

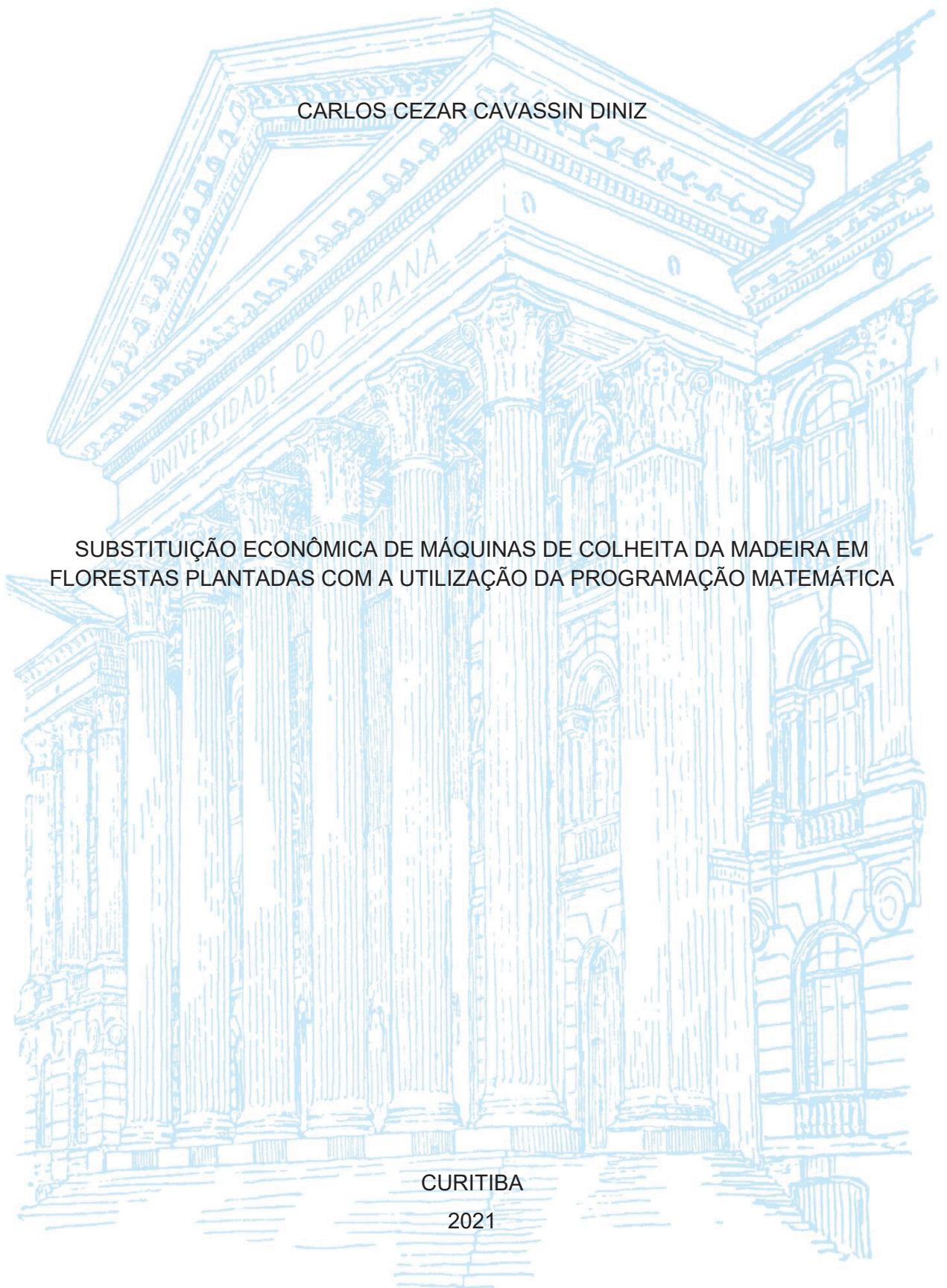
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS CEZAR CAVASSIN DINIZ

SUBSTITUIÇÃO ECONÔMICA DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA EM
FLORESTAS PLANTADAS COM A UTILIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

CURITIBA

2021



CARLOS CEZAR CAVASSIN DINIZ

SUBSTITUIÇÃO ECONÔMICA DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA EM
FLORESTAS PLANTADAS COM A UTILIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador:

Prof. Dr. Romano Timofeiczuk Junior

Coorientador:

Prof. Dr. Renato Cesar Gonçalves Robert

Prof. Dr. João Carlos Garzel Leodoro da Silva

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

CURITIBA

2021

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Diniz, Carlos Cezar Cavassin

Substituição econômica de máquinas de colheita da madeira em florestas plantadas com a utilização da programação matemática / Carlos Cezar Cavassin Diniz. - Curitiba, 2021.

105 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Romano Timofeiczky Junior

Coorientadores: Prof. Dr. Renato Cesar Gonçalves Robert

Prof. Dr. João Carlos Garzel Leodoro da Silva

Prof. Dr. Eduardo da Silva Lopes

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 29/10/2021.

Área de concentração: Economia e política florestal.

1. Máquinas florestais - Custos. 2. Madeira - Exploração - Custos. 3. Madeira - Exploração - Planejamento. 4. Programação (Matemática). 5. Teses. I. Timofeiczky Junior, Romano. II. Robert, Renato Cesar Gonçalves. III. Silva, João Carlos Garzel Leodoro da. IV. Lopes, Eduardo da Silva. V. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. VI. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.66

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga – CRB 9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **CARLOS CEZAR CAVASSIN DINIZ** intitulada: **SUBSTITUIÇÃO ECONÔMICA DE MÁQUINAS DE COLHEITA DA MADEIRA EM FLORESTAS PLANTADAS COM A UTILIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA**, sob orientação do Prof. Dr. ROMANO TIMOFEICZYK JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 29 de Outubro de 2021.

Assinatura Eletrônica

29/10/2021 13:58:51.0

ROMANO TIMOFEICZYK JUNIOR
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/11/2021 10:09:11.0

GABRIEL DE MAGALHAES MIRANDA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO OESTE)

Assinatura Eletrônica

12/11/2021 15:29:03.0

ROBERTO ANTONIO TICLE DE MELO E SOUSA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO)

Assinatura Eletrônica

29/10/2021 12:17:04.0

JULIO EDUARDO ARCE

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

29/10/2021 13:32:18.0

DANILO SIMÕES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 123182

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 123182

Para minha avó Adinilde (*in memoriam*), que
sempre me incentivou a estudar.

AGRADECIMENTOS

Escrever uma tese nunca é fácil, e eu jamais teria me arriscado a escrevê-la sem o apoio e incentivo das pessoas à minha volta. Romano Timofeiczky Junior e John Sessions, meus principais orientadores nessa jornada, não hesitaram e nem empalideceram quando eu disse que queria escrever uma tese sobre momento ótimo econômico de substituição de máquinas; a orientação de vocês foi uma benção. Renato Cesar Gonçalves Robert, João Carlos Garzel Leodoro da Silva e Eduardo da Silva Lopes também foram cúmplices nesta jornada de vários modos. Considero-me extremamente virtuoso por ter vocês como parte do meu comitê de orientação, pois seus comentários no manuscrito foram inestimáveis e pouparam você, caro leitor, da leitura de centenas de palavras desnecessárias.

A melhor coisa de ser um pesquisador é ser pago para aprender coisas completamente novas na vida adulta. No entanto, a busca dessa educação contínua seria impossível sem a paciência das pessoas que pedimos que sejam nossos professores. Sou grato a todos. Embora nem todos que me ajudaram sejam citados nominalmente aqui, foram todos excelentes professores, e sou profundamente grato por sua paciência e generosidade. Obrigado também Felipe Martins de Oliveira, Carla Krulikowski Rodrigues Pelissari, Flávio Cipriano de Assis do Carmo, Jean Alberto Sampietro, Marcelo Bonazza e, Gilson Scofield dos Santos: poder discutir com vocês sobre este trabalho teve um valor inestimável; sempre saí de nossas conversas com algo inteligente, útil e inesperado. Seu apoio, curiosidade e incentivo fizeram toda a diferença. Agradecimento especial a Klabin SA e as incríveis pessoas que me assistiram ao longo do projeto: Rogério Salamuni, Altair Negrello Junior, Eduardo Kremer Custódio de Souza, Reinaldo Correia, Wanderlei Machado e André Alves Pereira.

Tive seis meses produtivos e agradáveis como visitante na *Oregon State University*, que me deram a oportunidade de escrever sobre a história da pesquisa de substituição de máquinas em uma das melhores escolas de florestas do mundo. A universidade me ofereceu o ambiente perfeito para o trabalho, bastava ir à biblioteca para ter acesso a grande parte das pesquisas realizadas até o momento. Tive a sorte de conhecer e trabalhar com uma das pessoas que mais admiro, e me refiro não só ao lado profissional como também humano, obrigado John Sessions, a gratidão que tenho por tudo que essa experiência me proporcionou é infinita. Tenho

também uma dívida com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Universidade Federal do Paraná (UFPR) que me forneceram todas as ferramentas possíveis para a realização desta pesquisa. Agradecimento especial à Alexandra Asanovna Elbakyan por fundar o site Sci-Hub e oferecer acesso gratuito a incontáveis artigos acadêmicos.

Um longo projeto de tese acaba sendo um ponto de inflexão no clima emocional de uma pessoa, e ainda mais nesse caso. Quando embarquei nesta longa e estranha viagem, me perguntei o que isso significaria para as minhas três décadas vividas? Nunca imaginei que esse período poderia me revelar amigos como os que fiz. Neste período tive três experiências únicas, entre elas mudar de país, fundar minha própria empresa e trabalhar durante as férias de verão em uma Ilha. Obrigado Vera Tubino, Cintia Ribelato Longhini, Roy Ribelato, Fred Almeida, Cacau Almeida, Felipe Nogueira da Silva, Samuel Senna de Sales, Igor Klein, Hannai Adur, Pedro Caetano Borges Schemes da Silva, Guilherme Coelho, Kauê Alaponte, Guilherme Furtado, Huang Hsin Han, Leandro Zanlourenzi, Kyle Christensen, Oatis Christensen (*in memorian*), Ethan Monie, Saidie Monie, Adan e Emy Rodriguez, Monica Echeverri, Fernando Passos, Jailson Crovador, Claudio Guevara, Isadora Vigano Lattmann e demais amigos que não foram nominalmente citados. Por fim, agradeço aos membros da minha família – Adinilde de Fátima Almeida (*in memorian*), João Domingos Cavassin (*in memorian*), Beatris Cristina Cavassin, Amauri Diniz, Amábele Cavassin Diniz Alessi, César Maurício Cavassin e, João Arthur Cavassin – que acreditaram, incentivaram e me acompanharam mesmo que a distância nesta viagem.

“A ciência não é uma ilusão, mas seria uma ilusão acreditar que poderemos encontrar noutra lugar o que ela não pode nos dar.”

Sigmund Freud

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia usando um algoritmo de programação matemática para minimização do custo total presente (CTP), considerando o progresso tecnológico de máquinas de colheita da madeira ao longo do horizonte de planejamento. O problema foi baseado em um estudo de caso com um *harvester* e *forwarder* com horizonte de planejamento de 100 anos, onde o limite máximo de substituição foi de 8 anos. A metodologia foi implementada em uma planilha eletrônica. Para utilização da planilha eletrônica, foi necessário gerar listas de entrada a partir de fluxos de caixa, que incorporaram as possíveis combinações de substituição de uma série de máquinas de acordo com o tamanho do horizonte de planejamento e o limite máximo de substituição. As listas foram formadas por três descritores: nó predecessor, nó futuro e arco de ligação, caracterizados pelo momento de compra da máquina, pelo ponto de venda para aquisição de nova máquina, e pelas informações de CTP, custo médio de produção e produção média, respectivamente. Após a identificação dos cronogramas de substituição, procurou-se identificar o quanto os valores iniciais dos parâmetros que formaram os fluxos de caixa precisavam ser modificados a ponto de alterar os cronogramas de substituição. Os cronogramas identificados também foram comparados com cronogramas alternativos de substituição, sugeridos em estudos científicos e por empresas florestais brasileiras. Os resultados mostram que o CTP identificado para a série de substituições do *harvester* foi maior em relação ao *forwarder*. Também foi identificado que a vida econômica do *harvester* é mais curta, sendo que a partir da introdução de novas tecnologias, houve redução na vida econômica de ambas as máquinas. A introdução de novas tecnologias também foi responsável pela redução do custo médio de produção e aumento da produção média das máquinas. A análise de sensibilidade permitiu verificar que a produtividade exerce pouca influência sobre o CTP, pois não estão sendo consideradas as receitas para identificação do cronograma ótimo econômico de substituição. O parâmetro que exerceu maior influência sobre o CTP foi a taxa de utilização, indicando que ao investir em boas práticas de manutenção, o tomador de decisão tem a possibilidade de reduzir os custos do processo de substituição das máquinas. Ao testar diferentes horizontes de planejamento, identificou-se que para a taxa de desconto utilizada (0,0645 a.a.), o tamanho ideal do horizonte de planejamento esteve entre 450 e 600 meses. Ao comparar os cronogramas de substituição, verificou-se os cronogramas alternativos apresentaram maior valor de CTP e custos médios de produção, indicando que a utilização da planilha eletrônica é a melhor forma de evitar aumento dos custos, causados por decisões baseadas em um planejamento estratégico inadequado.

Palavras-chave: Vida econômica; progresso tecnológico; operações florestais, custo de colheita florestal, substituição de máquinas, colheita da madeira, CTL.

ABSTRACT

The objective of this research was to develop a methodology using a mathematical programming algorithm to minimize the net present cost (NPC), considering technological progress of logging machines over a planning horizon. The problem was based on a case study with a harvester and forwarder, with a 100-year planning horizon, where the maximum replacement limit was 8 years. The methodology was implemented in an electronic spreadsheet. To use the electronic spreadsheet, it was necessary to generate lists from cash flows, which incorporated the possible replacement combinations of a series of machines according to the length of the planning horizon and the maximum replacement limit. The lists were formed by three descriptors: predecessor node, future node, and arc value, characterized by the moment of purchase of the machine, by the point of sale for the acquisition of a new machine, the NPC information, the mean production cost and mean production, respectively. After identifying the replacement schedules, an attempt was made to identify how much the initial parameters' values that formed the cash flows needed to be modified to the point of changing the economic replacement schedules. The identified schedules were also compared with alternative replacement schedules, scientific studies and by Brazilian forestry companies. The results show that the NPC identified for the series of harvester replacements was higher compared to the forwarder. It was also identified that the harvester's economic life is shorter, and with the technological progress, there was a reduction in the economic life of both machines. The technological progress was also responsible for reducing the average production cost and increasing the average production of machines. The sensitivity analysis allowed us to verify that productivity exerts little influence on the NPC, as revenues are not being considered to identify the optimal economic replacement schedule. The parameter that exerted the greatest influence on the NPC was the utilization rate, indicating that by investing in good maintenance practices, the decision-maker has the possibility of reducing the costs of the machinery replacement process. When testing different planning horizons, it was identified that for the discount rate used (0,0645 a.a.), the planning horizon's ideal size was between 450 and 600 months. When comparing the replacement schedules, it was found that alternative schedules had higher NPC value and mean production costs, indicating that the use of the electronic spreadsheet is the best way to avoid cost increases, caused by decisions based on inadequate strategic planning.

Keywords: Economic life; technological progress; forest operations, forest harvest cost, machine replacement, forest harvest, CTL.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. <i>Harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b) estudados.....	35
FIGURA 2. Rede de combinações de decisões de substituição.	39
FIGURA 3. Diagrama lógico para formação dos fluxos de caixa e dos descritores da lista de entrada.....	39
FIGURA 4. Custo total presente acumulado da série de substituições do <i>harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b).....	48
FIGURA 5. Custo médio de produção (a) e produção média (b) da série ótima de substituições.....	52
FIGURA 6. Variação do custo total presente do <i>harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b).	55
FIGURA 7. Custo total presente acumulado da série de substituições do <i>harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b).....	57
FIGURA 8. Custo total presente acumulado da série de substituições do <i>harvester</i> (a) e <i>forwarder</i> (b).....	60
FIGURA 9. Seção de apresentação da planilha eletrônica.	87
FIGURA 10. Seção de entrada dos dados da planilha eletrônica.	88
FIGURA 11. Seção de resultados da planilha eletrônica.....	89
FIGURA 12. Rede de possíveis combinações dos arcos dentro do horizonte de planejamento.....	90
FIGURA 13. Seção de entrada dos dados para executar o algoritmo <i>forward reaching</i>	91
FIGURA 14. Apresentação do cronograma ótimo econômico de substituição.	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Custo de aquisição das máquinas obtido em proposta comercial.....	35
TABELA 2. Cronograma de grandes revisões e custo de substituição de cada componente.	36
TABELA 3. Premissas utilizadas para construção dos fluxos de caixa.	36
TABELA 4. Equações para definição do ritmo de entrada de novas tecnologias.	37
TABELA 5. Matriz de fluxo de caixa (T) de acordo o horizonte de planejamento em meses (t).....	38
TABELA 6. Intervalo de tempo utilizado para os cronogramas de substituição alternativos.	47
TABELA 7. Cronograma de substituições do <i>harvester</i> e <i>forwarder</i>	50
TABELA 8. Variação do tempo de permanência a partir de diferentes horizontes de planejamento.	58
TABELA 9. Custo médio de produção das máquinas selecionadas ao longo do horizonte de planejamento dos cronogramas de substituição avaliados.	62
TABELA 10. Visão geral da literatura do problema de substituição de máquinas.	75
TABELA 11. Base histórica das variáveis utilizadas para formação dos fluxos de caixa.	80
TABELA 12. Lista de entrada gerada a partir do fluxo de caixa calculado em T1.	85
TABELA 13. Lista contendo os possíveis arcos dentro do horizonte de planejamento.....	90
TABELA 14. Resultado obtido após processar cada arco com o algoritmo forward reaching.	91
TABELA 15. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde o custo de aquisição foi alterado em 1% para mais e para menos.	93
TABELA 16. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a taxa de utilização foi alterada em 1% para mais e para menos.	94
TABELA 17. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os custos (O&M) foi alterado em 1% para mais e para menos.	95
TABELA 18. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a produtividade foi alterada em 1% para mais e para menos.	96
TABELA 19. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a penalidade por falta de produção foi alterada em 1% para mais e para menos.....	97
TABELA 20. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os itens de grande revisão foi alterado em 1% para mais e para menos.	98
TABELA 21. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde o custo de aquisição foi alterado em 1% para mais e para menos.	99

TABELA 22. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a taxa de utilização foi alterada em 1% para mais e para menos.	100
TABELA 23. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os custos (O&M) foi alterado em 1% para mais e para menos.	101
TABELA 24. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a produtividade foi alterada em 1% para mais e para menos.	102
TABELA 25. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a penalidade por falta de produção foi alterada em 1% para mais e para menos.....	103
TABELA 26. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os itens de grande revisão foi alterado em 1% para mais e para menos.	104
TABELA 27. Especificações técnicas das máquinas estudadas.	105

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GERAL.....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	20
3.1. MODERNIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES FLORESTAIS.....	20
3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO.....	21
3.3. FORMAÇÃO DE CUSTOS	23
3.4. SUBSTITUIÇÃO DE MÁQUINAS	26
3.5. PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA.....	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS ADOTADAS.....	34
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
4.3. MÁQUINAS AVALIADAS.....	34
4.4. LEVANTAMENTO DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA.....	35
4.5. FORMAÇÃO DA LISTA DE ENTRADA	37
4.6. IDENTIFICAÇÃO DO CRONOGRAMA ÓTIMO ECONÔMICO	44
4.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	46
4.8. COMPARAÇÃO COM CRONOGRAMAS DE SUBSTITUIÇÃO ALTERNATIVOS ..	46
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1. IDENTIFICAÇÃO DO CRONOGRAMA ÓTIMO ECONÔMICO	48
5.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	54
5.3. COMPARAÇÃO COM CRONOGRAMAS DE SUBSTITUIÇÃO ALTERNATIVOS ..	59
6. CONCLUSÕES.....	64
7. RECOMENDAÇÕES	65
8. REFERÊNCIAS	66
9. APÊNDICE	75
5.1. APÊNDICE 1	75

5.2.	APÊNDICE 2	80
5.3.	APÊNDICE 3	85
5.4.	APÊNDICE 4	87
5.5.	APÊNDICE 5	90
5.6.	APÊNDICE 6	93
5.7.	APÊNDICE 7	99
10.	ANEXO	105
10.1.	ANEXO 1	105

1. INTRODUÇÃO

A aquisição e posterior substituição de máquinas florestais são frequentemente feitas em operações de silvicultura, colheita e transporte da madeira. Essas máquinas, quando utilizadas nas operações mencionadas, podem variar em tamanho, modelo, potência, aplicação e valor de aquisição. Na silvicultura, por exemplo, é comum a utilização de máquinas de baixo valor de aquisição e pouca tecnologia embarcada, como tratores de esteiras. Já na colheita da madeira é comum a utilização de máquinas com elevada tecnologia embarcada e alto valor de aquisição, como os *harvesters* e *forwarders*.

A colheita florestal sempre foi de grande atenção por parte das empresas consumidoras de madeira, devido a sua alta representatividade nos custos de produção, à elevada demanda de mão de obra e, também, pela natureza desgastante do trabalho, juntamente com o elevado nível de riscos de acidentes. Em alguns casos, os custos de colheita e transporte florestal representam mais de 50% do custo total da madeira posto fábrica (MACHADO *et al.*, 2014).

As máquinas de colheita da madeira compõem parte significativa dos ativos das empresas florestais e apresentam custos operacionais elevados, exigindo dessas empresas cuidados com a sua utilização e determinação de sua vida útil. A substituição dessas máquinas em momento inadequado pode apresentar um potencial de levar a organização a incorrer em perdas financeiras. Desta forma, é necessário realizar uma definição e prévia análise do horizonte de planejamento, dos custos operacionais, da depreciação, da utilização correta da máquina, dos programas de manutenção e dos reparos a serem considerados.

A estrutura de um problema de substituição é caracterizada pelo processo natural de deterioração da máquina, representado por um aumento de custo operacional e uma diminuição do valor de revenda e da sua capacidade de trabalho. Dentre os motivos que levam as empresas a substituir suas máquinas, destacam-se: entrada de novas tecnologias, mudança da operação corrente e mudança de legislações. Marques *et al.*, (2005) comentam que os métodos comumente aplicados para a determinação do momento ótimo econômico de substituição são o custo médio total, o custo anual equivalente, as equações diferenciais e o uso da programação matemática.

A programação matemática é caracterizada como uma coletânea de ferramentas utilizadas para analisar um processo sequencial de tomada de decisões, podendo ser determinística ou estocástica (DENARDO, 2003). A programação determinística considera que todas as variáveis são conhecidas ou predefinidas. Já a programação estocástica, assume que o comportamento das variáveis está associado a dada probabilidade de ocorrência. Esses modelos podem ser aplicados em problemas de substituição de máquinas que objetivam minimizar custos ou maximizar do lucro.

Bellman (1955) está entre os primeiros pesquisadores a utilizar a programação matemática para identificar o momento ótimo econômico de substituição de uma série de máquinas. Seu princípio baseia-se na decisão de manter ou substituir a máquina atual ao longo do horizonte de planejamento. Mais tarde, Wagner (1975) apresentou uma formulação alternativa de programação matemática, onde as decisões não são mais sobre manter ou substituir uma máquina, mas sobre identificar o número de períodos que se deve manter uma máquina ao longo do horizonte de planejamento.

Os modelos de programação matemática mais recentes na área florestal para auxiliar a tomada de decisão de substituição de máquinas foram formulados por Marques *et al.*, (2005) e Diniz e Sessions (2020). Marques *et al.*, (2005) propuseram um modelo que teve como objetivo maximizar o lucro, baseado no princípio de Bellman. Já, Diniz e Sessions (2020) basearam-se no princípio de Wagner, com objetivo de minimizar os custos. É importante destacar que em ambos os casos, é possível tanto a minimização dos custos quanto a maximização do lucro.

Apesar da existência desses e de outros modelos de substituição, pesquisas apontam que empresas, empreiteiros e produtores independentes, raramente, utilizam tais ferramentas, tomando suas decisões com base em experiências e intuições dos gestores. Esse tipo de comportamento faz com que os custos da atividade aumentem pela falta de um planejamento adequado. Cantú *et al.*, (2017) mencionam que as principais causas deste comportamento estão na complexidade em aplicar tais modelos, pois exige conhecimento aprofundado em economia e programação, além da obtenção de dados para aplicá-los.

Com o intuito de quebrar esse paradigma, pesquisadores como Bilek (2007), Ackerman *et al.*, (2014), Triplat e Krajnc (2020) e Sessions *et al.*, (2021) propuseram metodologias implementadas em planilhas eletrônicas e *softwares*, contudo, essas

ferramentas servem apenas para formação de custos. Dentro desse contexto, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias que possam subsidiar o processo de tomada de decisão de aquisição e substituição de máquinas evitando que empresas incorram em perdas financeiras pela substituição prematura ou tardia das máquinas por meio de decisões baseadas em experiência e intuição.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver uma metodologia de programação matemática aplicada ao processo de substituição de máquinas de colheita da madeira.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir uma planilha baseada no Microsoft *Excel* para minimizar o custo presente total de máquinas de colheita da madeira.
- Identificar o cronograma ótimo econômico de substituição de máquinas de colheita da madeira ao longo de um horizonte de planejamento;
- Verificar a variação do cronograma ótimo econômico de substituição das máquinas em função dos parâmetros que compõem o modelo; e
- Quantificar a diferença entre os cronogramas obtidos com o uso da planilha eletrônica e cronogramas alternativos de substituição.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. MODERNIZAÇÃO DAS OPERAÇÕES FLORESTAIS

A modernização das operações florestais, especialmente na colheita da madeira, somente foi possível devido ao processo de ampliação da mecanização (MCEWAN *et al.*, 2019), que também pode ser entendida como a entrada de novas tecnologias ou progresso tecnológico. A partir disso, empresas, empreiteiros e produtores independentes conseguiram garantir maior segurança durante a execução das atividades, com maiores ganhos de produtividade e redução dos custos de produção (MAC DONAGH *et al.*, 2020).

Foi na década de 1970, durante o 21st *Annual Forestry Symposium*, realizado na *Louisiana State University*, que a mecanização ganhou destaque, sendo um dos temas amplamente discutidos (SILVERSIDES, 1972). Desde então, a mecanização vem sendo abordada por diferentes pesquisadores ao redor do mundo (*e.g.* SPINELLI *et al.*, 2014; MAC DONAGH *et al.*, 2017; HARRILL *et al.*, 2019; NORDFJELL *et al.*, 2019; MAC DONAGH *et al.*, 2020).

Silversides (1997) relata que a mecanização das operações de colheita da madeira apresentou progresso, deixando os métodos manuais – com auxílio de animais – para métodos totalmente mecanizados. Lindroos *et al.*, (2017) comentam ainda que esse progresso tende a ser maior, devido, principalmente, à tecnologia de automação, como observado nos campos da robótica, inteligência artificial e sistemas de controle.

De acordo com Machado (2014), no Brasil, a história da mecanização mostra que durante muitos anos, as operações de colheita da madeira dependeram do uso de máquinas adaptadas da indústria e da agricultura para realizar suas atividades. Contudo, a utilização dessas máquinas refletia em muitas dificuldades, pois não atendiam às especificidades do setor florestal, como falta de acessórios de segurança e baixa potência dos motores, pois essas máquinas não foram fabricadas para tal finalidade.

Foi somente durante a década de 1970 quando os reflorestamentos dos incentivos fiscais estavam tendo as suas primeiras explorações que teve início a modernização das operações de colheita da madeira no Brasil, quando a indústria nacional começou a produzir maquinários de porte pequeno e médio (MACHADO *et al.*, 2014). Até então eram poucas as empresas que faziam uso de máquinas nas

operações de colheita da madeira (LIMA e LEITE, 2014), enquanto na América do Norte, já era feita a utilização de diferentes tipos de máquinas florestais, conforme Conrad IX *et al.*, (2018).

