46.970,17	8.505,60	132,90	-717,66
27	43.576,46	21.863,38	-21.713,08	-1.656,22	48.574,59	45.313,94	8.638,50	132,90	-730,95
28	45.143,50	19.161,52	-25.981,98	-1.801,68	46.772,91	43.512,27	8.771,40	132,90	-744,24
29	46.702,33	16.459,67	-30.242,66	-1.906,48	44.866,43	41.605,79	8.904,30	132,90	-757,53
30	48.626,42	13.757,81	-34.868,62	-1.998,27	42.868,16	39.607,52	9.037,20	132,90	-770,82
31	50.601,26	11.055,95	-39.545,31	-2.060,26	40.807,90	37.547,26	9.170,10	132,90	-784,11

Em que: C_{to} = custo de transformação (*truck* em toco); C'_{to} = variação do custo da transformação; iC_{to} = juros sobre o valor do custo da transformação; ($C'_{to} - iC_{to} = R_{Tr}$) = momento ótimo para a transformação (*truck* em toco).

Conforme pode ser observado no Quadro 3, o *truck* apresenta lucro positivo em todo o horizonte temporal em que foi realizada a simulação, sendo do ano 11 ao 31. O fato de a carreta já estar paga contribui para a lucratividade favorável; o *truck* arca apenas com o custo da transformação, que é de R\$9.303,00, contando para amortizá-lo com o valor residual do semi-reboque de R\$66.450,00. O lucro da utilização do *truck* é maximizado no 21^o ano, sendo de R\$51.093,71. Como ocorreu com a carreta, o tempo ótimo indicado para a transformação foi o período seguinte (quando $R_{Tr} = C'_{to} - C_{to}$); a diferença para o valor do lucro maximizado é de 0,06%.

A equação utilizada para determinar o momento ótimo da transformação do caminhão *truck* em toco demonstrou que o veículo passa a ser utilizado como toco no 23^o ano, com um custo de transformação de R\$7.974,00; a partir daí apresenta receita líquida e atualizada, com valores positivos até o 33^o ano, período até o qual também se nota a receita acumulada com comportamento

crecente. O lucro é maximizado no 31^o ano, com o valor de R\$19.044,65, sendo este indicado como o último ano de atividade do caminhão toco (quando $R_{to} = iS_{to} - S'_{to}$), devendo ser retirado com valor residual de R\$25.744,10 – isso pode ser observado no Quadro 4.

Quadro 4 – Simulação do uso do caminhão toco até a retirada

Período	Custo operacional	Renda bruta	Receita líquida R_{to}	Receita atual	Receita atualizada acumulada	Lucro atual	Valor residual toco S_{to}	S'_{to}	$iS_{to} - S'_{to}$
23	21.567,93	61.215,07	39.647,14	4.427,72	4.427,72	10.127,06	59.805,00	-6645,0	12.625,50
24	21.649,45	57.224,08	35.574,63	3.611,74	8.039,45	12.524,45	53.824,50	-5980,5	11.362,95
25	21.971,92	53.423,14	31.451,22	2.902,82	10.942,28	14.433,71	48.442,05	-5382,5	10.226,66
26	22.174,46	49.802,95	27.628,49	2.318,18	13.260,46	15.938,98	43.597,85	-4844,2	9.203,99
27	22.479,01	46.355,52	23.876,51	1.821,24	15.081,70	17.095,12	39.238,06	-4359,8	8.283,59
28	22.965,55	43.072,89	20.107,34	1.394,31	16.476,01	17.945,25	35.314,25	-3923,8	7.455,23
29	23.602,58	39.945,75	16.343,17	1.030,26	17.506,28	18.530,27	31.782,83	-3531,4	6.709,71
30	24.302,82	36.967,46	12.664,64	725,79	18.232,07	18.891,78	28.604,55	-3178,3	6.038,74
31	25.476,29	34.131,38	8.655,08	450,92	18.682,99	19.044,65	25.744,09	-2860,5	5.434,86
32	26.693,82	31.429,52	4.735,70	224,29	18.907,28	19.025,08	23.169,68	-2574,4	4.891,38
33	27.788,84	28.727,66	938,82	40,42	18.947,70	18.865,98	20.852,71	-2317,0	4.402,24
34	29.194,52	26.025,81	-3.168,72	-124,03	18.823,67	18.578,70	18.767,44	-2085,3	3.962,02
35	30.160,02	23.323,95	-6.836,07	-243,26	18.580,42	18.201,88	16.890,70	-1876,7	3.565,81
36	31.629,24	20.622,09	-11.007,15	-356,07	18.224,34	17.736,53	15.201,63	-1689,1	3.209,23
37	32.658,27	17.920,24	-14.738,04	-433,42	17.790,92	17.213,70	13.681,47	-1520,2	2.888,31
38	33.989,63	15.218,38	-18.771,26	-501,85	17.289,08	16.638,70	12.313,32	-1368,1	2.599,48
39	35.211,93	12.516,52	-22.695,41	-551,60	16.737,48	16.027,25	11.081,99	-1231,3	2.339,53
40	36.427,82	9.814,67	-26.613,15	-588,02	16.149,46	15.390,26	9.973,79	-1108,2	2.105,58
41	37.928,61	7.112,81	-30.815,80	-618,98	15.530,49	14.731,22	8.976,41	-997,4	1.895,02
42	39.468,98	4.410,95	-35.058,03	-640,17	14.890,32	14.058,26	8.078,77	-897,6	1.705,52

Em que: iS_{to} = juros sobre o valor residual do toco; S'_{to} = variação do valor residual do toco; $(iS_{to} - S'_{to} = R_{to})$ = momento ótimo (T) para retirada do toco.

O tempo total de utilização do equipamento transformado foi estimado em 31 anos, apresentando lucro positivo em todas as fases de utilização, conforme Quadro 5.

Verifica-se, pelo Quadro 5, uma diferença de valores anuais equivalentes bastante significativa entre os dois processos analisados neste trabalho. O valor anual equivalente (VAE) ou lucro anual corrigido, obtido através da simulação da transformação, à taxa de 10% a.a., é de R\$10.555,04, em relação a R\$4.084,06 do valor obtido com a simulação da carreta sem transformação. O modelo que utiliza as transformações apresentou um VAE bem maior, indicando uma

viabilidade na transformação de equipamentos, o que possibilitaria maior utilização do equipamento com um lucro anual equivalente mais interessante do que o processo sem transformação.

