

CESAR JUNIO DE OLIVEIRA SANTANA

**TRAÇAMENTO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE TORAS DE EUCALIPTO POR
GERAÇÃO DE COLUNAS E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**

Tese apresentada ao programa 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, área de concentração: Manejo Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce
Prof. Dr. Arinei Lindbeck da Silva

**CURITIBA, PR.
2013**

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

Santana, Cesar Junio de Oliveira

Traçamento e alocação ótima de toras de eucalipto por geração de colunas e programação dinâmica / Cesar Junio de Oliveira Santana. – Curitiba, 2013.
xiv, 79 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Julio Eduardo Arce

Prof. Dr. Arinei Lindbeck da Silva

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 30/08/2013.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Colheita florestal. 2. Programação dinâmica. 3. Eucalipto. 4. Teses. I. Arce, Julio Eduardo. II. Silva, Arinei Lindbeck da. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.35




Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da
Madeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

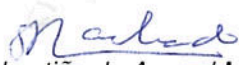
PARECER

Defesa nº. 996


A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) doutorando(a) *Cesar Junio de Oliveira Santana* em relação ao seu trabalho de tese intitulado "**TRAÇAMENTO E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE TORAS DE EUCALIPTO POR GERAÇÃO DE COLUNAS E PROGRAMAÇÃO DINÂMICA**", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de *Doutor* em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.

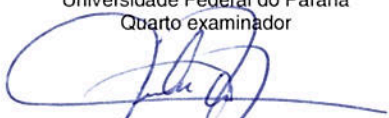

Dr. Cassius Tadeu Scarpin
Universidade Federal do Paraná
Primeiro examinador


Dr. Edilson Batista de Oliveira
Embrapa/Florestas
Segundo examinador



Dr. Sebastião do Amaral Machado
Universidade Federal do Paraná
Terceiro examinador




Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva
Universidade Federal do Paraná
Quarto examinador


Dr. Julio Eduardo Arce
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 30 de agosto de 2013.


Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Jorge Luis Monteiro de Matos
Vice-coordenador do curso

Aos meus pais Cezar e Tereza por todo o amor, incentivo e apoio.
Ao meu filho, Kaio, um presente de Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos amigos Julio Eduardo Arce, Arinei Lindbeck da Silva e Edgar Krast por tornarem possível a realização deste trabalho. O bom humor, os conhecimentos e o senso prático deles ajudaram a consolidar esta tese.

Agradeço aos meus pais, Cezar Romero Pinto Santana e Tereza Teixeira de Oliveira Santana, que, incondicionalmente, sempre me apoiaram com muito amor.

Agradeço aos meus “irmãos” e irmãs, pelos momentos de incentivo e amparo ao longo desta jornada.

Agradeço a Klabin S/A por ter me apoiado durante o curso do doutorado. Em especial, aos engenheiros Jose Artemio Totti, Darlon Orlamunder de Souza, Carlos Augusto do Amaral Santos e Jose Valmir Calori pelo apoio.

Agradeço aos profissionais Luiz Gastão Bernett e Edinaldo Aparecido Orador pelo fornecimento de dados e informações técnicas essenciais para realização deste estudo.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná por complementar a minha formação acadêmica e profissional, e pelos amigos que conquistei durante este tempo no ambiente acadêmico sulista.

Finalmente, agradeço a OPTIMBER pela parceria na constituição deste estudo.

“O que for a natureza do teu ser, assim será o teu desejo. O que for o teu desejo, assim será tua vontade. O que for a tua vontade, assim serão teus atos. O que forem teus atos, assim será teu destino”.

- Brihadaranyaka Upanishad IV, 4.5

BIOGRAFIA

CESAR JUNIO DE OLIVEIRA SANTANA, filho de Cezar Romero Pinto Santana e de Tereza Teixeira de Oliveira Santana, nascido em 07 de junho de 1979 em Viçosa, estado de Minas Gerais, concluiu o 2º grau no Coluni, colégio universitário da Universidade Federal de Viçosa, em dezembro de 1996.

Em fevereiro de 1998 ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, graduando-se em setembro de 2002 com ênfase na área de silvicultura.

Em fevereiro de 2003 foi selecionado para participar do programa de *trainees* da International Paper do Brasil Ltda.. Em maio de 2004, foi efetivado como engenheiro responsável pelas áreas de planejamento operacional e inventário florestal da unidade Inpacel Agroflorestal Ltda., em Arapoti - Paraná. Mais tarde, assumiu também as áreas de planejamento tático e estratégico.

Em fevereiro de 2006, retomou o programa de mestrado em engenharia florestal na UFPR. Em abril de 2007, mudou-se para Guaíba – RS onde atuou como coordenador de planejamento e pesquisa da Boise Cascade do Brasil Ltda. Em abril de 2008, concluiu o Mestrado em Engenharia Florestal na área de Manejo Florestal.

Em dezembro de 2008, ingressou na Klabin S/A, como especialista em planejamento e controle da produção. No mesmo período, foi aprovado no programa de doutorado em Engenharia Florestal da UFPR.

Em fevereiro de 2010 assumiu o cargo de coordenador de planejamento e pesquisa florestal na Klabin S/A. A partir de 2012 passou a atuar como coordenador corporativo de pesquisas e qualidade florestal.

Desde março de 2013 atua como gerente de soluções Remsoft na INFLORE Consultoria e Sistemas Ltda., onde executa as funções de representante e especialista em soluções Remsoft Inc., atendendo os clientes no Brasil.

RESUMO

Nesta tese, problemas de traçamento de árvores de eucalipto foram solucionados por meio de uma abordagem metodológica inspirada na formulação matemática de KANTOROVICH (1951) modificada pelo método de decomposição de DANTZIG-WOLFE (GILMORE e GOMORY, 1961 e 1963). Nesta formulação, têm-se vários subproblemas da “mochila”, um para cada lote de árvores nas sucessivas classes diamétricas. Para solucionar estes subproblemas, um algoritmo de “geração de colunas” foi desenvolvido para encontrar os melhores padrões de corte requeridos para solucionar um problema matemático principal cujo alvo é minimizar o consumo de árvores processadas para atender as carteiras de pedidos dos clientes. Uma adaptação do algoritmo de programação dinâmica concebido por ARCE (2000) foi programada para gerar as estimativas de volume por tipo de produto elegível na composição dos padrões de corte. Para testar o desempenho do protótipo construído em linguagem *Visual Studio* foram selecionados dados de povoamentos de três espécies de eucalipto estabelecidos pela Klabin S/A na Fazenda Monte Alegre, situada em Telêmaco Borba no Paraná. Os povoamentos apresentavam alto potencial para a produção de multiprodutos florestais e diferentes perfis quanto às frequências de árvores por classe diamétrica. Para executar uma rodada de otimização o protótipo requer como entrada de dados a frequência de árvores por classe diamétrica, equações hipsométricas e equações de afilamento por tipologia florestal, além de uma lista de pedidos com demandas e preços por produto. Os resultados são apresentados no formato de arquivos de texto e incluem o total de árvores consumidas em cada classe diamétrica, os padrões de corte designados para lotes de árvores em cada classe diamétrica, os volumes produzidos por tipo de produto e o valor da função objetivo resultante. Para cada espécie foram desenvolvidos três cenários distintos de mercado. Analisando os resultados, observou-se que o protótipo apresentou-se flexível e dinâmico, gerando respostas factíveis rapidamente.

Palavras-chave: Traçamento. Planejamento de colheita. Padrão de corte. Programação dinâmica. Silvicultura de precisão.

ABSTRACT

In this thesis bucking problems to stocks of Eucalyptus trees with different dimensions were solved through a methodological approaching inspired by the mathematical formulation of Kantorovich (1951) modified by the decomposition method of DANTZIG - WOLFE (GILMORE and GOMORY, 1961 and 1963). In this approaching, there have been several knapsack sub-problems, one for trees from each diameter class. A column generation algorithm was developed to solve these sub-problems quickly finding the best cutting patterns required to solve the main problem: "minimize the consumption of trees required to meet the demands of clients". An adaptation of the dynamic programming algorithm produced by ARCE (2000) was programmed to generate volume estimates for each type of eligible product during the composition of the cutting patterns. To test the performance of the prototype data were selected from stands of three species of Eucalyptus established by Klabin S/A at Monte Alegre farm, Parana state. The stands presented high potential to multiproduct production and different profiles about frequencies of trees by diameter class. The prototype requires as input the frequency of trees and hypsometric equations by diameter class, taper equations stratified by forest typology, an invoice with required demands and prices per product type. The results, presented in the form of text files, are the number of trees consumed by diameter class, the cutting patterns chosen to trees in each diameter class, the volumes by product type and the objective function value. For each specie, three marketing scenarios were developed. At the end, the prototype presented flexible and dynamic behavior generating feasible outcomes quickly.

Keywords: Bucking. Harvesting planning. Cutting patter. Dynamic programming. Precision forestry.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FOTOS DOS PRINCIPAIS RESPONSÁVEIS PELO DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	2
FIGURA 2 – DIAGRAMA DE INTERFACE ENTRE OS PRINCIPAIS NÍVEIS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL.....	10
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DE UM PADRÃO DE CORTE APLICADO A UM OBJETO UNIDIMENSIONAL.....	28
FIGURA 4 – EXEMPLO DE COMPUTADOR DE BORDO COM SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE DE PROCESSAMENTO DE ÁRVORES – OPTIPLUS, DA WOODSMAN PRO.....	31
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA.....	47

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus grandis</i>	33
GRÁFICO 2 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus dunnii</i>	33
GRÁFICO 3 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus saligna</i>	33
GRÁFICO 4 – NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE DESIGNADOS POR CLASSE DIAMÉ-TRICA EM CADA CENÁRIO - <i>Eucalyptus dunnii</i>	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ABORDAGENS ADOTADAS NO AGENDAMENTO OPERACIONAL DE COLHEITA.....	19
TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES DE PRODUTOS FLORESTAIS PRODUZIDO PELA KLABIN S/A NO PARANÁ PARA SUPRIMENTO INDUSTRIAL E DE MERCADO.....	29
TABELA 3 – HECTARES DE PLANTIO POR POVOAMENTO DE EUCALIPTO SELECIONADA PARA DESENVOLVIMENTO DESTE ESTUDO.....	32
TABELA 4 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA O MODELO HIPSOMÉTRICO DE CURTIS.....	45
TABELA 5 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU USADO PARA ESTIMAR OS VOLUMES POR SORTIMENTO POR ESTRATO.....	47
TABELA 6 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus dunnii</i>	49
TABELA 7 – PREÇOS ESTABELECIDOS POR CENÁRIO E PRODUTO PARA A MADEIRA DE <i>Eucalyptus dunnii</i>	50
TABELA 8 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus saligna</i>	51
TABELA 9 – CARTEIRA DE PEDIDOS E PREÇOS POR CENÁRIO - <i>Eucalyptus saligna</i>	52

TABELA 10 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus grandis</i>	53
TABELA 11 – CARTEIRA DE PEDIDOS E PREÇOS - <i>Eucalyptus grandis</i>	54
TABELA 12 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA <i>Eucalyptus dunnii</i>	56
TABELA 13 – NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO – <i>Eucalyptus dunnii</i>	58
TABELA 14 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL.....	59
TABELA 15 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS.....	60
TABELA 16 – TABELA 16 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS LONGAS.....	61
TABELA 17 – MAPEAMENTO DOS PADRÕES DE CORTE DESIGNADOS POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA O CENÁRIO MERCADO ATUAL – <i>Eucalyptus dunnii</i>	62
TABELA 18 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA <i>Eucalyptus saligna</i>	63
TABELA 19 – NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO – <i>Eucalyptus saligna</i>	64
TABELA 20 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus saligna</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL.....	65

TABELA 21 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus saligna</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS.....	66
TABELA 22 –VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus saligna</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS LONGAS.....	67
TABELA 23 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA <i>Eucalyptus grandis</i>	68
TABELA 24 – NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO – <i>Eucalyptus grandis</i>	69
TABELA 25 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus grandis</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL.....	70
TABELA 26 – VOLUMES POR PRODUTO DE <i>Eucalyptus grandis</i> PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS.....	71
TABELA 27 – VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO POR CENÁRIO E ESPÉCIE.....	72

LISTA DE SIGLAS

DAP	-	Diâmetro à altura do peito em centímetros
EDU	-	<i>Eucalyptus dunnii</i>
EGR	-	<i>Eucalyptus grandis</i>
ESA	-	<i>Eucalyptus saligna</i>
LP/TS	-	Linear Programming / Tabu Search
MARVL	-	Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types
OHS	-	Operational Harvesting Scheduling
PC	-	Padrão de Corte
PCE	-	Problemas de Corte e Empacotamento
PD	-	Programação dinâmica
PI	-	Programação Inteira
PL	-	Programação Linear
PLIM	-	Programação Linear Inteira Mista
RMP	-	Restricted Master Problem
SPP	-	Setting Partitioning Problems
Syx	-	Erro Padrão da Estimativa

LISTA DE ABREVIATURAS

arvs.	-	árvores
coef.	-	coeficiente
comp.	-	comprimento
dmin.	-	diâmetro mínimo na ponta fina das toras em centímetros
dmax.	-	diâmetro máximo na ponta grossa das toras em centímetros
int.	-	inteiro
m ³ c.c	-	metros cúbicos com casca
R ² ajust.	-	coeficiente de determinação ajustado
Regen01.	-	áreas em primeiro ciclo de regeneração
Regen02.	-	áreas em segundo ciclo de regeneração
SupvalorTC.	-	cenário de mercado c/ supervalorização de toras curtas
SupvalorTL.	-	cenário de mercado c/ supervalorização de toras longas
Supvalor.	-	supervalorização
semdesb.	-	povoamentos sem intervenção de desbaste
valoriz.	-	valorização
1ºdesb.	-	povoamentos que receberam apenas uma intervenção de desbaste
2ºdesb.	-	povoamentos que receberam duas intervenções de desbaste

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	4
3 OBJETIVOS	7
3.1 OBJETIVO GERAL.....	7
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
4 REVISÃO DE LITERATURA	8
4.1 PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO.....	8
4.2 PLANO ANUAL DE COLHEITA.....	11
4.2.1 Agendamento operacional de colheita.....	13
4.2.2 Geração de estimativas de produção em sistemas de agendamento operacional de colheita.....	15
4.3 TRAÇAMENTO DE ÁRVORES E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE TORAS.....	20
5 MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	31
5.2 ABORGAGEM MATEMÁTICA ADOTADA.....	34
5.2.1 O método simplex com geração de colunas.....	38
5.2.2 Algoritmo de programação dinâmica.....	42
5.3 MODELOS E EQUAÇÕES.....	44
5.3.1 Equações hipsométricas.....	44
5.3.2 Equações de afilamento.....	45
5.4 DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL.....	46
6 CENÁRIOS ELABORADOS PARA TESTAR O SISTEMA	48
6.1 Cenários de mercado para povoamentos de <i>Eucalyptus dunnii</i>	49
6.2 Cenários de mercado para povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i>	51
6.3 Cenários para povoamentos de <i>Eucalyptus grandis</i>	53
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
7.1 Resultados da otimização para povoamentos de <i>Eucalyptus dunnii</i>	58
7.2 Resultados da otimização para povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i>	62
7.3 Resultados da otimização para povoamentos de <i>Eucalyptus grandis</i>	68
7.4 Avaliação de desempenho do sistema.....	72
8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	73
8.1 Conclusões.....	73
8.2 Recomendações.....	74
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

1 – INTRODUÇÃO

Por concepção, a otimização do traçamento de árvores descreve a geração de um conjunto de estratégias de corte por unidade de colheita que permitem recuperar o valor máximo que pode ser obtido de uma floresta.