É importante comentar que o impulso para o desenvolvimento da mecanização no Brasil deve-se em grande parte ao mercado consumidor, ou seja, ao empresariado do setor florestal, pois sem determinada escala no consumo de máquinas, nenhuma fábrica se instalaria no país. Machado *et al.*, (2014) comentam que a concessão dos benefícios fiscais, associada aos investimentos privados, propiciou ao setor florestal um crescimento significativo na área reflorestada, passando de 400 mil hectares no final dos anos 1960, para 6,5 milhões de hectares em 2011. Atualmente a área reflorestada é de cerca de 9 milhões de hectares (IBÁ, 2020).

A partir da década de 1990, houve uma série de combinações que levaram empresas, empreiteiros e produtores independentes a intensificar a mecanização em suas atividades. Fiedler *et al.*, (2008) e Lopes *et al.*, (2014) comentam que a abertura do mercado para as importações e a necessidade de melhoria na eficiência e a segurança das atividades e, principalmente, a redução dos custos de produção foram fatores determinantes para essa intensificação. Em função dessas combinações, o Brasil, atualmente, possui mais de 70% das atividades de colheita de madeira realizadas totalmente mecanizadas (LUNDBÄCK *et al.*, 2021).

3.2. INDICADORES DE DESEMPENHO

Para a avaliação e controle das atividades de colheita da madeira, empresas, empreiteiros e produtores independentes fazem a utilização de indicadores de desempenho, que neste caso, podem ser classificados em dois grupos: indicadores operacionais e indicadores de custos (DI FLUVIO *et al.*, 2017). Os principais indicadores operacionais são: disponibilidade mecânica, disponibilidade técnica, taxa de utilização e produtividade, enquanto os indicadores de custos são: custo total, custo total médio e custo marginal (SILVA *et al.*, 2005).

A disponibilidade mecânica considera o tempo em que determinada máquina está disponível para atividade, descontando as horas em que a máquina ficou parada para manutenções (RODRIGUES *et al.*, 2019), sendo elas de caráter reativo e proativo, enquanto a disponibilidade técnica leva em consideração o tempo

disponível para operação, já descontadas as interrupções de manutenção e, os tempos gastos com interrupções de caráter técnico, como deslocamentos entre projetos, deslocamentos entre talhões, reuniões, entre outros (DINIZ *et al.*, 2018).

A taxa de utilização reflete o número exato de horas trabalhadas pelas máquinas, descontados os tempos improdutivos causados por interrupções de caráter mecânico e técnico. Assim, o cálculo da taxa de utilização é feito a partir do produto da disponibilidade mecânica e da disponibilidade técnica (PACCOLA, 2017). O autor comenta ainda que deve ser dada atenção especial à disponibilidade mecânica, pois trata-se do item de maior influência na formação da taxa de utilização, além de ser um indicador que tem relação direta com o grau de deterioração da máquina.

A produtividade nas atividades de corte e extração da madeira representa a capacidade produtiva das máquinas por hora de trabalho efetivo (BERG *et al.*, 2014). Quando se refere à atividade de corte, os principais fatores de influência são o volume individual das árvores, a declividade do terreno, o modelo da máquina, nível de deterioração da máquina, o tempo de experiência e habilidade do operador, dentre outros. Já para a extração da madeira, além dos fatores citados, a distância média de extração é uma variável muito importante (MALINOVSKI *et al.*, 2014).

Ackerman *et al.*, (2014) comentam que indicadores de custo são normalmente utilizados para atingir dois objetivos: estabelecer o custo de uma máquina; ou definir o preço a ser cobrado para a execução de determinada atividade. O primeiro objetivo é considerado quando as empresas ou organizações de pesquisa comparam diferentes máquinas – seja para decidir em qual máquina investir ou para determinar se pode ser lucrativo substituir uma máquina existente. O segundo objetivo é utilizado quando os contratantes desejam negociar o preço de seus serviços com potenciais empregadores, que é o caso de muitos empreiteiros.

O custo total é representado pela somatória dos custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos são aqueles que independem da quantidade produzida de um bem ou de um serviço oferecido. Enquadram-se nesta categoria os custos de investimento em máquinas (depreciação e juros), os custos da área e instalações e os custos indiretos como o custo de oportunidade do capital. Os custos variáveis são diretamente proporcionais à quantidade produzida, sendo frequentemente considerados os custos de mão de obra, matéria prima, transporte, energia e

desgaste de ferramentas (SILVA *et al.*, 2005; CASAROTTO FILHO e KOPITKE 2020).

Além do custo total, destacam-se os custos médios (custo fixo médio, custo variável médio e custo total médio) e o custo marginal. Os custos médios, representam a razão entre os custos fixos, os custos variáveis, os custos totais e a produção (REZENDE e OLIVEIRA, 2001). Já o custo marginal, representa uma variação no custo total da atividade devido à produção de uma unidade adicional do produto (SILVA *et al.*, 2005).

3.3. FORMAÇÃO DE CUSTOS

Dentre os métodos disponíveis na literatura para calcular os custos de máquinas florestais, um dos primeiros foi sugerido por Matthews (1942). Posteriormente foram publicados os métodos propostos por Miyata (1980), Sundberg e Silversides (1988), Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (1992) e Franklin (1997), sendo replicadas por diversos pesquisadores brasileiros (*e.g.* MINETTE *et al.*, 2008; ROBERT, 2013; LEITE *et al.*, 2014). As abordagens mais recentes foram publicadas por Brinker *et al.*, (2002), von Hofsten *et al.*, (2005), Bilek (2007), Hogg *et al.*, (2010), Ackerman *et al.*, (2014), Triplat e Krajnc (2020) e Sessions *et al.*, (2021).

De maneira geral, todos os métodos propostos consideram a formação dos custos a partir da soma dos custos fixos e custos variáveis. Porém é comum verificar em algumas abordagens o uso de diferentes nomenclaturas para um determinado item de formação de custo. Miyata (1980) e FAO (1992) por exemplo, substituíram o termo custo variável por custo operacional. Outra situação é tratar de forma separada um determinado item de custo que já estava incluso aos custos fixos ou variáveis. Um exemplo desse tipo é verificado na abordagem proposta pela FAO (1992), que trata separadamente os custos trabalhistas – pagamentos diretos e indiretos, como impostos, pagamentos de seguros, alimentos, subsídio de habitação, entre outros.

Outro exemplo é verificado no trabalho de Cantú *et al.*, (2017) e Jardine e Tsang (2017), os quais consideram que o custo de uma máquina de colheita da madeira é formado pelo somatório dos custos fixos, custos variáveis e custos de capital. De acordo com Bilek (2007), o custo de capital consiste no custo do

equipamento, menos qualquer empréstimo inicial do equipamento e o valor de recuperação do equipamento, mais as amortizações do empréstimo.

Além da utilização das diferentes nomenclaturas e do tratamento diferenciado para determinadas variáveis, é comum verificar a utilização de diferentes premissas para o cálculo ou estimativa de determinado item de formação de custo. Um exemplo disso está na estimativa do consumo de lubrificantes, que é estimado a partir de diferentes percentuais do consumo de combustível, podendo variar entre 10% e 50% (MIYATA, 1980; FAO, 1992; BRINKER *et al.*, 2002; BILEK, 2007; ACKERMAN *et al.*, 2014). Essas diferenças entre os métodos tornam a escolha do método uma tarefa difícil.

Bilek (2009) e Sperandio (2010) compararam diferentes métodos de formação de custos para as máquinas de colheita da madeira e identificaram que eles apresentam resultados ligeiramente diferentes. De acordo com os resultados obtidos, os autores concluíram que o melhor método a ser aplicado foi o proposto por Bilek (2007), que apresenta maior flexibilidade, se adequando a diferentes realidades. Outro ponto que acabou favorecendo a escolha do método proposto por Bilek (2007) foi a disponibilização do método implementado em uma planilha eletrônica, que permite que empresas, empreiteiros e produtores independentes a utilizem sem maiores problemas.

Ackerman *et al.*, (2014) e Triplat e Krajnc (2020) também forneceram ferramentas no formato de planilhas eletrônicas e *softwares*. No trabalho de Ackerman *et al.*, (2014) foi sugerido um método chamado *The COST*, que permite ao tomador de decisão uma visualização simultânea dos parâmetros de entrada e das saídas de custo resultantes. O objetivo dos autores foi propor um método de fácil aplicação, de forma a mitigar as diferenças entre os métodos até então fornecidos na literatura, considerando ainda as diferentes regulamentações adotadas por países como América do Norte e Europa.

Triplat e Krajnc (2020) sugeriram uma ferramenta para formação e avaliação de custos denominada *WoodChainManager*. Essa ferramenta baseada na *Web* é composta por três módulos, onde podem ser avaliados os custos totais e individuais de uma máquina ou conjunto de máquinas. A ferramenta possui algoritmos integrados que evitam a seleção de um sistema de colheita ilógico. O método selecionado para calcular custos para máquinas individuais é simples, e reflete o estado real dos custos incorridos.

Sessions *et al.*, (2021) identificaram que grande parte dos métodos assumem que a máquina continua a depreciar e o seu desgaste ocorre durante o tempo não produtivo na mesma taxa que durante o tempo produtivo. De acordo com os autores isso pode levar a superestimacões do custo da máquina, e que o uso de custos superestimados podem distorcer comparações entre sistemas de colheita da madeira, e prejudicar estratégias de substituição de máquinas.

Em função disso Sessions *et al.*, (2021) propuseram um novo método capaz de estimar os custos de uma máquina com maior precisão, onde o desgaste da máquina ocorrendo somente durante o seu tempo produtivo. Os autores forneceram um exemplo que mostra que os métodos apresentados por Miyata (1980), Brinker *et al.*, (2002) e Ackerman *et al.*, (2014) apresentam estimativas de custo quase 30% maiores do que o método proposto.

Timofeiczuk Júnior (2004) destaca que apesar do setor florestal brasileiro ser constituído de muitas empresas, grande parte delas não tem o conhecimento detalhado dos itens de formação dos custos de produção, havendo casos em que não é feita a consideração de determinado item de custo, como o custo de oportunidade, que se refere a remuneração que os fatores de produção teriam na melhor alternativa de utilização.

Também é possível verificar a não consideração dos custos de oportunidade em pesquisas realizadas em operações de colheita da madeira (e.g. MINETTE *et al.*, 2004; SIMÕES *et al.*, 2010; NASCIMENTO *et al.*, 2011; BURLA *et al.*, 2012; SEIXAS e BATISTA, 2014). De acordo com Quadros e Malinovski (2012), que consideraram os custos de oportunidade em sua pesquisa, a não consideração de determinado item de formação de custo pode afetar consideravelmente a análise, podendo trazer prejuízos muitas vezes irreversíveis à atividade.

Di Fluvio *et al.*, (2017) realizaram um estudo em escala global para detectar fatores técnicos e de custo em operações de corte florestal em diferentes regiões durante os anos de 2013 e 2014. Os autores consideraram para a formação do custo total a soma dos custos fixos, custos variáveis e custos trabalhistas. De acordo com os resultados, no Brasil, aproximadamente 35% do custo total de máquinas como *harvester* e *forwarder* está ligado ao custo fixo. O custo variável representa em torno de 47%, enquanto o custo trabalhista representa cerca de 18% do custo total.

De acordo com Silva e Fontes (2005), a decisão de escolha de um projeto na área florestal deve ser baseada a partir da aplicação de critérios de análise

econômica, ou simplesmente critérios econômicos. Os autores inferem ainda que uma série de decisões na área florestal podem ser feitas de forma mais segura quando feitas as simulações baseadas nos critérios econômicos. Outro ponto identificado pelos autores é que esses critérios devem levar em conta a variação do capital no tempo.

Diante disso, a avaliação econômica de um ou vários projetos pode ser realizada a partir de um conjunto de critérios econômicos como por exemplo o Custo Total Presente (CTP). O CTP é utilizado para determinar o custo presente de uma série de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, descontando o investimento inicial do projeto (CLEMENTE e SOUZA, 2015). Hersen (2020) comenta que os critérios econômicos podem ser aplicados para verificar a viabilidade de projetos em fase de estudo, bem como gerar indicadores adicionais para os projetos em andamento.

3.4. SUBSTITUIÇÃO DE MÁQUINAS

A substituição de máquinas é um tema amplo que envolve desde a seleção de máquinas similares para as trocas das existentes, até a avaliação de máquinas que atuam de forma completamente diferente para desempenhar a mesma função (CASAROTTO FILHO e KOPITTKKE, 2020). Na literatura esse tema pode ser tratado de formas diferentes. O tomador de decisão pode optar por substituir a máquina em uso por uma nova, pode optar em reformar a máquina em uso para depois fazer a sua substituição, pode vender a máquina nova e optar por alugar uma outra, ou ainda terceirizar a operação, desde que haja viabilidade econômica (DINIZ *et al.*, 2020a).

Existem algumas razões que não são exclusivas entre si que podem tornar econômica a substituição de máquinas, como a deterioração, o avanço tecnológico ou a própria mudança da operação corrente, que acaba tornando a máquina em uso inadequada, apresentando elevados custos (YATSENKO e HRITONENKO, 2020). Spinelli *et al.*, (2019) comentam que as substituições por mudança de operação vêm ocorrendo com frequência, devido às mudanças nas características do povoamento, como redução do volume individual das árvores e implantação de florestas em terrenos acidentados.

No Brasil, empresas florestais deram início a esse processo de mudança, e estão migrando do sistema de árvores inteiras, composto pelas máquinas *feller buncher*, *skidder* e processador *harvester*, para o sistema de toras curtas, composto por *harvester* e *forwarder*. A pesquisa realizada por Oliveira (2013) teve um papel importante nesse processo de tomada de decisão. O autor avaliou dois sistemas de colheita da madeira em povoamentos de eucalipto e identificou que o sistema de toras curtas apresentou menores custos de produção em relação ao sistema de árvores inteiras.

Casarotto Filho e Kopittke (2020) comentam acerca dos tipos de substituição mais abordados. Em baixa sem reposição, analisam-se as situações em que a máquina perde a razão de existir em função da evolução dos produtos e processos. O modelo de substituição idêntica é utilizado em casos em que praticamente não há evolução tecnológica, enquanto o modelo de substituição não idêntica é recomendado quando se reconhece um progresso tecnológico pontual, mas não é detectada uma tendência de evolução contínua. Já em casos em que essa evolução é contínua, os autores recomendam o modelo de substituição com progresso tecnológico.

Os principais métodos utilizados para determinação do momento ótimo de substituição de uma máquina são o valor anual equivalente uniforme (VAUE), uso de equações diferenciais e uso da programação matemática (MARQUES *et al.*, 2005). É importante comentar que, apesar da existência de diferentes métodos, é comum verificar que empresas, empreiteiros e produtores individuais raramente os utilizam, tomando suas decisões com base em experiência pessoal e intuição (CANTÚ e LEBEL, 2010).

Um dos primeiros trabalhos de substituição de máquinas realizados na área florestal foi realizado por Tufts e Mills (1982), que utilizaram técnicas de fluxo de caixa para identificar o momento em que o VAUE era maximizado. A mesma abordagem foi utilizada por Cantú *et al.*, (2017) para identificar o momento ótimo econômico de substituição de um *harvester*. Além de encontrar a vida econômica da máquina, os autores perceberam em suas análises que o intervalo de tempo escolhido pode influenciar a decisão de substituição. Em função disso, Cantú *et al.*, (2017) recomendam a aplicação do Valor Mensal Uniforme Equivalente (VMUE).

Um ponto negativo em relação ao método utilizado por Cantú *et al.*, (2017) é que este não considera uma sequência de máquinas dentro de um horizonte de

planejamento. Outro ponto está em não considerar a entrada de novas tecnologias no mercado. Apesar disso, a metodologia proposta pelos autores se mostra como uma ferramenta adequada para uso prático, uma vez que a máquina de maior importância dentro do horizonte de planejamento é a primeira (YATSENKO e HRITONENKO, 2009; 2015).

Outro método muito utilizado, que se aproxima do método VAUE, é o *economic life* (EL) proposto por Bowman e Fetter (1967). Esse método, replicado em diversas pesquisas (e.g. YATSENKO e HRITONENKO, 2009, 2011; DINIZ *et al.*, 2020a), identifica o momento ótimo econômico de substituição que minimiza o custo total presente (CTP) de uma série de substituições idênticas, em que não existe o progresso tecnológico dentro de um horizonte de planejamento infinito. Yatsenko e Hritonenko (2011) e Hartman e Tan (2014) comentam que esse é considerado o problema clássico de substituição de máquinas.

Cabe ressaltar que esse método pode ser utilizado de duas formas, minimizando os custos ou maximizando as receitas (REGNIER *et al.*, 2004; ROGERS e HARTMAN, 2005; YATSENKO e HRITONENKO, 2008). As principais restrições desse método são a não consideração do progresso tecnológico ao longo do horizonte de planejamento e a impossibilidade de aplicá-lo a partir de uma máquina em uso. Diniz *et al.*, (2020a) propuseram modificações no método EL que além de abolir uma dessas restrições, permite ao tomador de decisão analisar até três cenários.

Diniz *et al.*, (2020a) identificaram o momento ótimo econômico de substituição de cinco *harvesters* a partir de três cenários possíveis. O primeiro cenário consistia em vender a máquina atual imediatamente para compra de uma nova. No segundo considerou-se a reforma da máquina em uso, sendo feita sua substituição após um período pré-estabelecido. O terceiro ponderou a venda imediata da máquina em uso, seguido do aluguel de uma máquina nova por um tempo determinado, para posteriormente comprar uma máquina nova.

Mesmo não resolvendo a questão da entrada de novas tecnologias, a pesquisa feita por Diniz *et al.*, (2020a) acabou amortizando uma das principais restrições apresentadas pelo método EL, que é resolver o problema a partir de máquinas em uso. De acordo com os autores, o principal desafio no problema de substituição é incluir a entrada de novas tecnologias, fazendo com que as informações do modelo possam variar ao longo do horizonte de planejamento.

Mesmo possuindo algumas restrições o método EL é recomendado para identificação do momento ótimo de substituição de uma máquina (NEWMAN *et al.*, 2004; YATSENKO e HRITONENKO, 2011). Embora autores como Scarf e Hashem (2002) e Hartman e Murphy (2006) tenham comentado que o método não é frequentemente utilizado na prática, justamente por não levar em consideração o progresso tecnológico ao longo do horizonte de planejamento.

De acordo com Bilek (2007), as primeiras abordagens de suporte para tomada de decisão de substituição de máquinas na área florestal foram propostas por Butler e Dykstra (1981) e Tufts e Mills (1982). Butler e Dykstra (1981) formularam uma abordagem que incorpora taxas de desconto, custo de capital e custos de operação para identificar o momento ótimo econômico de substituição de máquinas de colheita de madeira a partir da minimização dos custos. Os autores ainda forneceram em seu trabalho uma série de equações para estimativas de custos de operação e manutenção.

Mills e Tufts (1985) compararam os modelos de Butler e Dykstra (1981) e Tufts e Mills (1982) e verificaram que a abordagem de Butler e Dykstra (1981) estimou incorretamente os custos. Os autores concluíram que o modelo de Tufts e Mills (1982) é mais adequado e flexível para resolver o problema de substituição de máquinas florestais. Cantú *et al.*, (2017) adicionam que a abordagem também pode ser utilizada para auxiliar na tomada de decisão de casos de reforma ou substituição de uma máquina, sendo esse um ponto positivo do método.

Cantú e LeBel (2010) resumizam as principais metodologias utilizadas na área florestal até então. Para os autores, os modelos propostos por Tufts e Mills (1982) e Stenzel *et al.*, (1986) representam as melhores alternativas. Ao aplicar a abordagem de Stenzel *et al.*, (1986), é possível identificar o momento ótimo econômico de substituição a partir da maximização do valor presente líquido (VPL). Na mesma pesquisa os autores realizaram entrevistas com empreiteiros florestais para verificar como era feito o processo de substituição de máquinas.

De acordo com os resultados obtidos por Cantú e LeBel (2010), grande parte dos empreiteiros florestais não utilizam nenhuma abordagem disponibilizada na literatura para dar suporte à tomada de decisão de substituição. Um dos motivos para esse comportamento está na complexidade em aplicar tais métodos. Os autores identificaram ainda que, geralmente, as substituições são feitas de forma tardia. Casarotto Filho e Kopittke (2020) comentam que existe um potencial enorme

de redução de custos dentro das organizações, simplesmente desfazendo-se de máquinas no tempo adequado.

Outra abordagem disponibilizada no meio florestal é a proposta por Baxter *et al.*, (2010). Eles desenvolveram um protótipo baseado em um modelo de programação matemática para dar suporte à tomada de decisão de substituição de máquinas de colheita de madeira. Apesar de sua programação ser um desafio, como identificado pelos autores, o protótipo foi criado e disponibilizado para aplicação tanto da comunidade científica-florestal. Baxter *et al.*, (2010) finalizam afirmando que o próximo obstáculo é fazer com que o protótipo seja testado em problemas reais.

Spinelli *et al.*, (2011) utilizaram uma abordagem diferente das descritas até agora. Os autores identificaram a vida econômica, tempo médio de uso e, valor residual de *harvester* e *forwarder* na Europa e América do Norte utilizando análises estatísticas a partir de informações disponibilizadas em *websites* especializados em venda de máquinas usadas. Os autores identificaram que a vida econômica de *harvester* e *forwarder* está entre sete e oito anos. Malinen *et al.*, (2016) replicaram a abordagem e encontraram resultados semelhantes.

3.5. PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Bellman (1955) foi o primeiro pesquisador a propor um método de programação matemática no problema de substituição de máquinas. A abordagem considera a maximização das receitas ou a minimização dos custos utilizando técnicas de VPL e CTP sobre os fluxos de caixa ao longo de um horizonte de planejamento finito. Desta forma, a cada período (t) ao longo do horizonte de planejamento é tomada a decisão de manter (R) ou substituir (K) a máquina atual.

Posteriormente, Wagner (1975) apresentou uma formulação alternativa de programação matemática para resolver o problema de substituição de máquinas. Para o autor as decisões não são mais sobre manter (R) ou substituir (K) uma máquina, são sobre identificar o número de períodos ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$) que se deve manter uma máquina ao longo do horizonte de planejamento. A decisão pode ser tomada a partir da maximização do VPL ou da minimização do CTP.

Hartman e Rogers (2006) compararam os métodos sugeridos por Bellman (1955) e Wagner (1975) e concluíram que o método proposto por Wagner (1975) performa melhor, apesar da importância de ambos no desenvolvimento de outras

pesquisas (e.g. SETHI e CHAND 1979; HOPP e NAIR 1991, 1994; FILGUEIRAS, 1997; ROGERS e HARTMAN 2005; MARQUES *et al.*, 2005; YATSENKO e HRITONENKO 2011, 2017; DINIZ e SESSIONS 2020).

Filgueiras (1997) e Marques *et al.*, (2005) basearam-se no modelo proposto por Bellman (1955), sendo os primeiros pesquisadores brasileiros a utilizar a programação matemática em um problema de substituição de máquinas florestais. Filgueiras (1997) procurou identificar o momento ótimo econômico de substituição a partir da minimização dos custos. Marques *et al.*, (2005) aprofundaram o tema, e identificaram o momento ótimo econômico de substituição a partir da minimização dos custos e da maximização da receita.

Em função disso, Marques *et al.*, (2005) concluíram que o modelo que inclui apenas custos é mais indicado para situações em que a máquina utilizada não gera receita direta. Por outro lado, o modelo que emprega a receita é mais flexível, podendo ser utilizado em casos que a máquina gera receitas diretas. Por fim os autores inferem que a dinâmica entre maximizar a receita e minimizar o custo é a mesma, sendo recomendado o método que se adequar melhor ao tomador de decisão conforme a disponibilidade de informações.

Outro método de programação matemática utilizado no problema de substituição de máquinas é o algoritmo *forward* (SETHI e CHAND, 1979), que se aproxima do método proposto por Wagner (1975). Neste caso, as decisões também são sobre o número de períodos ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$) que se deve manter uma máquina ao longo do horizonte de planejamento a partir da maximização do VPL ou da minimização do CTP. Métodos como o algoritmo *forward* são conhecidos como métodos *pull*, porque o algoritmo diz como entrar em um estado (nó) específico a partir de um estado (nó) predecessor (JENSEN e BARD, 2003).

Na versão estendida Chand e Sethi (1982) utilizam novamente o algoritmo *forward*, onde os autores consideraram que, além do progresso tecnológico sobre o horizonte de planejamento, a máquina em uso poderia ser substituída por qualquer um dos vários tipos diferentes de máquinas disponíveis no mercado. Para Denardo (2003), algoritmos como o *forward* são ótimas ferramentas para resolver problemas de redes acíclicas. Contudo, o autor comenta que existem técnicas mais eficientes, sendo uma delas, o algoritmo *forward reaching*.

O método *forward reaching*, proposto por Denardo (1982), é uma técnica de solução alternativa que combina a geração direta de estados com a recursão direta

em uma rede acíclica. Desta forma, o cronograma de substituição é obtido enquanto o espaço de estado está sendo gerado, em uma operação simultânea. Quando todos os estados são gerados, a otimização é concluída e a solução é encontrada com o procedimento de recuperação reversa.

Diniz e Sessions (2020) aplicaram o algoritmo *forward reaching* em um problema de substituição de um *harvester*. O trabalho foi dividido em três partes. A primeira buscou a validação do algoritmo a partir da comparação da abordagem com o método EL. A segunda procurou resolver o problema de substituição considerando a entrada de novas tecnologias. A última etapa do trabalho consistiu testar a acuracidade do algoritmo em identificar a série ótima de substituição que minimiza o CTP, omitindo um dos arcos de ligação.

A validação do algoritmo *forward reaching* foi confirmada por Diniz e Sessions (2020) ao obterem os mesmos resultados aplicando as duas abordagens. Ao considerarem a entrada de novas tecnologias ao longo do horizonte de planejamento, foi identificado que o tempo de permanência das máquinas tende a reduzir, priorizando o uso de máquinas de maior produtividade e taxa de utilização. A hipótese de que o algoritmo identifica a série ótima de substituição que minimiza o CTP é verdadeira, pois ao omitir um dos arcos da série ótima de substituição, os autores identificaram um segundo cronograma, com maiores custos que o original.

Para aplicar o algoritmo *forward reaching* é necessário estabelecer o horizonte de planejamento e o limite máximo de substituição de uma máquina. A partir disso, são utilizadas técnicas de VPL ou CTP sobre os fluxos de caixa formando uma rede com todas as possíveis combinações de substituição ($K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$), respeitando o horizonte de planejamento e o limite máximo de substituição pré-estabelecido (DENARDO, 2003). Assim uma máquina comprada em t_1 poderá ser substituída em t_2, t_3, \dots, t_n , para a compra de uma nova máquina.

Jensen e Bard (2003) inferem que ao aplicar o algoritmo *forward reaching* é possível maximizar o VPL ou minimizar o CTP, podendo resolver o problema a partir de uma máquina nova ou usada. A partir da aplicação do modelo também é possível verificar os custos médios de produção e a produção média da série de máquinas selecionadas no cronograma ótimo econômico de substituição.

Hartman e Tan (2014) alertam para dois pontos que o tomador de decisão precisa ficar atento ao utilizar métodos de programação matemática. Primeiro, é preciso presumir que toda máquina tem uma vida útil máxima e que ela deve ser

substituída quando a sua vida útil máxima for atingida. Segundo, a solução de um programa dinâmico é calculada recursivamente, e por isso, somente pode ser resolvida a partir de um horizonte de planejamento finito.

Quanto à definição do progresso tecnológico, é possível verificar que muitos pesquisadores o tratam de diferentes maneiras, variando de acordo com cada área de atuação (setor florestal, indústria, metalúrgica). Autores como Yatsenko e Hritonenko (2020) defendem que a entrada de novas tecnologias faz com que os custos totais sofram um aumento, assim como a produtividade e a taxa de utilização. Hartman e Rogers (2006) consideraram a entrada de novas tecnologias de forma exponencial, detectando que nesses casos, a vida econômica das máquinas tende a ser mais curta.

Cheevaprawatdomrong e Smith (2003) e Hritonenko e Yatsenko (2007) mostram em seu trabalho que a vida útil de uma máquina é menor quando a mudança tecnológica incorporada é mais intensa, comportamento também identificado na pesquisa de Rogers e Hartman (2005). Nos trabalhos Yatsenko e Hritonenko (2008, 2009) foi identificado que a vida útil das máquinas pode aumentar ou diminuir a partir de variações nos dados de entrada do modelo, o que acaba sendo um ótimo meio de testar as variáveis e fornecer diferentes cenários.