Quadro 5 – Lucratividade da carreta sem transformação e da carreta transformada

Equipamento	Intervalo de uso (anos)	Lucro (R\$)	VAE (R\$)
Carreta s/ transformação	1-9	23.520,31	4.084,06
Carreta c/ transformação	1-11	14.972,11	-
<i>Truck</i>	12-22	66.034,64	-
Toco	23-31	19.044,64	-
Sistema (carreta/truck/toco)	1-31	100.051,37	10.555,04

3.2. Análise de Sensibilidade

Para verificar o efeito de algumas variáveis do processo no lucro e também no tempo de utilização dos veículos, foram aplicadas variações em mais ou menos 20% nos valores das variáveis: preço de compra do veículo novo, custos operacionais, valor do frete e taxa de juros. Foram analisados os valores finais de lucro, *a*, *b* e *T* do sistema de transformações. Os resultados obtidos destas variações podem ser observados no Quadro 6; observa-se que as variações percentuais nos valores de preço de compra e taxa de juros não causaram efeito significativo em, *a*, *b* e *T* do sistema, mas afetaram a lucratividade.

Quadro 6 – Efeitos de variações nos valores das variáveis em mais ou menos 20%, apresentando o lucro em reais e *a*, *b* e *T* em anos

Variável	-20%				0%				+20%			
	Lucro	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>T</i>	Lucro	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>T</i>	Lucro	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>T</i>
Pr. Compra	182451,37	11	22	31	100051,37	11	22	31	17651,37	11	22	31
Custos Operac.	200356,22	13	26	37	100051,37	11	22	31	12429,37	9	18	26
Frete	-77258,67	8	17	24	100051,37	11	22	31	293027,62	13	26	37
Tx. Juros	165031,88	11	22	32	100051,37	11	22	31	48445,59	11	22	31

Observa-se pela Figura 2 que todas as variáveis afetaram significativamente o lucro, sendo a variação na taxa de juros a que causou menor efeito. A variável que mais afetou o lucro foi o valor do frete, pois, com uma redução de 20% no valor do frete, obteve-se lucro negativo (R\$77.258,67). Observa-se que o frete pode ser reduzido até cerca de 11% que o lucro ainda se mostra positivo (Figura 2a), a partir do qual se tem um lucro negativo. O efeito dos custos operacionais e do preço de compra do equipamento no lucro é aproximadamente o mesmo e observa-se que, mesmo com o aumento de 20% nos valores destas variáveis, o lucro ainda se mantém positivo.

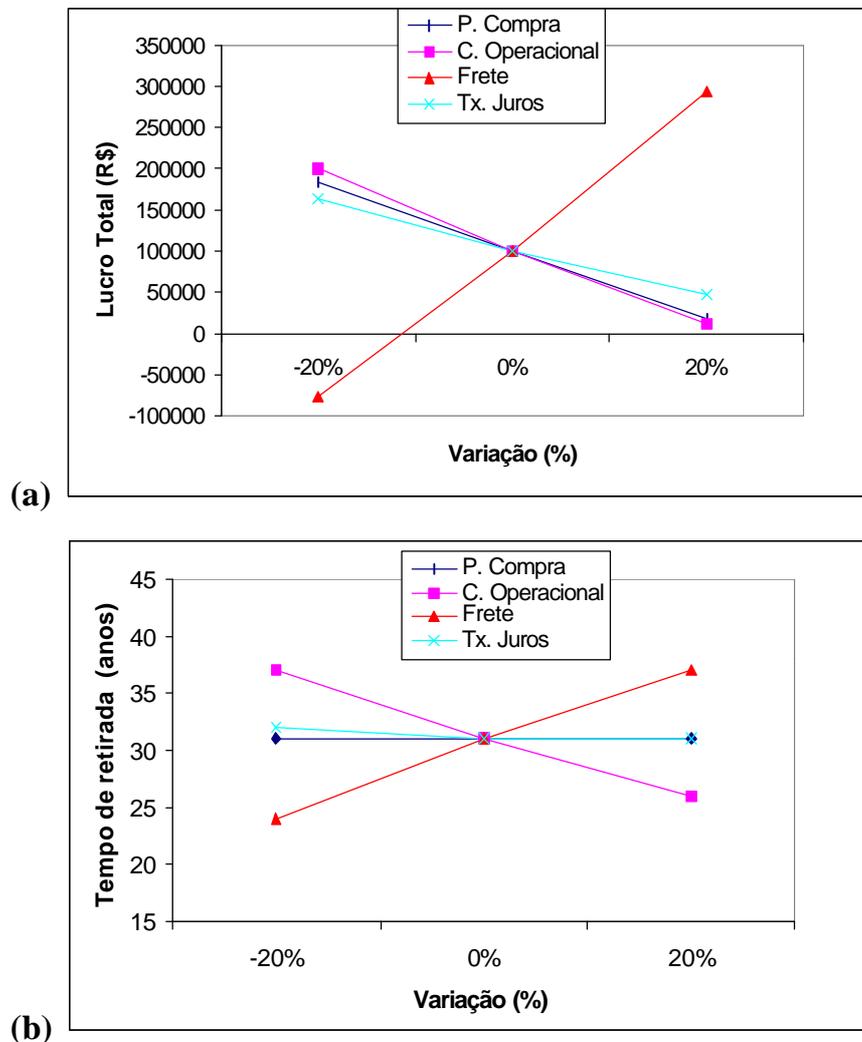


Figura 2 – Simulação dos efeitos de variações no sistema.

Com relação ao tempo de retirada (Figura 2b), o custo operacional teve efeito negativo, ou seja, aumentando o valor dos custos operacionais, diminui-se o tempo de retirada do equipamento. Em contrapartida, o frete teve efeito positivo, isto é, elevando o valor do frete, eleva-se o tempo de retirada do equipamento. Observou-se também que o preço de compra do equipamento não afetou o tempo de retirada, pois ocorre uma única vez e no ano zero.