Uma estratégia de processamento ou padrão de corte é um conjunto de produtos com instruções de processamento. A avaliação prévia do sortimento por classes diamétricas nos plantios florestais permite em determinadas circunstâncias, planejar os tipos de produtos a serem obtidos de maneira a otimizar o valor econômico da madeira em pé. O sortimento florestal, termo utilizado para resumir a avaliação comercial quali-quantitativa da floresta em pé a partir de uma lista de diferentes multi-produtos (toras), pode ser um indicador importante na tomada de decisões do manejador florestal. É sensato supor que nenhuma árvore deveria ser cortada sem antes saber, com um nível adequado de precisão, quantos e quais tipos de produtos poderiam ser obtidos a partir dela. Um raciocínio semelhante pode ser feito para o povoamento e para toda a floresta (ARCE, 2000).

MENDOZA e BARE (1986) concentraram esforços em problemas de utilização econômica e eficiente de florestas em empresas integradas de produção e industrialização de madeira. Eles identificaram dois problemas inter-relacionados:

1. O problema de traçamento ótimo de árvores em produtos florestais (*log bucking problem*) e;
2. O problema de alocação ótima de toras para as indústrias de transformação (*log allocation problem*).

O problema de traçamento ótimo de árvores em toras pode ser associado à otimização do sortimento em função da oferta, ou seja, dada uma árvore, qual é a maneira mais lucrativa de traçá-la de modo a obter toras de produtos pré-estabelecidos. Já o problema da alocação ótima de diferentes produtos pode ser visto como uma otimização em função da demanda (ARCE, 2000).

A programação linear, no campo da programação matemática aplicada ao gerenciamento de recursos florestais, é uma área da pesquisa operacional com vasta aplicação em processos decisórios do negócio florestal.

O problema de otimizar uma função linear sujeita a restrições lineares teve a sua origem com os estudos de FOURIER sobre sistemas lineares de inequações em 1826. No entanto, apenas em 1939 KANTOROVICH fez notar a importância prática destes problemas, tendo criado uma formulação matemática para solucioná-los. Em 1947, GEORGE DANTZIG criou o algoritmo *Simplex* e neste mesmo ano KOOPMANS demonstrou que a programação linear era um modelo apropriado para a análise da teoria econômica clássica.

Em 1975, a academia real de ciência americana atribuiu o prêmio Nobel de ciência em economia a KANTOROVICH e KOOPMANS pelas suas contribuições para a teoria de alocação de recursos, considerando a contribuição de DANTZIG mais no âmbito matemático. Como na época não havia prêmio para o ramo científico da matemática, não foi atribuído prêmio a DANTZIG. No entanto, DANTZIG permanecerá na história da construção da programação linear como um dos arquitetos fundamentais.



George Dantzig



Kantorovich



Charles Koopmans

FIGURA 1 – IMAGENS DOS PRINCIPAIS RESPONSÁVEIS PELO DESENVOLVIMENTO DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Outras variações do algoritmo *Simplex*, como o método *Dual Simplex*, foram propostas para reduzir o número de iterações e o custo computacional na programação linear (DANTZIG, 1963, P. 241).

Em contraste com a programação linear (PL), a formulação de problemas segundo a programação dinâmica (PD) é mais difícil, pois não existe um algoritmo clássico como o método *Simplex*, e a única semelhança entre todos os problemas de programação dinâmica é certo tipo de relação de recorrência. Técnicas de programação dinâmica foram adotadas com sucesso para solucionar problemas de traçamento de árvores tendo como objetivo a maximização de resultados financeiros em florestas.

ENG et al (1986) modelaram um pequeno problema de traçamento de árvores e alocação ótima de toras para fontes consumidoras associando a programação linear a um algoritmo de programação dinâmica. O mérito deste trabalho foi enfatizar a eficiência no sortimento global para os recursos em pé que são cortados durante um horizonte de planejamento ao invés de prescrever padrões de corte otimizados para cada unidade de colheita ou árvores individuais.

Contudo, em problemas reais, a estratégia de solução não deveria usar uma matriz “A” explícita que contém todas as combinações de padrões de corte possíveis. O custo computacional disto poderia ser muito alto. Para poder resolver problemas reais desta natureza uma das opções seria utilizar um algoritmo de decomposição, artifício matemático conhecido como “geração de colunas”. Este artifício permite encontrar a solução ótima para um problema de programação linear gerando “colunas” adicionais para a matriz somente quando elas são requeridas. Desta forma, um número relativamente menor de colunas é requerido para garantir a otimalidade (MITCHELL, 2004).

EPSTEIN et al. (1999) discutem no detalhe a geração de estimativas de produção no processo de solução de um modelo de programação linear concebido para o OPTICORT, solução desenvolvida para resolver problemas de agendamento operacional de colheita no Chile. Um processo de geração de colunas altera as listas de prioridades nos padrões de corte utilizando variáveis *duais* do problema principal de programação linear. O gerador de colunas retorna as estimativas de produção por produto para os padrões de corte que melhoram as soluções correntes do modelo. O método de geração de colunas foi programado com o propósito de gerar conjuntos de padrões de corte adicionados ao programa principal a cada iteração. O trabalho de EPSTEIN et al. (1999) foi pioneiro na utilização deste tipo de técnica para solucionar problemas de agendamento operacional de colheita.

Nesta tese, problemas de traçamento de árvores e alocação ótima de toras foram solucionados aplicando uma abordagem matemática onde o método *Simplex*

revisado é associado a um algoritmo de geração de colunas e a um algoritmo de programação dinâmica, e juntos, constituem o motor de um modelo matemático formulado para minimizar o consumo de árvores requeridas para atender os pedidos dos clientes.

2 - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Na maioria das empresas florestais brasileiras, os problemas de agendamento operacional de colheita são solucionados por profissionais experientes e dinâmicos que atuam na área de abastecimento de madeira. Tipicamente, algumas premissas e planilhas de apoio são usadas para elaborar a programação operacional por período e por meio de tentativa e erro os profissionais buscam atender aos pedidos dos clientes. De acordo com MICTHELL (2004), as agendas geradas por este método são usualmente baseadas na agenda da semana anterior, com mudanças realizadas somente quando necessário ou quando estas geram benefícios óbvios.

Frequentemente, pelo método manual, é difícil encontrar estratégias que respeitem as várias restrições comerciais, financeiras e operacionais estabelecidas. Alguns pedidos podem não ser atendidos e, em consequência, volumes significativos de produtos indesejáveis podem ser produzidos, gerando excesso de oferta, desclassificação e conseqüentemente desvalorização de produtos da floresta. Restrições adicionais ou agendas para um horizonte de tempo mais amplo tornam o problema praticamente impossível de ser resolvido pelo método manual.

Um método computacional adequado para solucionar problemas de traçamento de árvores e alocação ótima de toras deveria produzir soluções muito melhores que aquelas geradas manualmente. Mesmo diante da complexidade deste tema, resultados promissores foram obtidos utilizando técnicas da pesquisa operacional, principalmente em trabalhos realizados na Nova Zelândia e no Chile. Entretanto, este campo ainda é pouco explorado no Brasil.

Alguns sistemas de inventário e prognose da produção florestal possuem roteiros de processamento de sortimentos que estimam as quantidades de volume por produto para cada unidade de colheita. Mas para tal fim, estes sistemas consideram somente a otimização da floresta em pé, uma vez que não dispõem de cadastros de

pedidos ou demandas mínimas por tipo de produto. Dentre estes sistemas, destaca-se o MARVL (*Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types*), um sistema de inventário concebido por DEADMAN e GOULDING (1978), pesquisadores da Nova Zelândia.

Segundo ARCE (2000), além de levar em consideração o preço e o estoque potencial em pé de cada produto existente no povoamento, a decisão de quais produtos produzir em cada unidade de colheita deve levar em consideração a demanda pelos mesmos, assim como os custos de colheita e de transporte envolvidos.

Desde os trabalhos pioneiros publicados por GILMORE e GOMORY (1961, 1963 e 1965) a procura por soluções matemáticas advindas da pesquisa operacional para problemas desta natureza foi e continua sendo intensa em países com relevante participação do setor florestal na economia. No Brasil, muito pouco foi explorado pela ciência florestal aplicando métodos desenvolvidos dentro de uma categoria específica de problemas conhecidos na pesquisa operacional como problemas de corte e empacotamento (PCE) ou *Cutting Stock Problem* (WANG, 1983; HAESSLER e SWEENEY, 1991; CARNIERI et al. 1994a; SCHRAGE, 1997).

De acordo com ARCE (2000), as principais ferramentas matemáticas utilizadas para solucionar problemas de traçamento de árvores e alocação ótima de toras ao redor do mundo foram:

- Programação Linear com ou sem variáveis inteiras e binárias;
- Programação dinâmica;
- Algoritmos de geração de colunas;
- Otimização em redes;
- Sistemas especialistas (Expert Systems)
- Busca Tabu (Tabu Search Methods)

Segundo LAROZE (1999), os problemas de otimização do sortimento surgem ao nível do fuste, do povoamento e da floresta. Ao nível do fuste, o problema consiste em determinar o padrão de corte que maximiza o valor comercial do tronco de árvores, dados os preços dos produtos e as limitações de produção. Ao nível do povoamento, o problema consiste em associar padrões de corte para cada classe de fuste, de modo a maximizar o valor agregado da produção dadas as restrições de comercialização impostas pelos diferentes mercados e as características intrínsecas do povoamento,

principalmente as distribuições de diâmetros, alturas e qualidades. Ao nível da floresta, o problema consiste em determinar o programa de sortimento a ser aplicado em cada povoamento, dado o objetivo de maximizar globalmente a receita total, sujeito às restrições de demanda e comercialização dos diferentes mercados, as características de idade, espécie, densidade, sítio, distribuição diamétrica e tamanho dos povoamentos disponíveis para corte.

Toras de eucalipto com dimensões para atender as especificações das principais serrarias ou laminadoras brasileiras vem se tornando um recurso escasso, principalmente em função da baixa disponibilidade de florestas manejadas em ponto de colheita e ampliação das escalas de produção das indústrias de celulose e papel, que muitas vezes precisam consumir toras, que poderiam ser comercializadas, para garantir o abastecimento sustentável de suas novas linhas de produção. Diante deste quadro, o foco deste estudo foi sobre problemas de traçamento de árvores e alocação ótima de toras de eucalipto no sul do Brasil.

3 – OBJETIVOS

3.1 – OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo matemático para solucionar problemas de traçamento de árvores e alocação ótima de toras de eucalipto com baixo custo computacional, utilizando recursos de programação linear, um algoritmo de geração de colunas e um algoritmo de programação dinâmica.

3.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Formular um modelo matemático utilizando a abordagem descrita em ARENALES e MORABITO (1995) para solucionar problemas de corte de objetos unidimensionais com estoques em quantidades limitadas;
- Desenvolver um algoritmo de geração de colunas e incorporá-lo ao método “Simplex revisado” (DANTZIG, 1963), com o propósito de encontrar soluções para o problema principal com baixo custo computacional;
- Adaptar o algoritmo de programação dinâmica desenvolvido por ARCE (2000) para geração das estimativas de produção por produto para cada padrão de corte designado para os lotes de árvores em cada classe diamétrica;
- Construir um protótipo e discutir os resultados gerados pelo mesmo, considerando diferentes cenários de mercado elaborados para avaliar o desempenho e o comportamento do sistema.

4 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 - PLANEJAMENTO FLORESTAL HIERÁRQUICO

Como uma das principais etapas do processo de tomada de decisão, o planejamento florestal, organizado de forma hierárquica, busca analisar as possíveis alternativas para elaborar os planos de manejo de longo prazo, bem como estabelecer as metas a serem atendidas em médio e curto prazo. Esse processo é organizado basicamente em três níveis hierárquicos, estratégico, tático e operacional, os quais se diferenciam em escopo e atividades específicas. Os objetivos e planos gerados em cada nível devem ser consistentes e apoiados nos demais níveis, tornando-se mais específicos e envolvendo períodos de tempos menores à medida que o planejamento caminha do nível estratégico para o operacional (BATEMAN e SNELL, 1998; BASKENT e KELES, 2005).

Os vários processos que estão envolvidos no gerenciamento de recursos florestais deveriam ser conjuntamente planejados para evitar soluções não otimizadas. Muitos fatores, entre eles a estrutura organizacional das companhias florestais, a magnitude de dados e a complexidade dos sistemas têm direcionado o estabelecimento de uma hierarquia de fases de planejamento (MITCHELL, 2004).

Os modelos hierárquicos de planejamento consistem em um grande conjunto de subsistemas conectados que compõem uma estrutura de camadas composta por objetivos, metas e uma gama de variáveis. A classificação hierárquica para o planejamento florestal foi primeiramente introduzida por PAREDES no final da década de 80, porém, somente com WEINTRAUB e CHOLAKY no início da década de 90 é que os conceitos hierárquicos foram aplicados (ANDERSSON, 2005).

A análise hierárquica consiste na organização das informações para a tomada de decisão nos diferentes níveis e a qualidade da decisão depende da correta ligação entre os níveis hierárquicos (CONNELLY, 1996).

A questão de transferir decisões e restrições entre modelos dentro da hierarquia é discutida por LAROZE e GREBER (1991) e também por OGWENO (1995). Em ambos os estudos, os autores descrevem sistemas de planejamento hierárquico.

OGWENO (1995) apresenta um sistema de planejamento hierárquico que inclui componentes estratégicos, táticos, operacionais e de estimativas de produção.

EPSTEIN et al. (1999a), descrevem vários sistemas de pesquisa operacional desenvolvidos por pesquisadores da Universidade do Chile para solucionar diferentes instâncias do planejamento hierárquico, são eles:

- MEDFOR: ferramenta de planejamento estratégico;
- OPTIMED: ferramenta de planejamento tático;
- PLANEX: um sistema de planejamento da malha viária e alocação de máquinas;
- OPTICORT: um sistema de agendamento operacional de colheita com designação de padrões de corte por talhão, equipe de colheita e período;
- ASICAM: ferramenta de agendamento da frota de transporte.

A implantação destes sistemas foi patrocinada pelas indústrias florestais chilenas e também por fundos do governo. EPSTEIN et al. (1999a) destaca os benefícios destas ferramentas para a indústria chilena: *“...devido ao uso de três sistemas de pesquisa operacional, relatórios da área florestal da ARAUCO apontam que aproximadamente US\$ 8 milhões foram economizados no primeiro ano em um total de despesas com operações florestais de US\$140 milhões.”*

Segundo MITCHELL (2004), o planejamento da colheita florestal tem sido dividido em uma hierarquia de planos conforme apresentado na FIGURA 2.

O planejamento estratégico é tradicionalmente conduzido para direcionar decisões sobre níveis sustentáveis de colheita enquanto leva em consideração diretrizes estratégicas, financeiras, políticas e operacionais. Os resultados do planejamento estratégico fornecem volumes por sortimento que podem ser obtidos de uma floresta nas próximas décadas e as classes de idades que deveriam ser colhidas, sem indicar precisamente quais unidades de colheita contribuirão para este volume (MITCHELL, 2004).