É possível verificar que existem diferentes modelos para definição do momento ótimo econômico de substituição de uma máquina. Apesar disso, poucos são utilizados na prática (CANTÚ e LEBEL, 2010). Os principais motivos que levam a esse comportamento são a falta de conhecimento da existência desses modelos e a complexidade para aplicá-los (DINIZ *et al.*, 2020a). No Apêndice 1 é apresentada uma série de pesquisas de acordo com autor, ano de publicação e contribuição para que empresas, empreiteiros, produtores independentes e pesquisadores possam aprofundar os estudos nessa temática.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. DESCRIÇÃO DAS ETAPAS ADOTADAS

Esta pesquisa foi formulada como um problema de programação matemática com estrutura de rede especial, permitindo a aplicação de uma metodologia desenvolvida e implementada em uma planilha eletrônica. Para utilização dessa planilha eletrônica foi necessário gerar listas de entrada contendo três descritores: nó predecessor (momento em uma máquina é comprada); nó futuro (momento em que uma máquina é vendida) e; arco de ligação (custo total presente - CTP, custo médio de produção e produção média). As listas de entrada foram geradas a partir de uma série de fluxos de caixa que incorpora as possíveis combinações de substituição, de acordo com o tamanho do horizonte de planejamento e o limite máximo de substituição de cada máquina.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi desenvolvido a partir de um banco de dados de uma empresa florestal localizada no município de Telêmaco Borba, estado do Paraná. Os plantios florestais estudados foram formados por clones híbridos de *E. grandis* (W Hill ex Maiden) e *E. urophylla* (ST Blake), que são colhidos entre cinco e sete anos, dependendo da produtividade da floresta, com volume médio individual de 0,29 m³ e distância média de extração de 400 metros.

4.3. MÁQUINAS AVALIADAS

A escolha das máquinas ocorreu a partir de reuniões entre o pesquisador e a equipe técnica da empresa florestal, levando em consideração os aspectos técnicos da operação de corte e extração da madeira e o percentual que tais máquinas representam dentro da frota.

As máquinas estudadas foram um *harvester* e um *forwarder* de pneus da marca Ponsse, modelos, *Ergo 8w* e *Elephant 8w* respectivamente (Figura 1). As especificações técnicas são apresentadas no Anexo 1.

FIGURA 1. *Harvester* (a) e *forwarder* (b) estudados.

Fonte: O autor (2018).

4.4. LEVANTAMENTO DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA

A coleta dos dados foi realizada no período de abril de 2017 a outubro de 2020. Durante esse período foram realizadas visitas à empresa, em intervalos de um a dois meses, que dependeu da disponibilidade da equipe técnica, com duração de uma semana. Primeiro foram obtidos os dados de custo de aquisição das máquinas, a partir de propostas comerciais solicitadas para a empresa Timber Forest, representante da Ponsse no Brasil (Tabela 1).

TABELA 1. Custo de aquisição das máquinas obtido em proposta comercial.

Máquina	Custo de aquisição (R\$)
<i>Harvester</i>	2.222.400
<i>Forwarder</i>	2.129.800

Fonte: Timber Forest (2020).

Também foram coletadas as informações referentes aos cronogramas de grandes revisões, realizada em cada máquina de acordo com o seu tempo de uso em horas (Tabela 2). As grandes revisões foram caracterizadas pela substituição dos seguintes componentes: material rodante (pneus e semi-esteiras), bomba hidráulica, motor e cabeçote processador para o caso do *harvester*.

TABELA 2. Cronograma de grandes revisões e custo de substituição de cada componente.

Componentes de revisão	<i>Harvester</i>		<i>Forwarder</i>	
	Horímetro (h)	Custo (R\$)	Horímetro (h)	Custo (R\$)
Pneus	8.000	40.096	8.000	40.096
Semi-esteiras	10.000	60.000	10.000	60.000
Bomba hidráulica	10.000	50.000	10.000	50.000
Motor	20.000	45.000	20.000	45.000
Cabeçote processador	12.000	220.000	-	-

Fonte: Empresa estudada (2020).

No Apêndice 2 é possível verificar os indicadores de desempenho: taxa de utilização, custo de operação e manutenção (O&M) e produtividade. Eles foram obtidos diretamente dos registros históricos da empresa e consideraram o volume médio individual (VMI) das árvores e a distância média de extração citadas anteriormente.

É importante comentar que os custos (O&M) foram formados pela somatória dos custos fixos (seguros e impostos, administrativo, garagem, juros e depreciação) e variáveis (transporte de pessoal, transporte de máquinas, mão de obra, reparos e manutenções, óleo hidráulico, lubrificantes e combustível).

Na Tabela 3 são mostradas as variáveis: cronograma anual de trabalho, horizonte de planejamento, período máximo de substituição das máquinas, penalidade por falta de produção, taxa mínima de atratividade (TMA), taxa de depreciação fiscal e alíquota de imposto sobre a renda de pessoas jurídicas (IRPJ).

TABELA 3. Premissas utilizadas para construção dos fluxos de caixa.

Parâmetros	
Cronograma anual de trabalho (h)	6.120
Horizonte de planejamento (anos)	100
Período máximo de substituição (anos)	8
Penalidade por falta de produção (R\$/h)	500
Taxa mínima de atratividade (a.a.)	0,0645
Taxa de depreciação fiscal (a.a.)	0,20
Imposto de renda de pessoas jurídicas	0,34

Fonte: Empresa estudada (2020).

A TMA real utilizada para descontar os valores do fluxo de caixa nesta pesquisa foi definida de acordo com a disposição da empresa estudada em aceitar um investimento de risco para este tipo de projeto. A taxa de depreciação fiscal utilizada considerou a desvalorização total das máquinas em cinco anos calculada a partir do método de depreciação linear. Desta forma foi possível verificar o valor

residual fiscal (V(F)) de cada máquina ao longo do horizonte de planejamento, utilizado para calcular o benefício sobre o IRPJ.

A penalidade por falta de produção foi aplicada para suprir a demanda de madeira estabelecida pela empresa, sendo feita a contratação de empreiteiros para realização das operações de corte e extração. Essa é uma atividade recorrente e adotada por empresas florestais, de forma a garantir que as demandas sejam atendidas.

O progresso tecnológico ao longo do horizonte de planejamento caracterizou-se pela entrada de novos produtos e serviços no mercado – máquinas de maior capacidade produtiva e novas técnicas de manutenção. Neste contexto adotou-se que houve aumento dos custos ligados à operação, assim como aumento da produtividade e da taxa de utilização das máquinas.

A definição do ritmo de entrada de novas tecnologias seguiu as premissas adotadas no trabalho de Diniz e Sessions (2020). Desta forma, foram aplicadas as equações apresentadas na Tabela 4 sobre os valores iniciais (t_0) de cada variável, considerando ainda o valor do logaritmo natural de cada mês referência ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_{1200}$) ao longo do horizonte de planejamento.

TABELA 4. Equações para definição do ritmo de entrada de novas tecnologias.

Parâmetros	Equações
Custo de aquisição	$Y = X_{t_0} + 10.000 \ln(\text{mês})$
Taxa de utilização	$Y = X_{t_0} + 0.01 \ln(\text{mês})$
Custos (O&M)	$Y = X_{t_0} + 5 \ln(\text{mês})$
Produtividade	$Y = X_{t_0} + 0.2 \ln(\text{mês})$
Pneus ¹	$Y = X_{t_0} + 500 \ln(\text{mês})$
Semi-esteiras ¹	$Y = X_{t_0} + 500 \ln(\text{mês})$
Bomba hidráulica ¹	$Y = X_{t_0} + 500 \ln(\text{mês})$
Motor ¹	$Y = X_{t_0} + 500 \ln(\text{mês})$
Cabeçote processador ¹	$Y = X_{t_0} + 1000 \ln(\text{mês})$
Penalidade por falta de produção	$Y = X_{t_0} + 6 \ln(\text{mês})$

¹ componentes substituídos durante as grandes revisões.

Y = Parâmetro

X = Valor inicial do parâmetro no tempo t_0 .

Fonte: Adaptado de Diniz e Sessions (2020).

4.5. FORMAÇÃO DA LISTA DE ENTRADA

Para formação das listas de entrada foi necessário elaborar os fluxos de caixa respeitando o horizonte de planejamento (100 anos ou 1200 meses) e o intervalo máximo de substituição das máquinas (8 anos ou 96 meses). O intervalo de tempo

considerado foi na base mensal, desta forma, uma máquina adquirida em t_0 poderia ser substituída entre t_1 e t_{96} , formando o primeiro fluxo de caixa (T1). Uma máquina adquirida em t_{24} poderia ser substituída entre t_{25} e t_{120} , e assim sucessivamente até o final do horizonte de planejamento. Na Tabela 5 é possível verificar a matriz de fluxos de caixa gerados.

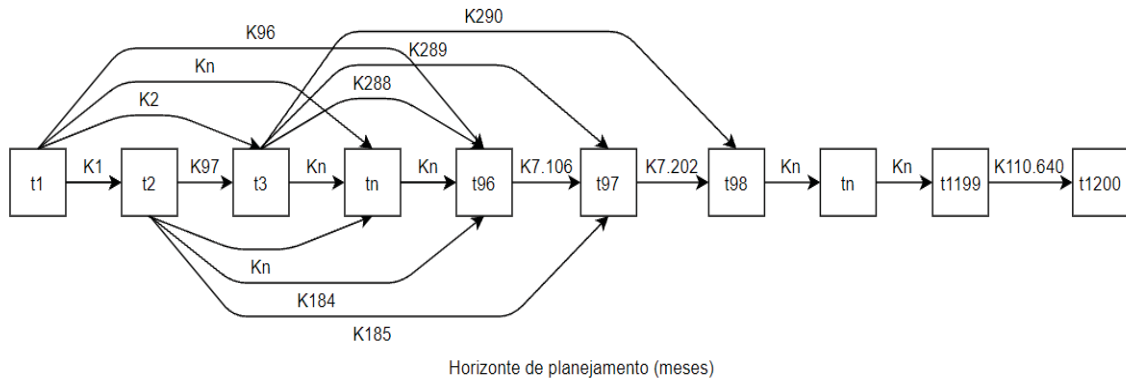
TABELA 5. Matriz de fluxo de caixa (T) de acordo o horizonte de planejamento em meses (t).

Fluxo de caixa (T)	Horizonte de planejamento (t)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	n	
1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	n	96
2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	n	97
3	2	3	4	5	6	7	8	9	10	n	98
4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	n	99
...
1191	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200
1192	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	
1193	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200		
1194	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200			
1195	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200				
1196	1195	1196	1197	1198	1199	1200					
1197	1196	1197	1198	1199	1200						
1198	1197	1198	1199	1200							
1199	1198	1199	1200								
1200	1199	1200									

Fonte: O autor (2020).

A rede de combinações de decisões de substituição a partir dessa estrutura possui 110.640 arcos de ligação (Figura 2). Cada nó (t_1 , t_2 , t_3 , ..., t_{1200}) representa o período em que uma máquina pode ser vendida para que outra de tecnologia superior seja comprada. Esses nós são conectados por um arco de ligação (K_1 , K_2 , K_3 , ..., $K_{110.640}$) que contém três informações: CTP, custo médio de produção e produção média. É importante ressaltar que apenas o CTP é utilizado para identificação do cronograma ótimo econômico. As demais variáveis servem de apoio para uso no planejamento estratégico da empresa.

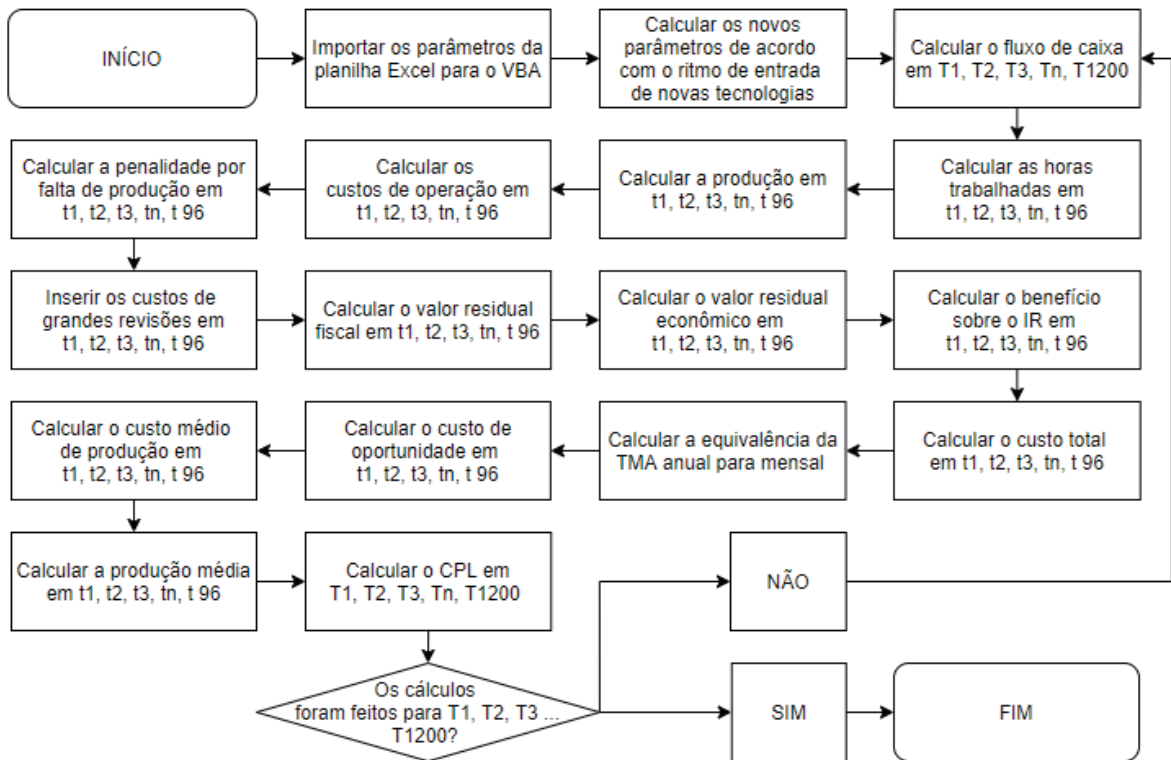
FIGURA 2. Rede de combinações de decisões de substituição.



Fonte: O autor (2020).

As equações utilizadas para formação dos fluxos de caixa e dos descritores da lista de entrada foram codificadas na linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA) versão 6 utilizando técnicas de *looping*. Na Figura 3 é possível verificar o diagrama lógico utilizado para codificação das equações, possibilitando a automatização dos cálculos. Como demonstrativo a lista de entrada gerada a partir do cálculo do fluxo de caixa T1 do *forwarder* pode ser observada no Apêndice 3.

FIGURA 3. Diagrama lógico para formação dos fluxos de caixa e dos descritores da lista de entrada.



Fonte: O autor (2020).

O cálculo para definição da quantidade de horas trabalhadas levou em consideração a idade da máquina em horas no tempo t. A partir disso, multiplicou-se a taxa de utilização pelo cronograma anual de trabalho de acordo com a Equação 1 (MACHADO, 2014).

$$HT_t = \sum_{t=1}^T TU_t \times \frac{CAT}{12} \quad (1)$$

Em que:

HT = horas trabalhadas no tempo t (h);

TU = taxa de utilização no tempo t (%);

CAT = cronograma anual de trabalho (h).

O cálculo para obtenção da produção considerou a idade da máquina em horas no tempo t, sendo multiplicada produtividade pelo número de horas trabalhadas, conforme a Equação 2 (MACHADO, 2014).

$$PR_t = \sum_{t=1}^T PD_t \times HT_t \quad (2)$$

Em que:

PR = produção no tempo t (t);

PD = produtividade no tempo t (t/h);

HT = horas trabalhadas no tempo t (h).

Para o cálculo do custo de operação foi aplicada a Equação 3 (MACHADO, 2014), que considera os custos (O&M) na idade t, e o número de horas trabalhadas.

$$CO_t = \sum_{t=1}^T C_t \times HT_t \quad (3)$$

Em que:

CO = custo de operação no tempo t (R\$);

C = custos (O&M) no tempo t (R\$/h);

HT = horas trabalhadas no tempo t (h).

A penalidade por falta de produção foi calculada a partir das horas de não operação da máquina no tempo t , de acordo com a Equação 4 (adaptado de DINIZ e SESSIONS, 2020).

$$PE_t = \sum_{t=1}^T \left(\frac{CAT}{12} - HT_t \right) \times P_t \quad (4)$$

Em que:

PE = penalidade por falta de produção no tempo t (R\$);

CAT = cronograma anual de trabalho (h);

HT = horas trabalhadas no tempo t (h);

P = penalidade por falta de produção no tempo t (R\$/h).

A Equação 5 foi aplicada para calcular o valor residual fiscal da máquina no tempo t (adaptado de DINIZ e SESSIONS, 2020).

$$VF_t = CA_{t'} \times \frac{TD}{12} \quad (5)$$

Em que:

VF = valor residual fiscal no tempo t (R\$);

CA = custo de aquisição da máquina no tempo t' , onde t' está inserido em T (R\$);

TD = taxa de depreciação fiscal (a.a. %).

O valor residual econômico foi calculado a partir da Equação 6 ($R^2 = 0,71$; $S_{Y \times 0,09}$), adaptada de Diniz e Sessions (2020).

$$VE_t = (2,065 - 0,192 \ln(HR_t)) \times CA_{t'} \quad (6)$$

Em que:

VE = valor residual econômico da máquina no tempo t (R\$);

HR = horímetro da máquina no tempo t (h);

CA = custo de aquisição da t' , onde t' está inserido em T (R\$).

Para o cálculo do benefício do imposto de renda (IR), utilizou-se a Equação 7 (adaptado de DINIZ e SESSIONS, 2020).

$$BIR_t = (VE_t - VF_t) \times IRPJ \quad (7)$$

Em que:

BIR = benefício do imposto de renda no tempo t (R\$);

VE = valor residual econômico da máquina no tempo t (R\$);

VF = valor residual fiscal da máquina no tempo t (R\$);

IRPJ = alíquota de IRPJ (%).

Para o cálculo do custo total, foram consideradas todas as despesas a partir da compra, utilização e venda de uma máquina no tempo t , como mostra a Equação 8 (adaptado de DINIZ e SESSIONS, 2020).

$$CT_t = CA_{t'} - VE_t + \sum_{t=1}^T CO_t + PE_t + BIR_t + \sum_{t' \in T} MP_{t'} \quad (8)$$

Em que:

CT = custo total no tempo t (R\$);

CA = custo de aquisição da t' , onde t' está inserido em T (R\$);

VE = valor residual econômico da máquina no tempo t (R\$);

CO = custo de operação no tempo t (R\$);

PE = penalidade por falta de produção no tempo t (R\$);

BIR = benefício do imposto de renda no tempo t (R\$);

MP = custo de substituição de componentes pontuais no tempo t' , onde t' está inserido em T' (R\$).

Uma vez que os períodos para construção dos fluxos de caixa foram na base mensal, foi necessário realizar a equivalência da TMA, aplicando a Equação 9 (SOUZA e CLEMENTE, 2015).

$$TMA_{\text{mensal}} = (1 + TMA_{\text{anual}})^{1/12} - 1 \quad (9)$$

Em que:

TMA_{mensal} = taxa mínima de atratividade (a.m.);

TMA_{anual} = taxa mínima de atratividade (a.a.).

O cálculo do custo de oportunidade foi realizado a partir da Equação 10, considerando a taxa de desconto após a sua equivalência (CASAROTTO e KOPITTKKE, 2020).

$$COP_t = VE_t \times i \quad (10)$$

COP = custo de oportunidade no tempo t (R\$);

VE = valor residual econômico da máquina no tempo t (R\$);

i = taxa de desconto (TMA_{mensal}).

O custo médio de produção das máquinas foi calculado a partir Equação 11 (adaptado de DINIZ e SESSIONS, 2020).

$$CMP_t = \frac{\sum_{t=1}^T CT_t + COP_t}{\sum_{t=1}^T PR_t} \quad (11)$$

Em que:

CMP = Custo médio de produção no tempo t (R\$/t);

CT = custo total no tempo t (R\$);

COP = custo de oportunidade no tempo t (R\$);

PR = produção no tempo t (t).

Para o cálculo da produção média, foi feita a divisão do montante acumulado de madeira produzida no momento t, como mostrado na Equação 12 (MACHADO, 2014).

$$PM_t = \frac{\sum_{t=1}^T PR_t}{t} \quad (12)$$

Em que:

PM = Produção média no tempo t (t/mês);

PR = produção no tempo t (t); t = momento t (mês).

Para o cálculo do CTP, foi aplicada a Equação 13, adaptada do trabalho de Diniz e Sessions (2020).

$$CTP_t = CA_T - \frac{VE_t}{(1+i)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{CO_t}{(1+i)^t} + \frac{PE_t}{(1+i)^t} + \frac{BIR_t}{(1+i)^t} + \sum_{t' \in T} \frac{MP_{t'}}{(1+i)^{t'}} \quad (13)$$

Em que:

CTP = custo total presente no tempo t (R\$);

CA = custo de aquisição no tempo T (R\$);

VE = valor residual econômico da máquina no tempo t (R\$);

CO = custo de operação no tempo t (R\$);

PE = penalidade por falta de produção no tempo t (R\$);

BIR = benefício do imposto de renda no tempo t (R\$);

MP = custo de substituição de componentes pontuais no tempo t', onde t' está inserido em T' (R\$);

i = taxa de desconto (TMA_{mensal}).

4.6. IDENTIFICAÇÃO DO CRONOGRAMA ÓTIMO ECONÔMICO

Para identificar o cronograma ótimo econômico de substituição que minimiza o CTP foi desenvolvida uma planilha Microsoft *Excel* contendo a codificação do algoritmo de programação matemática *forward reaching*. No Apêndice 4 é feita a descrição de todos os passos necessários para realização do *download* da planilha eletrônica, bem como da sua utilização.

Para executar o algoritmo foi necessário inserir a lista de entrada na planilha eletrônica contendo três descritores: nó predecessor (momento em que uma máquina é comprada); nó futuro (momento em que uma máquina é vendida) e; arco de ligação (CTP, custo médio de produção e produção média).

É importante ressaltar que a utilização do algoritmo *forward reaching* permite iniciar com uma máquina usada em algum momento de sua vida útil ou com uma máquina nova. No caso de iniciar com uma máquina usada, a decisão envolve quando comprar uma máquina nova, seguida por uma sequência de máquinas novas com vida útil determinada pelo futuro cenário econômico. Para aplicação do algoritmo *forward reaching* é necessário seguir as etapas descritas abaixo:

Etapa 1. Identificar a faixa de vida útil das máquinas que serão consideradas de acordo com cada arco de ligação ($K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$).

Etapa 2. Para cada um dos arcos identificados na Etapa 1, é necessário calcular o CTP da máquina comprada no período t_1 e vendida em t_n .

Etapa 3. Classificar a lista de acordo com o nó predecessor, se isso ainda não tiver sido feito na Etapa 2.

Etapa 4. Aplicar o algoritmo *forward reaching* começando no início do horizonte de planejamento (t_0), prosseguindo até o final do horizonte de planejamento (t_n), processando cada arco classificado na Etapa 3.

Etapa 5. Para identificar o cronograma ótimo de substituição é necessário aplicar a técnica de recursão a partir do arco que apresente o menor CTP.

O algoritmo *forward reaching* se concentra em uma linha de código: a atualização do melhor valor de cada período (nó) à medida que cada arco da lista classificada é processado. O nó predecessor identifica o período em que a máquina foi adquirida. Depois que o menor CTP são identificados ao final do horizonte de planejamento, o nó predecessor é usado para identificar o cronograma ótimo pela técnica de recursão.

A codificação do algoritmo *forward reaching* no *Visual Basic for Applications* (VBA) para minimizar o CTP é descrita a seguir:

```

DO i = 1; nArcs
{
  If bestvalue(begnode(i)) + netvalue(i) < bestvalue(endnode(i))
  {
    bestvalue(endnode(i)) = bestvalue(begnode(i)) + netvalue(i)
    prednode(endnode(i)) = begnode(i)
  }
}

```

Em que:

nArcs = opções do número de máquinas substituídas (arcos) sobre o horizonte de planejamento;

begnode(i) = período (nó) em que a máquina é adquirida;

endnode(i) = período (nó) em que a máquina é vendida;

bestvalue(i) = menor valor atual do CTP no período (i);

netvalue(i) = CTP da máquina comprada no período begnode(i) e vendida no período endnode(i);

prednode(i) = arco predecessor usado para rastrear o cronograma ótimo.

Após a identificação do nó com menor CTP ao final do horizonte de planejamento, é utilizada a técnica de recursão a partir do seu nó predecessor, como descrito a seguir:

TOP = L

K = prednode(L)

DO WHILE k > 1

{

TOP = K

K = prednode(K)

}

LOOP

Em que:

L = é o horizonte de planejamento desejado;

prednode(L) = arco que apresenta o menor CTP para o horizonte de planejamento desejado;

prednode(K) = arco predecessor usado para rastrear o cronograma ótimo econômico.

No Apêndice 5 foi formulado e resolvido um exemplo numérico mostrando como o algoritmo *forward reaching* identifica o cronograma ótimo econômico de substituição das máquinas ao longo do horizonte de planejamento desejado.

4.7. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Procurou-se identificar o quanto os parâmetros que compõem o modelo precisaram ser individualmente modificados ao ponto de alterar o cronograma ótimo econômico de substituição das máquinas. Essa análise foi realizada em duas partes. Na primeira, foi verificada a influência dos parâmetros custo de aquisição, taxa de utilização, custos (O&M), produtividade, penalidade por falta de produção e custo de grandes revisões. Na segunda, foi verificada a influência do horizonte de planejamento. É importante ressaltar que em ambas as análises, os demais parâmetros foram mantidos constantes.

Para realizar a primeira análise foram geradas novas listas de entrada, onde foi alterado o valor inicial de cada parâmetro em 1% para mais e para menos. É importante ressaltar que, para o caso desta mudança não surtir efeito sobre cronograma ótimo econômico de substituição das máquinas, torna-se necessário o aumento gradativo deste percentual.

Na segunda analisou-se o cronograma ótimo econômico de substituição a partir de 10 horizontes de planejamento distintos, variando de 10 em 10 anos (120 meses) até chegar ao final do horizonte de planejamento. Nesta etapa não foi necessária a geração de novas listas de entrada. Desta forma, alterou-se apenas o horizonte de planejamento diretamente na planilha eletrônica.

4.8. COMPARAÇÃO COM CRONOGRAMAS DE SUBSTITUIÇÃO ALTERNATIVOS

Uma vez obtido o cronograma ótimo econômico de cada máquina estudada, buscou-se quantificar a diferença em termos de CTP e custo médio de produção com cronogramas alternativos de substituição sugeridos pela literatura e utilizados por empresas florestais brasileiras. Os cronogramas alternativos 01 e 02 foram extraídos dos trabalhos realizados por Spinelli *et al.*, (2011) e Malinen *et al.*, (2016) respectivamente.

O cronograma alternativo 03 foi baseado em um cronograma de substituição que é geralmente adotado por algumas empresas florestais brasileiras. Esse cronograma de substituição sugere que todas as máquinas devem ser substituídas com 5 anos de uso. Na tabela 6 é possível verificar os cronogramas alternativos utilizados e seus respectivos intervalos de substituição.

TABELA 6. Intervalo de tempo utilizado para os cronogramas de substituição alternativos.

Máquinas	Cronograma alternativo 01		Cronograma alternativo 02		Cronograma alternativo 03	
<i>Harvester</i>	7,8 anos	94 meses	7,3 anos	88 meses	5,0 anos	60 meses
<i>Forwarder</i>	7,6 anos	91 meses	7,5 anos	90 meses	5,0 anos	60 meses

Fonte: Spinelli *et al.*, (2011) e Malinen *et al.*, (2016).