A taxa de juros afetou negativamente o tempo de retirada, ou seja, aumentando a taxa, diminui-se o tempo de retirada do equipamento.

4. CONCLUSÕES

Em conformidade com as condições nas quais o estudo foi desenvolvido, concluiu-se que a metodologia proposta é eficiente para mensurar os momentos ótimos de troca ou transformação do equipamento em questão.

O método desenvolvido mostrou-se eficiente para dar suporte à tomada de decisão no que se refere aos veículos de transporte pesado, que representam um importante ativo nas empresas florestais.

O método pode ser aplicado também no caso de reformas de equipamentos, bastando definir as funções de lucros dos destes.

É possível maximizar o lucro do conjunto de versões utilizadas, sendo carreta, *truck* e toco.

Com base nos dados de custo e frete utilizados, a transformação mostra-se como uma alternativa para as empresas que não dispõem de capital para investir em um equipamento novo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUTOMÓVEL. Disponível em <<http://www.automovel.com.br>>. Acesso em 22. Fev.2003.

ECONOMIA E TRANSPORTE. Disponível em <<http://www.economiaetransporte.com.br/tabelas/Scania/Scania.html>>. Acesso em 20. Fev.2003.

ECONOMIA E TRANSPORTE. Disponível em
<<http://www.economiaetransporte.com.br/custosoperacionais/custosoperacionais.html>>. Acesso em 20. Fev.2003.

HIRCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 5.ed. São Paulo: Atlas: 1992. 465 p.

MASSÉ, P. **Optimal investment decisions**: rules for action and criteria for choice. New Jersey: 1962. 500 p.

SORA, P. Manutenção ajuda a reduzir custos. **Transporte Moderno**, v. 40, n. 400, p. 79-80, 2002.

TRANSPORTE MODERNO. Indicadores de mercado. São Paulo: OTM, v. 36, n. 393, p. 64-69, 2000.

VALVERDE, S. R.; REZENDE, J. L. P. Princípio de substituição de máquinas e equipamentos. **Revista Árvore**, v. 21, n. 3, p. 353-364, 1997.

APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS

RESUMO – Este trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de programação dinâmica, destinado a determinar o momento ótimo de se fazer a substituição de equipamentos, incorporando as receitas geradas pelo uso e descarte da máquina e buscando, assim, maximizar lucros através de uma relação de recorrência referente às receitas e aos custos ao longo dos anos. Desse modo, comparou-se o modelo proposto com um modelo tradicional de substituição, utilizando da programação dinâmica que não contempla a receita gerada pelo equipamento usado por Filgueiras (1997). O modelo proposto foi satisfatório de acordo com o objetivo do trabalho, pois com o seu desenvolvimento foi possível oferecer decisões ótimas de substituir ou reter o equipamento. O modelo que inclui apenas os custos se mostrou mais indicado para situações em que o equipamento foi utilizado sem se preocupar com a geração de receitas anuais. Já o modelo desenvolvido é mais indicado em situações em que o equipamento gera receitas diretas, como no caso de aluguel deste. O modelo desenvolvido com a receita mostrou-se eficiente, constatando-se que é mais suscetível a aumentos no valor de aquisição do equipamento, enquanto o modelo sem receita é mais sensível a variações na taxa de juros. A vantagem de se usar a PD, neste caso, é que esta ferramenta oferece ao planejador uma gama de alternativas bem maior na hora da tomada de decisão.

Palavras-chave: programação dinâmica, substituição de equipamento, receita, custos.

APPLICATION OF THE DYNAMIC PROGRAMMING IN THE EQUIPMENT SUBSTITUTION

ABSTRACT – The objective of this work was to develop a dynamic programming model to determine the optimal time to replace equipment,

including the incomes generated by the use and removal of the machine, aiming at the maximization of profits through a recurrence relation related to the incomes and costs along the years. Thus, the model proposed was compared to the traditional replacement model using the dynamic programming that does not include the income generated by the equipment used by Filgueiras (1997). The model proposed was satisfactory according to the objective of the work, because with its development it was possible to after optimal decisions to replace or maintain the equipment. The model that includes only the costs showed to be best recommended in situations where the equipment is used without concern of generating annual incomes. On the other hand, the model developed is best recommended in situations where the equipment generates direct incomes, as in the case of rental. The model developed with the income showed to be efficient, and a greater susceptibility to a raise the purchase value of the equipment was observed, whereas the model without concern to income is more susceptible to variations of interest rates. The advantage in using the dynamic programming (PD) in this case is that this tool offers a much greater range of alternatives at the moment of the decision making.

Key words: dynamic programming, equipment replacement, income, costs.

1. INTRODUÇÃO

Uma parte significativa dos ativos das empresas florestais refere-se a máquinas e equipamentos, que apresentam custos de aquisição e operacionais bastante elevados, exigindo das empresas cuidados com a sua utilização e com a determinação da vida útil.

A substituição, seja tardia ou prematura, de máquinas e equipamentos leva a organização a incorrer em perdas financeiras, respectivamente, na recuperação de capital ou nos elevados custos operacionais do bem (Valverde e Rezende, 1997). Ao otimizar a troca de equipamentos, pressupõe-se a definição e prévia análise do horizonte de planejamento, do futuro do investimento, dos custos

operacionais, da depreciação, da taxa de juros, da utilização correta do ativo, dos programas de manutenção e reparos e dos critérios econômicos a serem considerados (Valverde e Rezende, 1997). A substituição de equipamentos mostra-se, dessa forma, uma atividade complexa, que resultará em uma importante tomada de decisão.

Segundo Gupta e Cozzolino (1974), a estrutura mais simples de substituição de um equipamento é caracterizada quando o processo de depreciação é conhecido e representado por um aumento de custo operacional e uma diminuição do valor de revenda e da sua capacidade de trabalho constante ou decrescente com o tempo.