O propósito de planejamento tático é agendar operações de colheita para áreas específicas nos primeiros anos do horizonte de planejamento e com uma escala de detalhes mais refinada visando subsidiar a elaboração de planos de negócios. O nível de detalhamento da produção é baseado em volumes por sortimentos padronizados, não considerando as dimensões de produtos específicos por cliente.

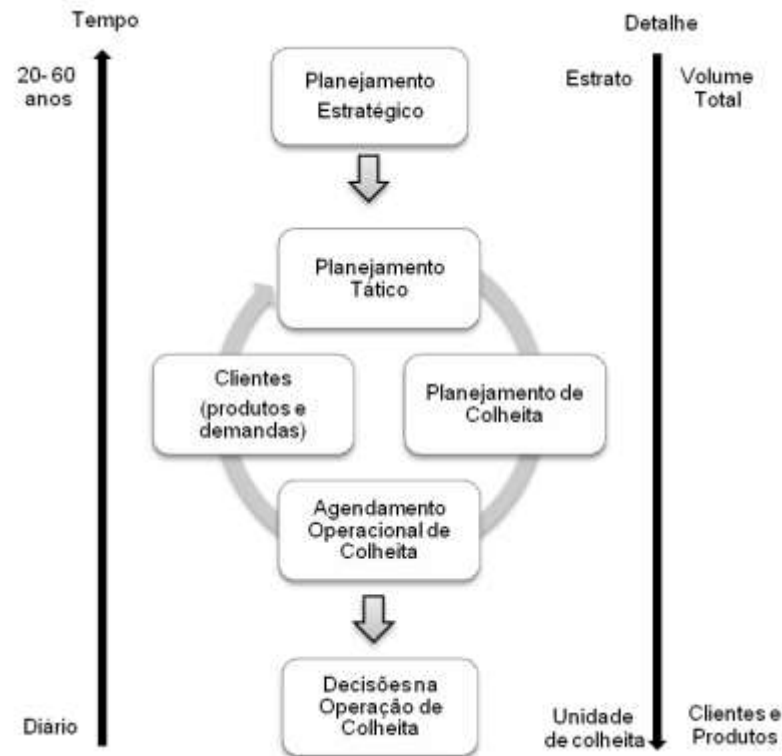


FIGURA 2 – DIAGRAMA DE INTERFACE ENTRE OS PRINCIPAIS NÍVEIS DE PLANEJAMENTO FLORESTAL

O planejamento de mercado direciona a venda da produção disponível na floresta. A área de comercialização identifica os volumes requeridos pelos clientes por período, bem como os preços de venda e a flexibilidade que os clientes têm em receber produtos similares.

O planejamento operacional de colheita é o último nível da hierarquia, e poderia ser segmentado em diversas etapas de acordo com a magnitude e complexidade operacional do negócio, considerando os recursos, processos, decisões e serviços relativos a diferentes escalas de tempo dentro do primeiro ano do horizonte de planejamento. O macroplanejamento e o microplanejamento das unidades de colheita, o agendamento operacional das equipes e recursos de produção, a designação de padrões de corte, a gestão de estoques e o agendamento das frentes de carregamento e transporte são as principais etapas envolvidas no processo de planejamento operacional de colheita em empresas que comercializam multiprodutos da floresta.

4.2 - PLANO ANUAL DE COLHEITA

Uma unidade de colheita é uma única porção de área dentro da floresta determinada pelo processo de planejamento florestal. Quando o planejamento anual de colheita está concluído e os limites dos blocos de colheita estão bem definidos, a localização espacial das unidades de colheita e a área efetiva devem ser consistentes em campo. Muitas vezes, as estimativas de produção estão diretamente vinculadas à qualidade desta informação (MITCHEL, 2004)

Neste contexto, novas etapas podem ser fragmentadas dentro do planejamento operacional de colheita. A primeira discute estratégias de produção e escoamento da madeira considerando os blocos de colheita e é classificada como macroplanejamento. A outra é responsável pelo planejamento das operações por talhão e é denominada de microplanejamento de colheita.

Segundo MALINOVSKI (2007), os objetivos do macroplanejamento são priorizar uma macro visão dos aspectos operacionais relacionados às unidades de colheita, considerando decisões relacionadas ao transporte de madeira, planejamento da malha viária, identificação de aspectos ambientais e sociais, nível de utilização de recursos, indicação da necessidade de investimentos e outros. Para tanto, a caracterização dos blocos de colheita, considerando a infraestrutura e características dos talhões que os compõem, inclui aspectos relativos à estrutura e produtividade da floresta, bem como outros fatores de produção relacionados.

EPSTEIN et al. (1999) desenvolveram um sistema de suporte ao planejamento de estradas e alocação de recursos operacionais para empresas florestais do Chile. O sistema foi denominado de PLANEX e pode ser classificado como uma solução de apoio para o macroplanejamento dos blocos de colheita. Quando uma empresa planeja colher 6.000 hectares nos próximos seis meses, o planejador pode decidir como alocar os recursos de produção visando obter máxima eficiência em função das características operacionais. Operações como a instalação de torres e guinchos em áreas acidentadas ou o uso de tratores florestais em áreas de relevo suave ou ondulado são programadas buscando minimizar os custos de estradas, baldeio e transporte de madeira.

Os autores não detalham o seu funcionamento mas a heurística do PLANEX requer uma grande quantidade de informações geoespaciais da empresa para rodar.

Assim que todos os estaleiros (local para estocagem da madeira processada) são definidos, a heurística define a malha de conexão de estradas com custo mínimo.

As principais decisões suportadas pelo PLANEX são:

- Em quais áreas arrastar a madeira utilizando tratores florestais ou *timber haulers* (caminhões para baldeio) e em quais utilizando torres c/ guinchos;
- Onde alocar os pátios para instalação das torres;
- Quais áreas deveriam ser baldeadas para cada torre;
- Quais estradas construir e;
- Quanto de madeira colher e transportar.

MACHADO e LOPES (2002) definem o microplanejamento como aquele executado no âmbito do talhão, de onde são obtidas informações detalhadas, necessárias para reduzir custos operacionais, aumentar a eficiência produtiva e facilitar a execução das operações. Os mesmos autores completam que, no planejamento operacional, devem ser identificados fatores de relevância, como a área total do bloco e a área individual dos talhões, as características da floresta (tais como material genético, volume por hectare, diâmetro e classe), o volume de madeira a ser colhida, a topografia, a capacidade suporte dos solos, a distribuição da malha viária, as distâncias por tipo de estrada, informações pluviométricas por período, disponibilidade de máquinas, equipamentos e mão-de-obra, especificações sobre os regimes de manejo prescritos, carteira de pedidos por cliente, dentre outros.

De acordo com GUIMARÃES (2004), os principais objetivos do microplanejamento florestal são:

- Refinar a quantificação do volume de madeira por sortimento
- Realizar uma descrição fiel da estrutura física do talhão;
- Subsidiar a configuração dos módulos de colheita;
- Definir os sentidos de derrubada e as distâncias de arraste;
- Definir os estaleiros e os pátios de processamento;
- Identificar áreas de reserva legal, áreas de preservação permanente, sítios de valor histórico; testes experimentais, áreas de risco e outras informações de relevante interesse para a empresa.

4.2.1 - Agendamento Operacional de Colheita

Uma das etapas mais complexas no processo de planejamento operacional é o agendamento operacional das equipes de colheita. Para subsidiar este complexo processo foram desenvolvidas soluções que são conhecidas internacionalmente como OHS – *Operational Harvesting Scheduling*. Estes sistemas requerem informações detalhadas sobre os rendimentos e custos das equipes de colheita, além de estimativas de produção confiáveis para as unidades de colheita elegíveis para corte. O sistema usa estas e outras informações para produzir uma agenda operacional para cada equipe de colheita em escala semanal ou mensal.

MITCHELL (2004) relata que o agendamento operacional de colheita é usado na prática para dar instruções periódicas para as equipes de colheita ordenar a produção da floresta, com foco em atender as demandas dos clientes, equalizar os recursos de produção e minimizar os custos envolvidos. O agendamento operacional de colheita determinará, período por período, como a floresta deverá ser colhida. Qualquer ajuste para a semana vigente é reportado e usado para ajustar as agendas das próximas semanas.

Ainda segundo MITCHELL (2004), a solução de um OHS completo deveria produzir pelo menos as seguintes respostas:

- “As agendas para as equipes de colheita por unidade de tempo”, ou seja, qual bloco e unidade de colheita cada equipe colherá em cada período. As movimentações e períodos ociosos para as equipes estão incluídas nesta etapa;
- “Os volumes e os produtos que serão produzidos em cada período”. Cabe considerar que os volumes e tipos de produtos produzidos em qualquer porção da floresta são governados pelas dimensões e qualidade das árvores disponíveis.
- “Como a produção será alocada para os clientes”. Uma vez produzidas, as toras e toretes são transportadas para os clientes. Os custos de transporte dependem principalmente das distâncias até as fontes consumidoras. Um bom OHS tentará atender às demandas dos clientes colhendo as unidades

de colheita mais próximas dos centros consumidores. Um aspecto que pode ser importante é as distâncias entre as unidades de colheita, principalmente quando as equipes se movimentam constantemente. Desta maneira, qualquer problema de não atendimento das demandas poderia ser antecipado.

Vários trabalhos sobre problemas de agendamento operacional de colheita foram produzidos por um grupo de pesquisadores da Universidade do Chile. Um dos mais abrangentes sistemas de agendamento operacional de colheita descrito é o OPTICORT, desenvolvido por EPSTEIN et al. (1999). Um ponto crucial na metodologia adotada no OPTICORT foi a estratégia adotada para designar os padrões de corte por unidade de colheita considerando que o número de padrões de corte possíveis pode ser exponencialmente alto.

Os pesquisadores chilenos construíram um modelo matemático inicial utilizando uma lista pré-definida de padrões de corte, tentando cobrir um número razoável de opções. Após o modelo ter sido implementado com sucesso, eles desenvolveram uma abordagem de “geração de colunas” para automatizar a geração dos padrões de corte. Esta novidade trouxe benefícios em duas pontas:

- Os usuários do sistema demandavam muito tempo para gerar bons conjuntos de padrão de corte;
- O conjunto de padrões de corte inicial muitas vezes não incluía outras boas combinações de padrão de corte.

Na Nova Zelândia, as principais contribuições do trabalho de MITCHELL (2004) estão na modelagem do problema de agendamento operacional de colheita e na estratégia de solução aplicada. O uso de uma formulação tipo II na implementação do submodelo de alocação de equipes é único na literatura.

As seguintes técnicas foram implementadas por MITCHELL (2004) buscando obter uma solução consistente para o problema de OHS:

- Soluções inteiras relaxadas;
- Geração de estimativas de produção;
- Geração de colunas (*column generation*);

- Ramificação de restrições (*constraint branching*);
- Alocação inteira.

Os resultados provenientes de três estudos de caso demonstraram que o sistema desenvolvido por MITCHELL (2004) pode ser aplicado para solucionar problemas reais com escalas de tempo semanal, mensal ou anual com alto nível de detalhamento das soluções.

4.2.2 - Geração de Estimativas de Produção em Sistemas de Agendamento Operacional de Colheita

A precisão da solução de um sistema de agendamento operacional está diretamente relacionada à qualidade das informações que ingressam no sistema. Por exemplo, se as estimativas de produção por produto não são precisas o OHS pode recomendar produzir toras que não podem ser obtidas de uma determinada unidade de colheita. Diferentemente das simplificações adotadas nos modelos de planejamento tático e estratégico, o nível de detalhe e a precisão das estimativas de produção para as unidades de colheita é algo tão importante quanto as estimativas de rendimento por equipe de colheita (MITCHELL, 2004).

MITCHELL (2004) relata que quando decisões sobre o traçamento de árvores são incorporadas em problemas de agendamento operacional de colheita, as dificuldades aumentam consideravelmente. Devido ao grande número de padrões de corte possíveis, diferentes abordagens têm sido desenvolvidas para gerar um conjunto razoável de padrões de corte, seja externamente aos modelos de PL como em MCGUIGAM (1984) ou internamente usando o método de decomposição de DANTZIG-WOLFE (ENG, DAELLENBACH e WHYTE, 1986) ou técnicas de geração de colunas (MENDOZA e BARE, 1986). Técnicas de programação dinâmica (BRIGGS, 1989) e heurísticas (SESSIONS, OLSEN e GARLAND, 1989) também foram utilizadas.

Quando restrições de mercado não permitem a otimização das unidades de colheita individualmente, a complexidade do problema aumenta ainda mais. Existem dois métodos que lidam com este tipo de problema: “a priori” (antes da otimização), por meio da geração de uma lista de estratégias de corte representativas - adotado

por MURPHY (1998), BOSTON e BETTINGER (1999) e LAROZE (1999), ou através da geração iterativa, conforme adotado por ENG et al. (1986), MENDOZA e BARE (1986), COSSENS (1996) e EPSTEIN et al. (1999b).

MURPHY (1998) e EPSTEIN et al (1999b) sugerem que a pré geração não é efetiva para problemas que contém um grande número de produtos florestais com restrições muito apertadas de demanda.

EPSTEIN et al. (1999b) relata um ganho na função objetivo usando o método iterativo. Contudo, ele destaca que o entusiasmo sobre um método iterativo deve ser moderado devido a preocupação de que estes métodos podem facilmente produzir soluções difíceis de serem aplicadas operacionalmente (ENG et al. 1986; MENDOZA e BARE, 1986). Os autores comentam que a pré geração de padrões de corte deveria ser usada apenas para reduzir o tempo computacional e gerar boas soluções iniciais para os métodos iterativos.

As dificuldades geradas pelos métodos iterativos podem ser contornadas por um método de dois estágios utilizando *Outturn Optimization*, como recomendado por OGWENO (1995). Este método pode prover a melhor combinação de vantagens do método iterativo e ainda gerar boas soluções do ponto de vista operacional.

Uma descrição fiel das demandas permite que os resultados da otimização sejam diretamente implementados na floresta. Se os tipos de toras são agregados ou simplificados, ou restrições de mercado não são modeladas, as soluções necessitariam passar por um processo de desagregação ou alteração manual para serem operacionalmente implementadas. Infelizmente, este processo poderia facilmente destruir qualquer ganho obtido na otimização (MITCHEL, 2004).

Somente algumas soluções, como aquelas desenvolvidas por MURPHY (1998), BOSTON e BETTINGER (1999), EPSTEIN et al. (1999b) ou MITCHELL (2004) adotaram mais do que 10 opções de padrões de corte em problemas de agendamento operacional de colheita.

MITCHELL (2004) destaca que as estimativas de produção para uma unidade de colheita podem ser geradas através de três formas:

- Informações de produções de uma unidade de colheita similar;
- Estimativas de produção por produto, geradas pelo inventário pré-corte, considerando a qualidade dos fustes;

- Sistemas computacionais que simulam o processamento das árvores e geram estimativas por classe diamétrica.

MITCHELL (2004) comentou que as produções de uma unidade de colheita não devem ser consideradas como fixas em problemas de agendamento de colheita que envolvem vários produtos florestais. As proporções e os produtos produzidos em uma unidade de colheita podem mudar e obter uma boa solução para esta etapa é um fator crítico em um OHS completo.