É importante ressaltar que esses cronogramas foram aplicados sobre as mesmas listas geradas para identificar o cronograma ótimo econômico de substituição utilizando a planilha eletrônica. Desta forma, para o *harvester*, o cronograma alternativo 01 iniciou-se com a ligação entre o nó predecessor t_0 e nó futuro t_{94} , indo progressivamente até o fim do horizonte de planejamento. Foi feita a mesma rotina para o *forwarder* e os demais cronogramas.

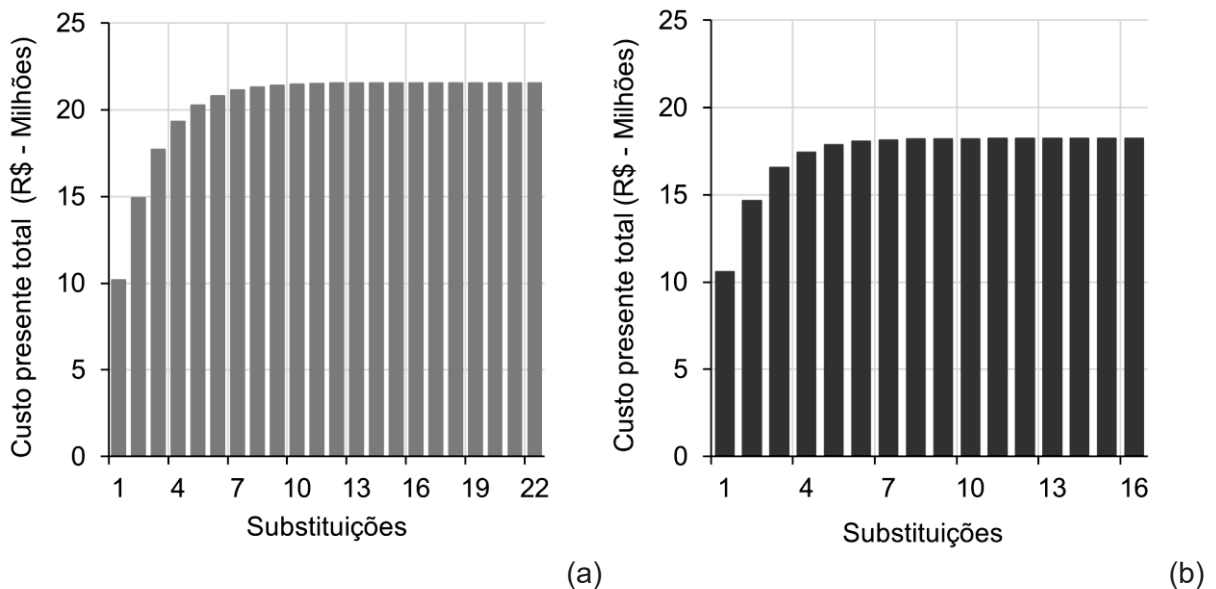
A fim de verificar se há diferença estatística entre as médias, os resultados de custos de produção foram submetidos à análise de variância. Inicialmente as variâncias dos tratamentos (cronogramas de substituição) foram avaliadas quanto a sua homogeneidade pelo teste de Bartlett. As variáveis cujas variâncias mostraram-se homogêneas tiveram os efeitos dos tratamentos testados por meio do teste de F. Quando os resultados revelaram existir diferenças estatisticamente significantes entre médias de tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. IDENTIFICAÇÃO DO CRONOGRAMA ÓTIMO ECONÔMICO

Os cronogramas de substituição do *harvester* e do *forwarder* contaram com total de 22 e 16 substituições respectivamente. Para o *harvester* as operações de compra, utilização e venda das máquinas ao longo do horizonte de planejamento convergiram para um CTP de R\$ 21,6 milhões, enquanto para o *forwarder*, o CTP foi de R\$ 18,2 milhões (Figura 4). Essa diferença entre os resultados pode ser explicada a partir dos custos envolvidos na formação dos fluxos de caixa de cada máquina, que no caso do *harvester*, por ser uma máquina de maior complexidade em termos de engenharia, possui maiores custos.

FIGURA 4. Custo total presente acumulado da série de substituições do *harvester* (a) e *forwarder* (b).



Fonte: O autor (2020).

Outro ponto que explica a diferença entre o CTP do cronograma ótimo econômico das máquinas está ligado à taxa de utilização. A taxa de utilização do *forwarder* foi superior à do *harvester* fazendo com que a demanda pelos serviços prestados por terceiros, representado pela penalidade por falta de produção, fosse menor, reduzindo os custos. O menor número de decisões de substituição do *forwarder* tem relação com os custos e com o processo de desgaste físico das máquinas, que para o *harvester* foi mais acentuado devido a função de maior complexidade que exerce.

Também é possível perceber que em ambos os casos a contribuição que cada decisão de substituição exerceu sobre o CTP foi menor na medida em que o

horizonte de planejamento aumentou. Esse comportamento pode ser explicado pela determinação do CTP a partir da taxa de desconto utilizada no escopo desta pesquisa. Assim, quanto mais distante do momento t_0 , menor será o valor considerado. Outro ponto a ser destacado está na definição do tamanho ideal do horizonte de planejamento, que ocorre quando a contribuição do CTP é menor que 1%.

Diniz e Sessions (2020) verificaram alterações significativas sobre o CTP e o tempo de permanência das máquinas selecionadas no cronograma ótimo econômico de substituição a partir de variações sobre a TMA. De acordo com os resultados obtidos pelos autores é possível concluir que maiores taxas tendem a reduzir o CTP, sendo o inverso verdadeiro. Desta forma, o uso de taxas de desconto maiores favorece a utilização de horizontes de planejamento menores (REZENDE e OLIVEIRA, 2001), uma vez que o ponto em que a contribuição do CTP é menor que 1% foi antecipada.

É importante salientar que a utilização da planilha eletrônica não permite verificar os demais cronogramas de substituição, uma vez que a solução é encontrada a partir da técnica de recursão, e é selecionada apenas a combinação que minimiza o CTP. Para verificar os outros cronogramas o tomador de decisão deverá ocultar os arcos de ligação desejados e executar o algoritmo novamente, como feito por Diniz e Sessions (2020). O novo cronograma de substituição será identificado, desta vez com maior valor de CTP.

Foi verificado que o tempo de permanência do *harvester* e do *forwarder* apresentou redução à medida que o horizonte de planejamento aumentou (Tabela 7), permitindo assim o uso de uma máquina de maior produtividade e taxa de utilização. Em ambos os casos foi verificada maior diferença entre a primeira e a segunda decisão de substituição. Esse comportamento pode ser explicado pela utilização do logaritmo natural nas equações aplicadas para definição do ritmo de entrada das novas tecnologias. Como é possível observar na Tabela 4, foram aplicadas em todos os parâmetros o logaritmo natural do mês referência ($\ln(\text{mês})$).

TABELA 7. Cronograma de substituições do *harvester* e *forwarder*.

Substituição	Harvester			Forwarder		
	Aquisição (mês)	Venda (mês)	Permanência (meses)	Aquisição (mês)	Venda (mês)	Permanência (meses)
1 ^a	0	71	72	0	96	97
2 ^a	71	127	57	96	174	79
3 ^a	127	182	56	174	250	77
4 ^a	182	236	55	250	324	75
5 ^a	236	290	55	324	398	75
6 ^a	290	344	55	398	471	74
7 ^a	344	398	55	471	544	74
8 ^a	398	452	55	544	617	74
9 ^a	452	506	55	617	690	74
10 ^a	506	560	55	690	763	74
11 ^a	560	614	55	763	836	74
12 ^a	614	668	55	836	909	74
13 ^a	668	722	55	909	982	74
14 ^a	722	776	55	982	1055	74
15 ^a	776	830	55	1055	1128	74
16 ^a	830	884	55	1128	1200	73
17 ^a	884	938	55	-	-	-
18 ^a	938	991	54	-	-	-
19 ^a	991	1044	54	-	-	-
20 ^a	1044	1097	54	-	-	-
21 ^a	1097	1149	53	-	-	-
22 ^a	1149	1200	52	-	-	-

Fonte: O autor (2020).

Ao aplicar essa premissa é possível verificar uma tendência onde a diferença entre os novos valores obtidos para construção dos fluxos de caixa reduz na medida em que se aumentou o mês referência ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_{1200}$). Por exemplo, o valor de Int_1 é 0,000, enquanto o valor de Int_2 é igual a 0,6931, sendo está a diferença entre ambos. Ao considerar o valor de Int_3 , tem-se 1,0986, sendo a diferença entre Int_3 e Int_2 de 0,4055 e assim sucessivamente.

Outro fator de interesse está na estabilidade verificada no tempo de permanência de ambas as máquinas a partir da 4^a substituição. Este comportamento também pode ser explicado pela aplicação do logaritmo natural $\ln(\text{mês})$, desta vez, por inserir uma leve mudança nos valores iniciais de cada variável. Na medida em que se aumenta o mês referência ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_{1200}$), a diferença entre os valores do logaritmo natural é reduzida.

Também é possível observar na Tabela 7 que o algoritmo sugere que a substituição do primeiro *forwarder* da série ótima econômica de substituição seja

realizada em t96, que é o limite máximo de substituição estabelecido no escopo dessa pesquisa. Esse ponto específico encontrado nos resultados alerta para uma das limitações que o tomador de decisão poderá enfrentar ao utilizar formulações de programação matemática.

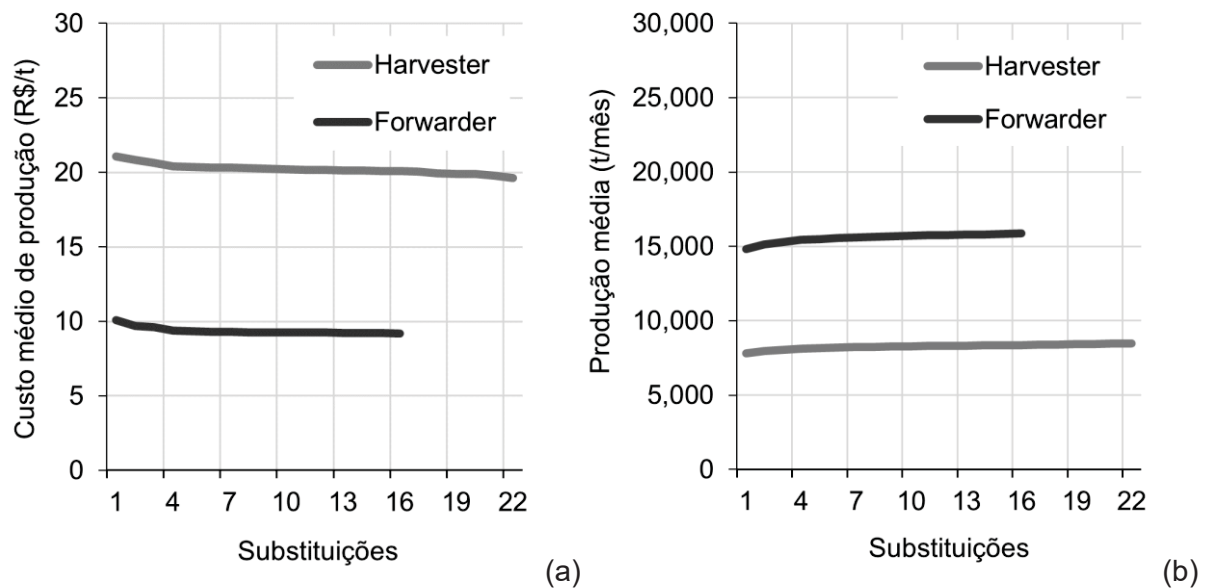
Hartman e Tan (2014) comentam que ao utilizar formulações de programação matemática é preciso presumir que todo equipamento tem uma vida útil máxima. Desta forma esse ponto é o limite que o tomador de decisão possui para manter a máquina em uso, sendo obrigado substituí-la por uma nova após esse período. Como é possível observar na Tabela 7, a primeira máquina da série ótima econômica de substituição do *forwarder* atingiu o limite máximo, que foi de 97 meses.

Esse comportamento, se repetido nas demais substituições, revelaria que o limite máximo de substituição definido para essa máquina teria sido inadequado. Para corrigir esse desvio seria necessário aumentar esse limite, recalculando os fluxos de caixa e as variáveis da lista de entrada para executar novamente o algoritmo. Por isso recomenda-se atenção na definição desse limite, de preferência que seja definido de acordo com os dados históricos da empresa ou dados fornecidos pelos fabricantes das máquinas.

Uma vez selecionado o cronograma ótimo econômico de substituição pelo algoritmo, a planilha eletrônica identifica na lista de entrada o custo médio de produção e a produção média de todas as máquinas selecionadas no cronograma ótimo econômico de substituição. Essas informações aliadas ao CTP permitem a tomada de decisões de forma racional, minimizando os custos. Como Diniz e Sessions (2020) afirmaram, a utilização do algoritmo *forward reaching* traz consistência entre as decisões de substituição e o planejamento estratégico da empresa.

Yatsenko e Hitronenko (2011, 2017, 2020) comentam em seus estudos que é esperado uma redução do custo médio de produção e aumento da produção média a partir da entrada de novas tecnologias. Os resultados apresentados na Figura 5 são coerentes com essa hipótese. Como é possível observar, os custos médios de produção das séries ótimas econômicas de substituição do *harvester* e do *forwarder* apresentaram redução, enquanto houve aumento da produção média.

FIGURA 5. Custo médio de produção (a) e produção média (b) da série ótima de substituições.



Fonte: O autor (2020).

O custo médio de produção do *harvester* reduziu gradativamente, partindo de R\$ 21,08/t até atingir R\$ 19,64/t, sendo esse resultado reflexo do aumento produtividade das máquinas ao longo do horizonte de planejamento. É importante ressaltar que o custo médio de produção é influenciado diretamente pela quantidade de madeira produzida, sendo muito sensível a qualquer variação, como demonstrado nas pesquisas de Costa *et al.*, (2017) e Santos *et al.*, (2017).

A produção média do *harvester* teve um aumento de 8,2% da primeira para a última substituição. Os maiores aumentos foram verificados durante as primeiras substituições, explicadas pelas equações utilizadas na definição do ritmo de entrada de novas tecnologias. O aumento da taxa de utilização e da produtividade foram mais abruptas neste período, ressaltando que na medida em que o horizonte de planejamento aumentou, essa diferença reduziu, bem como os ganhos sobre a produção.

O custo médio de produção observado para o *forwarder* foi R\$ 9,90/t, enquanto a produção média foi de 14 mil t/mês. Santos *et al.*, (2017) avaliando dois sistemas de colheita de madeira, observaram um custo de produção para o *forwarder* semelhante, com valor de R\$ 9,21/t. A proximidade dos resultados, embora o comparativo não seja possível em razão dos fatores de gestão, técnicos e operacionais da atividade, pode ser explicada pela marca e modelo da máquina avaliada, a mesma da máquina utilizada neste estudo.

O custo médio de produção e a produção média do *forwarder* se comportaram de maneira similar ao *harvester*. O custo médio de produção apresentou uma redução de 9,1% entre a primeira e a última máquina, enquanto a produção média apresentou um aumento de 6,6%. Ambos os resultados são explicados pela entrada de novas tecnologias ao longo do horizonte de planejamento, caracterizadas pelo aumento da produtividade e taxa de utilização.

A influência que a entrada de novas tecnologias exerceu sobre os resultados de ambas as máquinas foi coerente com as hipóteses levantadas por autores como Hartman e Rogers (2006) e Yatsenko e Hitronenko (2017). Foi verificado que a partir da incorporação da entrada de novas tecnologias houve uma redução no tempo de permanência das máquinas assim como verificado nas pesquisas de Cheevaprawatdomrong e Smith (2003), Rogers e Hartman (2005) e Hritonenko e Yatsenko (2007).

Em relação à produtividade, entende-se perfeitamente a sua relação com a redução do custo médio de produção e com o aumento da produção média. Contudo é preciso explicar o quanto a taxa de utilização poderá afetar os resultados apresentados. O aumento da taxa de utilização a partir da entrada de novas tecnologias está relacionado ao progresso tecnológico das máquinas, pela maior capacidade produtiva e as novas práticas de manutenção, que ao serem aplicadas nos novos modelos de gestão, garantem o aumento da disponibilidade mecânica das máquinas, fator de maior influência na formação da taxa de utilização (BILEK, 2007).

Diniz *et al.*, (2020b) compararam dois modelos de manutenção que levam em consideração a combinação de diferentes tipos de manutenção. Os pesquisadores concluíram que a partir de novas práticas de manutenção é possível aumentar a disponibilidade mecânica de máquinas de colheita da madeira, influenciando diretamente na taxa de utilização. Tal resultando juntamente com o estudo realizado por Di Fluvio *et al.*, (2017) foram determinantes para a consideração do aumento da taxa de utilização a partir da entrada de novas tecnologias, esperando sempre a evolução nas técnicas de manutenção empregadas no setor florestal.

O fato de a planilha eletrônica permitir a projeção dos custos e produções futuras é de grande importância, sendo essas, duas atividades que apresentam alto grau de dificuldade de previsão na área florestal, podendo variar de acordo com uma série de fatores, como características do terreno, características do

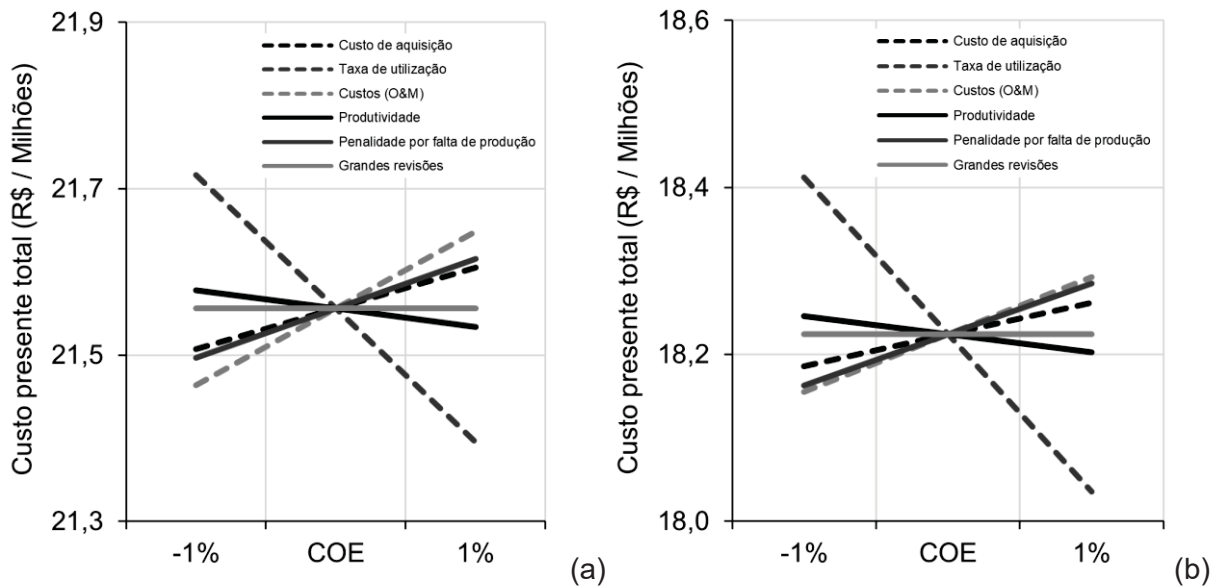
povoamento, regime de manejo, sistema de colheita empregado, modelos de manutenção utilizados e fornecedores de peças (BRINKER *et al.*, 2002; DODSON *et al.*, 2015; DI FULVIO *et al.*, 2017; DINIZ e SESSIONS, 2020).

Yatsenko e Hritonenko (2020) expõem a importância da utilização de técnicas de programação matemática que combinam a definição do momento ótimo econômico de substituição com o planejamento estratégico das empresas. Isso já havia sido observado por Denardo (2003), onde o autor comenta que, dificilmente, pode-se esperar um procedimento computacional mais eficiente que esse. Outra vantagem está no tempo consumido para identificar os cronogramas de substituição (menos de 10 segundos). Isso traz uma grande vantagem em relação a outros métodos, pois permite ao tomador de decisão testar diferentes cenários em um curto período.

5.2. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Na Figura 6 é possível perceber que a alteração de 1% para mais e para menos dos valores iniciais de cada parâmetro testado foi suficiente para alterar o CTP dos cronogramas de substituição das máquinas. Também é possível observar que a partir do aumento de alguns parâmetros, o CTP se comportou de maneira oposta aos demais. Com aumento dos valores iniciais da taxa de utilização e da produtividade, por exemplo, houve uma redução no seu valor, sendo o inverso verdadeiro.

O fato da taxa de utilização e produtividade atuarem de forma diferente dos demais parâmetros sobre a formação do CTP explica o comportamento mencionado. A taxa de utilização e a produtividade quando aumentadas, reduziram a necessidade dos serviços prestados por terceiros, uma vez que a demanda de madeira da empresa foi atingida. Diniz e Sessions (2020) identificaram que esses parâmetros possuem correlação negativa com o CTP, ao passo que os demais parâmetros possuem correlação positiva.

FIGURA 6. Variação do custo total presente do *harvester* (a) e *forwarder* (b).

COE = Cronograma ótimo econômico.

Fonte: O autor (2020).

Observou-se que a taxa de utilização foi a variável que apresentou maior influência sobre o CTP das máquinas estudadas, em torno de R\$ 160 mil para o *harvester* e R\$ 188 mil para o *forwarder*. Nos Apêndices 6 e 7 é possível verificar que o tempo de permanência de ambas as máquinas também sofreu uma alteração, sendo antecipada em um mês. Por outro lado, ao reduzir os valores iniciais da taxa de utilização em 1% para formação da lista de entrada, foi observado que postergar em um mês a decisão de substituição era a melhor opção.

Tanto a antecipação quanto a postergação na decisão de substituição realizadas a partir das modificações na taxa de utilização são coerentes, uma vez que reflete o percentual exato de horas trabalhadas pela máquina no mês decorrido. Assim, com o aumento da taxa de utilização, é feita a antecipação do momento de substituição das máquinas, uma vez que elas trabalham por um maior número de horas ao longo dos turnos de trabalho. A medida em que a taxa de utilização é reduzida ocorreu uma redução no tempo trabalhado pelas máquinas ao longo dos turnos, postergando assim, o momento de substituição das máquinas.

Destaca-se ainda as alterações de apenas R\$ 20 mil e R\$ 21 mil ocorridas após a alteração dos valores iniciais do parâmetro produtividade, para o *harvester* e *forwarder* respectivamente. A alteração da produtividade em 1% para mais e para menos não alterou o tempo de permanência das máquinas selecionadas ao longo do

horizonte de planejamento. O baixo impacto sobre o CTP é um dos fatores que podem ajudar a explicar este comportamento.

Uma das hipóteses iniciais em relação à produtividade é de que ela exerceria influência sobre o CTP, contudo, esperava-se maior influência. A explicação para esse comportamento pode ser feita a partir de duas formas. A primeira está relacionada à forma como a produtividade atua sobre o CTP. Na medida que se aumenta a produtividade das máquinas reduz-se a necessidade dos serviços prestados por empreiteiros, representada pela penalidade por falta de produção, uma vez que a demanda de madeira da empresa foi suprida.

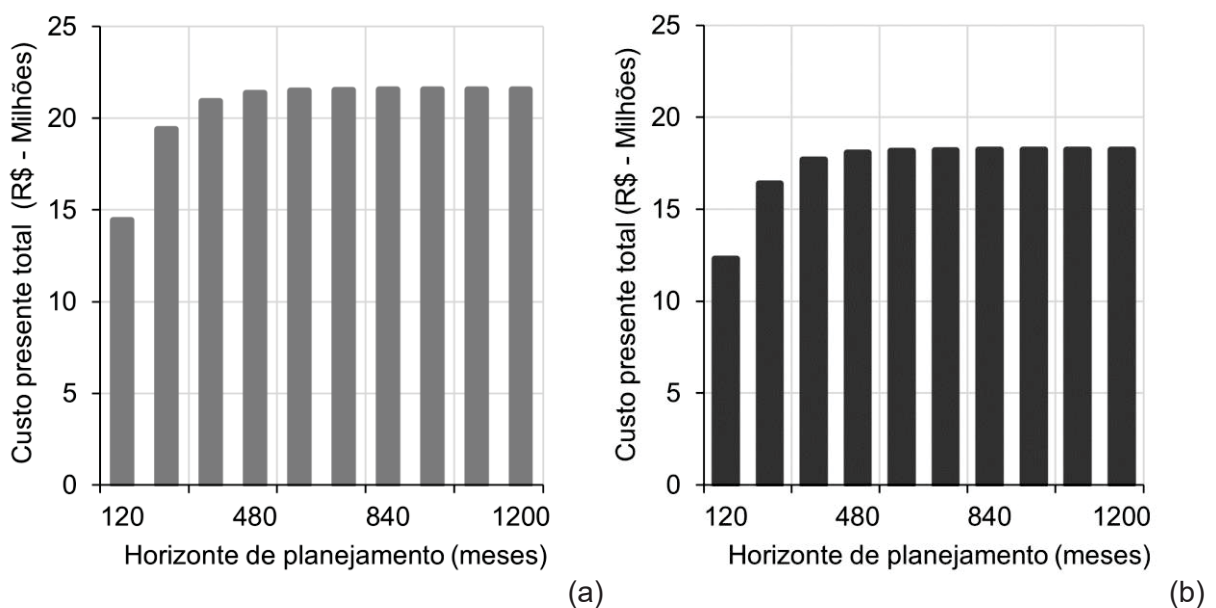
A segunda é relacionada à forma de identificação do cronograma ótimo econômico de substituição pelo algoritmo *forward reaching*, que é feita por meio da minimização do CTP. Neste caso não são consideradas as receitas, que tem relação direta com a produtividade. Se o objetivo fosse maximizar o VPL como feito por Marques *et al.*, (2005), a produtividade teria maior influência, uma vez que as entradas seriam calculadas a partir da produção, que por sua vez, é calculada pelo produto do número de horas trabalhadas e da produtividade da máquina.

Os custos (O&M), a penalidade por falta de produção e o custo de aquisição, se comportaram de maneira semelhante e esperada. A partir do aumento nos valores iniciais das variáveis supracitadas houve aumento no CTP, sendo o inverso verdadeiro. A diferença observada a partir da alteração nos custos (O&M) foi em torno de R\$ 92 mil para o *harvester*, e R\$ 68 mil para o *forwarder*, sendo essa a segunda variável de maior impacto sobre o CTP. A diferença observada para penalidade por falta de produção foi em torno de R\$ 59 mil e R\$ 60 mil para o *harvester* e *forwarder*, respectivamente, enquanto o custo de aquisição apresentou diferença de R\$ 48 mil e R\$ 38 mil.

O aumento dos parâmetros custos (O&M) e penalidade por falta de produção provocou a antecipação do momento ótimo econômico de substituição em um mês. Em relação ao parâmetro custo de aquisição foi possível verificar que houve uma tendência em antecipar a decisão de substituição a partir da sua redução. Esse comportamento é coerente, uma vez que menores custos de aquisição favorecem a substituição da máquina atual por outra de melhor tecnologia. Já os itens de grande revisão, não apresentaram variação em relação ao tempo de permanência, explicados pelo baixo impacto que a alteração dos parâmetros causou sobre o CTP.

Ao utilizar diferentes horizontes de planejamentos verificou-se que o CTP deixou de ser expressivo a partir do 600º mês, que foi o momento que a contribuição do mesmo foi inferior a 1% (Figura 7). O CTP total do cronograma ótimo econômico de substituição do *harvester* foi de R\$ 21,5 milhões, enquanto o do *forwarder* foi de R\$ 18,2 milhões. Foi constatado também que o primeiro horizonte de planejamento testado representou 67% da composição do CTP de ambas as máquinas, enquanto os horizontes de planejamento de 240, 360 e 480 meses representaram 23%, 7% e 2%, respectivamente.

FIGURA 7. Custo total presente acumulado da série de substituições do *harvester* (a) e *forwarder* (b).



Fonte: O autor (2020).

Na Tabela 8 é possível constatar que o tempo médio de permanência das máquinas selecionadas no cronograma ótimo econômico de substituição apresentou redução à medida em que houve aumento do horizonte de planejamento. Esse resultado é um reflexo da consideração do progresso tecnológico das máquinas ao longo do horizonte de planejamento. Yatsenko e Hritonenko (2008) verificaram comportamento semelhante em sua pesquisa, confirmando a hipótese de que a partir da entrada de novas tecnologias, o momento ótimo econômico de substituição das máquinas tende a ser antecipado.