Apresentam-se como motivadores da substituição de equipamentos: melhores tecnologias, mudanças nos requerimentos dos serviços e nos próprios equipamentos, mudança na legislação tributária e casualidades (Grant, 1960). A substituição é efetuada quando o equipamento inicia um processo de incapacidade de realização de suas funções, podendo, entretanto, ser substituído por outro mais funcional, que resulte em redução de custos operacionais e aumento de eficiência (Massé, 1962). Nota-se que aspectos como a vida útil do equipamento e o seu valor residual são freqüentemente considerados na determinação do tempo ótimo de troca de máquinas e equipamentos. Dentre os métodos utilizados para determinação da substituição ótima de equipamentos destacam-se o do custo médio total, do custo anual equivalente e o de equações diferenciais (ciclo terminal, substituição parcial ou retirada e cadeia de substituição) e o uso da programação dinâmica (PD), como ferramentas para definir a substituição.

Apesar de cada método apresentar suas características próprias, a programação dinâmica é bastante promissora, pois, além de flexível, busca soluções de forma rápida e otimizada dentro de um leque maior de opções. É um método de decomposição que se baseia no princípio da otimalidade de Bellman, aplicável em situações em que diversas decisões são requeridas na determinação da solução ótima de um sistema composto de distintos estágios, no qual as decisões em estágios subseqüentes não afetam os resultados de estágios anteriores (Nenhauer, 1966; Beveridge e Schechter, 1970; Dreyfus e Law, 1977).

Os modelos de PD aplicados na substituição de equipamentos objetivaram minimizar custos, sem considerar as receitas geradas conforme o modelo utilizado por Filgueiras (1997). Contudo, sabe-se que as máquinas e os equipamentos podem gerar receitas (aluguéis e fretes). O fato de incluir a receita do equipamento como variável de decisão pode alterar essa decisão.

Na área florestal é grande o investimento em máquinas e equipamentos que em sua maioria apresentam custos elevados, daí a necessidade de eles operarem em jornadas extensas de uso intensivo, para redução de custos fixos. As máquinas são submetidas a condições de trabalho adversas, gerando elevados custos de reparos, manutenção e consertos. Nas últimas décadas observou-se a introdução de modernas técnicas de mecanização, principalmente no que diz respeito à colheita florestal. Grandes organizações utilizam-se de equipamentos de forma experimental, buscando mais produtividade nos serviços florestais. Nota-se, dessa forma, que diversas empresas do segmento florestal estão intensificando seu investimento em maquinário. Assim, estudos sobre substituição de máquinas e equipamentos são fundamentais na tomada de decisão.

O objetivo geral deste estudo foi desenvolver um modelo com o uso de programação dinâmica incorporando a receita do equipamento, a fim de proporcionar ao planejador florestal subsídios relativos à inversão de capital em novos equipamentos ao longo do horizonte de planejamento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Modelo de Programação Dinâmica para Substituição de Equipamentos Minimizando Custo

Um dos modelos utilizados neste estudo como ferramenta para definir o momento ideal para a substituição do equipamento foi o mesmo utilizado por Filgueiras (1997) e também por Gupta e Cozzolino (1974), em que o objetivo foi a minimização dos custos operacionais. Foram adotadas algumas notações e termos básicos para a formulação do problema e o desenvolvimento do modelo, conforme mostrado a seguir:

Horizonte de Planejamento: conjunto de períodos sucessivos no decorrer do qual há interesse em se otimizar determinada variável ou função; corresponde ao número de estágios.

Estágios: representa o número de anos futuros nos quais a capacidade do equipamento é necessária.

Estado: situação do sistema em determinado estágio, caracterizada por uma ou mais variáveis quantitativas ou qualitativas.

Transição: passagem do sistema do estado em que se encontra num determinado estágio para um estado associado ao estágio seguinte; a transição de estados é caracterizada pela mudança dos valores especificativos das variáveis de um estado para outro.

Decisão: a decisão no início de cada estágio consiste em reter o equipamento em uso por mais um ano ou substituí-lo e começar o ano seguinte com o equipamento novo.

Política: conjunto de decisões sucessivas ao longo do horizonte de planejamento.

N = número total de estágios ou tamanho do horizonte de planejamento.

n = idade do equipamento com a qual o processo é iniciado, em anos, $n = 1, 2, \dots, N$.

P_o = valor de aquisição de um equipamento novo, em R\$.

C_n = custo operacional anual de um equipamento no início do ano n , $n = 1, 2, \dots, N$, em R\$; C_n é determinado pelo produto do custo/hora e pelo número de horas em operação no ano n .

R_n = valor de revenda de um equipamento, no final do ano n , $n = 1, 2, \dots, N$, em R\$.

p_n = fator de custos anuais não-controláveis de um tipo ou classe de equipamento, expresso em termos percentuais em relação a C_n , que varia em função da idade do equipamento.

i = taxa de desconto anual.

Com base nas variáveis anteriormente definidas, formulou-se, então, a seguinte relação de recorrência:

$$f_N(n) = \text{Min} \{ [C_{n+1} * (1+p_{n+1}) * (1+i)^{-(n+1)}] + f_{N-1}(n+1) = \text{reter}; \quad (1)$$

$$P_o - [R_n * (1+i)^{-n}] + [C_1 * (1+p_1) * (1+i)^{-1}] + f_{N-1}(1) = \text{substituir} \quad (2)$$

$$\text{Com } f_o(n) = -R_n * (1+i)^{-n}, \quad (3)$$

em que $f_N(n)$ = custo total atualizado dos N estágios futuros, tendo o equipamento em consideração n anos de uso no início do processo e sendo tomadas decisões ótimas em todos os futuros estágios.

Observa-se que, no final do processo ($f_o(n)$), ocorre a venda do equipamento ou sucata, por isso $f_o(n) = -R_n * (1+i)^{-n}$.

A decisão econômica ótima é tomada comparando-se os valores da relação de recorrência referentes a manter ou substituir o equipamento para o ano seguinte do processo, isto é, o equipamento é mantido quando o custo de retenção é menor que o custo de substituição; caso contrário, o equipamento deve ser substituído.