Basicamente, dois diferentes artifícios têm sido usados para estimar as produções em problemas de agendamento operacional de colheita: recursos de programação dinâmica, que é o preferido dos pesquisadores da Nova Zelândia, e o método da lista de prioridades, que agrada os pesquisadores chilenos. O uso do processador de inventário conhecido como MARVL (DEADMAN e GOULDING, 1978) na maior parte das indústrias da Nova Zelândia pode ser o motivo pela preferência.

O reflexo de mudanças na lista de prioridades pode ter impactos similares a alterações de preços de produtos nos métodos de programação dinâmica. Uma vez que o método de programação dinâmica encontra a solução ótima para um particular conjunto de preços, as soluções geradas pelo método da lista de prioridades devem ter alvos menores ou iguais às soluções encontradas através de métodos de programação dinâmica (MITCHELL, 2004).

Para encontrar a lista de prioridades, EPSTEIN et al. (1999b) optaram por um procedimento *branch and bound* tradicional. Este procedimento determina cada tipo de tora na lista de prioridades. O procedimento *branch and bound* utiliza um artifício proveniente do processamento de uma lista de prioridades, onde o volume de uma tora que está em uma k -ésima posição na lista de processamento é independente das toras das porções mais inferiores desta lista. Esta propriedade não seria verdadeira caso um modelo de programação dinâmica fosse usado.

Utilizando o método da lista de prioridades, EPSTEIN et al. (1999) criaram regras de ramificação específicas para este subproblema. Dado um nó, um conjunto de regras heurísticas determina os melhores produtos a serem adicionados na próxima escolha. Estas regras foram baseadas em padrões de corte lógicos e uma análise da composição de produtos torna-se essencial. A seleção dos nós é baseada na qualidade de cada nó, medida pelo valor do nó e pela estimativa do valor dos produtos

remanescentes que poderiam ser obtidos da porção remanescente da árvore a ser processada.

Na TABELA 1 estão listados alguns dos principais modelos desenvolvidos nas últimas décadas para problemas de agendamento operacional de colheita e os métodos adotados para estimar as produções dos produtos que compõem os padrões de corte.

TABELA 1 – ABORDAGENS ADOTADAS NO AGENDAMENTO OPERACIONAL DE COLHEITA

Modelo	Método de Estimativa da Produção	Método de Solução
MENDOZA e BARE (1986)	<i>Knapsack Problem</i>	Programação Linear
ENG et al. (1986)	Programação Dinâmica	Programação Linear
SESSIONS et al. (1989)	<i>Shortest Path</i>	Busca Binária
WEINTRAUB et al. (1991)	<i>Priority Lists</i>	Programação Inteira (PL + heurísticas)
LAROZE e GREBER (1993)	<i>Priority Lists</i>	Simulação de Monte Carlo
WEINTRAUB et al. (1993)	<i>Priority Lists</i>	Sistema Especialista
OGWENO (1995)	Classes de Qualidade	Programação Inteira
COSENS (1996)	MARVL	Programação Linear
MURPHY (1998)	MARVL	<i>Busca Tabu</i>
LAROZE e GREBER (1997)	<i>Priority Lists</i>	<i>Busca Tabu</i>
LAROZE (1999)	<i>Priority Lists</i>	Programação Linear e Busca Tabu
BOSTON e KISER (1999)	MARVL	<i>Busca Tabu</i> e Algoritmo Genético
EPSTEIN et al. (1999b)	<i>Priority Lists</i>	Programação Linear e <i>Branch and Bound</i>
MITCHELL et al. (2004)	<i>Priority Lists</i>	Programação Linear e <i>Branch and Bound</i>

FONTE: O autor

O maior diferencial entre a formulação de OGWENO (1995) e as outras, como WEINTRAUB et al. (1993) e MURPHY (1998) está no método de estimativa das produções. Na maioria dos trabalhos a geração de estimativas de produção foram baseadas em simulações durante o processamento dos fustes amostrados. Em OGWENO (1995), a estimativa do volume para uma unidade de colheita é dividida em classes de qualidade.

As classes de qualidade representam agregações de produtos florestais que são escolhidos para representar subconjuntos de tipos de toras. OGWENO determinou os volumes por classe de qualidade da seguinte maneira:

- Os tipos de toras são agrupados em classes de qualidade, com base em suas dimensões e especificações;
- A classe de qualidade é criada como um tipo de tora que já está representada como um componente da classe;
- Estas classes de qualidade são ranqueadas por suas especificações, a classe mais rigorosa é a primeira da lista;
- Uma heurística, onde preços por classe de qualidade foram configurados, e o simulador desenvolvido por OGWENO (1995) são utilizados para determinar o volume máximo em cada classe usando o método da lista de prioridades no processamento.

O caminho para a geração das estimativas de produção adotado por MITCHELL (2004) é similar àquele descrito por COSSENS (1996), porém aplicado em um modelo de agendamento operacional de colheita completo com natureza similar ao OPTICORT (EPSTEIN et al., 1999).

Os estudos de caso abordados no estudo de MITCHELL (2004) sugerem que as estimativas de produção podem ser modificadas de duas formas. Novas estimativas de produção podem ser geradas por um processo iterativo ou uma regra de desclassificação pode prover a transição de volumes entre diferentes tipos de produtos. Os resultados do estudo de caso de MITCHELL sugerem que o processo iterativo tenha resultados marginais superior ao processo de desclassificação.

Os resultados dos estudos de caso de MITCHELL (2004) recomendam um processo iterativo em preferência à pré-geração de estimativas de produção, uma vez que, sob uma perspectiva de modelagem, o processo iterativo modela o comportamento fiel das equipes de colheita. A geração iterativa também garante que a produção atenda os pedidos dos clientes. Adicionalmente, somente um processo iterativo pode controlar o número de tipos de produtos produzidos por uma equipe.

4.3 – TRAÇAMENTO DE ÁRVORES E ALOCAÇÃO ÓTIMA DE TORAS

A Otimização do traçamento de árvores (*bucking optimization*) é considerada um caso especial do problema de agendamento operacional de colheita. *Bucking* é o processo de cortar o fuste (tronco) de uma árvore em toras comercializáveis (MITCHELL, 2004).

Basicamente, a solução do problema de otimização do traçamento de árvores gera as estimativas de produção para as unidades de colheita que atenderão as demandas de mercado. Este problema é uma simplificação de um sistema de agendamento operacional de colheita completo, pois não considera restrições de rendimento de equipes, agendamento de recursos operacionais e a logística da madeira.

A necessidade de desenvolver trabalhos para otimização do traçamento de fustes foi criada porque os primeiros métodos aplicados para solucionar estes tipos de problemas otimizavam o valor de cada árvore sem considerar as demandas de mercado. Neste contexto, duas importantes definições precisam ser esclarecidas:

- “Padrão de corte”: é a sequência específica de cortes que são executados ao longo de um fuste para gerar os produtos florestais;
- “Estratégia de corte”: um método de determinar padrões de corte aplicado para traçar um fuste em toras e toretes. Uma lista de tipo de toras, um conjunto de preços relativos e um algoritmo de programação dinâmica são exemplos de uma estratégia de corte.

MENDOZA e BARE (1986) e ENG et al. (1986) foram os primeiros a contribuir com soluções para este tipo de problema na área florestal. Em ambos os estudos, os autores aplicaram métodos iterativos para gerar as estimativas de produção utilizadas por um modelo principal de programação linear. A cada iteração, o modelo de programação linear (PL) tenta satisfazer as restrições de demandas com as estimativas de produção existentes. As variáveis *duais* do modelo de programação linear foram usadas para direcionar a geração de novos padrões de corte e suas respectivas estimativas de produção. Em ENG et al. (1986), este subproblema foi solucionado por um

algoritmo de programação dinâmica enquanto MENDOZA e BARE (1986) criaram um algoritmo para solução do “problema da mochila”.

Tanto em MENDOZA e BARE (1986) como em ENG et al. (1986), as estimativas de produção foram geradas por classe diamétrica do povoamento. Uma classe diamétrica é um grupo de fustes semelhantes que não estão necessariamente na mesma unidade de colheita. Nestes estudos, padrões de corte específicos foram atribuído para árvores em cada classe diamétrica do povoamento.

A principal diferença entre os estudos de ENG et al. (1986) e MENDOZA e BARE (1986) está na modelagem de aspectos sobre a comercialização de toras. ENG et al. (1986) modelou o mercado de toras através de um modelo de programação linear que requer os produtos, quantidades e preços na carteira de pedidos. A restrição de demanda mais relevante é apresentada a seguir:

$$\sum_i \sum_j a_{ijk} x_{ij} (\leq, =, \geq) b_k \dots \forall_k \quad (1)$$

Onde:

i : índice dos padrões de corte;

j : índice das classes diamétricas;

k : índice dos tipos de toras;

x_{ij} : é o número de fustes da classe diamétrica j processados segundo o padrão de corte i ;

a_{ijk} : é o volume associado do tipo de tora k ;

b_k : é a demanda requerida do tipo de tora k .

Em contrapartida, MENDOZA e BARE (1986) modelaram as demandas de produtos florestais da seguinte maneira:

$$\sum_i \sum_j a_{ijk} x_{ij} - \sum_p y_{kp} = 0 \dots \forall_k \quad (2)$$

Onde:

p : índice das árvores processadas;

y_{kp} : é o volume do tipo de tora k alocado pelo processamento da árvore p .

SESSIONS et al. (1989) descrevem um sistema que iterativamente ajusta os preços relativos das toras até que uma estratégia de corte encontre as metas de produção por unidade de colheita. SESSIONS et al. (1989) solucionaram o subproblema de estimativas de produção através de um algoritmo específico. A aplicabilidade deste algoritmo nas operações de traçamento de árvores em campo foi discutida para garantir que a produção obtida seja equivalente às demandas projetadas.

Em SESSIONS et al. (1989), os fustes não são agrupados em classes diamétricas até que o processo de solução inicie. Adicionalmente, os autores implementaram artifícios para que 100% da unidade de colheita utilize uma única estratégia de corte ao invés de padrões estratificados por classe diamétrica. Os autores justificam que desta forma as soluções podem ser operacionalmente viáveis.

LAROZE e GREBER (1993) descrevem um método que gera instruções de traçamento baseadas no método da lista de prioridades para cada talhão, ao invés de padrões de corte definidos por classe diamétrica como em ENG et al. (1986), ou preços como em SESSIONS et al. (1989).

LAROZE e GREBER (1993) afirmaram que os padrões de corte apresentados em ENG et al. (1986) não são práticos.

Em LAROZE e GREBER (1993), um método que utilizou a técnica de simulação de Monte Carlo (RUBINSTEIN, 1981) foi aplicado para solucionar problemas de traçamento de árvores. O problema incluía 23 talhões de *Pinus radiata*, 8 diferentes conjuntos de restrições de mercado (relacionando as proporções e especificações de toras para exportação) para 6 tipos de toras (toras longas, intermediárias e curtas para exportação, toras de serraria para o mercado doméstico e toras de polpa para o mercado de celulose).

O método descrito por LAROZE e GREBER (1993) maximiza o lucro obtido em cada talhão enquanto garante o atendimento às especificações das toras para exportação. Os autores descrevem 3 diferentes artifícios utilizando a técnica de simulação de Monte Carlo como método para geração das listas de prioridades por talhão. As listas de prioridades geradas na simulação alteram as seguintes especificações para as toras de exportação:

- Diâmetro mínimo;
- Número máximo de toras de cada fuste;
- Classes de qualidade permitidas.

Os resultados da simulação de Monte Carlo são comparados favoravelmente contra resultados de uma formulação via programação inteira similar àquela descrita por ENG et al. (1986).

LAROZE e GREBER (1993) comparam a redução no lucro entre a formulação via programação linear (PL) contra a programação inteira (PI), e encontraram uma diferença de 1,07% ou menos em todos os casos. A similaridade dos valores das soluções via PL e PI é atribuída à estrutura do problema. Os autores também comentaram que o procedimento de geração de colunas usado não necessariamente gera todos os padrões de corte requeridos para uma solução ótima de programação inteira.

Os padrões de corte gerados pela técnica de Monte Carlo foram caracterizados como consistentes através das classes diamétricas. Na conclusão, LAROZE e GREBER (1993) descrevem os benefícios do sistema e atestam que ele foi implementado operacionalmente, mas também destacam que a simulação de Monte Carlo pode não ser sofisticada o suficiente para lidar com restrições de mercado muito complicadas.

Em LAROZE e GREBER (1997), os autores reavaliam o estudo de caso desenvolvido em 1993. Desta vez a heurística *Busca Tabu* (GLOVER e LAGUNA, 1993) foi usada para alterar a lista de prioridades para cada unidade de colheita. O desempenho da *Busca Tabu* foi uma melhoria sobre a técnica de simulação de Monte Carlo. A diferença média entre as soluções de programação inteira e *Busca Tabu* foi de 2,4%, contra uma diferença de 3,5% por meio da simulação de Monte Carlo (LAROZE e GREBER, 1993).

Em LAROZE (1999), um modelo matemático desenvolvido para resolver o problema de otimização do traçamento de fustes ao nível da floresta, considerou a produção total de todos os talhões para atender as demandas de mercado. O método que utilizou a heurística *Busca Tabu* em 1997 foi usado para gerar a lista de prioridades par as quais foram geradas as estimativas de produção.

LAROZE (1999) destacou que as restrições operacionais sobre a movimentação das equipes de corte ou as restrições sobre o rendimento das equipes em cada período não foram consideradas em seu modelo. O exemplo utilizado por LAROZE (1999) foi o mesmo adotado anteriormente em LAROZE e GREBER (1993) e LAROZE

e GREBER (1997). Novamente, o método desenvolvido no trabalho de ENG et al. (1986) foi escolhido como “testemunha” para comparações. Contudo, uma abordagem de programação linear foi adotada ao invés de um modelo de programação inteira. A formulação matemática de LAROZE (1999) foi alterada para considerar múltiplos talhões, o que demandou restrições adicionais conforme demonstrado na equação a seguir:

$$\sum_j x_{sij} \leq N_{sj} \dots \forall_{sj} \quad (3)$$

onde:

s : índice de talhões;

N_{sj} : é o número de fustes no talhão s da classe i ;

x_{ij} : é o número de fustes da classe j processados segundo o padrão i .

O PL no método de programação linear / *Busca Tabu* (LP/TS) de LAROZE (1999) é similar ao PL desenvolvido por ENG et al. (1986) mas é baseado em área ao invés de fustes.

$$\begin{aligned} \sum_{sp} u_{sp(m)} y_{ip} &\geq V_m \dots \forall_m \\ \sum_p y_{sp} &\leq S_s \dots \forall_s \end{aligned} \quad (4)$$

Onde:

p : índice das regras de traçamento;

m : índice de mercados;

y_{sp} : é a área do talhão s processada com a regra p ;

$u_{sp(m)}$: é o volume produzido para o mercado m no talhão s usando a regra de traçamento p por unidade de área;

V_m : é o volume total requerido pelo mercado m ;

S_s : é a área do talhão s .

Em contraste com o método de ENG et al. (1986), o método de programação linear / *Busca Tabu* (LP/TS) de LAROZE (1999) não é um método iterativo. Ao invés disso, 11 diferentes cenários de mercado (incluindo somente venda de toras e somente venda de madeira de polpa) foram listados para o algoritmo de *Busca Tabu* em LAROZE e GREBER (1997), os quais geraram 11 diferentes estimativas de produção para cada talhão. Das estimativas de produção pré-geradas, o PL seleciona as melhores combinações para satisfazer toda a demanda do mercado. LAROZE (1999) testou alternativas diferentes no método de solução:

- Alterar o número de alternativas para as estimativas de produção;
- Alterar as restrições de demanda;
- Alterar as áreas relativas dos talhões;
- Alterar os preços das toras.