Também foi verificado que até o terceiro horizonte de planejamento testado não houve diferença entre o tempo médio de permanência das máquinas, com apenas uma exceção. Para o *forwarder* o tempo médio de permanência das máquinas no primeiro horizonte de planejamento testado foi inferior aos demais.

Esse comportamento é explicado pelo tamanho do horizonte de planejamento testado. Deste modo o algoritmo identifica que o CTP será mínimo em virtude da combinação de duas máquinas. Reduzir o tempo de permanência provocaria um aumento do CTP devido à nova substituição.

TABELA 8. Variação do tempo de permanência a partir de diferentes horizontes de planejamento.

Horizonte de Planejamento	Duração (meses)	Tempo médio de permanência (meses)		Número médio de substituições (n)	
		<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>
1	120	61	61	2	2
2	240	61	81	4	3
3	360	61	81	5	4
4	480	57	81	6	6
5	600	57	79	11	8
6	720	57	79	13	9
7	840	56	77	15	11
8	960	56	77	17	12
9	1080	55	77	20	14
10	1200	55	75	22	16

Fonte: O autor (2020).

Foi verificado que o tempo médio de permanência do *harvester* variou de 61 a 55 meses e o *forwarder* apresentou variação de 81 a 75 meses. Esta variação entre o tempo de permanência das máquinas também foi verificada na pesquisa de Malinen *et al.*, (2016), que identificaram que o tempo de permanência do *forwarder* tende a ser superior ao *harvester*. Uma das razões para este comportamento está na diferença entre o custo de aquisição e custo de operação dessas máquinas.

Os valores médios de tempo de permanência começaram a reduzir a partir do quarto horizonte de planejamento, se mantendo estável até o sexto, e reduzindo gradativamente até o último. Esta redução pode ser explicada a partir das equações utilizadas para definição do ritmo de entrada de novas tecnologias, onde se utilizou o logaritmo natural $\ln(\text{mês})$.

A medida em que o horizonte de planejamento foi aumentado ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_{1200}$), a diferença entre cada logaritmo utilizado para calcular os valores que definem a entrada de novas tecnologias reduziu. Isso fez com que houvesse estabilidade em relação ao tempo médio de permanência das máquinas, como verificado nos resultados de ambas as máquinas.

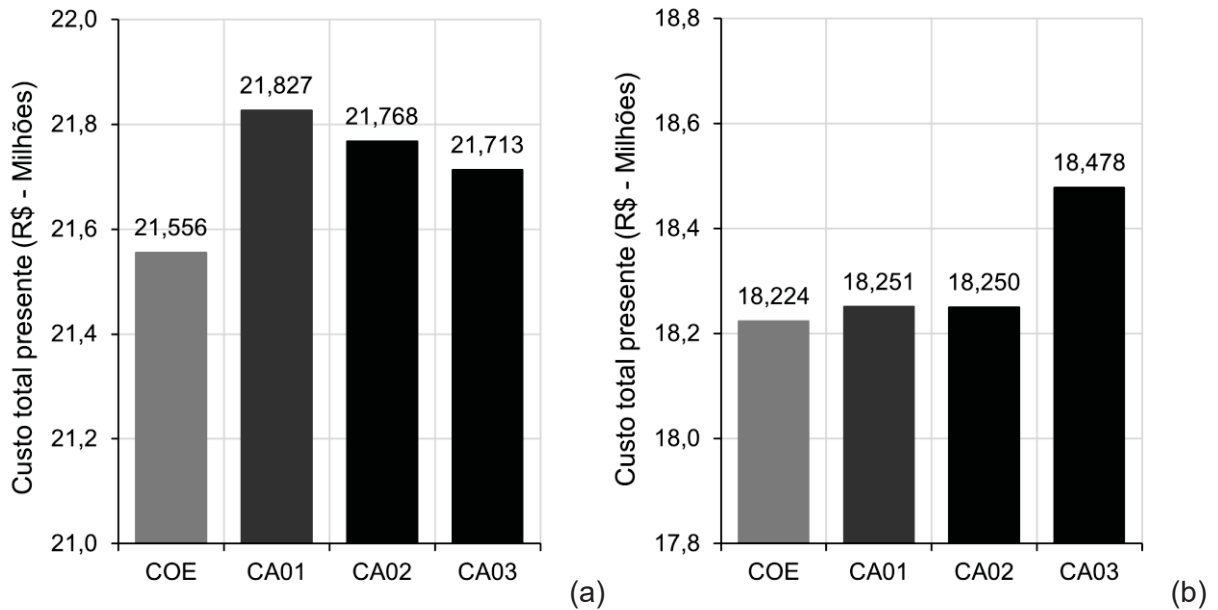
Os resultados apresentados permitiram constatar que o parâmetro que apresentou maior influência sobre cronograma ótimo econômico das máquinas

estudadas foi a taxa de utilização. Isso indica que o tomador de decisão tem a possibilidade de elevar a taxa de utilização e reduzir os custos das máquinas envolvidas ao investir em boas práticas de manutenção, assim como verificado nos trabalhos de Diniz *et al.*, (2017, 2019a, 2019b, 2020b).

5.3. COMPARAÇÃO COM CRONOGRAMAS DE SUBSTITUIÇÃO ALTERNATIVOS

Na Figura 8 é possível verificar que, para o *harvester*, o cronograma alternativo 01 apresentou maior valor de CTP, sendo da ordem de R\$ 21,83 milhões. Esse valor é resultante da operação de compra, utilização e venda de 13 máquinas ao longo do horizonte de planejamento. Ao optar por esse cronograma, o tomador de decisão arcaria com um aumento do CTP de R\$ 271 mil, enquanto os cronogramas alternativos 02 e 03 provocariam um aumento de R\$ 212 mil e R\$ 157 mil, respectivamente, resultantes de 14 e 20 decisões de substituição, respectivamente.

No caso do *forwarder*, o cronograma que apresentou maior valor de CTP foi o cronograma alternativo 03, totalizando R\$ 18,48 milhões. Os cronogramas alternativos 01 e 02 apresentaram valores de CTP na ordem de R\$ 18,25 milhões, apresentando pouca diferença em relação ao cronograma ótimo econômico de substituição. A postergação das substituições feitas nos cronogramas alternativos 01 e 02 do *forwarder* apresentaram aumento no CTP de R\$ 26 mil e R\$ 25 mil, respectivamente, enquanto a antecipação das substituições realizadas no cronograma alternativo 03 resultaram em um aumento de R\$ 254 mil.

FIGURA 8. Custo total presente acumulado da série de substituições do *harvester* (a) e *forwarder* (b).

COE = Cronograma ótimo econômico.
 CA01 = Cronograma alternativo 01.
 CA02 = Cronograma alternativo 02.
 CA03 = Cronograma alternativo 03.

Fonte: O autor (2020).

O cronograma ótimo econômico de substituição apresentou menor valor de CTP em relação aos cronogramas alternativos. Desta forma, é possível que afirmar que a utilização da planilha eletrônica permite ao tomador de decisão evitar o aumento dos custos envolvidos no processo de substituição de máquinas, apesar da pouca diferença encontrada para o caso do *forwarder*.

O caso do *forwarder* permitiu verificar que pode ser preferível postergar a decisão de substituição ao invés de antecipá-la, pois os custos envolvidos na compra, utilização e venda das máquinas selecionadas ao longo do horizonte de planejamento são menores. Ao antecipar as substituições o tomador de decisão estaria arcando com um aumento dos custos, devido principalmente à desvalorização das máquinas após os primeiros anos de operação.

Esse comportamento é coerente com os resultados obtidos por Diniz *et al.* (2020a). Os autores aplicaram o método EL para definição do momento ótimo econômico de uma máquina florestal e identificaram que o custo tendeu a ser maior no início da vida econômica das máquinas, reduzindo até o ponto ótimo econômico de substituição, e em seguida, aumentou novamente. O ponto de interesse é que ao postergar a decisão de substituição, o custo aumenta de maneira moderada, assim como no presente estudo.

É possível perceber que em todos os cronogramas alternativos testados ocorreram aumentos do custo em relação ao cronograma ótimo econômico de substituição. Tais resultados já eram esperados, uma vez que as substituições foram realizadas em momentos distintos do recomendado pelo algoritmo *forward reaching*. A redução e o aumento do tempo de permanência das máquinas causaram um aumento no CTP a partir do processo natural de deterioração das máquinas.

Esse processo faz com que a taxa de utilização reduza. A partir disso os custos (O&M) aumentam, assim como a demanda pelos serviços prestados por terceiros. A combinação desses dois fatores contribuiu para o aumento do CTP obtido para cada um dos cronogramas alternativos testados. Já havia sido observado que esses foram os parâmetros que exerceram maior influência sobre o CTP, logo, o que torna esse resultado coerente.

É importante ressaltar que não foi possível aplicar nenhuma análise estatística para comparar os resultados obtidos em cada cronograma de substituição. Como descrito nos procedimentos metodológicos o CTP não é formado por uma série de médias, e sim pela somatória de vários CTPs, extraídos de cada máquina selecionada ao longo do horizonte de planejamento. Desta forma apenas a variável custo médio de produção passou por uma análise estatística.

Todos os cronogramas alternativos de substituição testados apresentaram aumento do custo médio de produção. Na Tabela 9 é possível verificar o custo médio de produção de cada máquina selecionada ao longo do horizonte de planejamento. Ao se aplicar o teste de Tukey ($p < 0,05$) observou-se que houve diferença estatística entre as médias de grande parte dos cronogramas testados, ocasionado pelo aumento dos custos envolvidos nas operações de compra, utilização e venda das máquinas ao longo do horizonte de planejamento.

O cronograma alternativo 01 do *harvester*, quando comparado ao cronograma ótimo econômico de substituição, apresentou aumento de 4,7% no custo médio de produção. Já os cronogramas alternativos 02 e 03 apresentaram aumento de 3,1% e 1,6%, respectivamente. É importante destacar ainda que todos os cronogramas alternativos apresentaram diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), quando comparados ao cronograma ótimo econômico de substituição.

Para o *forwarder* foi verificado que apenas o cronograma alternativo 03 apresentou diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) quando comparado com o cronograma ótimo econômico de substituição. O aumento do valor do CTP é

um dos fatores que explicam este resultado. Os resultados também permitem verificar que os cronogramas alternativos 01 e 02 não apresentaram diferença estatística pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Anteriormente já havia sido verificado que esses cronogramas apresentaram pouca variação.

TABELA 9. Custo médio de produção das máquinas selecionadas ao longo do horizonte de planejamento dos cronogramas de substituição avaliados.

Substituição	<i>Harvester</i>				<i>Forwarder</i>			
	COE	CA01	CA02	CA03	COE	CA01	CA02	CA03
1 ^a	21,08	22,12	21,69	21,39	10,10	10,33	10,14	11,31
2 ^a	20,85	21,83	21,53	21,15	9,71	10,02	9,84	10,79
3 ^a	20,62	21,74	21,39	20,92	9,60	9,80	9,62	10,73
4 ^a	20,42	21,61	21,30	20,78	9,37	9,69	9,53	10,68
5 ^a	20,36	21,49	21,21	20,71	9,35	9,61	9,48	10,61
6 ^a	20,30	21,32	21,09	20,67	9,30	9,54	9,42	10,54
7 ^a	20,32	21,17	20,95	20,66	9,29	9,51	9,40	10,46
8 ^a	20,28	21,04	20,74	20,62	9,27	9,52	9,40	10,43
9 ^a	20,24	20,83	20,58	20,58	9,26	9,52	9,38	10,41
10 ^a	20,21	20,67	20,41	20,56	9,26	9,51	9,38	10,39
11 ^a	20,18	20,51	20,32	20,52	9,25	9,49	9,37	10,39
12 ^a	20,16	20,34	20,24	20,48	9,24	9,47	9,35	10,37
13 ^a	20,13	20,29	20,17	20,44	9,23	9,44	9,33	10,34
14 ^a	20,11	-	20,08	20,37	9,23	9,43	9,29	10,35
15 ^a	20,09	-	-	20,30	9,22	-	-	10,35
16 ^a	20,07	-	-	20,23	9,18	-	-	10,33
17 ^a	20,05	-	-	20,16	-	-	-	10,34
18 ^a	19,92	-	-	20,12	-	-	-	10,32
19 ^a	19,90	-	-	20,07	-	-	-	10,30
20 ^a	19,89	-	-	20,01	-	-	-	10,28
21 ^a	19,76	-	-	-	-	-	-	-
22 ^a	19,64	-	-	-	-	-	-	-
Média	20,21	21,15	20,83	20,54	9,37	9,63	9,49	10,49
Tukey ($p < 0,05$)	A	C	BC	B	A	A	A	B

COE = Cronograma ótimo econômico.

CA01 = Cronograma alternativo 01.

CA02 = Cronograma alternativo 02.

CA03 = Cronograma alternativo 03.

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: O autor (2020).

É possível observar que em todos os casos houve redução do custo médio de produção à medida que uma máquina era substituída por outra de melhor tecnologia. A consideração do progresso tecnológico ao longo do horizonte de planejamento provocou o aumento da produtividade das máquinas, o que explica tal resultado. Também é possível perceber que a diferença do custo médio de produção

foi maior entre as primeiras substituições. A explicação para esse comportamento está no uso das equações utilizadas para definir o ritmo de entrada de novas tecnologias, que provocou maiores mudanças nos meses iniciais.

O aspecto de maior destaque em relação aos resultados apresentados nessa seção foi a variação que os cronogramas de substituição alternativos apresentaram em relação aos cronogramas de substituição obtidos ao utilizar a planilha eletrônica. A não utilização desses métodos, como revelado por Cantú *et al.*, (2017), levam os gestores florestais a incorrer no aumento dos custos ligados à compra, utilização e substituição das máquinas pelo uso de um planejamento inadequado e por decisões tomadas com base em experiência e intuição.

6. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida nesta pesquisa poderá auxiliar empresas, empreiteiros e produtores independentes a identificar o momento ótimo econômico de substituição de uma série de máquinas de maneira rápida e precisa, permitindo identificar os custos e produções futuras ao longo do horizonte de planejamento.

O cronograma ótimo econômico de substituição do *harvester* apresentou maior valor de CTP e menor tempo de permanência em relação ao cronograma ótimo econômico de substituição do *forwarder*, em função do maior custo de aquisição, menor taxa de utilização e maiores custos (O&M).

A entrada de novas tecnologias ao longo do horizonte de planejamento permitiu a redução no custo médio de produção e aumento na produção média de ambas as máquinas estudadas, com conseqüente redução no tempo médio de permanência ao longo do horizonte de planejamento.

Os parâmetros testados apresentaram influência sobre o cronograma ótimo econômico de substituição das máquinas estudadas, onde a alteração em 1% nos valores iniciais foi suficiente para modificar o cronograma ótimo econômico das máquinas estudadas.

A taxa de utilização foi o parâmetro de maior influência sobre o CTP das máquinas estudadas, indicando que ao investir em boas práticas de manutenção, o tomador de decisão tem a possibilidade de reduzir os custos do processo de substituição das máquinas.

Para a taxa de desconto utilizada, verificou-se que o tamanho ideal do horizonte de planejamento para o problema de substituição do *harvester* e do *forwarder* encontra-se entre 450 e 600 meses, pois foi a partir desse intervalo que a contribuição que cada decisão de substituição exerceu influência sobre o CTP em taxas inferiores a 1%.

Os cronogramas de substituição obtidos a partir da utilização da planilha eletrônica apresentaram menores custos em relação aos cronogramas alternativos de substituição, indicando que a utilização da planilha eletrônica é a melhor forma de evitar o aumento dos custos.

7. RECOMENDAÇÕES

É verdadeira a afirmação de que a abordagem utilizada nesta pesquisa não pode ser aplicada para resolver o problema de substituição de uma frota de máquinas. Neste ponto fica aberta uma lacuna para futuras pesquisas. Encoraja-se que pesquisadores realizem estudos e encontrem métodos capazes de resolver este tipo de problema, especialmente no Brasil, que conta com empresas que possuem uma frota de máquinas expressiva. Outro ponto é que essas novas abordagens sejam de fácil entendimento e possuam aplicação prática. Como Cantú *et al.*, (2017) mostraram, muitas vezes as abordagens não são utilizadas devido à sua complexidade, ou distanciamento da realidade do campo.

Foram identificados dois pontos de melhoria na planilha eletrônica. Primeiro, incluir a opção para identificar a série ótima econômica de substituição que maximiza o lucro da atividade, uma vez que o algoritmo *forward reaching* permite este feito. Segundo, incluir nos resultados fornecidos pela planilha eletrônica o horímetro de cada máquina selecionada no cronograma ótimo econômico de substituição, que é dado por mês. Recomenda-se que futuras pesquisas procurem incluir essas melhorias, possibilitando compreender ainda mais os efeitos que as decisões de gestão, técnicas e operacionais exercem sobre o ponto ótimo econômico de substituição de máquinas de colheita da madeira.

Por fim, recomenda-se que empresas, empreiteiros e produtores independentes façam uso das abordagens disponibilizadas na literatura para definição do momento ótimo econômico de substituição. É importante deixar claro que a abordagem escolhida é um meio para uma decisão, e a decisão que é importante. Utilidade é o critério adequado para a escolha de uma abordagem e, se não for útil, o melhor conselho é obter outra. O ponto principal da análise é resolver o problema desejado de maneira simples, rápida e confiável. O Apêndice 1 poderá ajudar a comunidade científica-florestal a encontrar a melhor abordagem, de acordo com o problema que se deseja resolver.

8. REFERÊNCIAS

- Ackerman, P. Belbo, H. Eliasson, L. de Jong, A. Lazdins, A. Lyons, J. (2014). The cost model for calculation of forest operations costs. *International Journal of Forest Engineering*, 25, 75–81.
- Apeland, S. Scarf, P. A. (2003). A fully subjective approach to capital equipment replacement. *Journal of the Operational Research Society*, 54, 371–378.
- Baxter, M. Brown, M. Gan, H. S. (2010). A decision support tool for equipment replacement in forestry harvesting operations. In *Proceedings of the 45th Annual Conference of the ORSNZ*, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Bean, J. C. Lohmann, J. R. Smith, R. L. (1985). A dynamic infinite horizon replacement economy decision model. *The Engineering Economist*, 30, 99–120.
- Bean, J. C. Lohmann, J. R. Smith, R. L. (1994). Equipment replacement under technological change. *Naval Research Logistics*, 41, 117–128.
- Bellman, R. (1955). Equipment replacement policy. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 3, 133–136.
- Berg, S. Bergström, D. Nordfjell, T. (2014). Simulating conventional and integrated stump-and round-wood harvesting systems: a comparison of productivity and costs. *International Journal of Forest Engineering*, 25, 138–155.
- Bethuyne, G. (1998). Optimal replacement under variable intensity of utilization and technological progress. *The Engineering Economist*, 43, 85–105.
- Bilek, E. M. (2007). ChargeOut! Determining machine and capital equipment charge-out rates using discontinued cash-flow analysis. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, General technical report Nr. FPL-GTR–171.
- Bilek, E. M. (2009). Machine cost analysis using the traditional machine-rate method and CHARGEOUT! In: *The proceedings from the 2009 Council on Forest Engineering (COFE) Conference: “Environmentally Sound Forest Operations”*. Lake Tahoe (CA); June 15–18, 2009; p. 11. Disponível em: http://web1.cnre.vt.edu/forestry/cofe/documents/COFE_2009_Bilek.pdf
- Bowman, H. Fetter, R. B. (1967). *Analysis for production and operations management*. 3rd Edition. Homewood. Illinois. Richard D Irwin, Inc.
- Brinker, R. W. Kinard, J. Rummer, B. Lanford, B. (2002). *Machine rates for selected forest harvesting machines*. Auburn (AL): Alabama Experiment Station; p. 32.
- Brown, M. (1993). A mean-variance serial replacement decision model: the correlated case. *The Engineering Economist*, 38, 237–247.
- Burla, E. R. Fernandes, C. H. Machado, C. C. Leite, D. M. Fernandes, P. S. (2012). Avaliação técnica e econômica do *harvester* em diferentes condições operacionais. *Engenharia na Agricultura*, 20, 412-422.
- Butler, D. A. Dykstra, D. P. (1981). Logging equipment replacement: a quantitative approach. *Forest Science*, 27, 2-12.

- Bylka, S. Sethi, S. Sorger, G. (1992). Minimal forecast horizons in equipment models with multiple technologies and general switching costs. *Naval Research Logistics*, 39, 488–507.
- Cantú, R. P. LeBel, L. (2010). How adequate are equipment replacement models for logging contractors? COFE, In: *Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the Council on Forest Engineering: Fueling the Future*, Compiled by D, Mitchell and T, Gallagher.
- Cantú, R. P. LeBel, L. Gautam, S. (2017). A context specific machine replacement model: a case study of forest harvesting equipment. *International Journal of Forest Engineering*, 28, 124-133.
- Casarotto Filho, N. Kopittke, H. B. (2020). *Análise de investimentos: engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial*. 12. ed. São Paulo: Atlas.
- Caterpillar Tractor Co. (1978). Don't guess: here are the facts on when to trade. *Canadian Pulp and Paper Industry*. 31, 28-30.
- Caulfield, J. P. Tufts, R. A. (1989). Forestry equipment replacement decisions under risk. *Forest Products Journal*, 39, 49-54.
- Chand, S. Sethi, S. (1982). Planning horizon procedures for machine replacement models with several replacement alternatives. *Naval Research Logistics*, 29, 483–493.
- Chand, S. McClurg, T. Ward, J. (1993). A single-machine replacement model with learning. *Naval Research Logistics*, 40, 175–192.
- Chang, P. T. (2005). Fuzzy strategic replacement analysis. *European Journal of Operational Research*, 160, 532–559.
- Cheevaprawatdomrong, T. Smith, R. (2003). A paradox in equipment replacement under technological improvement. *Operations Research Letters*, 31, 77–82.
- Christer, A. H. Scarf, P. (1994). A robust replacement model with applications to medical equipment. *Journal of the Operational Research Society*, 45, 261–275.
- Conrad IX, J. L. Greene, D. Hiesl, P. (2018). The evolution of logging businesses in Georgia 1987-2017 and South Carolina 2012-2017. *Forest Science*, 64, 671-681.
- de Sousa, J. F. Guimaraes, R. (1997). Setting the length of the planning horizon in the vehicle replacement problem. *European Journal of Operational Research*, 101, 550–559.
- da Costa, E. M. Marzano, F. L. C. Machado, C. C. Leite, E. S. (2017). Desempenho e custos operacionais de um *harvester* em floresta de baixa produtividade. *Engenharia na Agricultura*, 25, 124-131.
- Denardo, E. V. (1982). *Dynamic Programming, Models and Applications*. Englewood Cliffs. 1st edition. NJ: Prentice-Hall. Inc.
- Denardo, E. V. (2003). *Dynamic Programming, Models and Applications*. Englewood Cliffs. 2nd edition. NJ: Prentice-Hall. Inc.
- Di Fulvio, F. Abbas, D. Spinelli, R. Acuna, M. Ackerman, P. Lindroos, O. (2017). Benchmarking technical and cost factors in forest felling and processing operations in

- different global regions during the period 2013–2014. *International Journal of Forest Engineering*. 28, 94–105.
- Diniz, C. C. C. Lopes, E. S. Miranda, G. M. Koehler, H. S. (2017). Manutenção preventiva como determinante para redução de custos de manutenção de um feller buncher. *BIOFIX Scientific Journal*, 2, 43-47.
- Diniz, C. C. C. da Silva, S. A. Cerqueira, C. L. Oliveira, G. (2018). Influência das interrupções sobre o grau de utilização de picadores florestais. *Biofix Scientific Journal*, 3, 267-272.
- Diniz, C. C. C. Lopes, E. S. Miranda, G. M. Koehler, H. S. de Souza, E. K. C. (2019a). Analysis of indicators and cost of world class maintenance (wcm) in forest machines. *Floresta*, 49, 533-542.
- Diniz, C. C. C. Rothbarth, D. L. Lopes, E. S. Miranda, G. M. Koehler, H. S. Oliveira, G. S. (2019b). Optimization of maintenance activity using the world-class maintenance system in skidder forest operations. *Journal of Agricultural Science*, 11, 1916-9752.
- Diniz, C. Sessions, J. (2020). Ensuring consistency between strategic plans and equipment replacement decisions. *International Journal of Forest Engineering*. 31, 211-223. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1768769>.
- Diniz, C. Sessions, J. Tmofeiczuk Junior, R. Robert, R. (2020a). Equipment replacement policy for forest machines in Brazil. *International Journal of Forest Engineering*. 31, 87-94.
- Diniz, C. C. C. Lopes, E. S. Miranda, G. M. Koehler, H. S. Paccola, J. E. (2020b). Comparative analysis of maintenance models in forest machines. *Floresta e Ambiente*. 27(2): 1-7.
- Dobbs, I. M. (2004). Replacement investment: optimal economic life under uncertainty. *Journal of Business Finance & Accounting*, 31, 729–757.
- Dodson, E. Hayes, S. Meek, J. Keyes, C. R. (2015). Montana logging machine rates. *International Journal of Forest Engineering*, 26, 85–95.
- Dreyfus, S. E. (1960). A generalized equipment replacement study. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 8, 425–435.
- Elton, E. J. Gruber, M. J. (1976). On the optimality of an equal life policy for equipment subject to technological improvement. *Operational Research Quarterly*, 27. 93–99.
- Esogbue, A. O. Hearnese, W. E. (1998). On replacement models via a fuzzy set theoretic framework. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 28, 549–560.
- Fan, W. Machemehl, R. Gemar, M. Brown, L. (2014). A stochastic dynamic programming approach for the equipment replacement optimization under uncertainty. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 14, 76-84.
- FAO. (1992). *Cost Control in Forest Harvesting and Road Construction*. FAO, Rome. Forestry papers Nr. 99, 16 pp. ISBN 92-5-103161–4

- Fiedler, N. C. Rocha, E. B. Lopes, E. S. (2008). Análise da produtividade de um sistema de colheita de árvores inteiras no norte do estado de Goiás. *Floresta*, 38, 577-586.
- Filgueiras, J. F. (1997). Um modelo de substituição de equipamentos para minimizar custos operacionais em uma empresa florestal. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa
- Franklin, G. S. (1997). *The business of logging: a workbook for use with the video*. Canada: Forest Engineering Research Institute of Canada (FERIC).
- Goldstein, T. Ladany, S. P. Mehrez, A. (1986). A dual machine replacement model: a note on planning horizon procedures for machine replacements. *Operations Research*, 34, 938–941.
- Goldstein, T. Ladany, S. P. Mehrez, A. (1988). A discounted machine-replacement model with an expected future technological breakthrough. *Naval Research Logistics Quarterly*, 35, 209–220.
- Goldstein, Z. Mehrez, A. (1996). Replacement of technology when a new technological breakthrough is expected. *Engineering Optimization*, 27, 265–278.
- Hartman, J. C. (2001). An economic replacement model with probabilistic asset utilization. *IIE Transactions*, 33, 717–727.
- Harrill, H. Visser, R. Raymond, K. (2019). New Zealand Cable Logging 2008–2018: a Period of Change. *Current Forestry Reports*, 5, 1-10.
- Hartman, J. C. Murphy, A. (2006). Finite-horizon equipment replacement analysis. *IIE Transactions*, 38, 409-419.
- Hartman, J. C. Rogers, J. L. (2006). Dynamic programming approaches for equipment replacement problems with continuous and discontinuous technological change. *IMA Journal of Management Mathematics*, 17, 143–158.
- Hartman, J. C. Tan, C. H. (2010). Modeling technological change in equipment replacement models. In *Optimal control of age-structured populations in economy, demography, and the environment*. R. Boucekine, N. Hritonenko, and Y. Yatsenko. Oxon, UK, and New York, NY: Routledge, 295 pp.
- Hartman, J. C. Tan, C. H. (2014). Equipment replacement analysis: a literature review and directions for future research. *The Engineering Economist*, 59, 136-153.
- Hersen, A. (2020). Viabilidade econômica da geração distribuída e compartilhada de energia elétrica proveniente da biomassa florestal no município de Guarapuava, PR. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Hogg, G. Längin, D. Ackerman, P. (2010). South African Harvesting and transport costing model. Department of Forest and Wood Science, Stellenbosch University. 37 pp.
- Hopp, W. J. Nair, S. K. (1991). Timing replacement decisions under discontinuous technological change. *Naval Research Logistics*, 38, 203–220.
- Hopp, W. J. Nair, S. K. (1994). Markovian deterioration and technological change. *IIE Transactions*, 26, 74–82.