2.2. Modelo com Programação Dinâmica Incluindo Receita do Equipamento

Para se incluir a receita, apesar de a dinâmica ser a mesma, neste novo modelo se procura maximizar os lucros, enquanto no anterior procura-se minimizar os custos. Neste caso, será introduzida a receita (anual) gerada pelo equipamento, seja pelo aluguel da máquina ou pela sua utilização no processo produtivo, ou a receita do frete, no caso de veículos.

A definição das variáveis do modelo desenvolvido para este trabalho, associada ao objetivo de maximização dos lucros anuais do equipamento, proporcionou a formulação da seguinte relação de recorrência:

$$f_N(n) = \text{máx}$$

$$[Rf_{n+1} * (1+i)^{-(n+1)}] - [C_{n+1}(1+p_{n+1}) * (1+i)^{-(n+1)}] + f_{N-1}(n+1) = \text{reter} \quad (4)$$

$$[Rf_1 * (1+i)^{-1}] + [Rn(1+i)^{-n}] - P_o - [C_1(1+p_1) * (1+i)^{-1}] + f_{N-1}(1) = \text{substituir} \quad (5)$$

$$\text{Com } f_o(n) = R_n * (1+i)^{-n}, \quad (6)$$

em que Rf_n é a receita gerada pelo equipamento no ano n; as demais variáveis foram definidas conforme anteriormente.

2.3. Estudo de Caso

A utilização dos modelos propostos se deu através de dados atualizados, que representam a rotina de atividades do setor florestal. Dessa forma, foi elaborado um estudo de caso de um trator de porte médio, com informações que podem ser observadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados sobre um trator de porte médio utilizado em operações florestais

Variável	Valor
Valor de aquisição do equipamento novo	R\$60.000,00
Custo operacional	R\$14,00/hora
Receita gerada pelo equipamento	R\$30,00/hora
Taxa de juros	6% a.a.
Horas trabalhadas anualmente	2.000 horas/ano
Duração do processo	10 anos

2.4. Pós-otimização

A pós-otimização foi realizada efetuando-se variações nas variáveis valor de aquisição de um equipamento novo, taxa de juros, receita e custo operacional, da seguinte forma: elevou-se o valor de aquisição de R\$60.000,00 para R\$150.000,00, a taxa de juros de 6% para 18%, a receita de R\$30,00 para R\$50,00 e o custo operacional de R\$14,00 para R\$25,00. Essas alterações foram aplicadas nos dois modelos, a fim de verificar o efeito que a mudança em cada variável causaria sobre a decisão final.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Aplicação dos Modelos

Para testar a aplicabilidade dos modelos e compará-los, considerou-se um trator de porte médio com valor de aquisição de R\$60.000,00, sendo os demais dados conforme apresentado nos Quadros 1 e 2.

Quadro 2 – Custo operacional, receita do equipamento, valor de revenda e fator de custos imprevistos

Idade (n)*	Custo Operacional**	Receita do Equipamento**	Valor de Revenda**	Fator de custo (P_n)
1	28000	60.000	43.200	0,05
2	29960	58.800	36.000	0,10
3	32057	57.624	29.400	0,15
4	34301	56.472	25200	0,20
5	36702	55.342	22.200	0,25
6	39271	54.235	18.600	0,30
7	42020	53.151	15.600	0,35
8	44962	52.088	13.200	0,40
9	48109	51.046	12.000	0,45
10	51477	50.025	11.400	0,50

* em anos; ** em R\$.

Nota-se, na Figura 1, um rápido decréscimo do valor de revenda do equipamento, principalmente nos primeiros anos.

O custo operacional, por sua vez, demonstra um crescimento aproximadamente linear; em contrapartida, pode-se observar a tendência descendente da linha da receita anual que é superada pelo custo a partir do décimo ano de vida útil do equipamento. Nesse momento, o valor de revenda deste se mostra muito baixo, devido à depreciação sofrida pelo equipamento no decorrer do processo.

O fator de custo (p_n) considerado também é crescente, componente este que faz com que o custo sofra aumento maior com o tempo.

Esses dados, embora aproximados, seguem uma tendência esperada para essas variáveis ao longo da vida útil do equipamento.

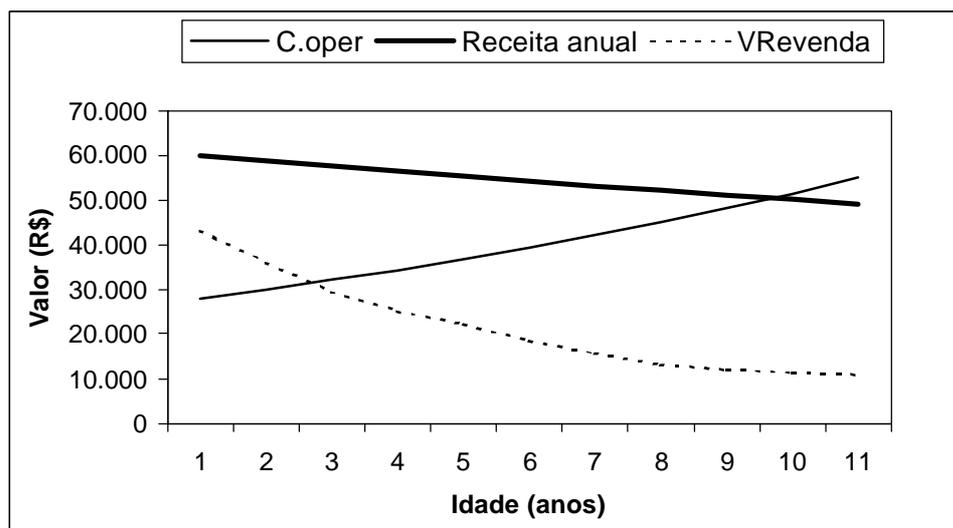


Figura 1 – Tendência da evolução do custo operacional, receita anual e valor de revenda do equipamento durante sua vida útil.

A partir dos dados do Quadro 2 e da taxa de juros de 6% a.a., obtiveram-se os resultados para o modelo com receita (MCR), que são apresentados no Quadro 3, e para o modelo sem receita (MSR), no Quadro 4.

No Quadro 3 são ilustrados os resultados obtidos com a utilização do modelo com receita gerada por um equipamento com valor de aquisição de R\$60.000,00, trabalhando 2.000 horas por ano e com taxa de juros de 6% ao ano.