Os resultados destes testes foram discutidos e explicados em detalhes por LAROZE (1999). Um aumento sobre o número de estimativas de produção incrementou o valor da função objetivo das soluções geradas pelo PL em aproximadamente 2% sobre a solução ótima proveniente do método LP/ST. O aumento de 3 para 11 estimativas de produção incrementou o valor da função objetivo de 1 a 1,5%.

LAROZE (1999) declarou que houve uma tendência de selecionar somente uma única estimativa de produção por talhão. Ele concluiu que com restrições de demanda mais complexas o número de estimativas de produção e também a fragmentação dos padrões de corte por período e talhão pode aumentar dramaticamente, especialmente quando o número de talhões elegíveis é reduzido segundo restrições dos sistemas de colheita.

COSENS (1996) apresentou um modelo multi-períodos que usa um método de decomposição similar ao desenvolvido por ENG et al (1986) para otimização do traçamento de árvores. Contudo, diferentemente de ENG et al (1986), as estimativas de produção não foram baseadas em fustes, sendo geradas pelo método de avaliação do volume recuperável por produto - MARVL (DEADMAN e GOULDING 1979).

O método e o modelo apresentado por COSENS (1996) são similares ao de LAROZE (1999) com duas importantes diferenças: o método é iterativo e um algoritmo de programação dinâmica é usado.

A formulação descrita por COSSENS (1996) é muito geral e o estudo não detalha as restrições exatas que foram usadas. O problema foi formulado através do método de decomposição de DANTZIG-WOLFE (DANTZIG e WOLFE 1960). O “problema principal relaxado” modela os recursos e as restrições de demanda, e o subproblema é a geração de estimativas de produção por talhão. As estimativas de produção processadas pelo MARVL foram obtidas por meio de uma estratégia de corte que utilizou um conjunto de preços relativos gerados por variáveis *duais* do problema principal relaxado. O problema principal relaxado inclui os volumes de cada produto x_{stmp} com um coeficiente de custo c_{stmp} , além de restrições de demanda conforme apresentado a seguir:

$$\sum_{stmp} a_{ismtp} x_{stmp} = bi \quad \forall i \quad (5)$$

Onde:

x_{stmp} : é o volume do tipo de tora p enviado até a fábrica m no período t do talhão s ;

a_{ismtp} : são os coeficientes de cada restrição de demanda; b_i : é o coeficiente RHS para a restrição i ;

Os preços relativos para o subproblema c_{stmp} , foram encontrados através da equação:

$$\hat{c}_{stmp} = c_{stmp} - \sum_i \pi_i a_{ismtp} \quad (6)$$

Onde:

\hat{c}_{stmp} : é a receita para o tipo de tora p para a fábrica m no período t do talhão s ;

\hat{c}_{stmp} : é o preço relativo usado em MARVL;

π_i : são as variáveis duais para cada restrição de demanda i

As estimativas de produção foram adicionadas ao problema principal relaxado como um novo cenário, e o problema foi resolvido novamente.

Existem dois estudos de caso reportados em COSSENS (1996). No mais amplo deles 4 talhões, 7 tipos de produtos e 4 fábricas foram considerados. Restrições de demandas mínimas foram adotadas incluindo o custo de transporte até as fábricas. O processo de solução foi executado com três ou quatro iterações quando o valor da função objetivo estava dentro de 0,24% do limite superior. 99% do tempo de solução foi gasto no subproblema de geração de estimativas de produção. Provavelmente, o tamanho do problema utilizado no estudo de caso era pequeno porque o autor necessitou gerar manualmente as entradas matriciais requeridas pelo *Solver* de PL, e retornar os dados para o MARVL.

ARCE (2000) desenvolveu um sistema de análise, simulação e otimização ao nível da floresta, levando em consideração a demanda dos clientes e os custos de transporte. O sistema é composto por dois módulos principais: O módulo gerador dos padrões de corte (MGPC) e o módulo global de otimização (MGOS) do sortimento. Módulos adicionais para os cálculos das alturas e volumes também fazem parte do sistema. O MGPC é o módulo que gera os padrões ótimos de corte. Ele utiliza um algoritmo heurístico que identifica os cortes potenciais que devem ser avaliados ao longo do fuste, e um algoritmo baseado na programação dinâmica, que determina a combinação ótima de produtos que maximiza a receita do fuste.

O MGOS, formulado como um problema de programação linear inteira mista, está submetido a restrições que consideram para cada talhão limites para os volumes de madeira, número de produtos florestais e as demandas.

Dentre os objetivos propostos por ARCE (2000) estava o de aplicar técnicas de pesquisa operacional para coordenar e tornar mais eficientes, em conjunto, as decisões de sortimento e transporte de multiprodutos, de modo a reduzir o custo da matéria-prima obtida a partir de plantios comerciais. ARCE ainda comentou que a eficiência do sistema poderia ser medida pelos seguintes critérios:

- Redução dos resíduos comerciais de madeira;
- Aumento no valor total da madeira traçada e baldeada devido ao sortimento e aos custos de transporte otimizados;
- Redução dos custos de classificação na floresta devido à simulação e controle dos produtos a retirar por talhão e;

- Alguma combinação dos fatores mencionados.

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

Segundo ARENALES e MORABITO (1995), cortar unidades maiores em unidades menores ou empacotar unidades menores dentro de unidades maiores são problemas idênticos, considerando que um item cortado de uma certa posição poderia ser realocado àquela posição. Por isto, problemas desta classe são referidos como “problemas de corte e empacotamento”. Dependendo dos itens solicitados, seria possível combiná-los dentro de um objeto de inúmeras maneiras, respeitando-se um conjunto de restrições no processo de corte. Estas combinações são denominadas de “padrões de corte”. O padrão de corte ótimo é aquele que produz, por exemplo, a menor perda. O número de padrões de corte possíveis pode ser, na prática, muito elevado, exigindo que técnicas bem elaboradas sejam desenvolvidas para determinar o padrão ótimo. Na FIGURA 3 pode-se visualizar um exemplo de um padrão de corte aplicado sobre um objeto unidimensional.

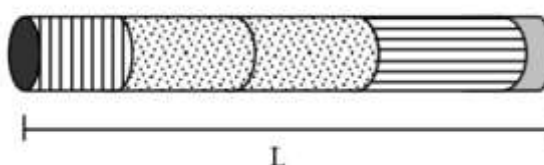


FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DE UM PADRÃO DE CORTE APLICADO A UM OBJETO UNIDIMENSIONAL

Quando uma quantidade elevada de itens deve ser produzida, temos um problema em que a solução exige o corte de vários objetos em estoque e a repetição de vários padrões de corte. Este problema é conhecido na literatura como “problema de corte de estoque” e o objetivo pode ser, entre outros, produzir o menor número de objetos cortados ou obter o menor custo total dos objetos cortados, considerando diferentes custos para os objetos em estoque.

O problema de corte de estoque é um problema de otimização clássico, comumente tratado como um problema de programação linear inteira. No Brasil, ele tem

sido bem aplicado para solucionar problemas de corte e empacotamento na indústria de celulose e papel (bobinas) e na indústria de aço (tubos).

Tratando-se de negócio florestal, uma vez que se conhece o estoque de árvores por classe diamétrica de povoamentos manejados de *Eucalyptus spp.*, as listas de pedidos dos clientes, os preços de cada tipo de tora e assume-se que existem recursos tecnológicos que possibilitem realizar a colheita por classe de tamanho das árvores a um custo atraente, quais seriam os padrões de corte que minimizam o desperdício de árvores em um povoamento ao atender a carteira de pedidos?

Na região de Telêmaco Borba – PR, para atender a lista de pedidos dos clientes, a Klabin S/A produz mais de 60 produtos florestais a cada mês (TABELA 2), comercializando aproximadamente 400.000 toneladas mensalmente. Os produtos florestais reúnem especificações sobre espécies, limites de diâmetro e comprimento. Em função do número de produtos processados, um dos maiores problemas enfrentados pela área de abastecimento de madeira tem sido a desclassificação de toras durante o traçamento das árvores em campo, aspecto que impacta diretamente na lucratividade do negócio.

TABELA 2 – ESPECIFICAÇÕES DE PRODUTOS FLORESTAIS PRODUZIDOS PELA KLABIN S/A NO PARANÁ PARA SUPRIMENTO INDUSTRIAL E DE MERCADO

Nº	Material	Espécie	Comprimento de toras(m)	Destino	Sortimento (cm) [dmin – dmax]
1	EGP-240	<i>Eucalyptus grandis</i>	2,40	Processo Industrial	[8-28]
2	EGP-360	<i>Eucalyptus grandis</i>	3,60	Processo Industrial	[8-28]
3	EGP-650	<i>Eucalyptus grandis</i>	6,50	Processo Industrial	[8-28]
4	EGP-720	<i>Eucalyptus grandis</i>	7,20	Processo Industrial	[8-28]
5	EDP-360	<i>Eucalyptus dunnii</i>	3,60	Processo Industrial	[8-28]
6	EGP-650	<i>Eucalyptus dunnii</i>	6,50	Processo Industrial	[8-28]
7	EGP-720	<i>Eucalyptus dunnii</i>	7,20	Processo Industrial	[8-28]
8	EGP-360	<i>Eucalyptus saligna</i>	3,60	Processo Industrial	[8-28]
9	EGP-650	<i>Eucalyptus saligna</i>	6,50	Processo Industrial	[8-28]
10	EGP-720	<i>Eucalyptus saligna</i>	7,20	Processo Industrial	[8-28]
11	PTP-240	<i>Pinus taeda</i>	2,40	Processo Industrial	[8-24]
12	PTP-255	<i>Pinus taeda</i>	2,55	Processo Industrial	[8-24]
13	PTP-310	<i>Pinus taeda</i>	3,10	Processo Industrial	[8-24]
14	PTP-320	<i>Pinus taeda</i>	3,20	Processo Industrial	[8-24]
15	PTP-360	<i>Pinus taeda</i>	3,60	Processo Industrial	[8-24]
16	PTP-650	<i>Pinus taeda</i>	6,50	Processo Industrial	[8-24]
17	PTP-720	<i>Pinus taeda</i>	7,20	Processo Industrial	[8-24]
18	EGC-605	<i>Eucalyptus grandis</i>	6,05	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
19	EGC-760	<i>Eucalyptus grandis</i>	7,60	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
20	EGC-530	<i>Eucalyptus grandis</i>	5,30	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
21	EGC-610	<i>Eucalyptus grandis</i>	6,10	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]

22	EGC-510	<i>Eucalyptus grandis</i>	5,10	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
23	EGC-765	<i>Eucalyptus grandis</i>	7,65	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
24	ESC-615	<i>Eucalyptus saligna</i>	6,15	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
25	ESC-620	<i>Eucalyptus saligna</i>	6,20	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
26	ESC-515	<i>Eucalyptus saligna</i>	5,15	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
27	EDC-620	<i>Eucalyptus dunnii</i>	6,20	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
28	EDC-615	<i>Eucalyptus dunnii</i>	6,15	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
29	EDC-515	<i>Eucalyptus dunnii</i>	5,15	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
30	EOC-515	<i>Eucalyptus sp.</i>	5,15	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
31	EHC-530	<i>Eucalyptus spp.</i>	5,30	Comércio	[28-32] / [32-38] / [> 38]
32	PTC-736	<i>Pinus taeda</i>	7,36	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
33	PTC-310	<i>Pinus taeda</i>	3,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
34	PTC-530	<i>Pinus taeda</i>	5,30	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
35	PTC-610	<i>Pinus taeda</i>	6,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
36	PTC-710	<i>Pinus taeda</i>	7,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
37	PTC-368	<i>Pinus taeda</i>	3,68	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
38	PTC-265	<i>Pinus taeda</i>	2,65	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
39	PTC-285	<i>Pinus taeda</i>	2,85	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
40	PTC-290	<i>Pinus taeda</i>	2,90	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
41	PTC-510	<i>Pinus taeda</i>	5,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
42	PTC-360	<i>Pinus taeda</i>	3,60	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
43	PTC-315	<i>Pinus taeda</i>	3,15	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
44	PTC-575	<i>Pinus taeda</i>	5,75	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
45	PTC-305	<i>Pinus taeda</i>	3,05	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
46	PEC-265	<i>Pinus elliotti</i>	2,65	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
47	PEC-570	<i>Pinus elliotti</i>	5,70	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
48	PEC-255	<i>Pinus elliotti</i>	2,55	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
49	PEC-290	<i>Pinus elliotti</i>	2,90	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
50	PEC-305	<i>Pinus elliotti</i>	3,05	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
51	PEC-240	<i>Pinus elliotti</i>	2,40	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
52	PEC-610	<i>Pinus elliotti</i>	6,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
53	PEC-510	<i>Pinus elliotti</i>	5,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
54	PEC-500	<i>Pinus elliotti</i>	5,00	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
55	PEC-735	<i>Pinus elliotti</i>	7,35	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
56	PEC-310	<i>Pinus elliotti</i>	3,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
57	PEC-710	<i>Pinus elliotti</i>	7,10	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
58	PEC-315	<i>Pinus elliotti</i>	3,15	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
59	PEC-575	<i>Pinus elliotti</i>	5,75	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
60	PEC-530	<i>Pinus elliotti</i>	5,30	Comércio	[24-30] / [30-40] / [> 40]
61	AAC-310	<i>Araucaria angustifolia</i>	3,10	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
62	AAC-410	<i>Araucaria angustifolia</i>	4,10	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
63	AAC-530	<i>Araucaria angustifolia</i>	5,30	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
64	AAC-600	<i>Araucaria angustifolia</i>	6,00	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
65	AAC-610	<i>Araucaria angustifolia</i>	6,10	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
66	AAC-700	<i>Araucaria angustifolia</i>	7,00	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]
67	AAC-750	<i>Araucaria angustifolia</i>	7,50	Comércio	[8-18] / [18-30] / [> 30]

FONTE: Comercialização de Madeira - Klabin S/A

A principal solução tecnológica aplicada para subsidiar as operações de traçamento de árvores tem sido os sistemas de medição e controle de corte integrados aos

cabeçotes processadores dos *harvesters*. Empresas especializadas como a *WARATAH* ou a *WOODSMAN PRO* embarcam *softwares* em computadores de bordo e nestes “controladores” o operador da máquina cadastra as dimensões dos produtos florestais que serão produzidos. Assim, em função das dimensões da árvore a ser processada, o programa mensura, aciona o sabre e contabiliza a produção de acordo com o padrão de corte pré-definido pelo operador. A qualquer momento o operador pode intervir e decidir sobre mudanças no padrão de corte em função da qualidade dos fustes das árvores. Estes sistemas são geralmente precisos e simples de usar.



FIGURA 4 – EXEMPLO DE COMPUTADOR DE BORDO COM SISTEMA DE MEDIÇÃO E CONTROLE DE PROCESSAMENTO DE ÁRVORES – OPTIPLUS, DA *WOODSMAN PRO*.