- Hritonenko, N. Yatsenko, Y. (2007). Optimal equipment replacement without paradoxes: a continuous analysis. *Operations Research Letters*, 35, 245–250.
- Hritonenko, N. Yatsenko, Y. (2008). The dynamics of asset lifetime under technological change. *Operations Research Letters*, 36, 565–568.
- Indústria brasileira de árvores – IBÁ. (2020). Relatório 2020. Recuperado de <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>.
- Instituto brasileiro de geografia e estatística – IBGE. (2020). Mapas Mundos - Brasil com divisão de Estados. Disponível em: <https://geoftp.ibge.gov.br/produtos_educacionais/mapas_mudos/mapas_do_brasil/mapas_nacionais/brasil.pdf> Acesso em: 30 de outubro de 2020.
- Jardine, A. K. Tsang, A. H. (2017). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*. 2nd ed. New York: CRC Press.
- Jensen, P. A. Bard, J. F. (2003). *Operations research models and methods*. Wiley & Sons: New York.
- Koger, J. Dubois, M. R. (1999). Analyzing harvesting equipment investments using reverse capital budgeting techniques. *Forest Products Journal*, 49, 35-38.
- Kolesar, P. (1966). Minimum cost replacement under Markovian deterioration. *Management Science*, 12, 694–706.
- Kusaka, Y. Suzuki, H. (1988). Equipment replacement with consideration of technological advances—determination of replacement times by control limit policy. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 31, 389–411.
- Leite, E. S. Minette, J. L. Fernandes, H. C. Souza, A. P. Amaral, E. J. Lacerda, E. G. (2014). Desempenho do harvester na colheita de eucalipto em diferentes espaçamentos e declividades. *Árvore*, 38. 1-8.
- Lindroos, O. La Hera, P. X. M. Häggström, C. (2017). Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38, 243-258.
- Lima, J. S. S. Leite, A. M. P. (2014). *Mecanização*. In: Machado, C. C. (2014). *Colheita Florestal*. Viçosa, MG, 3ª Edição, UFV.
- Lohmann, J. (1986). A stochastic replacement economic decision model. *IIE Transactions*, 18, 182–194.
- Lopes, E. S. Oliveira, D. Sampietro, J. A. (2014). Influence of wheels types of a skidder on productivity and cost of the forest harvesting. *Floresta*, 44, 53-62.
- Lundbäck, M. Häggström, C. Nordfjell, T. (2021). Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering*. doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617
- Lussier, L. J. (1961). Planning and control of logging operations. Issue 8, *Foundation TFR*, editor, Quebec city: Forest Research Foundation, Université Laval.
- Mac Donagh, P. Botta, G. Schlichter, T. Cubbage, F. (2017). Harvesting contractor production and costs in forest plantations of Argentina, Brazil, and Uruguay. *International Journal of Forest Engineering*, 28, 157-168.

- Mac Donagh, P. Velazco, S. J. E. Botta, G. Schlichter, T. Cubbage, F. (2020). Logging Contractors' Growth in the Southern Cone: An Analysis of Contractor Business Strategies, Innovation, and Mechanization. *Forests*, 10, 1- 12.
- Machado, C. C. (2014). *Colheita Florestal*. Viçosa, MG, 3ª Edição, UFV.
- Machado, C. C. Silva, E. N. Pereira, R. S. Castro, G. P. O setor florestal brasileiro e a colheita florestal. In: Machado, C. C. (2014). *Colheita Florestal*. Viçosa, MG, 3ª Edição, UFV.
- Malinen, J. Laitila, J. Väätäinen, K. Viitamäki, K. (2016). Variation in age, annual usage and resale price of cut-to-length machinery in different regions of Europe. *International Journal of Forestry Engineering*, 27, 95-102.
- Malinovski, J. R. Camargo, C. M. S. Malinovski, R. A. Malinovski, R. A. Castro, G. P. Sistemas. In: Machado, C. C. (2014). *Colheita Florestal*. Viçosa, MG, 3ª Edição, UFV.
- Matthews, D. M. (1942). *Cost control in the logging industry*. New York: McGraw-Hill book company. 374 p.
- Mardin, F. Arai, T. (2012). Capital equipment replacement under technological change. *The Engineering Economist: A Journal Devoted to the Problems of Capital Investment*, 57, 119-129.
- Marques, G. M. (2003). *Transformação e substituição de equipamentos utilizando equações diferenciais e programação matemática*. 59f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Marques, G. M. Silva, M. L. Leite, H. G. Fontes, A. A. (2005). Aplicação da programação matemática na substituição de equipamentos. *Árvore*, 29, 749-756.
- Marsh, R. F. Nam, S. (2003). The impact of increasing user expectations on machine replacement. *IIE Transactions*, 35, 457-466.
- Mauer, D. C. Ott, S. H. (1995). Investment under uncertainty: the case of replacement investment decisions. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*. 30, 581-605.
- McEwan, A. Marchi, E. Spinelli, R. Brink, M. (2019). Past, present and future of industrial plantation forestry and implication on future timber harvesting technology. *Journal of Forestry Research*, 31, 1-13.
- Mills, W. L. Tufts, R. A. (1985). Equipment replacement: a comparison of two methods. *Forest Science*, 31, 661-670.
- Minete, J. L. Moreira, F. M. T. Souza, A. P. Machado, C. C. Silva, K. R. (2004). Análise técnica e econômica do *forwarder* em três subsistemas de colheita de florestas de eucalipto. *Árvore*, 28, 91-97.
- Minette, J. L. Silva, E. N. Freitas, K. E. Souza, A. P. Silva. E. P. (2008). Análise técnica e econômica da colheita florestal mecanizada em Niquelândia, Goiás. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 12, 659-665
- Miyata, E. S. (1980). *Determining fixed and operating costs of logging equipment*. North central forest experiment station forest service. United States Department of Agriculture.

- Nair, S. (1995). Modeling strategic investment decisions under sequential technological change. *Management Science*, 41, 282–297.
- Nair, S. Hopp, W. (1992). A model for equipment replacement due to technological obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 63, 207–221.
- Nascimento, A. C. Leite, A. M. P. Soares, T. S. Freitas, L. C. (2011). Avaliação técnica e econômica da colheita florestal com *feller buncher*. *Cerne*, 17, 9-15.
- Newman, D, Eschenbach, T. Lavelle, J. (2004). *Engineering economic analysis*. 9th Edition, Oxford University Press, New York.
- Nordfjell, T. Öhmana, E. Lindroos, O. Ager, B. (2019). The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. *International Journal of Forest Engineering*, 30, 1-13.
- Oliveira, D. (2013). Análise operacional e custos de sistemas de colheita de madeira em povoamentos de eucalipto. UNICENTRO, 101 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Estadual do Centro-Oeste. Irati, PR.
- Pacolla, J. E. (2017). *Manutenção e operação de equipamentos móveis*. 2ª Edição. São José dos Campos – SP.
- Quadros, D. S. Malinovski, J. R. (2012). Análise econômica de empresas prestadoras de serviço florestal em duas regiões do estado de Santa Catarina. *Floresta*, 42, 35-48.
- Rajagopalan, S. Singh, M. R. Morton, T. E. (1998). Capacity expansion and replacement in growing markets with uncertain technological breakthroughs. *Management Science*, 44, 12–30.
- Regnier, E. Sharp, G. Tovey, C. (2004). Replacement under ongoing technological progress. *IIE Transactions*, 36, 497-508.
- Rezende, J. L. P. Oliveira, A. D. (2001). *Projetos Florestais*. 2ª Edição. Universidade Federal de Viçosa – UFV.
- Richardson, S. Kefford, A. Hodkiewicz, M. (2013). Optimised asset replacement strategy in the presence of lead time uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 141, 659–667.
- Robert, R. C. G. (2013). Análise técnica e econômica de um sistema de colheita mecanizada em plantios de *eucalyptus* spp. em duas condições de relevo acidentado. 112 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Rogers, J. Hartman, J. (2005). Equipment replacement under continuous and discontinuous technological change. *IMA Journal of Management Mathematics*, 16, 23-36.
- Santos, L. N. Fernandes, H. C. Silva, R. M. F. da Silva, M. L. de Souza, A. P. (2017). Avaliação de custos do harvester no abate e processamento de madeira de eucalipto. *Árvore*. 41, 410-501.
- Scarf, P. A. Hashem, M. (2002). Characterization of optimal policies for capital replacement models. *IMA Journal of Management Mathematics*, 13, 261-271.

- Schochetman, I. E. Smith, R. L. (2007). Infinite horizon optimality criteria for equipment replacement under technological change. *Operations Research Letters*, 35, 485–492.
- Seixas, F. Batista, J. L. F. (2014). Comparação técnica e econômica entre *harvesters* de pneus e com máquina base de esteiras. *Ciência Florestal*, 24, 185-191.
- Sessions, J. Berry, M. Han, H. (2021). Machine rate estimates and equipment utilization – A modified approach. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 42, 1-7.
- Sethi, S. Chand, S. (1979). Planning horizon procedures for machine replacement models. *Management Science*, 25, 140–151.
- Silva, M. L. Jacovine, L. A. G. Valverde, S. R. (2005). *Economia Florestal*. 2ª Edição. Universidade Federal de Viçosa, UFV.
- Silversides, C. R. (1972). The mechanization of timber harvesting. 21st Annual Forestry Symposium. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, "1972: Mechanization, Safety, and Manpower in Southern Forestry".
- Silversides, C. R. (1997). Broadaxe to flying shear: the mechanization of forest harvesting east of the Rockies. Transformation Series no. 6, National Museum of Science and Technology. Ottawa, Canada.
- Sinclair, A. W. Clark, M. L. Wong, T. B. (1986). Two replacement models for B. C. costal logging equipment. Institut Canadian de Recherches en Génie Forestier (FERIC).
- Simões, D. Fenner, P. T. Esperancini, M. S. T. (2010). Avaliação técnica e econômica da colheita de florestas de eucalipto com harvester. *Scientia Forestalis*, 38, 611-618.
- Sivazlian, B. D. (1979). Life cycle cost analysis under uncertainty in systems lifetime. *The Engineering Economist*, 25, 91-105.
- Souza, a. Clemente, A. (2015). *Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações*. São Paulo: Atlas, 194p.
- Sperandio, G. (2010). Costing forest machinery: available methods, recurrent problems. In: *Harvesting forest biomass: a global state of the art*. Cost action FP0902., Trento, Italy.
- Spinelli, R. Magagnotti, N. Picchi, G. (2011). Annual use, economic life and residual value of cut-to-length harvesting machines. *Journal of Forest Economics*, 17, 378-387.
- Spinelli, R. Lombardini, C. Magagnotti, N. (2014). The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica*, 48, 1-15.
- Spinelli, R. Visser, R. Han, H. (2019). A decade of forest engineering: Achievements and future directions. *Forests*, 10, 1-12.
- Stenzel, G. Walbridge, T. A. Pearce, J. K. (1986). *Logging and pulpwood production*. (éd. 2nd). États-Unis: John Wiley & Sons.

- Sundberg, U, Silversides, C. R. (1988). Operational efficiency in forestry. Doordrecht, the Netherlands, Kluwer academic publishers. 219 p. ISBN: 9024736846.
- Tan, C. H. Hartman, J. C. (2010). Equipment replacement analysis with an uncertain finite horizon. *IIE Transactions*, 42, 342-353.
- Terborgh, G. (1949). *Dynamic Equipment Policy*. McGraw-Hill, New York.
- Timofeiczuk Junior, R. (2004). Análise econômica do manejo de baixo impacto em florestas tropicais – um estudo de caso. 126f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Triplat, M. Kraknc, N. (2020). Assessment of Costs in Harvesting Systems Using WoodChainManager Web-based Tool. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 41, 49-57.
- Tufts, R. A. Mills, W. L. (1982). Financial analysis of equipment selection. *Forest Products Journal*. 32(10): 45-52.
- Usher, J. S. Whitfield, G. M. (1993). Evaluation of used-system life cycle costs using fuzzy set theory. *IIE Transactions*, 25, 84-88.
- von Hofsten, H. Lundström, H. Nordén, B. Thor, M. (2005). System för uttag av skogsbränsle, Analyser av sju slutavverkningsystem och fyra gallringssystem (Biomass harvesting systems, analyses of seven final felling systems and four thinning systems). Skogforsk, Uppsala. Arbetsrapport No. 597, 34 pp. ISSN 1404-305X.
- Wagner, H. M. (1975). *Principles of operations research*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs. NJ.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2008). Properties of optimal service life under technological change. *International Journal of Production Economics*, 114, 230–238.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2009). Technological breakthroughs and asset replacement. *The Engineering Economist*, 54, 81–100.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2011). Economic life replacement under improving technology. *International Journal of Production Economics*, 133, 596-602.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2015). Algorithms for asset replacement under limited technological forecast. *International Journal of Production Economics*, 160, 26-33.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2017). Machine replacement under evolving deterministic and stochastic costs. *International Journal of Production Economics*, 193, 491-501.
- Yatsenko, Y. Hritonenko, N. (2020). Analytics of machine replacement decisions: economic life vs real options. *Management Decision*, Emerald Publishing Limited, 0025-1747. DOI 10.1108/MD-12-2019-1704.
- Ye, M. (1990). Optimal replacement strategy with stochastic maintenance and operation costs. *European Journal of Operational Research*, 44, 84–94.

9. APÊNDICE

5.1. APÊNDICE 1

Na Tabela 10 é possível verificar dentro de uma linha cronológica uma série de trabalhos publicados sobre a temática de substituição de máquinas, partindo da metodologia proposta por Bellman (1955) e Wagner (1975), considerados os trabalhos que nortearam as principais pesquisas sobre o tema. Ainda é possível verificar pesquisas feitas na área florestal, que em suma, foram formulados a partir de análises econômicas com base em estimativas de custos.

TABELA 10. Visão geral da literatura do problema de substituição de máquinas.

Autores	Ano	Contribuição
Terborgh	1949	Este trabalho foi, provavelmente, o primeiro a considerar a decisão de substituição, que as despesas operacionais tendem a aumentar a uma taxa constante ao longo do tempo.
Bellman	1955	Bellman mostra como o problema pode ser abordado aplicando equações funcionais da teoria da programação matemática.
Dreyfus	1960	Dreyfus ilustra como a formulação de Bellman também pode ser usada para obter a política de substituição ideal em qualquer horizonte finito.
Lussier	1961	Lussier apresenta em sua obra um modelo de substituição que adota como critério o CAUE.
Kolesar	1966	Kolesar considera o problema de substituição de máquinas sujeitos a deterioração Markoviana e, finalmente, a falhas.
Bowman e Fetter	1967	Eles mostraram com um exemplo numérico uma solução para o problema de substituição de máquinas em um horizonte de planejamento infinito.
Wagner	1975	Apresentou uma formulação alternativa de programação matemática na qual o estado do sistema é o período de tempo. As decisões não são mais sobre manter ou substituir a máquina, mas o número de períodos, 1, 2, ..., N para manter uma máquina.
Elton e Gruber	1976	Os autores mostraram que, sob a definição da mudança tecnológica, é desnecessário assumir que uma política de substituição é a mesma.
Caterpillar	1978	Neste trabalho é apresentado um modelo de substituição que incorpora inflação, taxas e créditos, custos de inatividade e mudanças tecnológicas adotando como critério de substituição o custo mínimo de hora cumulativa.
Sethi e Chand	1979	Os autores utilizaram o algoritmo <i>forward</i> para um horizonte de planejamento finito, onde as máquinas encontravam-se em um ambiente tecnológico aprimorado ao longo do tempo.
Sivazlian	1979	Seu artigo mostrou que a função de sobrevivência ou confiabilidade do sistema desempenha um papel significativo na construção de modelos econômicos na análise de custo do ciclo de vida.
Butler e Dykstra	1981	Foi introduzida uma teoria unificada que pode ser aplicada à substituição de qualquer equipamento e derivam as condições sob as quais ele fornecerá um ponto ótimo.
Chand e Sethi	1982	Os autores consideraram um ambiente tecnológico que está melhorando ao longo do tempo e que a máquina pode ser substituída por qualquer um dos vários tipos diferentes de

		máquinas disponíveis naquele momento.
Tufts e Mills	1982	Os autores apresentaram um modelo de substituição de máquinas que incorpora todos os custos associados a substituição de máquinas em um horizonte infinito.
Bean <i>et al.</i> ,	1985	Bean <i>et al.</i> , (1985) desenvolveram um algoritmo avançado que considera os avanços tecnológicos dentro do horizonte de planejamento.
Mills e Tufts	1985	Mills e Tufts (1985) revisaram e compararam dois modelos de substituição de máquinas e verificaram que o modelo apresentado por Tufts e Mills (1982) incorpora adequadamente todos os custos associados a substituição de máquinas.
Stenzel <i>et al.</i> ,	1986	Os autores propõem um modelo capaz de levar em consideração diferentes níveis de produção sem ajuste. Eles fazem isso usando o valor presente líquido como critério de decisão.
Goldstein <i>et al.</i> ,	1986	O trabalho estende o trabalho de Sethi e Chand (1979), que consideraram um modelo de substituição de máquina dupla em um ambiente tecnológico aprimorado ao longo do tempo. O modelo abrange casos em que as duas máquinas são de tecnologia diferentes, medida pelo investimento e pelos custos operacionais.
Lohmann	1986	Lohman descreve um modelo geral para resolver problemas estocásticos de economia de substituição.
Sinclair <i>et al.</i> ,	1986	Sinclair e seus colegas demonstraram em seu manuscrito que modelos de substituição de máquinas que usam custos anuais e custos de horas cumulativas chegam a resultados semelhantes.
Kusaka e Suzuki	1988	Os autores propuseram um método para determinar o momento de substituição econômica de máquinas para um horizonte de planejamento finito usando a Política de Limites de Controle.
Goldstein <i>et al.</i> ,	1988	Em seu trabalho, os autores analisaram o problema de substituição de máquinas em um ambiente de desenvolvimento tecnológico, no qual uma máquina de melhor tecnologia pode aparecer no futuro.
Caulfield e Tufts	1989	Os autores avaliaram o problema de substituição de máquinas sob risco, considerando a estrutura de um modelo de substituição existente, usando dados de custo de operação e manutenção de uma empresa de produtos florestais.
Ye	1990	Ye (1990) considerou um problema de substituição no qual o estado de uma peça de equipamento é descrito pelo custo de manutenção e operação, que evolui continuamente de acordo com um processo Wiener.
Hopp e Nair	1991	Os pesquisadores desenvolveram um procedimento para calcular o momento de substituição ótimo que incorpora iterativamente uma previsão tecnológica.
Bylka <i>et al.</i> ,	1992	Foi desenvolvida uma metodologia que atinge horizontes mínimos de previsão para o problema de substituição de máquinas.
Nair e Hope	1992	Os pesquisadores consideraram o problema de a partir da premissa de manter ou substituir uma máquina com uma tecnologia avançada.
Chand <i>et al.</i> ,	1993	Chand <i>et al.</i> , (1993) desenvolvem procedimentos para encontrar a solução ótima de substituição dentro de um horizonte de planejamento.
Brown	1993	Brown amplia sua abordagem para solucionar problemas de substituição em série, para permitir que as recompensas

		sejam correlacionadas entre as substituições.
Usher e Whitfield	1993	Os autores apresentaram um modelo para estimar a vida total de cada componente em um sistema multi-componente usado através do uso da teoria dos conjuntos difusos e de variáveis linguísticas.
Christer e Scarf	1994	Christer e Scarf (1994) apresentaram um modelo para equipamentos médicos, onde fatores como serviço e risco desempenham um papel na tomada de decisão de substituição.
Bean <i>et al.</i> ,	1994	Bean e seus colegas apresentam um problema de substituição de máquinas com mudanças tecnológicas. Eles estabeleceram um limite de erro dentro do horizonte de planejamento que permite descobrir o erro da solução dentro do horizonte infinito, resolvendo assim, o problema com horizonte finito.
Hopp e Nair	1994	Hopp e Nair apresentaram em seu trabalho um algoritmo de previsão para determinar se deve ou não manter o equipamento atual que faz uso de uma quantidade finita de dados futuros previstos.
Mauer e Ott	1995	Mauer e Ott analisaram os determinantes das decisões de investimento de substituição em um modelo com incerteza nos custos de manutenção e operação.
Nair	1995	Nair usou procedimentos de previsão para modelar decisões de investimento de capital em que qualquer número de tecnologias possa aparecer no futuro com custos e receitas de compra que podem variar ao longo do tempo.
Goldstein e Mehrez	1996	Os autores apresentam um problema de substituição no qual uma tecnologia está disponível e uma nova tecnologia é esperada em algum momento incerto no futuro.
Filgueiras	1997	Filgueiras propôs um modelo de substituição de máquinas baseado na abordagem de Bellman (1955) considerando o ambiente florestal, onde o objetivo era minimizar o custo.
De Souza e Guimaraes	1997	Os autores usaram um método que supera as deficiências do horizonte de planejamento fixo usando um exemplo de problema de substituição de veículo.
Bethuyme	1998	Bethuyme introduziu uma variável de intensidade para utilização no modelo de substituição tradicional, explicando a degradação funcional presente no modelo.
Rajagopalan <i>et al.</i> ,	1998	Os autores consideraram um problema em que uma sequência de avanços tecnológicos é antecipada, mas sua magnitude e tempo são incertos.
Esogbue e Hearnnes	1998	Este artigo ilustra o uso de conjuntos difusos e a teoria das possibilidades para modelar explicitamente a incerteza nas decisões de substituição por meio de variáveis e números difusos.
Koger e Dubois	1999	Nesta pesquisa foi desenvolvido um programa de computador (DECAL) capaz de resolver o problema de substituição de máquinas da área florestal.
Hartman	2001	Este artigo examina o efeito da utilização probabilística de ativos nas decisões de substituição por meio do uso de programação matemática.
Scarf e Hashem	2002	Os autores compararam e contrastam o modelo de horizonte de planejamento fixo com o modelo de horizonte de planejamento variável e relacionam ambos ao modelo de vida econômico clássico.
Cheevaprawatdomrong e Smith	2003	Os autores apresentaram um modelo simples de mudança tecnológica, com uma constante melhoria nos custos de equipamentos por período.
Apeland e Scarf	2003	Apeland e Scarf (2003) discutem como duas abordagens

		subjetivas para representar incertezas relacionadas a eventos futuros - a abordagem bayesiana clássica e a abordagem totalmente subjetiva - podem ser usadas como base para a tomada de decisões sobre substituição.
Marques	2003	Marques apresentou duas formulações para o problema de substituição. Primeiro testou a transformação de um veículo transportador de madeira a partir de equações diferenciais. Segundo, testou dois modelos de programação matemática para definir entre a substituição ou manutenção de um trator florestal a partir da maximização da receita e da minimização dos custos.
Marsh e Nam	2003	Este estudo explorou o equipamento tradicional que mantém ou substitui a decisão em cenários de aumento das expectativas do cliente.
Regnier <i>et al.</i> ,	2004	Esta pesquisa avalia a economia de custos alcançável no problema de substituição de máquinas no horizonte infinito, considerando o progresso tecnológico que afeta as máquinas disponíveis após várias substituições futuras e permite uma vida útil variável.
Dobbs	2004	Este artigo estende os trabalhos de Terborgh ao caso em que a evolução do custo operacional é incerta.
Rogers e Hartman	2005	Os autores modelaram a situação em que as descobertas ocorrem periodicamente, fornecendo uma nova frota de desafiantes e cada desafiante dentro de uma frota evolui de acordo com uma função conhecida.
Chang	2005	Chang (2005) propôs uma metodologia difusa para substituição de equipamentos usando dois exemplos numéricos.
Marques <i>et al.</i> ,	2005	Os autores desenvolveram um modelo de programação matemática baseado no modelo de Bellman (1955) para determinar o momento ótimo de substituição a partir de duas perspectivas: minimizando os custos e maximizando as receitas.
Hartman e Rogers	2006	Hartman e Rogers (2006) consideraram um problema de substituição de máquinas de capital em que as máquinas disponíveis para compra evoluem com o tempo, de acordo com as funções contínuas e descontínuas da mudança tecnológica.
Hartman e Murphy	2006	Os pesquisadores identificaram casos, de acordo com custos de capital, custos operacionais e taxa de juros, quando essa política é boa e quando se desvia significativamente do ideal.
Hritonenko e Yatsenko	2007	Neste artigo, Hritonenko e Yatsenko mostram que a vida útil ideal do equipamento é menor quando a mudança tecnológica incorporada é mais intensa.
Schochetman e Smith	2007	Os autores descobrem que é possível a existência de várias políticas ótimas de substituição sob um horizonte infinito.
Hritonenko e Yatsenko	2008	Seu trabalho identifica casos em que a vida útil ideal das máquinas é variável ou constante e quando a mudança tecnológica aumenta ou diminui a vida útil ideal.
Yatsenko e Hritonenko	2008	Os autores consideram um problema de substituição de uma única máquina em tempo contínuo e o reduzem a uma equação integral não linear para a vida útil ideal variável da máquina.
Yatsenko e Hritonenko	2009	O artigo analisa o impacto da mudança tecnológica descontínua na substituição ideal de ativos (equipamentos de capital, máquinas),
Hartman e Tan	2010	Hartman e Tan (2010) propuseram a abordagem minimax, que otimiza para o pior cenário, e o uso de conjuntos difusos.
Tan e Hartman	2010	O trabalho proposto pelos autores examina o caso em que o

		horizonte durará pelo menos períodos Ts, mas poderá durar até Tl, devido à incerteza na duração da produção ou na prestação temporária de serviços.
Baxter <i>et al.</i> ,	2010	Os autores descreveram vários modelos de programação linear inteira mista, com níveis variados de complexidade, desenvolvidos para tomar decisões sobre a substituição de equipamentos na área florestal.
Cantú e LeBel	2010	A partir de uma revisão de literatura, os pesquisadores propõem quais variáveis devem compor um modelo de substituição de acordo com as características e necessidade de empreiteiros florestais no Canadá.
Yatsenko e Hritonenko	2011	O artigo fornece uma análise teórica e numérica sistemática do método de substituição da vida econômica (<i>EL method</i>) e suas modificações na presença de mudança tecnológica.
Spinelli <i>et al.</i> ,	2011	Os autores reuniram um grande banco de dados de ofertas de venda de máquinas em segunda mão contendo mais de 1000 registros, provenientes da Europa e da América do Norte para definir a vida econômica média de máquinas florestais.
Mardin e Arai	2012	Mardin e Arai (2012) propuseram um método desafiador-defensor modificado como um método de decisão de substituição para o problema de substituição de equipamentos sob mudança tecnológica.
Richardson <i>et al.</i> ,	2013	O trabalho deles desenvolveu uma estratégia de substituição ideal para equipamentos intensivos em capital, com longo prazo de entrega.
Fan <i>et al.</i> ,	2014	O trabalho deles apresentou uma formulação estocástica de modelo de programação matemática para resolver o problema de otimização de substituição de equipamentos que pode explicar a incerteza na utilização do veículo.
Yatsenko e Hritonenko	2015	Os autores analisaram o problema de substituição de máquinas quando o curso futuro da mudança tecnológica é conhecido em um horizonte futuro limitado.
Malinen <i>et al.</i> ,	2016	Neste estudo, idade, tamanho, uso anual e preço de <i>harvesters</i> e <i>forwarders</i> para venda na Europa foram investigados, usando dados de vendas do mercado on-line.
Yatsenko e Hritonenko	2017	Os autores estudaram a minimização de custos no horizonte infinito para analisar a substituição em série de uma única máquina com o aprimoramento da tecnologia.
Cantú <i>et al.</i> ,	2017	Cantú <i>et al.</i> , (2017) adaptaram um modelo de substituição de máquinas existente para os empreiteiros de colheita de madeira que operam em áreas remotas.
Diniz <i>et al.</i> ,	2020a	Os autores apresentaram um modelo para auxiliar no processo de decisão de substituição de equipamentos no contexto do setor florestal brasileiro, usando cronogramas detalhados de manutenção de equipamentos.
Diniz e Sessions	2020	Nesta pesquisa os autores validaram a abordagem sugerida por Denardo (2003), ao comparar o algoritmo <i>forward reaching</i> com o método EL no problema clássico de substituição de máquinas. Os autores consideraram ainda a entrada de novas tecnologias em seu trabalho, mostrando a versatilidade da abordagem.
Yatsenko e Hritonenko	2020	Os autores combinam otimização discreta e contínua, modelagem matemática aplicada, análise de dados e, teoria das opções reais para propor um modelo aplicável à realidade empresarial com dados de custos operacionais e de reposição.