Observa-se que o equipamento com um ano de uso ($n=1$) seria retido em todos os estágios (de $f1$ a $f7$). Já o equipamento com dois anos de uso ($n=2$), utilizado por mais um ano ($f1$), seria retido, porém, se este equipamento fosse utilizado por dois anos ou mais ($f2$, $f3$, fn), deveria ser substituído. O modelo indica que, para as demais situações, o equipamento seria substituído.

No Quadro 4 encontram-se os resultados obtidos com a utilização do modelo sem receita. Neste caso, para a maioria das situações a melhor opção, ou seja, a que minimiza os custos, seria reter o equipamento por mais tempo. Em poucos casos aparece a substituição. Para interpretação do modelo, um equipamento que fosse utilizado por mais um ano ($f1$) seria retido seja qual for a sua idade. Já no ($f2$), ou seja, caso o equipamento fosse utilizado por dois anos e tivesse até sete anos de idade, ele seria retido. Entretanto, um equipamento com oito anos seria substituído.

Quadro 3 – Lucro (R\$) e solução ótima do problema de substituição de equipamento relativo ao modelo com receita (MCR), para um equipamento de idade (n) que será utilizado por N anos ($f_N(n)$)

Ie	f1		f1	f2		f2	f3		f3	f4		f4	f5		f5	f6		f6	f7		f7
	n	Reter		Subst	Reter		subst	Reter		subst	Reter										
1	55040,94	50377,36	R	65114,88	64663,58	R	78949,80	74737,52	R	89023,74	88572,45	R	102858,67	98646,38	R	112932,61	112481,31	R	126767,53	122555,25	R
2	42113,81	41662,51	R	51736,45	55948,74	S	66022,67	66022,67	S	76096,61	79857,60	S	89931,54	89931,54	S	100005,47	103766,46	S	113840,40	113840,40	S
3	32087,77	34307,45	S	41710,42	48593,67	S	55996,64	58667,61	S	66070,58	72502,54	S	79905,50	82576,47	S	89979,44	96411,40	S	103814,37	106485,34	S
4	23661,35	29583,40	S	33284,00	43869,62	S	47570,22	53943,56	S	57644,16	67778,49	S	71479,08	77852,43	S	81553,02	91687,35	S	95387,95	101761,29	S
5	15355,71	26211,77	S	24978,35	40498,00	S	39264,57	50571,93	S	49338,51	64406,86	S	63173,44	74480,80	S	73247,37	88315,72	S	87082,30	98389,66	S
6	7995,94	22734,91	S	17618,58	37021,13	S	31904,80	47095,07	S	41978,74	60929,99	S	55813,67	71003,93	S	65887,60	84838,86	S	79722,53	94912,80	S
7	1468,71	19997,53	S	11091,35	34283,76	S	25377,57	44357,69	S	35451,51	58192,62	S	49286,44	68266,56	S	59360,37	82101,48	S	73195,30	92175,42	S
8	-3973,16	17904,48	S	5649,48	32190,71	S	19935,70	42264,64	S	30009,64	56099,57	S	43844,56	66173,51	S	53918,50	80008,44	S	67753,43	90082,37	S
9	-8817,29	16725,42	S	805,35	31011,65	S	15091,58	41085,58	S	25165,51	54920,51	S	39000,44	64994,45	S	49074,38	78829,37	S	62909,30	88903,31	S
10	-13459,42	15988,34	S	-3836,78	30274,56	S	10449,44	40348,50	S	20523,38	54183,43	S	34358,31	64257,37	S	44432,24	78092,29	S	58267,17	88166,23	S

R (Reter) . S (Substituir).

11

Quadro 4 – Custo (R\$) e solução ótima do problema de substituição de equipamento relativo ao modelo sem receita (MSR), para um equipamento de idade (n) que será utilizado por N anos ($f_N(n)$)

Ie	f1		f1	f2		f2	f3		f3	f4		f4	f5		f5	f6		f6	f7		f7
	n	Reter		Subst	Reter		Subst	Reter		subst	Reter		subst	Reter		subst	Reter		subst	Reter	
1	-2709,15	6226,42	R	35599,14	44271,98	R	72926,90	82580,27	R	110581,14	119908,03	R	150048,27	157562,27	R	190512,74	197029,40	R	232099,29	237493,88	R
2	6268,41	14941,26	R	43596,18	52986,83	R	81250,41	91295,11	R	120717,55	128622,88	R	161182,02	166277,11	R	202768,57	205744,25	R	241913,16	246208,72	R
3	12642,96	22296,33	R	50297,19	60341,89	R	89764,33	98650,18	R	130228,80	135977,94	R	171815,35	173632,18	R	210959,95	213099,31	R	248614,18	253563,79	R
4	17693,47	27020,37	R	57160,61	65065,94	R	97625,08	103374,22	R	139211,63	140701,99	R	178356,23	178356,23	S	216010,46	217823,36	R	255477,59	258287,83	R
5	22878,00	30392,00	R	63342,48	68437,57	R	104929,02	106745,85	R	146212,99	144073,62	S	183540,75	181727,85	S	221194,99	221194,99	S	242591,49	261659,46	R
6	27352,21	33868,87	R	68938,75	71914,43	R	111407,68	110222,72	S	150687,19	147550,48	S	188014,96	185204,72	S	206601,23	224671,85	R	206601,23	265136,33	R
7	31211,65	36606,24	R	73680,58	74651,81	R	116238,35	112960,09	S	154546,64	150287,86	S	168874,13	187942,09	R	168874,13	227409,23	R	168874,13	267873,70	R
8	34187,08	38699,29	R	78040,78	76744,86	S	119213,78	115053,14	S	129380,63	152380,91	R	129380,63	190035,14	R	129380,63	229502,28	R	129380,63	269966,75	R
9	36750,91	39878,35	R	82401,46	77923,92	S	88090,77	116232,20	R	88090,77	153559,97	R	88090,77	191214,20	R	88090,77	230681,34	R	88090,77	271145,81	R
10	39284,85	40615,43	R	44974,15	78661,00	R	44974,15	116969,28	R	44974,15	154297,05	R	44974,15	191951,29	R	44974,15	231418,42	R	44974,15	271882,89	R

R (Reter) . S (Substituir).