Diante deste contexto, desenvolver uma solução tecnológica para otimizar o aproveitamento das árvores considerando as suas dimensões e estoques, os preços de cada produto e as carteiras de pedidos torna-se muito importante, principalmente quando trabalha-se com estoques de árvores de eucalipto de grandes dimensões e uma carteira diversa de pedidos, como no caso da Klabin S/A.

5.1 - ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é constituída de povoamentos de três diferentes espécies de eucalipto predominantemente comercializadas no mercado de toras brasileiro. Conforme pode ser verificado na TABELA 3, os povoamentos possuem diferentes idades e históricos de manejo e são de propriedade da empresa Klabin S/A.

Os povoamentos foram estabelecidos na fazenda Monte Alegre, cuja sede está situada no município de Telêmaco Borba – PR.

TABELA 3 – HECTARES DE PLANTIO POR POVOAMENTO DE EUCALIPTO SELECIONADA PARA DESENVOLVIMENTO DESTE ESTUDO

Espécie	Idade (anos)	Histórico de Manejo					Total Geral (ha)
		Sem desbaste	1º Desbaste	2º Desbaste	Regen. 01	Regen. 02	
<i>Eucalyptus grandis</i>	10				28,7		28,7
<i>Eucalyptus grandis</i>	25			13,3			13,3
<i>Eucalyptus grandis</i>	26	2,68					2,68
<i>Eucalyptus grandis</i>	31				5,9		5,9
<i>Eucalyptus grandis</i>	38				1,7	3,6	5,3
<i>Eucalyptus grandis</i>	40				2,5		2,5
Subtotal		2,68	0,0	13,3	38,8	3,6	58,4
<i>Eucalyptus dunnii</i>	19	31,6	45,0				76,6
<i>Eucalyptus dunnii</i>	29	3,4					3,4
Subtotal		35,0	45,0	0,0	0,0	0,0	80,0
<i>Eucalyptus saligna</i>	10				22,0		22,0
<i>Eucalyptus saligna</i>	33					5,7	5,7
<i>Eucalyptus saligna</i>	34					5,0	5,0
<i>Eucalyptus saligna</i>	43				3,9		3,9
<i>Eucalyptus saligna</i>	53					21,0	21,0
<i>Eucalyptus saligna</i>	56					6,4	6,4
Subtotal		0,0	0,0	0,0	25,9	38,1	64,0
Hectares Total		37,7	45,0	13,3	64,7	41,7	202,4

FONTE: O autor

Os povoamentos selecionados possuem diferentes perfis quanto a frequência de árvores por classe diamétrica, conforme apresentado nos GRÁFICOS 1, 2 e 3, respectivamente. Esta variabilidade na frequência de árvores foi considerada importante para avaliar o desempenho e a flexibilidade do modelo conceitual do protótipo desenvolvido neste estudo.

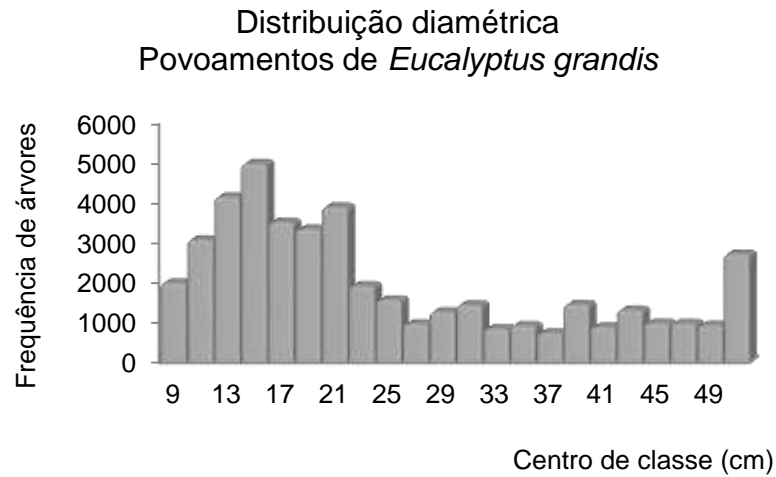


GRÁFICO 1 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus grandis*

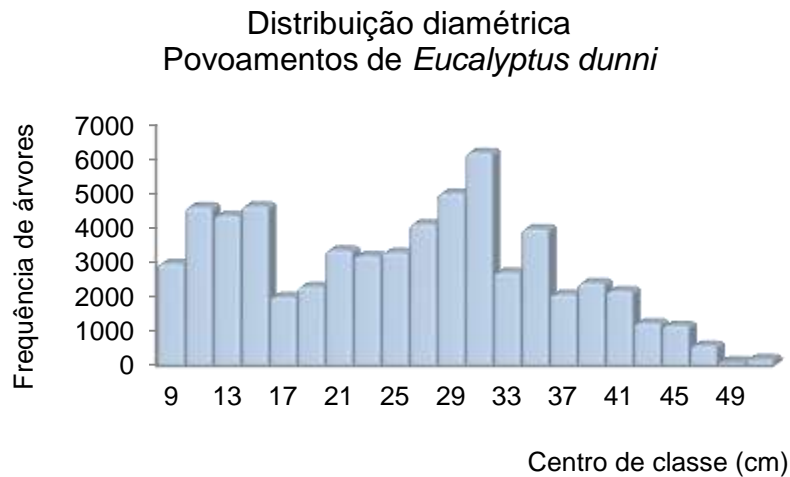


GRÁFICO 2 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii*

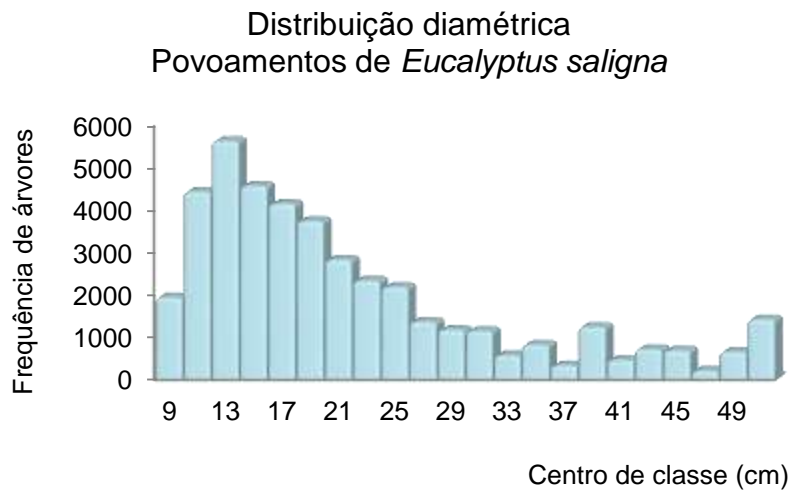


GRÁFICO 3 – PERFIL DA ESTRUTURA DIAMÉTRICA DOS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus saligna*

A oferta de toras de eucalipto para suprimento de serrarias e laminadoras no sul do Brasil tem diminuído expressivamente nos últimos anos. Em contrapartida, os volumes comercializados para atender demandas dos mercados de móveis e de construção civil vêm aumentando. A escassez de toras em um futuro próximo exigirá adequação por parte das fontes consumidoras e maior assertividade dos gestores florestais e/ou proprietários de florestas de eucalipto em decisões sobre regimes de desbastes, idades de rotação, definição de padrões de corte e logística de alocação dos produtos para os clientes.

5.2 – ABORDAGEM MATEMÁTICA ADOTADA

A abordagem matemática adotada neste estudo foi inspirada na estrutura do problema de corte de estoque unidimensional de materiais formulada por L.V. KANTOROVICH e V.A. ZALGALLER (1951), a qual foi desenvolvida para resolver o problema do uso econômico de material no estágio de corte através da programação linear.

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^N y_j \quad (14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \geq b_i \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^m l_i x_{ij} \leq L y_j \quad (16)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (17)$$

$$x_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro} \quad (18)$$

Em que:

- N : é o número de barras de comprimento L necessárias;

- y_j : é igual a 1 se a barra j é usada ou igual a 0 senão;
- x_{ij} : é o número de vezes que o produto i de comprimento l é cortado na barra j ;
- b_i : é o número de pedidos do produto i ;
- m : é o número total de pedidos.

Para introduzir o problema, digamos que a formulação matemática básica para um problema de corte de estoque de árvores tem uma lista de m pedidos cada um requerendo b_i produtos. A princípio, uma lista de todos os padrões de corte possíveis deveria ser produzida, associando cada padrão de corte a uma variável inteira positiva x_j que representaria quantas vezes cada padrão j é usado. Seria possível descrever o problema linear inteiro simplificado da seguinte maneira:

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^N c_j x_j \quad (19)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} x_j \geq b_i \quad (20)$$

$$x_j \geq 0 \quad (21)$$

Em que:

- a_{ij} : quantidades do produto i no padrão de corte j ;
- c_j : é o custo do padrão de corte j .

Todavia, neste tipo de problema, o número de padrões de corte j cresce exponencialmente em função de m , o número de pedidos. Desta forma, quando o número de pedidos i é alto, torna-se impraticável enumerar todos os padrões de corte possíveis.

Ao aplicar o método de decomposição DANTZIG-WOLFE sobre a formulação de KANTOROVICH obtém-se o modelo de GILMORE e GOMORY. Estes pesquisadores foram pioneiros na aplicação do método de geração de colunas sobre problemas de corte de estoque unidimensional em uma série de artigos publicados na década de 60. Segundo eles, o método de geração de colunas tende a ser muito mais eficiente que a abordagem original de KANTOROVICK (1951), particularmente quando o número de padrões de corte possíveis cresce.

Os métodos de decomposição consistem em decompor um problema inicial de grande porte em problemas com dimensões menores denominados subproblemas, permitindo substituir um grande volume de cálculos centrais por cálculos locais. Tais subproblemas trabalham de forma paralela, sequencial ou interativa, supervisionados por um nível de coordenação, denominado problema principal (ou problema mestre). O problema principal recebe informações dos subproblemas e altera, a cada iteração, os parâmetros que atualizam a função custo e/ou o vetor de recursos de cada subproblema, permitindo através de suas soluções uma aproximação para a solução ótima global, caso ela exista (GILMORE e GOMORY, 1963).

Considerando a natureza e a quantidade de restrições dos problemas de corte de estoques de árvores de eucalipto, foi proposto adotar um método de decomposição para gerar soluções factíveis com baixo custo computacional. Um algoritmo de programação dinâmica foi utilizado como método de estimativa da produção volumétrica por padrão de corte.

O modelo matemático produzido neste estudo lida com estoques de árvores por classe diamétrica e utiliza um algoritmo de “geração de colunas” para gerar padrões de corte adicionais apenas quando eles são necessários. Os novos padrões de corte são introduzidos na matriz do modelo de PL pela solução de um subproblema conhecido como “problema da mochila” utilizando variáveis *duais* do modelo principal de programação linear. Por conseguinte, o problema tem várias restrições da mochila, uma para o estoque de árvores em cada classe diamétrica.

O “problema da mochila” é um problema de otimização combinatória. Dado um conjunto de materiais, cada um com seu respectivo peso e valor, o objetivo é determinar o número de itens que devem ser incluídos em uma mochila tal que o peso total seja menor ou igual à capacidade da mochila e o valor dos materiais contidos na mochila seja o maior possível (ARENALES E MORABITO, 1995).

A cada padrão de corte associou-se um vetor dimensional para contabilizar os tipos de produtos produzidos, onde α_i é a quantidade do produto i :

$$a = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) \quad (22)$$

A formulação matemática do modelo principal desenvolvido para o protótipo pode ser descrita da seguinte forma:

Minimize:

$$f(x_{11}, x_{21}, \dots) = \sum_{i=1}^{n_1} c_1 x_{i1} + \sum_{i=1}^{n_2} c_2 x_{i2} + \dots + \sum_{i=1}^{n_N} c_N x_{iN} \quad (23)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{n_1} a_{i1} x_{i1} + \sum_{i=1}^{n_2} a_{i2} x_{i2} + \dots + \sum_{i=1}^{n_N} a_{iN} x_{iN} = d \quad (24)$$

$$l_1 \alpha_1^j + l_2 \alpha_2^j + \dots + l_m \alpha_m^j \leq L_j \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^{n_1} x_{i1} \leq e_1 \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^{n_2} x_{i2} \leq e_2 \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^{n_N} x_{iN} \leq e_N \quad (28)$$

$$\alpha_1^j \geq 0, \alpha_2^j \geq 0, \dots, \alpha_m^j \geq 0 \text{ e inteiros, } j = 1, \dots, N \quad (29)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n_j \quad j = 1, \dots, N \quad (30)$$

Em que:

- c_j : custo da árvore da classe diamétrica j , $j=1, \dots, N$;
- x_{ij} : nº de árvores da classe diamétrica j processadas pelo padrão de corte i ;

- L_j : comprimento médio dos fustes das árvores da classe diamétrica j , $j=1, \dots, N$;
- l_i : comprimento do produto i , $i=1, \dots, m$;
- N : número de classes diamétricas;
- n_j : número de padrões de corte i aplicados na classe diamétrica j ;
- d_i : demanda pelo produto i , $i=1, \dots, m$;
- e_j : estoque de árvores na classe diamétrica j , $j=1, \dots, N$.

5.2.1 – O Método Simplex com “Geração de Colunas”

O princípio de decomposição de DANTZIG-WOLFE é baseado na versão revisada do método *Simplex* (DANTZIG, 1963) e fornece um procedimento eficiente quando aplicado a problemas de programação linear de grande porte. Este método trabalha formando um problema equivalente ao problema original, possui um número de linhas um pouco maior do que o número de restrições de acoplamento do problema original e um número de colunas que pode vir a ser muito grande. O problema equivalente é resolvido usando técnicas de geração de colunas.

GILMORE e GOMORY (1961, 1963, 1965) demonstraram que a geração de colunas garantiram a convergência para a solução ótima sem necessitar enumerar todos os possíveis padrões de corte possíveis.

Segundo ARENALES e MORABITO (1995), quando o número de variáveis (colunas) n é muito maior que o número de restrições (linhas) m , é muito trabalhoso pelo método *Simplex* determinar uma nova coluna para entrar na base.

Para subsidiar o entendimento de como foi programado o algoritmo de geração de colunas neste estudo, considere o seguinte problema primal básico de otimização linear citado por ARENALES E MORABITO (1995):

$$\text{Minimize } f(x) = c^T x \quad (34)$$

Sujeito a :

$$\begin{aligned} Ax &= b \\ x &\geq 0 \end{aligned} \quad (35)$$

Em que: $A \in R^{m \times n}$ e posto $(A) = m$.

Para solucionar este sistema, considere uma partição nas colunas de A , tal que $A = (B, N)$ e $B \in R^{m \times m}$, formada por m colunas da matriz A , assumindo A como inversível.

Considere outra partição no vetor das variáveis: $X = (X_B, X_N)$, onde X_B é chamado vetor das *variáveis básicas* e X_N vetor das *variáveis não-básicas*. Isto posto, dado um valor qualquer para as variáveis não-básicas X_N , então X_B pode ser determinado.

$$Ax = b \Leftrightarrow BX_B + NX_N = b \Leftrightarrow X_B = B^{-1}b - B^{-1}NX_N. \quad (36)$$

A solução particular X obtida por: $X_B = B^{-1}b$, $X_N = 0$, é chamada *solução básica*. Se $X_B = B^{-1}b \geq 0$, então a solução básica é *primal-factível* e a partição básica é *primal-factível*.