Fonte: O autor (2020).

5.2. APÊNDICE 2

TABELA 11. Base histórica das variáveis utilizadas para formação dos fluxos de caixa.

Horímetro	<i>Harvester</i>			<i>Forwarder</i>		
	Taxa de Utilização	Custos O&M (R\$/h)	Produtividade (t/h)	Taxa de Utilização	Custos O&M (R\$/h)	Produtividade (t/h)
250	0,90	135,77	20,87	0,92	116,30	41,74
498	0,89	137,22	20,81	0,92	116,88	41,62
748	0,88	138,66	20,75	0,91	117,46	41,49
993	0,88	140,09	20,68	0,91	118,04	41,37
1.238	0,87	141,53	20,62	0,90	118,62	41,24
1.470	0,86	142,96	20,56	0,90	119,17	41,11
1.699	0,85	144,39	20,49	0,89	119,72	40,99
1.926	0,84	145,81	20,43	0,88	120,26	40,86
2.151	0,83	147,23	20,37	0,88	120,81	40,73
2.375	0,83	148,65	20,30	0,87	121,35	40,61
2.597	0,82	150,07	20,24	0,86	121,89	40,48
2.818	0,82	151,48	20,18	0,85	122,43	40,35
3.037	0,81	152,90	20,11	0,84	122,97	40,23
3.256	0,81	154,30	20,05	0,83	123,51	40,10
3.473	0,80	155,71	19,99	0,83	124,04	39,97
3.689	0,80	157,12	19,92	0,82	124,58	39,85
3.905	0,79	158,52	19,86	0,82	125,12	39,72
4.119	0,79	159,92	19,80	0,81	125,66	39,59
4.333	0,79	161,32	19,73	0,81	126,20	39,47
4.546	0,78	162,71	19,67	0,80	126,74	39,34
4.759	0,78	164,11	19,61	0,80	127,27	39,21
4.970	0,78	165,50	19,54	0,79	127,81	39,09
5.181	0,78	166,89	19,48	0,79	128,35	38,96
5.392	0,77	168,28	19,42	0,79	128,90	38,84
5.601	0,77	169,66	19,35	0,78	129,44	38,71
5.810	0,77	171,05	19,29	0,78	129,98	38,58
6.019	0,77	172,43	19,23	0,78	130,52	38,46
6.227	0,76	173,81	19,16	0,78	131,07	38,33
6.435	0,76	175,19	19,10	0,77	131,61	38,20
6.642	0,76	176,56	19,04	0,77	132,16	38,08
6.848	0,76	177,94	18,97	0,77	132,71	37,95
7.054	0,76	179,31	18,91	0,77	133,25	37,82
7.260	0,75	180,68	18,85	0,76	133,80	37,70
7.465	0,75	182,05	18,79	0,76	134,35	37,57
7.670	0,75	183,42	18,72	0,76	134,90	37,44
7.874	0,75	184,79	18,66	0,76	135,46	37,32
8.078	0,75	186,15	18,60	0,76	136,01	37,19
8.281	0,74	187,52	18,53	0,75	136,56	37,06
8.484	0,74	188,88	18,47	0,75	137,12	36,94
8.687	0,74	190,24	18,41	0,75	137,68	36,81

8.889	0,74	191,60	18,34	0,75	138,24	36,68
9.091	0,74	192,96	18,28	0,75	138,80	36,56
9.293	0,74	194,31	18,22	0,74	139,36	36,43
9.494	0,74	195,67	18,15	0,74	139,92	36,31
9.695	0,73	197,02	18,09	0,74	140,48	36,18
9.896	0,73	198,37	18,03	0,74	141,05	36,05
10.096	0,73	199,72	17,96	0,74	141,61	35,93
10.296	0,73	201,07	17,90	0,74	142,18	35,80
10.496	0,73	202,42	17,84	0,74	142,75	35,67
10.696	0,73	203,77	17,77	0,73	143,32	35,55
10.895	0,73	205,11	17,71	0,73	143,89	35,42
11.094	0,73	206,46	17,65	0,73	144,47	35,29
11.292	0,72	207,80	17,58	0,73	145,04	35,17
11.490	0,72	209,14	17,52	0,73	145,62	35,04
11.688	0,72	210,48	17,46	0,73	146,20	34,91
11.886	0,72	211,82	17,39	0,73	146,77	34,79
12.084	0,72	213,16	19,65	0,73	147,36	39,30
12.281	0,72	214,49	19,61	0,72	147,94	39,21
12.478	0,72	215,83	19,57	0,72	148,52	39,13
12.675	0,72	217,16	19,52	0,72	149,11	39,05
12.871	0,72	218,50	19,48	0,72	149,69	38,96
13.067	0,71	219,83	19,44	0,72	150,28	38,88
13.263	0,71	221,16	19,40	0,72	150,87	38,79
13.459	0,71	222,49	19,35	0,72	151,47	38,71
13.655	0,71	223,82	19,31	0,72	152,06	38,62
13.850	0,71	225,15	19,27	0,72	152,65	38,54
14.045	0,71	226,47	19,23	0,71	153,25	38,46
14.240	0,71	227,80	19,19	0,71	153,85	38,37
14.435	0,71	229,12	19,14	0,71	154,45	38,29
14.629	0,71	230,45	19,10	0,71	155,05	38,20
14.823	0,71	231,77	19,06	0,71	155,65	38,12
15.017	0,70	233,09	19,02	0,71	156,26	38,03
15.211	0,70	234,41	18,97	0,71	156,87	37,95
15.405	0,70	235,73	18,93	0,71	157,48	37,87
15.598	0,70	237,05	18,89	0,71	158,09	37,78
15.792	0,70	238,37	18,85	0,71	158,70	37,70
15.985	0,70	239,68	18,81	0,70	159,31	37,61
16.178	0,70	241,00	18,76	0,70	159,93	37,53
16.370	0,70	242,31	18,72	0,70	160,55	37,44
16.563	0,70	243,63	18,68	0,70	161,16	37,36
16.755	0,70	244,94	18,64	0,70	161,79	37,28
16.947	0,70	246,25	18,60	0,70	162,41	37,19
17.139	0,70	247,56	18,55	0,70	163,03	37,11
17.331	0,70	248,87	18,51	0,70	163,66	37,02
17.522	0,69	250,18	18,47	0,70	164,29	36,94
17.714	0,69	251,49	18,43	0,70	164,92	36,85

17.905	0,69	252,79	18,38	0,70	165,55	36,77
18.096	0,69	254,10	18,34	0,70	166,18	36,68
18.287	0,69	255,41	18,30	0,70	166,82	36,60
18.478	0,69	256,71	18,26	0,69	167,46	36,52
18.668	0,69	258,01	18,22	0,69	168,10	36,43
18.859	0,69	259,32	18,17	0,69	168,74	36,35
19.049	0,69	260,62	18,13	0,69	169,38	36,26
19.239	0,69	261,92	18,09	0,69	170,03	36,18
19.429	0,69	263,22	18,05	0,69	170,67	36,09
19.619	0,69	264,52	18,01	0,69	171,32	36,01
19.809	0,69	265,82	17,96	0,69	171,97	35,93
19.998	0,69	267,12	17,92	0,69	172,63	35,84
20.188	0,68	268,41	17,88	0,69	173,28	35,76
20.377	0,68	269,71	17,84	0,69	173,94	35,67
20.566	0,68	271,01	17,79	0,69	174,60	35,59
20.755	0,68	272,30	17,75	0,69	175,26	35,50
20.944	0,68	273,59	17,71	0,69	175,92	35,42
21.132	0,68	274,89	17,67	0,68	176,59	35,34
21.321	0,68	276,18	17,63	0,68	177,25	35,25
21.509	0,68	277,47	17,58	0,68	177,92	35,17
21.697	0,68	278,76	17,54	0,68	178,59	35,08
21.885	0,68	280,05	17,50	0,68	179,27	35,00
22.073	0,68	281,34	17,46	0,68	179,94	34,91
22.261	0,68	282,63	17,41	0,68	180,62	34,83
22.449	0,68	283,92	17,37	0,68	181,30	34,75
22.636	0,68	285,20	17,33	0,68	181,98	34,66
22.824	0,68	286,49	17,29	0,68	182,66	34,58
23.011	0,68	287,78	17,25	0,68	183,35	34,49
23.198	0,68	289,06	17,20	0,68	184,04	34,41
23.385	0,68	290,35	17,16	0,68	184,73	34,32
23.572	0,67	291,63	17,12	0,68	185,42	34,24
23.759	0,67	292,91	17,08	0,68	186,11	34,15
23.946	0,67	294,19	17,04	0,68	186,81	34,07
24.132	0,67	295,48	18,55	0,68	187,51	37,11
24.318	0,67	296,76	18,51	0,68	188,21	37,02
24.505	0,67	298,04	18,47	0,67	188,91	36,94
24.691	0,67	299,32	18,43	0,67	189,61	36,85
24.877	0,67	300,59	18,38	0,67	190,32	36,77
25.063	0,67	301,87	18,34	0,67	191,03	36,68
25.249	0,67	303,15	18,30	0,67	191,74	36,60
25.434	0,67	304,43	18,26	0,67	192,45	36,52
25.620	0,67	305,70	18,22	0,67	193,17	36,43
25.805	0,67	306,98	18,17	0,67	193,89	36,35
25.991	0,67	308,25	18,13	0,67	194,61	36,26
26.176	0,67	309,53	18,09	0,67	195,33	36,18
26.361	0,67	310,80	18,05	0,67	196,06	36,09

26.546	0,67	312,07	18,01	0,67	196,78	36,01
26.731	0,67	313,35	17,96	0,67	197,51	35,93
26.916	0,67	314,62	17,92	0,67	198,24	35,84
27.101	0,67	315,89	17,88	0,67	198,98	35,76
27.285	0,66	317,16	17,84	0,67	199,71	35,67
27.470	0,66	318,43	17,79	0,67	200,45	35,59
27.654	0,66	319,70	17,75	0,67	201,19	35,50
27.838	0,66	320,97	17,71	0,67	201,93	35,42
28.022	0,66	322,23	17,67	0,67	202,68	35,34
28.206	0,66	323,50	17,63	0,66	203,43	35,25
28.390	0,66	324,77	17,58	0,66	204,18	35,17
28.574	0,66	326,03	17,54	0,66	204,93	35,08
28.758	0,66	327,30	17,50	0,66	205,68	35,00
28.942	0,66	328,56	17,46	0,66	206,44	34,91
29.125	0,66	329,83	17,41	0,66	207,20	34,83
29.309	0,66	331,09	17,37	0,66	207,96	34,75
29.492	0,66	332,36	17,33	0,66	208,72	34,66
29.675	0,66	333,62	17,29	0,66	209,49	34,58
29.858	0,66	334,88	17,25	0,66	210,26	34,49
30.041	0,66	336,14	17,20	0,66	211,03	34,41
30.224	0,66	337,40	17,16	0,66	211,80	34,32
30.407	0,66	338,66	17,12	0,66	212,58	34,24
30.590	0,66	339,92	17,08	0,66	213,36	34,15
30.773	0,66	341,18	17,04	0,66	214,14	34,07
30.955	0,66	342,44	16,99	0,66	214,92	33,99
31.138	0,66	343,70	16,95	0,66	215,71	33,90
31.320	0,66	344,96	16,91	0,66	216,50	33,82
31.503	0,65	346,21	16,87	0,66	217,29	33,73
31.685	0,65	347,47	16,82	0,66	218,08	33,65
31.867	0,65	348,73	16,78	0,66	218,88	33,56
32.049	0,65	349,98	16,74	0,66	219,68	33,48
32.231	0,65	351,24	16,70	0,66	220,48	33,40
32.413	0,65	352,49	16,66	0,65	221,28	33,31
32.594	0,65	353,74	16,61	0,65	222,09	33,23
32.776	0,65	355,00	16,57	0,65	222,89	33,14
32.958	0,65	356,25	16,53	0,65	223,70	33,06
33.139	0,65	357,50	16,49	0,65	224,52	32,97
33.321	0,65	358,75	16,44	0,65	225,33	32,89
33.502	0,65	360,01	16,40	0,65	226,15	32,81
33.683	0,65	361,26	16,36	0,65	226,97	32,72
33.864	0,65	362,51	16,32	0,65	227,80	32,64
34.045	0,65	363,76	16,28	0,65	228,62	32,55
34.226	0,65	365,01	16,23	0,65	229,45	32,47
34.407	0,65	366,25	16,19	0,65	230,29	32,38
34.588	0,65	367,50	16,15	0,65	231,12	32,30
34.769	0,65	368,75	16,11	0,65	231,96	32,22

34.950	0,65	370,00	16,07	0,65	232,80	32,13
35.130	0,65	371,24	16,02	0,65	233,64	32,05
35.311	0,65	372,49	15,98	0,65	234,48	31,96
35.491	0,65	373,74	15,94	0,65	235,33	31,88
35.671	0,65	374,99	15,90	0,65	236,18	31,79
35.852	0,65	376,23	15,85	0,65	237,03	31,71
36.032	0,65	377,48	15,81	0,65	237,89	31,62
36.212	0,65	378,73	15,77	0,65	238,75	31,54
36.392	0,65	379,98	15,73	0,65	239,61	31,46
36.572	0,64	381,22	15,69	0,65	240,47	31,37
36.752	0,64	382,47	15,64	0,65	241,34	31,29
36.931	0,64	383,72	15,60	0,65	242,21	31,20
37.111	0,64	384,97	15,56	0,65	243,08	31,12
37.291	0,64	386,21	15,52	0,65	243,96	31,03
37.470	0,64	387,46	15,48	0,64	244,83	30,95
37.650	0,64	388,71	15,43	0,64	245,71	30,87
37.829	0,64	389,96	15,39	0,64	246,60	30,78
38.009	0,64	391,20	15,35	0,64	247,48	30,70
38.188	0,64	392,45	15,31	0,64	248,37	30,61
38.367	0,64	393,70	15,26	0,64	249,26	30,53
38.546	0,64	394,95	15,22	0,64	250,16	30,44
38.725	0,64	396,19	15,18	0,64	251,06	30,36
38.904	0,64	397,44	15,14	0,64	251,96	30,28
39.083	0,64	398,69	15,10	0,64	252,86	30,19
39.262	0,64	399,94	15,05	0,64	253,76	30,11
39.440	0,64	401,18	15,01	0,64	254,67	30,02
39.619	0,64	402,43	14,97	0,64	255,59	29,94
39.798	0,64	403,68	14,93	0,64	256,50	29,85
39.976	0,64	404,93	14,88	0,64	257,42	29,77
40.155	0,64	406,17	14,84	0,64	258,34	29,69

Fonte: Empresa florestal estudada (2019).

5.3. APÊNDICE 3

Na Tabela 12 é apresentado um demonstrativo da lista de entrada gerada a partir do cálculo do fluxo de caixa T1, contendo o CTP, custo médio de produção (CMP) e produção média (PM).

TABELA 12. Lista de entrada gerada a partir do fluxo de caixa calculado em T1.

Fluxo de caixa (T)	Nó predecessor	Nó futuro	Arco de ligação		
	Compra	Venda	CTP	CMP	PM
1	0	1	R\$ 336.406,86	R\$ 4,10	18.671,48
1	0	2	R\$ 710.002,10	R\$ 4,22	18.642,45
1	0	3	R\$ 965.639,05	R\$ 4,39	18.470,25
1	0	4	R\$ 1.173.340,56	R\$ 4,57	18.267,49
1	0	5	R\$ 1.355.546,33	R\$ 4,82	17.967,22
1	0	6	R\$ 1.522.005,65	R\$ 5,04	17.701,99
1	0	7	R\$ 1.679.223,55	R\$ 5,45	17.228,00
1	0	8	R\$ 1.829.863,37	R\$ 5,78	16.855,01
1	0	9	R\$ 1.975.545,37	R\$ 6,07	16.541,38
1	0	10	R\$ 2.117.326,79	R\$ 6,32	16.266,80
1	0	11	R\$ 2.255.933,53	R\$ 6,56	16.019,88
1	0	12	R\$ 2.391.883,71	R\$ 6,78	15.793,58
1	0	13	R\$ 2.525.558,70	R\$ 6,99	15.583,26
1	0	14	R\$ 2.657.246,35	R\$ 7,19	15.385,70
1	0	15	R\$ 2.787.168,50	R\$ 7,38	15.198,56
1	0	16	R\$ 2.915.499,15	R\$ 7,57	15.020,11
1	0	17	R\$ 3.042.376,90	R\$ 7,75	14.849,02
1	0	18	R\$ 3.167.913,60	R\$ 7,92	14.684,25
1	0	19	R\$ 3.327.923,84	R\$ 10,98	14.524,95
1	0	20	R\$ 3.415.313,30	R\$ 8,27	14.370,47
1	0	21	R\$ 3.537.314,51	R\$ 8,44	14.220,23
1	0	22	R\$ 3.658.257,02	R\$ 8,61	14.073,79
1	0	23	R\$ 3.778.185,58	R\$ 8,77	13.930,75
1	0	24	R\$ 3.989.761,16	R\$ 17,20	13.790,78
1	0	25	R\$ 4.015.148,23	R\$ 9,10	13.653,60
1	0	26	R\$ 4.132.243,58	R\$ 9,27	13.518,97
1	0	27	R\$ 4.248.449,17	R\$ 9,43	13.386,66
1	0	28	R\$ 4.363.786,71	R\$ 9,60	13.256,51
1	0	29	R\$ 4.481.424,70	R\$ 8,90	14.866,76
1	0	30	R\$ 4.591.932,05	R\$ 8,74	14.767,01
1	0	31	R\$ 4.704.771,97	R\$ 8,86	14.668,99
1	0	32	R\$ 4.816.808,70	R\$ 8,98	14.572,57
1	0	33	R\$ 4.928.054,51	R\$ 9,10	14.477,65
1	0	34	R\$ 5.038.520,52	R\$ 9,22	14.384,12
1	0	35	R\$ 5.148.216,90	R\$ 9,34	14.291,91
1	0	36	R\$ 5.257.152,94	R\$ 9,46	14.200,94
1	0	37	R\$ 5.365.337,23	R\$ 9,58	14.111,13
1	0	38	R\$ 5.472.777,73	R\$ 9,70	14.022,41
1	0	39	R\$ 5.609.234,67	R\$ 12,85	13.934,73
1	0	40	R\$ 5.685.456,49	R\$ 9,93	13.848,04
1	0	41	R\$ 5.790.708,21	R\$ 10,05	13.762,28
1	0	42	R\$ 5.894.875,42	R\$ 10,13	13.706,96
1	0	43	R\$ 5.998.487,68	R\$ 10,23	13.635,28
1	0	44	R\$ 6.101.398,39	R\$ 10,35	13.551,65

1	0	45	R\$ 6.203.612,70	R\$ 10,47	13.468,81
1	0	46	R\$ 6.305.135,58	R\$ 10,59	13.386,72
1	0	47	R\$ 6.405.971,81	R\$ 10,72	13.305,34
1	0	48	R\$ 6.506.126,02	R\$ 10,84	13.224,64
1	0	49	R\$ 6.605.602,72	R\$ 10,96	13.144,60
1	0	50	R\$ 6.806.588,82	R\$ 23,48	13.065,19
1	0	51	R\$ 6.802.540,90	R\$ 11,21	12.986,39
1	0	52	R\$ 6.900.010,83	R\$ 11,33	12.908,16
1	0	53	R\$ 6.996.820,13	R\$ 11,46	12.830,49
1	0	54	R\$ 7.092.972,81	R\$ 11,59	12.753,36
1	0	55	R\$ 7.188.472,83	R\$ 11,71	12.676,74
1	0	56	R\$ 7.283.324,08	R\$ 11,84	12.600,63
1	0	57	R\$ 7.377.530,40	R\$ 11,97	12.524,99
1	0	58	R\$ 7.471.095,60	R\$ 12,10	12.449,82
1	0	59	R\$ 7.564.023,44	R\$ 12,23	12.375,10
1	0	60	R\$ 7.656.317,64	R\$ 12,36	12.300,81
1	0	61	R\$ 7.774.684,88	R\$ 15,02	13.321,35
1	0	62	R\$ 7.839.019,89	R\$ 11,59	13.246,49
1	0	63	R\$ 7.929.435,25	R\$ 11,71	13.172,06
1	0	64	R\$ 8.019.231,60	R\$ 11,83	13.098,03
1	0	65	R\$ 8.108.412,55	R\$ 11,95	13.024,39
1	0	66	R\$ 8.196.981,68	R\$ 12,07	12.951,14
1	0	67	R\$ 8.284.942,56	R\$ 12,19	12.878,25
1	0	68	R\$ 8.372.298,73	R\$ 12,32	12.805,72
1	0	69	R\$ 8.459.053,75	R\$ 12,44	12.733,54
1	0	70	R\$ 8.545.211,14	R\$ 12,57	12.661,70
1	0	71	R\$ 8.630.774,41	R\$ 12,70	12.590,20
1	0	72	R\$ 8.715.747,08	R\$ 12,83	12.519,01
1	0	73	R\$ 8.800.132,64	R\$ 12,96	12.448,13
1	0	74	R\$ 8.883.934,58	R\$ 13,09	12.377,56
1	0	75	R\$ 8.967.156,37	R\$ 13,22	12.307,29
1	0	76	R\$ 9.049.801,48	R\$ 13,35	12.237,30
1	0	77	R\$ 9.186.957,37	R\$ 22,94	12.167,60
1	0	78	R\$ 9.213.375,52	R\$ 13,62	12.098,17
1	0	79	R\$ 9.294.311,35	R\$ 13,76	12.029,01
1	0	80	R\$ 9.374.684,29	R\$ 13,90	11.960,11
1	0	81	R\$ 9.454.497,79	R\$ 14,04	11.891,47
1	0	82	R\$ 9.533.755,26	R\$ 14,18	11.823,08
1	0	83	R\$ 9.631.644,87	R\$ 17,95	11.754,94
1	0	84	R\$ 9.690.615,76	R\$ 14,46	11.687,03
1	0	85	R\$ 9.768.225,60	R\$ 14,61	11.619,35
1	0	86	R\$ 9.845.293,02	R\$ 14,76	11.551,91
1	0	87	R\$ 9.921.821,40	R\$ 14,90	11.484,69
1	0	88	R\$ 9.997.814,11	R\$ 15,05	11.417,68
1	0	89	R\$ 10.073.274,52	R\$ 15,21	11.350,90
1	0	90	R\$ 10.148.205,98	R\$ 15,36	11.284,32
1	0	91	R\$ 10.222.611,85	R\$ 15,51	11.217,94
1	0	92	R\$ 10.296.321,41	R\$ 15,60	11.180,04
1	0	93	R\$ 10.369.571,57	R\$ 15,75	11.118,76
1	0	94	R\$ 10.444.402,03	R\$ 16,38	11.052,88
1	0	95	R\$ 10.514.531,16	R\$ 16,07	10.987,20
1	0	96	R\$ 10.586.247,17	R\$ 10,10	14.674,23

Fonte: O autor (2020).

5.4. APÊNDICE 4

O *download* desta planilha Microsoft *Excel* pode ser realizado a partir do endereço eletrônico: https://www.researchgate.net/publication/350900986_FRADS. A planilha eletrônica é dividida em três abas. Na primeira aba, nomeada “Apresentação”, é explicado de maneira clara e direta os passos que o tomador de decisão deve seguir para identificar o cronograma ótimo econômico de substituição de uma série de máquinas. Na Figura 9 é mostrada a aba de apresentação da planilha eletrônica. É possível acessar as demais abas clicando nos botões localizados no canto superior direito.

FIGURA 9. Seção de apresentação da planilha eletrônica.



Esta planilha tem o intuito de auxiliar a comunidade científica e florestal a identificar o cronograma ótimo econômico de substituição de uma série de máquinas que minimiza o custo presente líquido (CPL). Para utilizar a planilha e descobrir o cronograma ótimo econômico de substituição são necessários seis descritores: nó predecessor (momento em que a máquina é comprada); nó futuro (momento em que a máquina é vendida); arco de ligação (CPL; custo médio de produção e; produção média).

LISTA DE ENTRADA

RESULTADOS

Para utilizar a planilha é necessário seguir os seguintes passos:

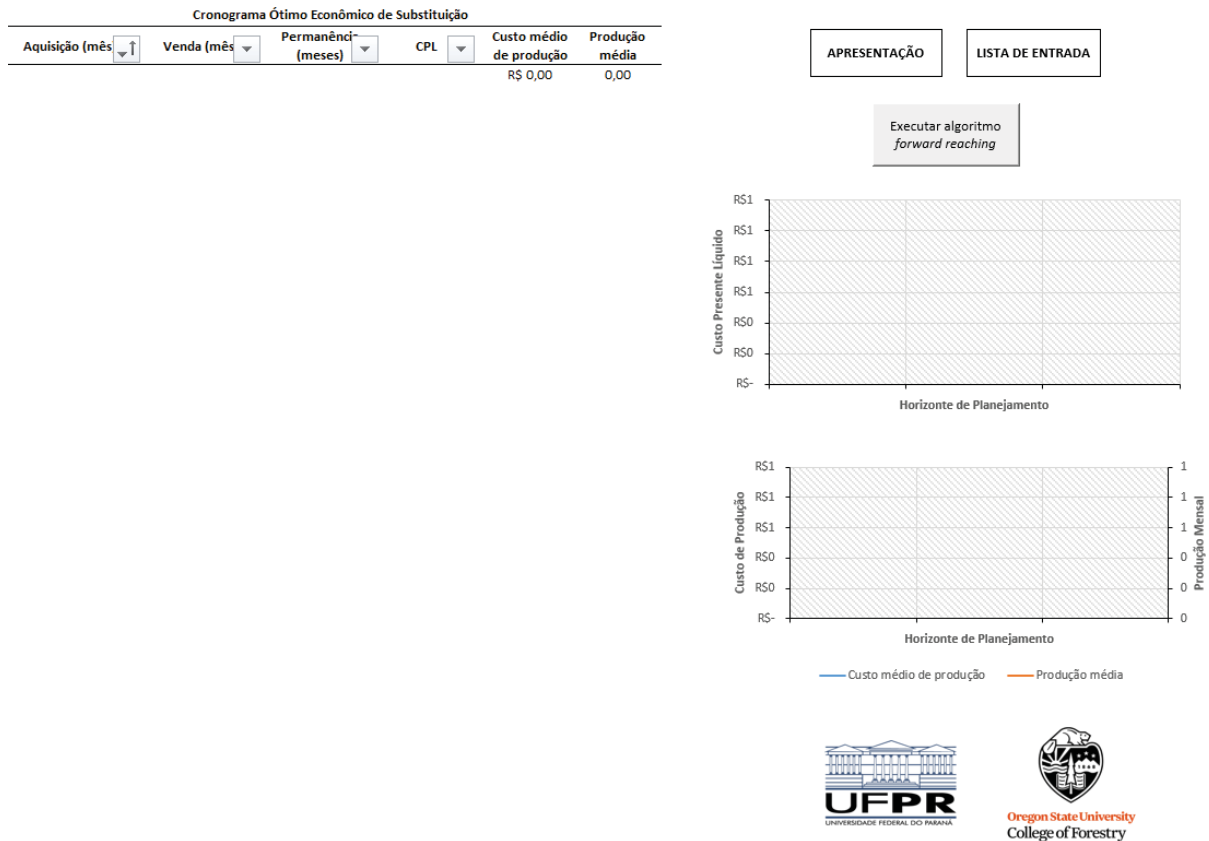
1. Clicar no botão superior direito para inserir os dados de entrada.
2. Preencha as seis colunas de acordo com o nó predecessor, nó futuro, CPL, custo médio de produção e produção média.
3. Insira o horizonte de planejamento de acordo com o intervalo de tempo desejado.
4. Identifique e insira o número de arcos de ligação (o número de arcos é o tamanho exato da lista de entrada).
5. Clique no botão "executar algoritmo *forward reaching*" para descobrir o cronograma ótimo econômico de substituição.
6. Clique no botão "RESULTADOS" para visualizar o cronograma ótimo econômico de substituição.
7. Selecione as primeiras células nominadas como "custo médio de produção" e "produção média" e arraste-as para baixo até encontrar todos os resultados relativos as máquinas selecionadas no cronograma ótimo econômico. **Jamais exclua ou apague as formulas inseridas na linha 2, colunas 5 e 6.** Elas retornam os valores de "custo médio de produção" e "produção média" do cronograma ótimo econômico que minimiza o CPL.
8. Selecione todo o cronograma de planejamento e classifique-o de forma crescente a partir dos meses de aquisição.
9. Ajuste os gráficos de acordo com o número de máquinas identificadas no cronograma ótimo econômico.