Comparando o MCR e o MSR, observa-se que foram apresentados resultados diferentes em virtude da inclusão da receita do equipamento.

A partir do Quadro 3 (MCR), confeccionou-se um diagrama ou “árvore de decisão” (Figura 1), que ilustra a melhor alternativa para os três últimos anos finais do processo ou tempo em que o equipamento é necessário. Neste caso, um trator com quatro anos de uso seria substituído por um novo equipamento, sendo este retido até o final do processo.

A Figura 2 foi gerada a partir do Quadro 4 e ilustra a melhor alternativa, considerando o MSR, para os três anos finais do processo. Neste caso, um equipamento com quatro anos seria retido até o final do processo.

3.2. Pós-otimização

Para testar a aplicação dos modelos, desenvolveu-se uma planilha onde foi possível variar o valor de aquisição, a taxa de juros, o total de horas trabalhadas no ano, o custo/hora da máquina e a receita/hora desta.

Ao alterar essas variáveis, observou-se o seguinte: quando não se considera a receita do equipamento, os dois modelos se igualaram e apresentaram a mesma solução, indicando que ambos estão corretos.

Ao aumentar o valor de aquisição de R\$60.000,00 para R\$150.000,00, nota-se que tanto o MCR como o MSR resultaram na retenção do equipamento por mais tempo, significando que, em função do maior valor do bem, seria necessário um maior prazo para o retorno do capital investido.

Elevando-se a taxa de juros de 6% para 18%, ambos os modelos resultaram em soluções que recomendaram a retenção do equipamento por mais tempo.

O aumento de receita teve efeito inverso, possibilitando retorno mais rápido do capital. Assim, ao aumentar o valor da receita de R\$30,00 para R\$50,00, obtiveram-se soluções que recomendaram a retenção do equipamento por menos tempo.

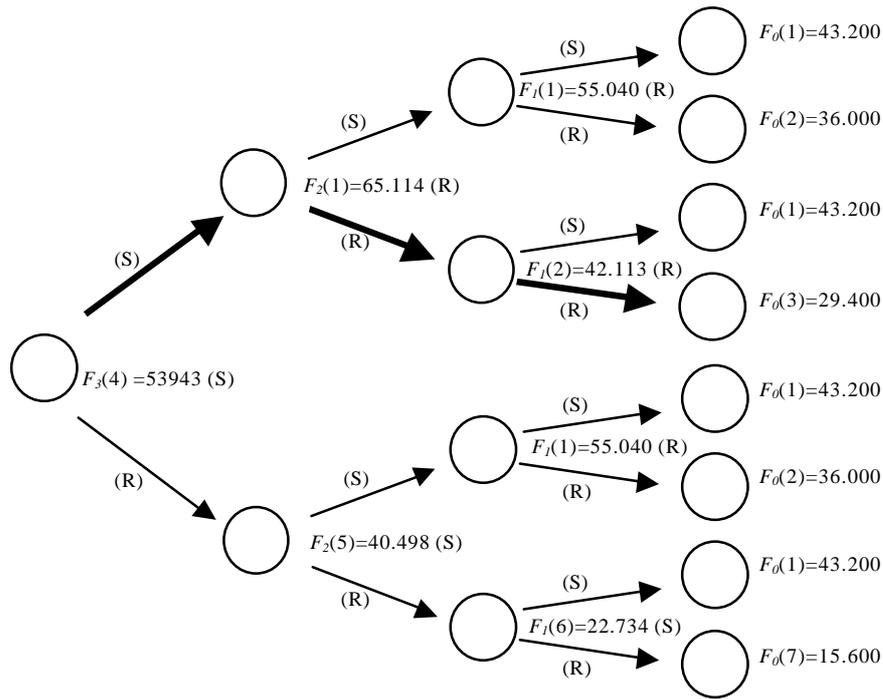


Figura 1 – Árvore de decisão do modelo de programação dinâmica com receita, ou seja, com maximização do lucro, para um equipamento com quatro anos de uso ser utilizado por mais três anos.

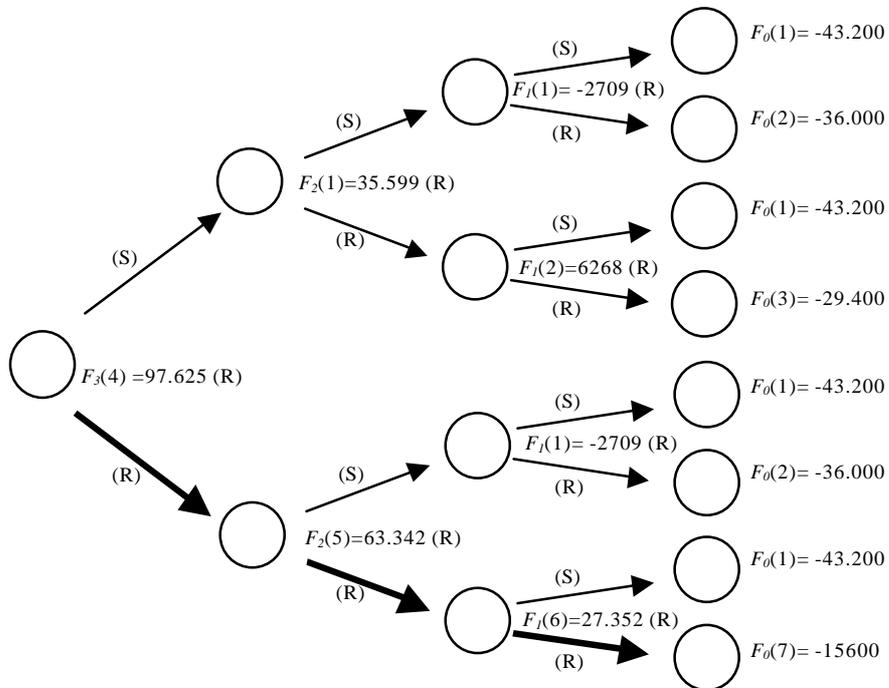


Figura 2 – Árvore de decisão do modelo de programação dinâmica sem receita, ou seja, com minimização dos custos, para um equipamento com quatro anos de uso ser utilizado por mais três anos.