Considerando a partição nos coeficientes da função objetivo c : $C^T = (C_B, C_N)^T$, chama-se de vetor das variáveis *duais* ou vetor multiplicador *Simplex* o vetor $\lambda \in R^m$, dado por: $\lambda = C_B B^{-1}$.

Quando a condição $(c_j - \lambda a_j) \geq 0, j=1, \dots, n$ é verificada, então λ é uma solução básica *dual-factível*. Neste caso, a partição é *dual-factível*.

Se uma partição básica for *primal* e *dual* factíveis, então as soluções básicas associadas resolvem os problemas *primal* e *dual*, respectivamente, e dizemos que a partição básica é ótima.

Para encontrar a solução ótima para um problema *primal* de otimização linear, ARENALES e MORABITO (1995) descrevem o funcionamento do algoritmo Simplex em duas etapas:

Etapa I:

- Encontra-se uma partição básica primal-factível: $A=(B,N)$. Para isto pode ser necessário o método das variáveis artificiais.
- Faça “PARE” = “FALSO”, Iteração = 0. A variável lógica “PARE” será “FALSO” até que a condição de otimalidade seja verificada. Neste caso, o número total de iterações para encontrar a solução ótima é discriminado.

Etapa II:

Enquanto “PARE” = “FALSO” faça:

1. Determine a solução básica *primal* factível: $x_B = B^{-1}b$.
2. Teste de otimalidade:
 - 2.1. Determine o vetor multiplicador Simplex: $\lambda = C_B B^{-1}$.
 - 2.2. Determine o menor custo relativo:

$$(c_k - \lambda a_k) = \text{mínimo } (c_j - \lambda a_j, j=1, 2, \dots, n).$$
 - 2.3. Se: $(c_k - \lambda a_k) \geq 0$, então a solução na iteração IT é ótima.
 “PARE” = “VERDADEIRO”.
 Senão: ...,
3. Determine a direção Simplex: $y = -B^{-1}a_k$.
 - 3.1. Se: $y \geq 0$, então o problema não tem solução ótima finita.
 “PARE” = “VERDADEIRO”.
 Senão:...,
4. Determine o passo:

$$\varepsilon^0 = -\frac{x_{B_l}^0}{y_l} = \min \left\{ -\frac{x_{B_i}^0}{y_i} \mid y_i < 0, \quad i = 1, \dots, m \right\}$$
5. Atualize a partição básica: $a_{B_l} \leftrightarrow a_k, IT \leftarrow IT+1$.

A questão para o método Simplex é que quando ele lida com problemas de otimização linear onde o número de variáveis n é muito maior que o número de restrições m (por exemplo, m é da ordem de algumas dezenas e n da ordem de vários

milhares ou milhões), a enumeração completa de todas as colunas da matriz torna-se muito custosa computacionalmente.

Todavia, sabe-se da teoria da otimização linear que apenas m colunas da matriz A são necessárias para descrever uma solução ótima, ou seja, não é necessário armazenar toda a matriz A . Assim sendo, considerando $a = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$, como uma coluna de A e supondo-se que o coeficiente na função objetivo seja dado por:

$$c(a) = \gamma_0 + \sum_{i=1}^m \gamma_i \alpha_i \quad (37)$$

o custo relativo da variável, cuja coluna é dada por a , pode ser determinado por:

$$\theta(a) = c(a) - \pi^T a = \gamma_0 + \sum_{i=1}^m \gamma_i \alpha_i - \sum_{i=1}^m \pi_i \alpha_i = \gamma_0 + \sum_{i=1}^m (\gamma_i - \pi_i) \alpha_i \quad (38)$$

e o subproblema para determinar a coluna de A que entrará na base, passa a ser escrito por:

$$\text{Minimize } c(a) = \gamma_0 + \sum_{i=1}^m \gamma_i \alpha_i \quad (39)$$

Sujeito a:

$$a = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m) \in X$$

Desta forma, o algoritmo Simplex original pode ser reformulado, introduzindo-se no passo 2.2 a solução do subproblema (39) para direcionar a geração de colunas.

Segundo ARENALES e MORABITO (1995), quando “*diversos tipos de barras em estoque*” são consideradas, duas características devem ser levadas em conta no procedimento de geração de colunas:

- i) cada coluna do modelo não é mais formada simplesmente por um padrão de corte, mas também contém uma coluna da matriz identidade;
- ii) os padrões de corte homogêneos não produzem mais uma base (agora a base é formada por $m + N$ colunas) e simplesmente completar com as colunas das variáveis de folga do conjunto de restrições pode levar a uma base infactível.

Durante a execução das rotinas de programação, deu-se atenção às recomendações de ARENALES e MORABITO (1995) e um procedimento inédito de geração de colunas aplicado para solução de “problemas de corte e empacotamento” com *diversos tipos de árvores de eucalipto em estoque* foi produzido.

5.2.2 - Algoritmo de Programação Dinâmica

A programação dinâmica (PD), também denominada programação de múltiplos estágios, se caracteriza pela avaliação sucessiva da evolução da otimização em etapas ou estágios, através de uma equação recursiva. Em cada um destes estágios são comparadas várias alternativas ou estados, e é guardado somente o valor – *label* – do melhor deles.

O método da programação dinâmica é citado por vários autores como um dos mais eficientes para resolver o problema de traçamento de árvores, provavelmente porque ele pode considerar funções lineares ou não lineares, incorporando elementos determinísticos ou probabilísticos, e a solução gerada é apropriada para o conjunto de todas as possíveis condições.

O algoritmo de programação dinâmica utilizado neste estudo é uma adaptação do algoritmo desenvolvido por ARCE (2000). Tal algoritmo considera os diferentes tipos de produtos florestais como estágios na otimização de um fuste ou classe diamétrica, algumas posições pré-definidas ao longo do comprimento do fuste (números úteis) como estados, e a equação recursiva possui por finalidade a maximização da receita do fuste ou do volume utilizado.

Na primeira etapa de funcionamento, o algoritmo de PD define ao longo do fuste os pontos onde serão avaliadas as diferentes estratégias de sortimento. Estes pontos são definidos através de um procedimento de geração de números úteis descrito por ARCE (2000) onde são considerados somente os pontos que contribuem efetivamente para a geração de uma nova estratégia de corte, conforme recomenda CARNIERI et al., (1994a).

O primeiro passo é obter o menor dos comprimentos β a partir da lista de diferentes produtos que podem ser retirados, e assim é definido o primeiro número útil

como sendo o início do comprimento útil. Neste passo, é utilizado apenas o comprimento útil do fuste, ou seja, desde a altura do toco até o menor diâmetro na ponta fina, ao invés da altura total.

Uma vez que cada número útil tenha sido encontrado devem ser calculados os pontos de corte ao longo do fuste para cada novo produto i extraído dele t toras ($t = 1, 2, \dots$) desde que a porção remanescente do fuste seja suficiente para retirar dele pelo menos uma tora do produto de menor comprimento β .

Os números úteis encontrados – $F^{(i)}$ – são acrescentados à lista já existente – $U^{(i+1)}$ – removendo quaisquer números repetidos ou equivalentes. Finalmente, o procedimento é repetido até contemplar o último produto ($i = 1$), concluindo a geração dos números úteis, os quais são armazenados em $U^{(1)}$.

O código deste algoritmo pode ser descrito como:

Passo 1. Calcule $\beta = \min\{l_i, i = 1, 2, \dots, m\}$. Defina $U^{(m+1)} = F^{(m+1)} = \{0\}$, e faça $i = m$.

Passo 2. Calcule $F^{(i)} = \{u + t * l_i; u \in U^{(i+1)}, t = 1, 2, \dots, \text{ e } L - (u + t * l_i) \geq \beta\}$

Passo 3. Faça $U^{(i)} = F^{(i)} \cup U^{(i+1)}$. Remova quaisquer números equivalentes de $U^{(i)}$.

Passo 4. Se $i > 1$, faça $i \leftarrow i - 1$ e vá para o Passo 2. Caso contrário, pare.

$U^{(1)}$ contém a lista dos números úteis.

A geração dos números úteis é ilustrada por ARCE (2000) através do seguinte exemplo: seja um fuste de altura total $h = 24,15$ m e comprimento útil $L = 20,40$ m, obtido com a eliminação de $0,20$ m da base devido ao toco e de $3,55$ m do extremo devido à perda por ponta fina. Os $m = 3$ produtos diferentes que devem ser obtidos do talhão em questão, do qual o fuste utilizado como exemplo faz parte, possuem os seguintes comprimentos: $l_1 = 1,20$ m, $l_2 = 2,25$ m, $l_3 = 3,50$ m. Ao realizar uma busca exaustiva a cada 5 cm ao longo do fuste, considerando o máximo divisor comum dos três comprimentos, surgem $(20,40 / 0,05) = 408$ pontos ($0,05; 0,10; 0,15; \dots; 20,35; 20,40$). Através do algoritmo de geração dos números úteis foram obtidos 172 pontos ($1,20; 2,25; 2,40; 3,45; 3,50; 3,60; \dots; 20,40$), o que representa menos da metade dos pontos a avaliar (42% neste caso). Na busca exaustiva a cada 5 cm poderiam ser desconsiderados os primeiros $(1,20 / 0,05) = 24$ pontos, ou seja, $0,05; 0,10; 0,15; \dots; 1,05; 1,10; 1,15$, que representam cortes retirando seções menores do que o menor

dos comprimentos β , mas mesmo assim os 172 pontos avaliados através do MGNU ainda representam menos da metade (45%) destes $(408 - 24) = 384$ pontos.

A ordem com que são examinados os diferentes produtos – estágios – na PD é estabelecida arbitrariamente, e não afeta em modo algum a otimalidade do resultado. Além da receita bruta acumulada em cada um dos números úteis, são armazenados outros *labels* com a finalidade de controlar o comprimento útil remanescente e o diâmetro do fuste correspondente à altura indicada pelo estado. Desta maneira, e em função dos valores dos *labels*, as opções de sortimento ineficazes vão sendo eliminadas durante a evolução da equação recursiva.

A receita bruta da tora P_s , ao invés de ser um valor único por peça – R\$/unidade – como é o caso mais comum nos problemas de corte e empacotamento (PCE), deve ser obtida multiplicando o volume da tora [m^3] pelo preço unitário do produto [R\$/ m^3], tornando-se necessário aplicar as funções de afilamento.

5.3 - MODELOS E EQUAÇÕES

Para estimar a produção volumétrica por tipo de produto em m^3 com casca foram utilizadas equações hipsométricas e equações de afilamento fornecidas por especialistas da área de mensuração florestal da Klabin S/A. Os modelos e as regras de estratificação adotadas pela empresa garantiram uma boa precisão para as estimativas de volume por produto utilizadas pelo sistema.

5.3.1 - Equações Hipsométricas

O modelo hipsométrico fornecido foi o modelo de *Curtis*:

$$\ln Ht = \beta_0 + \beta_1(1/DAP) \quad (33)$$

Em que:

β_s = parâmetros a serem estimados;

DAP = centro de classe de diâmetro (cm);

Ht = altura comercial estimada por centro de classe diamétrica (m);

Na TABELA 4 são apresentados os coeficientes e a qualidade do ajuste para cada estrato florestal.

TABELA 4 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE PARA O MODELO HIPNOMÉTRICO DE CURTIS

Espécie	Manejo	Idade (anos)	Coef. Curtis		Ajuste	
			B_0	B_1	R^2 ajust. (%)	S_{yx} (%)
<i>E. dunnii</i>	semdesb.	18-19	3,964	-12,103	69,3	14,4
<i>E. dunnii</i>	1ºdesb.	18-19	4,001	-11,667	95,6	7,9
<i>E. dunnii</i>	semdesb.	29-30	4,225	-15,805	82,7	10,2
<i>E. grandis</i>	semdesb.	25-26	4,402	-21,386	92,9	6,9
<i>E. grandis</i>	2ºdesb.	25-26	4,402	-21,386	92,9	6,9
<i>E. grandis</i>	Regen.01	2-24	3,931	-10,676	84,0	8,1
<i>E. grandis</i>	Regen.01	25-40	4,402	-21,386	92,9	6,9
<i>E. grandis</i>	Regen.02	-	4,402	-21,386	92,9	6,9
<i>E. saligna</i>	-	2-40	3,727	-7,945	80,5	8,1

FONTES: Departamento de Inventário Florestal– Klabin S/A

5.3.2 - Equações de Afilamento

O polinômio de 5º grau foi o modelo utilizado para ajuste das equações de afilamento. A expressão (7) apresenta a conformação básica do modelo:

$$\frac{d_i}{Dap} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \quad (31)$$

Isolando-se o “ d_i ” obtém-se a função (8), que permite estimar o diâmetro correspondente a qualquer altura da árvore:

$$d_i = Dap \times \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h_i}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{h_i}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h_i}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h_i}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h_i}{h}\right)^5 \right] \quad (32)$$

Em que:

β_s = parâmetros a serem estimados; d_i = diâmetro encontrado em uma determinada altura h_i (cm); Dap = diâmetro a altura do peito (cm); h = altura comercial (m); h_i = alturas relativas (m).

A seguir, na TABELA 5, são apresentados os estratos, os coeficientes do modelo e os indicadores de ajuste obtidos.

TABELA 5 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AJUSTE DO POLINÔMIO DE 5º GRAU USADO PARA ESTIMAR OS VOLUMES POR SORTIMENTO POR ESTRATO

Espécie	Manejo	Classe de DAP (cm)	Coeficientes do Polinômio de 5º grau						Ajuste	
			B_0	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	R^2 ajust. (%)	S_{yx} (%)
<i>Edu</i>	semdesb.	0-11,9	1,281	-4,435	17,699	-36,520	33,625	-11,657	97,5	5,9
<i>Edu</i>	semdesb.	12-19,9	1,209	-3,863	15,835	-34,362	33,379	-12,211	97,4	6,4
<i>Edu</i>	semdesb.	> 20	1,157	-3,395	13,219	-28,103	26,730	-9,619	97,2	7,4
<i>Edu</i>	1ºdesb.	0-59,9	1,153	-3,629	14,058	-28,830	26,241	-9,000	96,4	7,9
<i>Edu</i>	1ºdesb.	60-74,9	1,097	-2,960	10,708	-20,671	16,083	-4,256	98,1	5,5
<i>Edu</i>	1ºdesb.	75-150	1,139	-4,521	19,515	-42,540	39,763	-13,362	97,4	8,7
<i>Egr</i>	semdesb.	0-39,9	1,131	-2,852	11,473	-26,213	26,667	-10,214	97,0	7,2
<i>Egr</i>	semdesb.	40-150	1,110	-2,699	9,881	-20,667	19,154	-6,795	97,8	6,4
<i>Egr</i>	Regen.01	0-9,9	1,309	-4,982	22,242	-48,472	45,810	-15,916	86,2	8,6
<i>Egr</i>	Regen.01	10-34,9	1,179	-3,505	14,624	-32,577	32,422	-12,156	96,4	6,4
<i>Egr</i>	Regen.01	35-150	1,135	-3,061	11,520	-23,409	20,956	-7,152	97,5	6,1
<i>Egr</i>	Regen.02.	0-9,9	1,309	-4,982	22,242	-48,472	45,810	-15,916	86,2	8,6
<i>Egr</i>	Regen.02	10-34,9	1,179	-3,505	14,624	-32,577	32,422	-12,156	96,4	6,4
<i>Egr</i>	Regen.02	35-150	1,135	-3,061	11,520	-23,409	20,956	-7,152	97,5	6,1
<i>Egr</i>	2ºdesb.	0-24,9	1,170	-3,332	14,103	-32,402	32,927	-12,476	96,3	7,8
<i>Egr</i>	2ºdesb.	25-49,9	1,116	-2,753	10,818	-24,200	23,991	-8,982	97,3	7,1
<i>Egr</i>	2ºdesb.	50-150	1,094	-2,747	9,714	-18,733	15,738	-5,078	97,7	6,6
<i>Esa</i>	Regen.01	0-9,9	1,309	-4,982	22,242	-48,472	45,810	-15,916	86,2	8,6
<i>Esa</i>	Regen.01	10-34,9	1,179	-3,505	14,624	-32,577	32,422	-12,156	96,4	6,4
<i>Esa</i>	Regen.01	35-150	1,135	-3,061	11,520	-23,409	20,956	-7,152	97,5	6,1
<i>Esa</i>	Regen.02.	0-9,9	1,309	-4,982	22,242	-48,472	45,810	-15,916	86,2	8,6
<i>Esa</i>	Regen.02	10-34,9	1,179	-3,505	14,624	-32,577	32,422	-12,156	96,4	6,4
<i>Esa</i>	Regen.02	35-150	1,135	-3,061	11,520	-23,409	20,956	-7,152	97,5	6,1

FONTE: Departamento de Inventário Florestal– Klabin S/A

5.4 - DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL

Todas as rotinas de programação desenvolvidas para construir o protótipo utilizado neste estudo foram programadas em ambiente *Visual Studio*.