Os direitos desta planilha são reservados ao pesquisador Carlos Diniz. E-mail para contato: carloscezarodiniz@gmail.com

Fonte: O autor (2021).

A segunda aba, nomeada “Lista de entrada” (Figura 10), é o local onde o tomador de decisão deve inserir a lista contendo os três descritores mencionados anteriormente. O lado esquerdo da planilha eletrônica é dedicado à lista de entrada contendo os descritores. No canto superior direito o tomador de decisão deve inserir o tamanho do horizonte de planejamento, bem como o número de arcos. Na aba de apresentação é explicado como identificar esses valores. Após preencher corretamente os campos basta executar o algoritmo na aba de resultados clicando no botão “Executar algoritmo *forward reaching*” para que o problema seja resolvido.

FIGURA 11. Seção de resultados da planilha eletrônica.



Fonte: O autor (2021).

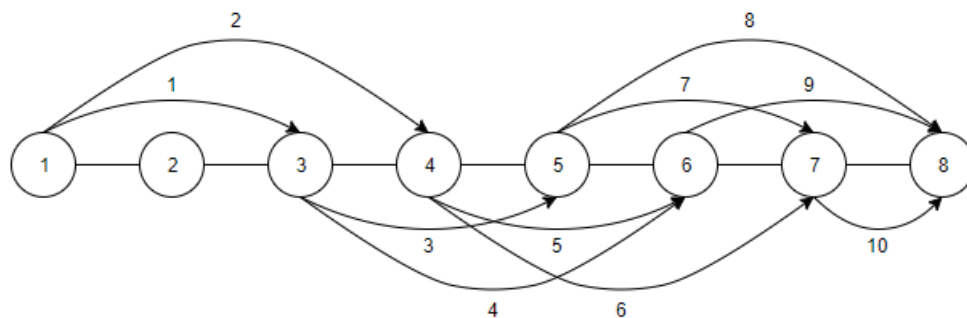
É importante ressaltar que foram incorporados automaticamente na planilha eletrônica, fórmulas para identificar o custo médio de produção e a produção mensal de cada máquina selecionada no cronograma ótimo econômico de substituição.

5.5. APÊNDICE 5

Neste exemplo, é explicado como o algoritmo *forward reaching* opera em um problema de substituição de máquinas com objetivo de minimizar o CTP. Neste caso, o problema se inicia a partir dos três descritores de entrada: nó predecessor (momento em que uma máquina é comprada), nó futuro (momento em que a máquina é vendida), e arco de ligação (CTP, custo de produção e produção anual).

Para este problema, as máquinas poderiam ser substituídas entre dois e três anos sobre um horizonte de planejamento de 8 anos. A rede apresentada na Figura 12 mostra a estrutura do problema com as possíveis combinações, onde cada nó é conectado por um arco de ligação.

FIGURA 12. Rede de possíveis combinações dos arcos dentro do horizonte de planejamento.



Fonte: O autor (2020).

A lista com os possíveis arcos, que definem quando as máquinas serão substituídas, é disponibilizada na Tabela 13. Cada arco representa o período de aquisição de uma máquina (nó predecessor), e o período de venda (nó futuro), junto ao respectivo CTP. A taxa mínima de atratividade é zero neste exemplo. O arco 10 representa um arco de 1 ano.

TABELA 13. Lista contendo os possíveis arcos dentro do horizonte de planejamento.

Arcos	Nó Predecessor	Nó Futuro	Arco de ligação		
	Momento de Compra	Momento de Venda	CTP (R\$)	Custo de produção (R\$/t)	Produção (t/ano)
1	1	3	300	20	55
2	1	4	400	17	60
3	3	5	300	15	65
4	3	6	400	14	70
5	4	6	300	14	75
6	4	7	400	13	80
7	5	7	300	12	85
8	5	8	400	11	90
9	6	8	300	10	95
10	7	8	250	9	100

Fonte: O autor (2020).

Após aplicar o algoritmo *forward reaching* no exemplo, foi concluído que o cronograma ótimo econômico de substituição é representado pela combinação dos nós 1, 3, 5 e 8, totalizando R\$ 1.000. A Tabela 14 apresenta os resultados deste problema.

TABELA 14. Resultado obtido após processar cada arco com o algoritmo *forward reaching*.

Arcos	Compra	Venda	CTP	<i>Forward reaching</i>
1	1	3	300	$1 > 3 = 300$
2	1	4	400	$1 > 4 = 400$
3	3	5	300	$1 > 3 > 5 = 300 + 300 = 600$
4	3	6	400	$1 > 3 > 6 = 300 + 400 = 700$
5	4	6	300	$1 > 4 > 6 = 400 + 300 = 700$
6	4	7	400	$1 > 4 > 7 = 400 + 400 = 800$
7	5	7	300	$1 > 3 > 5 > 7 = 600 + 300 = 900$
8	5	8	400	$1 > 3 > 5 > 8 = 600 + 400 = 1000$
9	6	8	300	$1 > 3 > 6 > 8 = 700 + 300 = 1000$
10	7	8	250	$1 > 4 > 7 > 8 = 800 + 250 = 1050$

Fonte: O autor (2020).

O mesmo exemplo foi resolvido utilizando a planilha eletrônica. Para tal, foram inseridos a lista de entrada (nó predecessor, nó futuro, arco de ligação) na segunda aba da planilha. Também foi necessário adicionar o horizonte de planejamento (anos) e o número de arcos de ligação, que é o tamanho exato da lista de entrada, para posteriormente executar o algoritmo (Figura 13).

FIGURA 13. Seção de entrada dos dados para executar o algoritmo *forward reaching*.

Nó Predecessor	Nó Futuro	Arco de Ligação		
Momento de Aquisição	Momento de Venda	Custo Presente Líquido - CPL	Custo Médio de Produção	Produção Média
1	3	R\$ 300,00	R\$ 20,00	55,00
1	4	R\$ 400,00	R\$ 17,00	60,00
3	5	R\$ 300,00	R\$ 15,00	65,00
3	6	R\$ 400,00	R\$ 14,00	70,00
4	6	R\$ 300,00	R\$ 14,00	75,00
4	7	R\$ 400,00	R\$ 13,00	80,00
5	7	R\$ 300,00	R\$ 12,00	85,00
5	8	R\$ 400,00	R\$ 11,00	90,00
6	8	R\$ 300,00	R\$ 10,00	95,00
7	8	R\$ 250,00	R\$ 9,00	100,00

Horizonte de planejamento: 8
Número de arcos: 10

APRESENTAÇÃO

RESULTADOS



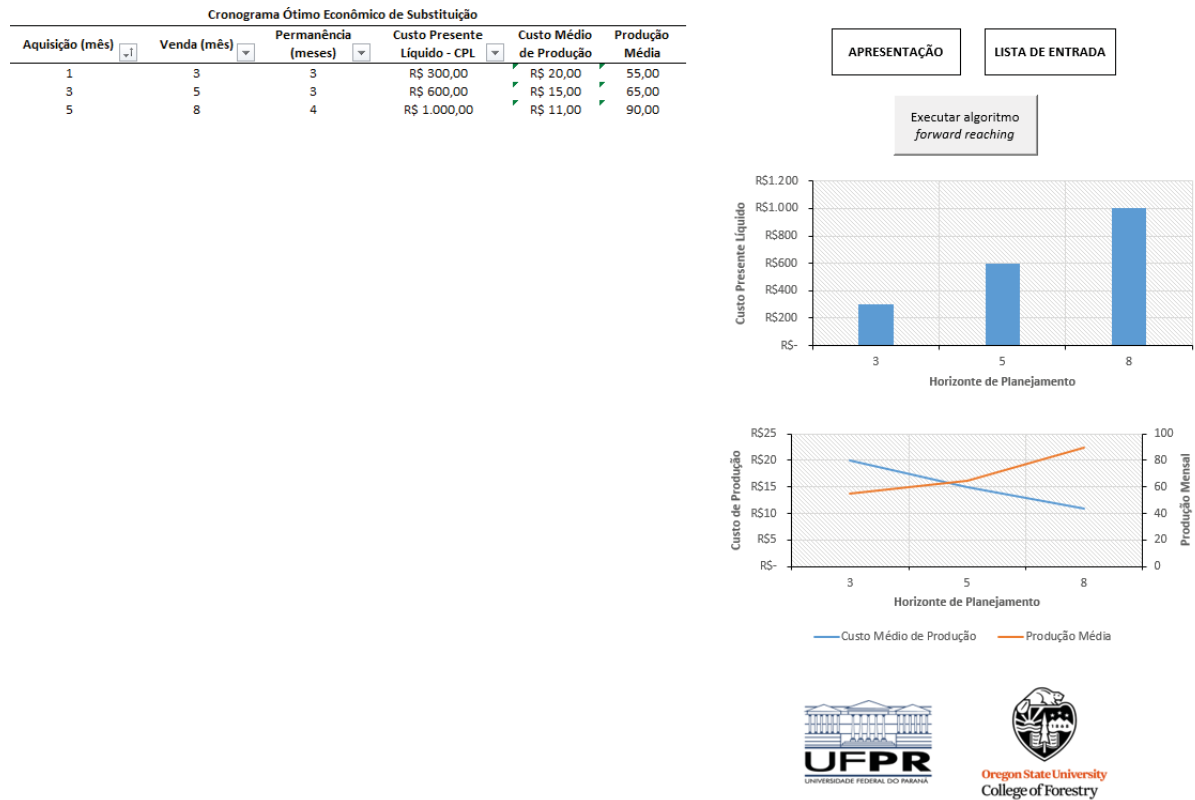
Oregon State University
College of Forestry

Fonte: O autor (2020).

Após executar o algoritmo na aba 'resultados', é possível verificar os resultados em duas formas. No canto esquerdo são apresentados os resultados na forma de tabela, enquanto o canto direito apresenta os resultados de forma gráfica. Na Figura 14, o gráfico superior direito apresenta o CTP de cada máquina

selecionada ao longo do horizonte de planejamento. O gráfico inferior apresenta os valores de custo de produção e produção mensal de acordo com as máquinas selecionadas ao longo do horizonte de planejamento.

FIGURA 14. Apresentação do cronograma ótimo econômico de substituição.



Fonte: O autor (2020).

5.6. APÊNDICE 6

Esta seção apresenta todas as análises feitas para testar o quanto cada variável que compõem o modelo precisava ser alterada para modificar a decisão de substituir uma máquina, e o efeito sobre o custo total presente (CTP) do *harvester*.

TABELA 15. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde o custo de aquisição foi alterado em 1% para mais e para menos.

Custo de aquisição - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Custo de aquisição + 1 %		
Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
70	71	10,05	71	72	10,17	71	72	10,20
126	57	14,81	127	57	14,91	128	58	15,01
181	56	17,62	182	56	17,69	183	56	17,77
235	55	19,25	236	55	19,31	238	56	19,40
289	55	20,20	290	55	20,26	293	56	20,35
342	54	20,75	344	55	20,82	347	55	20,89
395	54	21,07	398	55	21,13	401	55	21,20
448	54	21,26	452	55	21,32	455	55	21,37
501	54	21,37	506	55	21,42	509	55	21,47
554	54	21,43	560	55	21,48	563	55	21,53
607	54	21,46	614	55	21,51	617	55	21,56
660	54	21,48	668	55	21,53	671	55	21,58
713	54	21,49	722	55	21,54	725	55	21,59
766	54	21,50	776	55	21,55	779	55	21,60
819	54	21,50	830	55	21,55	833	55	21,60
872	54	21,50	884	55	21,55	887	55	21,60
925	54	21,51	938	55	21,55	941	55	21,60
979	55	21,51	991	54	21,56	995	55	21,60
1033	55	21,51	1044	54	21,56	1048	54	21,60
1087	55	21,51	1097	54	21,56	1100	53	21,60
1143	57	21,51	1149	53	21,56	1151	52	21,60
1200	58	21,51	1200	52	21,56	1200	50	21,60

Fonte: O autor (2020).

TABELA 16. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a taxa de utilização foi alterada em 1% para mais e para menos.

Taxa de utilização - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Taxa de utilização + 1 %		
Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (mês)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
72	73	10,36	71	72	10,17	70	71	9,99
129	58	15,15	127	57	14,91	126	57	14,74
184	56	17,90	182	56	17,69	181	56	17,52
239	56	19,52	236	55	19,31	235	55	19,15
294	56	20,47	290	55	20,26	289	55	20,10
348	55	21,00	344	55	20,82	343	55	20,65
402	55	21,31	398	55	21,13	396	54	20,97
456	55	21,49	452	55	21,32	449	54	21,15
510	55	21,59	506	55	21,42	502	54	21,26
564	55	21,64	560	55	21,48	555	54	21,32
618	55	21,68	614	55	21,51	608	54	21,35
672	55	21,69	668	55	21,53	661	54	21,37
726	55	21,70	722	55	21,54	714	54	21,38
780	55	21,71	776	55	21,55	767	54	21,39
834	55	21,71	830	55	21,55	820	54	21,39
888	55	21,71	884	55	21,55	873	54	21,39
942	55	21,72	938	55	21,55	926	54	21,39
996	55	21,72	991	54	21,56	980	55	21,39
1049	54	21,72	1044	54	21,56	1034	55	21,39
1101	53	21,72	1097	54	21,56	1088	55	21,39
1152	52	21,72	1149	53	21,56	1143	56	21,39
1200	49	21,72	1200	52	21,56	1200	58	21,40

Fonte: O autor (2020).

TABELA 17. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os custos (O&M) foi alterado em 1% para mais e para menos.

Custos (O&M) - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Custos (O&M) + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
71	72	10,13	71	72	10,17	70	71	10,11
128	58	14,91	127	57	14,91	126	57	14,91
183	56	17,66	182	56	17,69	181	56	17,73
238	56	19,27	236	55	19,31	235	55	19,37
292	55	20,20	290	55	20,26	289	55	20,34
346	55	20,74	344	55	20,82	343	55	20,90
400	55	21,05	398	55	21,13	397	55	21,22
454	55	21,23	452	55	21,32	450	54	21,40
508	55	21,33	506	55	21,42	503	54	21,51
562	55	21,39	560	55	21,48	556	54	21,57
616	55	21,42	614	55	21,51	609	54	21,60
670	55	21,44	668	55	21,53	662	54	21,62
724	55	21,45	722	55	21,54	715	54	21,63
778	55	21,46	776	55	21,55	768	54	21,64
832	55	21,46	830	55	21,55	821	54	21,64
886	55	21,46	884	55	21,55	874	54	21,65
940	55	21,46	938	55	21,55	927	54	21,65
993	54	21,46	991	54	21,56	981	55	21,65
1046	54	21,46	1044	54	21,56	1035	55	21,65
1099	54	21,46	1097	54	21,56	1089	55	21,65
1150	52	21,46	1149	53	21,56	1144	56	21,65
1200	51	21,46	1200	52	21,56	1200	57	21,65

Fonte: O autor (2020).

TABELA 18. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a produtividade foi alterada em 1% para mais e para menos.

Produtividade - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Produtividade + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
71	72	10.18	71	72	10.17	71	72	10.16
127	57	14.93	127	57	14.91	127	57	14.90
182	56	17.71	182	56	17.69	182	56	17.68
236	55	19.33	236	55	19.31	236	55	19.29
290	55	20.28	290	55	20.26	290	55	20.24
344	55	20.84	344	55	20.82	344	55	20.79
398	55	21.16	398	55	21.13	398	55	21.11
452	55	21.34	452	55	21.32	452	55	21.30
506	55	21.44	506	55	21.42	506	55	21.40
560	55	21.50	560	55	21.48	560	55	21.46
614	55	21.54	614	55	21.51	614	55	21.49
668	55	21.55	668	55	21.53	668	55	21.51
722	55	21.57	722	55	21.54	722	55	21.52
776	55	21.57	776	55	21.55	776	55	21.53
830	55	21.57	830	55	21.55	830	55	21.53
884	55	21.58	884	55	21.55	884	55	21.53
938	55	21.58	938	55	21.55	937	55	21.53
991	54	21.58	991	54	21.56	990	54	21.53
1044	54	21.58	1044	54	21.56	1043	54	21.53
1097	54	21.58	1097	54	21.56	1096	54	21.53
1149	53	21.58	1149	53	21.56	1148	53	21.53
1200	52	21.58	1200	52	21.56	1200	52	21.53

Fonte: O autor (2020).

TABELA 19. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a penalidade por falta de produção foi alterada em 1% para mais e para menos.

Penalidade falta de produção - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Penalidade por falta de produção + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
71	72	10.14	71	72	10.17	70	71	10.10
128	58	14.93	127	57	14.91	126	57	14.89
183	56	17.68	182	56	17.69	181	56	17.71
238	56	19.30	236	55	19.31	235	55	19.34
292	55	20.23	290	55	20.26	289	55	20.31
346	55	20.77	344	55	20.82	343	55	20.87
400	55	21.08	398	55	21.13	397	55	21.19
454	55	21.26	452	55	21.32	451	55	21.37
508	55	21.37	506	55	21.42	504	54	21.48
562	55	21.42	560	55	21.48	557	54	21.54
616	55	21.46	614	55	21.51	610	54	21.57
670	55	21.47	668	55	21.53	663	54	21.59
724	55	21.48	722	55	21.54	716	54	21.60
778	55	21.49	776	55	21.55	769	54	21.61
832	55	21.49	830	55	21.55	822	54	21.61
886	55	21.49	884	55	21.55	875	54	21.61
940	55	21.50	938	55	21.55	929	55	21.61
993	54	21.50	991	54	21.56	983	55	21.61
1046	54	21.50	1044	54	21.56	1037	55	21.62
1099	54	21.50	1097	54	21.56	1091	55	21.62
1150	52	21.50	1149	53	21.56	1145	55	21.62
1200	51	21.50	1200	52	21.56	1200	56	21.62

Fonte: O autor (2020).

TABELA 20. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os itens de grande revisão foi alterado em 1% para mais e para menos.

Grandes revisões - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Grandes revisões + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
71	72	10.17	71	72	10.17	71	72	10.17
127	57	14.91	127	57	14.91	127	57	14.91
182	56	17.69	182	56	17.69	182	56	17.69
236	55	19.31	236	55	19.31	236	55	19.31
290	55	20.26	290	55	20.26	290	55	20.26
344	55	20.82	344	55	20.82	344	55	20.82
398	55	21.13	398	55	21.13	398	55	21.13
452	55	21.32	452	55	21.32	452	55	21.32
506	55	21.42	506	55	21.42	506	55	21.42
560	55	21.48	560	55	21.48	560	55	21.48
614	55	21.51	614	55	21.51	614	55	21.51
668	55	21.53	668	55	21.53	668	55	21.53
722	55	21.54	722	55	21.54	722	55	21.54
776	55	21.55	776	55	21.55	776	55	21.55
830	55	21.55	830	55	21.55	830	55	21.55
884	55	21.55	884	55	21.55	884	55	21.55
938	55	21.55	938	55	21.55	938	55	21.55
991	54	21.56	991	54	21.56	991	54	21.56
1044	54	21.56	1044	54	21.56	1044	54	21.56
1097	54	21.56	1097	54	21.56	1097	54	21.56
1149	53	21.56	1149	53	21.56	1149	53	21.56
1200	52	21.56	1200	52	21.56	1200	52	21.56

Fonte: O autor (2020).

5.7. APÊNDICE 7

Esta seção apresenta todas as análises feitas para testar o quanto cada variável que compõem o modelo precisava ser alterada para modificar a decisão de substituir uma máquina, e o efeito sobre o custo total presente (CTP) do *forwarder*.

TABELA 21. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde o custo de aquisição foi alterado em 1% para mais e para menos.

Custo de aquisição - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Custo de aquisição + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.57	96	97	10.59	96	97	10.61
174	79	14.63	174	79	14.66	175	80	14.73
248	75	16.50	250	77	16.56	251	77	16.62
322	75	17.39	324	75	17.45	325	75	17.49
395	74	17.82	398	75	17.86	399	75	17.91
468	74	18.01	471	74	18.06	473	75	18.10
540	73	18.11	544	74	18.15	547	75	18.19
612	73	18.15	617	74	18.19	620	74	18.23
684	73	18.17	690	74	18.21	693	74	18.25
756	73	18.18	763	74	18.22	766	74	18.26
828	73	18.18	836	74	18.22	839	74	18.26
900	73	18.18	909	74	18.22	912	74	18.26
972	73	18.18	982	74	18.22	985	74	18.26
1045	74	18.19	1055	74	18.22	1058	74	18.26
1120	76	18.19	1128	74	18.22	1130	73	18.26
1200	81	18.19	1200	73	18.22	1200	71	18.26

Fonte: O autor (2020).

TABELA 22. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a taxa de utilização foi alterada em 1% para mais e para menos.

Taxa de utilização - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Taxa de utilização + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.70	96	97	10.59	96	97	10.48
175	80	14.85	174	79	14.66	174	79	14.51
250	76	16.74	250	77	16.56	249	76	16.38
325	76	17.64	324	75	17.45	322	74	17.25
398	74	18.05	398	75	17.86	395	74	17.67
471	74	18.24	471	74	18.06	468	74	17.87
544	74	18.33	544	74	18.15	541	74	17.96
617	74	18.38	617	74	18.19	613	73	18.00
690	74	18.40	690	74	18.21	685	73	18.02
762	73	18.40	763	74	18.22	757	73	18.03
834	73	18.41	836	74	18.22	829	73	18.03
906	73	18.41	909	74	18.22	901	73	18.03
979	74	18.41	982	74	18.22	973	73	18.03
1052	74	18.41	1055	74	18.22	1047	75	18.03
1126	75	18.41	1128	74	18.22	1121	75	18.04
1200	75	18.41	1200	73	18.22	1200	80	18.04

Fonte: O autor (2020).

TABELA 23. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os custos (O&M) foi alterado em 1% para mais e para menos.

Custos (O&M) - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Custos (O&M) + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.55	96	97	10.59	96	97	10.63
175	80	14.64	174	79	14.66	174	79	14.72
251	77	16.52	250	77	16.56	250	77	16.63
325	75	17.39	324	75	17.45	324	75	17.51
399	75	17.80	398	75	17.86	397	74	17.93
472	74	17.99	471	74	18.06	470	74	18.12
545	74	18.08	544	74	18.15	543	74	18.22
618	74	18.12	617	74	18.19	616	74	18.26
691	74	18.14	690	74	18.21	688	73	18.28
764	74	18.15	763	74	18.22	760	73	18.29
837	74	18.15	836	74	18.22	832	73	18.29
910	74	18.15	909	74	18.22	904	73	18.29
983	74	18.15	982	74	18.22	977	74	18.29
1056	74	18.15	1055	74	18.22	1050	74	18.29
1128	73	18.16	1128	74	18.22	1123	74	18.29
1200	73	18.16	1200	73	18.22	1200	78	18.29

Fonte: O autor (2020).

TABELA 24. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a produtividade foi alterada em 1% para mais e para menos.

Produtividade - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Produtividade + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.60	96	97	10.59	96	97	10.57
175	79	14.71	174	79	14.66	174	79	14.64
251	77	16.60	250	77	16.56	250	77	16.55
325	75	17.48	324	75	17.45	324	75	17.43
399	75	17.89	398	75	17.86	398	75	17.84
472	74	18.08	471	74	18.06	471	74	18.04
545	74	18.17	544	74	18.15	544	74	18.13
618	74	18.21	617	74	18.19	617	74	18.17
691	74	18.23	690	74	18.21	690	74	18.19
764	74	18.24	763	74	18.22	763	74	18.20
837	74	18.24	836	74	18.22	836	74	18.20
910	74	18.24	909	74	18.22	909	74	18.20
983	74	18.24	982	74	18.22	981	74	18.20
1056	74	18.25	1055	74	18.22	1054	74	18.20
1128	74	18.25	1128	74	18.22	1127	74	18.20
1200	73	18.25	1200	73	18.22	1200	73	18.20

Fonte: O autor (2020).

TABELA 25. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde a penalidade por falta de produção foi alterada em 1% para mais e para menos.

Penalidade por falta de produção - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Penalidade por falta de produção + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.55	96	97	10.59	96	97	10.62
175	80	14.65	174	79	14.66	174	79	14.71
251	77	16.53	250	77	16.56	250	77	16.62
325	75	17.40	324	75	17.45	324	75	17.51
399	75	17.81	398	75	17.86	397	74	17.92
473	75	18.00	471	74	18.06	470	74	18.12
546	74	18.09	544	74	18.15	543	74	18.21
619	74	18.13	617	74	18.19	615	73	18.25
692	74	18.15	690	74	18.21	687	73	18.27
765	74	18.16	763	74	18.22	759	73	18.28
838	74	18.16	836	74	18.22	831	73	18.28
911	74	18.16	909	74	18.22	903	73	18.28
984	74	18.16	982	74	18.22	976	74	18.28
1057	74	18.16	1055	74	18.22	1049	74	18.28
1129	73	18.16	1128	74	18.22	1124	76	18.28
1200	72	18.16	1200	73	18.22	1200	77	18.28

Fonte: O autor (2020).

TABELA 26. Comparação entre o cronograma ótimo econômico de substituição e os cronogramas onde os itens de grande revisão foi alterado em 1% para mais e para menos.

Grandes revisões - 1 %			Cronograma Ótimo Econômico			Grandes revisões + 1 %		
Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)	Venda (meses)	Posse (meses)	CTP (R\$ / Milhões)
96	97	10.59	96	97	10.59	96	97	10.59
174	79	14.66	174	79	14.66	174	79	14.66
250	77	16.56	250	77	16.56	250	77	16.56
324	75	17.45	324	75	17.45	324	75	17.45
398	75	17.86	398	75	17.86	398	75	17.86
471	74	18.06	471	74	18.06	471	74	18.06
544	74	18.15	544	74	18.15	544	74	18.15
617	74	18.19	617	74	18.19	617	74	18.19
690	74	18.21	690	74	18.21	690	74	18.21
763	74	18.22	763	74	18.22	763	74	18.22
836	74	18.22	836	74	18.22	836	74	18.22
909	74	18.22	909	74	18.22	909	74	18.22
982	74	18.22	982	74	18.22	982	74	18.22
1055	74	18.22	1055	74	18.22	1055	74	18.22
1128	74	18.22	1128	74	18.22	1128	74	18.22
1200	73	18.22	1200	73	18.22	1200	73	18.22

Fonte: O autor (2020).

10. ANEXO

10.1. ANEXO 1

TABELA 27. Especificações técnicas das máquinas estudadas.

Especificações Técnicas		
Máquina	<i>Harvester</i>	<i>Forwarder</i>
Motor	MB OM906 LA UE Est. IIIA	MB OM906 LA UE Est. IIIA
Potência	205 kW (275 hp)	205 kW (275 hp)
Torque	1.100 Nm	1.150 Nm
Faixa de rotação de trabalho	1.200 a 1.600 rpm	1.200 a 1.600 rpm
Tração	8x8	8x8
Volume do tanque de óleo diesel	380 l (100 gl US)	260 l (69 gl US)
Volume do tanque de óleo hidráulico	250 l (66 gl US)	170 l (45 gl US)
Implemento	Ponsse H7	Garra Ponsse (0,53 m ²)
Capacidade de carga	-	18.000 kg (39.683 lbs)

Fonte: Timber forest (2019).