Ao considerar custos operacionais mais elevados, é recomendado que o equipamento seja substituído mais cedo por um novo. Assim, ao elevar os custos operacionais de R\$14,00 para R\$25,00, tanto no modelo MCR como no MSR, isso resultou em menor tempo de retenção do equipamento.

Observou-se que o modelo com receita (MCR) é mais afetado pelo valor de aquisição, ou seja, quanto mais se eleva o valor de aquisição, mantendo as demais variáveis constantes, o modelo com receita resulta em retenções do equipamento por mais tempo.

O modelo sem receita (MSR) foi mais sensível a variações na taxa de juros. Assim, quanto mais elevada esta taxa, mais se recomenda reter o equipamento; taxas acima de 8% resultaram em soluções recomendando a retenção do equipamento para todas as situações.

Além das variáveis citadas, a solução ótima pode ser afetada pela forma das curvas de custo operacional, de valor de revenda e receita da máquina, enfim, depende do tipo ou modelo do equipamento.

O resumo da análise de sensibilidade é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Resumo da análise de sensibilidade

Variável	Modelo com receita	Modelo sem receita
↑ Valor de Aquisição	Reter mais tempo	Reter mais tempo
↑ Taxa de Juros	Reter mais tempo	Reter mais tempo
↑ Receita	Reter menos tempo	–
↑ Custo Operacional	Reter menos tempo	Reter menos tempo

4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento do referido modelo e a análise dos respectivos resultados permitiram chegar às seguintes conclusões:

- A vantagem de se usar a PD, neste caso, é que esta ferramenta oferece ao planejador uma gama de alternativas bem maior na hora da tomada de decisão.

- O modelo proposto foi satisfatório de acordo com o objetivo do trabalho, pois com o seu desenvolvimento foi possível oferecer decisões ótimas de substituir ou reter o equipamento.
- Um aumento no valor de aquisição do equipamento pode acarretar o adiamento na substituição ótima da capacidade de serviço do equipamento em análise.
- O modelo que inclui apenas custos é mais indicado para situações em que o equipamento é utilizado sem se preocupar com a geração de receitas anuais; neste caso, o que mais afetou a decisão foi a taxa de juros utilizada.
- O modelo com receita é mais indicado para situações em que o equipamento gera receitas diretas, como no caso de aluguel ou frete do equipamento.
- A escolha da taxa de juros deve ser criteriosa, pois afeta a rentabilidade do investimento e também para que o processo de substituição apresente coerência com a realidade do problema.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEVERIDGE, G. S. D.; SCHECHTER, R. S. **Optimization: theory and practice.** Tóquio: 1970. 773 p.

DREYFUS, S. E.; LAW, A. M. **The art and theory of dynamic programming.** San Diego: 1977. 284 p.

FILGUEIRAS, J. F. **Um modelo de substituição de equipamentos para minimizar custos operacionais em uma empresa florestal.** 1997. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

GUPTA, S. K.; COZZOLINO, J. M. **Fundamentals of operations research for management: an introduction to quantitative methods.** San Francisco: 1974. 405 p.

GRANT, E. L. **Principles of engineering economy.** New York: 1960. 623 p.

KAUFMANN, A.; CRUON, R. **La programmation dynamique.** Paris: 1965. 273 p.

MASSÉ, P. **Optimal investment decisions: rules for action and criteria for choice.** New Jersey: 1962. 500 p.

NENHAUSER, G. L. **Introduction to dynamique programming**. New York: 1966. 256 p.

VALVERDE, S. R.; REZENDE, J. L. P. Princípio de substituição de máquinas e equipamentos. **Revista Árvore**, v. 21, n. 3, p. 353-364, 1997.

3. RESUMO E CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver dois trabalhos. No primeiro foi verificada a viabilidade econômica de se fazer a transformação de um veículo transportador de madeira composto de um cavalo mecânico com um semi-reboque de três eixos em caminhão *truck* e, posteriormente, em caminhão *toco*; para isso, desenvolveu-se um modelo para definir os momentos ótimos de fazer as transformações, com base em equações diferenciais. No outro foi proposto um modelo de programação dinâmica incluindo a receita gerada pelo equipamento e comparando com um modelo tradicional de minimização de custos, aplicando ambos num estudo de caso utilizando um trator de médio porte.

Como conclusões do primeiro artigo, teve-se:

- O modelo desenvolvido mostrou-se eficiente no suporte à tomada de decisão no que se refere aos veículos de transporte pesado, que representam um importante ativo nas empresas florestais.
- Em conformidade com as condições nas quais o estudo foi desenvolvido, concluiu-se que a metodologia proposta é eficiente para mensurar os momentos ótimos de troca ou transformação do equipamento em questão.
- É possível maximizar o lucro do conjunto de versões utilizadas, sendo carreta, *truck* e *toco*.

- Com base nos dados de custos e receitas utilizados, a transformação mostra-se como uma alternativa viável para a substituição.

No segundo trabalho, concluiu-se que:

- O modelo proposto foi satisfatório de acordo com o objetivo do trabalho, pois com o seu desenvolvimento foi possível oferecer decisões ótimas de substituir ou reter o equipamento.
- A vantagem de se usar a PD, neste caso, é que esta ferramenta oferece ao planejador uma gama de alternativas bem maior na hora da tomada de decisão.
- Um aumento no valor de aquisição do equipamento pode acarretar o adiamento na substituição ótima da capacidade de serviço do equipamento em análise.
- O modelo que inclui apenas custos é mais indicado para situações em que o equipamento é utilizado sem se preocupar com a geração de receitas anuais; neste caso, o que mais afetou a decisão foi a taxa de juros utilizada.
- O modelo com receita é mais indicado para situações em que o equipamento gera receitas diretas, como no caso de aluguel ou frete do equipamento.
- A escolha da taxa de juros deve ser criteriosa, pois ela reflete o retorno esperado do investimento e também para que o processo de substituição apresente coerência com a realidade do problema.