A seguir, na FIGURA 5, é apresentado um fluxograma simplificado sobre o funcionamento do protótipo.

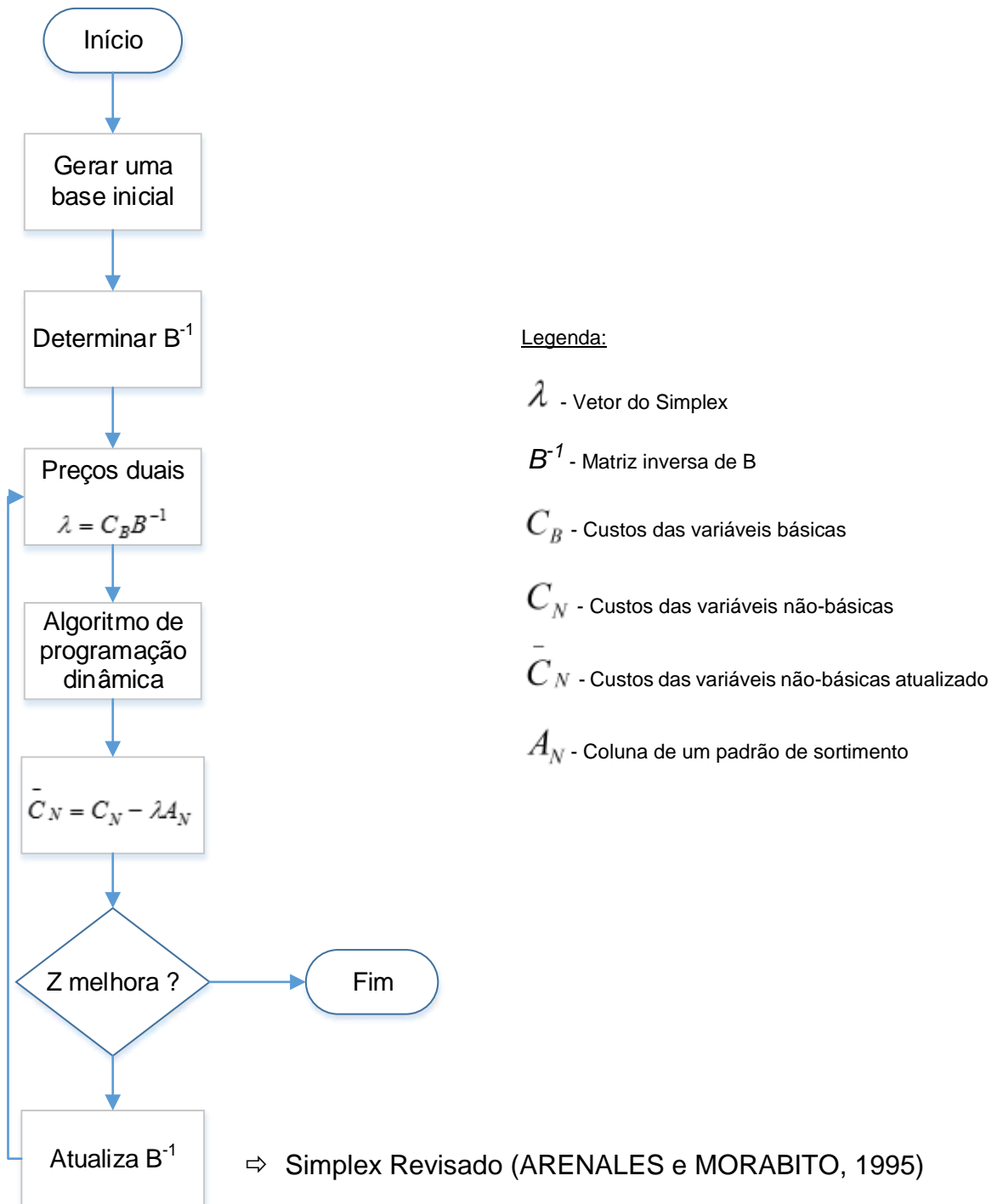


FIGURA 5 – FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO SISTEMA

As informações requeridas para rodar um cenário de otimização são:

- A frequência de árvores por classe diamétrica
- Os coeficientes das equações hipsométricas

- Os coeficientes das equações de afilamento
- O cadastro do diâmetro na ponta fina, ponta grossa e comprimento dos produtos florestais
- A lista de preços por produto florestal
- A lista de pedidos por produto florestal (Volume em m³)

Após encontrar a solução ótima, o protótipo gera as seguintes saídas:

- O número de árvores utilizadas por classe diamétrica
- Os padrões de corte designados por classe diamétrica
- Os volumes estimados por produto e classe diamétrica
- Relata as classes onde não houve intervenção
- Relata o % de atendimento da carteira
- de pedidos por produto
- Fornece o valor da função objetivo e o número de iterações

6 - CENÁRIOS ELABORADOS PARA TESTAR O PROTÓTIPO

Para avaliar o desempenho e os resultados gerados pelo protótipo foram gerados 9 cenários de mercado. Para cada espécie foram construídos três cenários distintos. Cada cenário é constituído por uma lista de pedidos e uma lista de preços por produto. As listas de pedidos foram geradas considerando demandas menores do que o estoque estimado de produtos em cada espécie.

As demandas por produto florestal são equivalentes nos cenários dentro de cada espécie. As mudanças efetivas ocorrem sobre os preços por tipo de produto, considerando as seguintes situações:

- “Mercado atual”: preços médios por tipo de tora praticado no mercado de atuação da Klabin em 2012;
- “Supervalorização de toras curtas”: simula uma supervalorização das toras curtas, com comprimento menor que 4 metros e mantêm os preços médios para os demais tipos de toras;

- “Supervalorização de toras longas”: simula uma supervalorização das toras longas, com comprimento maior que 4 metros e mantêm os preços médios para os demais tipos de toras;

6.1 – Cenários de Mercado para Povoamentos de *Eucalyptus dunnii*

A distribuição diamétrica dos povoamentos de *Eucalyptus dunnii* é apresentada na TABELA 6. Explorando a base de dados, notou-se que esta é a espécie que apresenta a maior oferta de árvores e o maior diâmetro médio quadrático neste estudo.

TABELA 6 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii*

Classe diamétrica (cm)	Altura estimada (m)	Frequência de árvores
7	9,0	240
9	13,7	2.971
11	17,8	4.618
13	21,3	4.368
15	24,3	4.642
17	26,9	2.010
19	29,1	2.303
21	31,1	3.362
23	32,8	3.196
25	34,2	3.296
27	35,6	4.125
29	36,8	5.016
31	37,9	6.199
33	38,9	2.716
35	39,7	3.981
37	40,5	2.075
39	41,3	2.410
41	42,0	2.177
43	42,6	1.244
45	43,1	1.171
47	43,7	591
49	44,2	112
51	44,6	196
Total		63.019

FONTE: O autor

Na TABELA 7 é apresentada a carteira de pedidos, incluindo os preços de venda por produto para cada cenário. Assumiu-se a premissa de que os preços das toras de *Eucalyptus dunni* fossem 15% menores do que os preços atribuídos para os produtos de *Eucalyptus grandis*.

TABELA 7 – CARTEIRA DE PEDIDOS E PREÇOS POR CENÁRIO - *Eucalyptus dunni*

Nº Prod.	Sortimento	Comp. (m)	Volume Pedido (m³ c.c)	Preço de Mercado R\$/m³ c.c	Preço SupvalorTC.		Preço SupvalorTL.	
					R\$/m³ c.c	valoriz.	R\$/m³ c.c	valoriz.
01	[> 38]	3,05	600	136,0	191,3	41%	136,0	0%
02	[> 38]	2,90	600	144,5	212,5	47%	144,5	0%
03	[> 38]	2,65	2.400	153,0	238,0	55%	153,0	0%
	Subtotal		3.600					
04	[32-38]	3,05	1.000	108,8	161,5	48%	108,8	0%
05	[32-38]	2,90	2.000	110,5	170,0	54%	110,5	0%
06	[32-38]	2,65	4.000	114,8	178,5	55%	114,8	0%
	Subtotal		7.000					
07	[28-32]	7,36	1.600	96,1	96,1	0%	174,3	81%
08	[28-32]	6,05	2.000	85,9	85,9	0%	157,3	83%
09	[28-32]	5,30	1.200	85,9	85,9	0%	148,8	73%
10	[28-32]	3,70	1.200	100,3	148,8	48%	100,3	0%
11	[28-32]	3,05	800	102,0	157,3	54%	102,0	0%
	Subtotal		6.800					
12	[18-28]	7,36	8.000	79,9	79,9	0%	153,0	91%
13	[18-28]	6,05	4.000	78,2	78,2	0%	144,5	85%
14	[18-28]	5,30	3.200	76,5	76,5	0%	136,0	78%
15	[18-28]	3,70	2.000	80,8	127,5	58%	80,8	0%
16	[18-28]	3,05	1.200	80,8	136,0	68%	80,8	0%
	Subtotal		18.400					
17	[18-28]	7,20	6.000	84,0	84,0	0%	84,0	0%
18	[18-28]	3,60	2.000	90,0	90,0	0%	90,0	0%
19	[18-28]	2,40	1.400	92,0	92,0	0%	92,0	0%
20	-	1,00	400	1,0	1,0	0%	1,0	0%
	Subtotal		9.800					
	Total		45.600					

FONTE: O autor

6.2 – Cenários para Povoamentos de *Eucalyptus saligna*

A distribuição diamétrica das florestas de *Eucalyptus saligna* é apresentado na TABELA 8.

TABELA 8 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus saligna*

Classe diamétrica (cm)	Altura estimada (m)	Frequência de árvores
7	11,6	168
9	14,5	1.947
11	17,4	4.446
13	20,7	5.645
15	23,6	4.584
17	26,1	4.160
19	28,3	3.753
21	30,3	2.838
23	32,3	2.346
25	33,9	2.191
27	34,8	1.375
29	36,0	1.180
31	37,1	1.152
33	40,7	580
35	40,0	830
37	39,7	338
39	43,7	1.250
41	41,3	467
43	44,1	723
45	45,1	693
47	50,6	219
49	39,6	662
51	45,7	1.427
Total		42.974

FONTE: O autor

Na TABELA 9 é apresentada a carteira de pedidos para produtos de *Eucalyptus saligna*. Os percentuais de valorização dos produtos em relação aos preços considerados no cenário “mercado atual” também são apresentados.

TABELA 9 – CARTEIRA DE PEDIDOS E PREÇOS POR CENÁRIO - *Eucalyptus saligna*

Nº Prod.	Sortimento	Comp. (m)	Volume Pedido (m³ c.c)	Preço de Mercado R\$/m³ c.c	Preço SupvalorTC		Preço SupvalorTL	
					R\$/m³ c.c	valoriz.	R\$/m³ c.c	valoriz.
01	[>38]	7,36	800	146,7	146,7	0%	225,0	53%
02	[>38]	6,05	3.600	133,2	133,2	0%	216,0	62%
03	[>38]	5,30	400	131,4	131,4	0%	198,0	51%
	Subtotal		4.800					
04	[32-38]	3,70	1.600	115,2	162,0	41%	115,2	0%
05	[32-38]	3,05	400	115,2	171,0	48%	115,2	0%
06	[32-38]	2,90	400	117,0	180,0	54%	117,0	0%
07	[32-38]	2,65	320	121,5	189,0	55%	121,5	0%
	Subtotal		2.720					
08	[28-32]	3,70	800	106,2	157,5	48%	106,2	0%
09	[28-32]	3,05	400	108,0	166,5	54%	108,0	0%
10	[28-32]	2,90	400	109,8	175,5	60%	109,8	0%
11	[28-32]	2,65	320	117,0	178,2	52%	117,0	0%
	Subtotal		1.920					
12	[18-28]	7,36	1.200	84,6	84,6	0%	162,0	91%
13	[18-28]	6,05	2.000	82,8	82,8	0%	153,0	85%
14	[18-28]	5,30	800	81,0	81,0	0%	144,0	78%
15	[18-28]	3,70	200	85,5	135,0	58%	85,5	0%
16	[18-28]	3,05	200	85,5	144,0	68%	85,5	0%
17	[18-28]	2,90	600	85,5	153,0	79%	85,5	0%
18	[18-28]	3,70	320	85,5	162,0	89%	85,5	0%
	Subtotal		5.320					
19	[8-18]	7,20	4.800	84,0	84,0	0%	84,0	0%
20	[8-18]	3,60	600	90,0	90,0	0%	90,0	0%
21	[8-18]	2,40	400	92,0	92,0	0%	92,0	0%
22	-	1,00	400	1,0	1,0	0%	1,0	0%
	Subtotal		6.200					
	Total		20.960					

FONTE: O autor

6.3 – Cenários para Povoamentos de *Eucalyptus grandis*

O perfil das florestas de *Eucalyptus grandis* é apresentado na TABELA 10.

TABELA 10 – FREQUÊNCIA DE ÁRVORES OBSERVADA E ALTURA TOTAL ESTIMADA POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA OS POVOAMENTOS DE *Eucalyptus grandis*

Classe diamétrica (cm)	Altura estimada (m)	Frequência de árvores
7	11,1	311
9	9,6	2.007
11	13,6	3.091
13	17,4	4.163
15	20,7	5.001
17	24,0	3.532
19	27,1	3.357
21	29,8	3.912
23	32,2	1.938
25	34,3	1.581
27	36,2	980
29	38,0	1.284
31	39,7	1.457
33	42,8	862
35	44,3	938
37	45,8	752
39	47,18	1.465
41	48,46	903
43	47,67	1.328
45	50,76	1.000
47	51,8	995
49	52,77	947
51	52,31	2.732
Total		44.536

FONTE: O autor

Atualmente, as toras de *Eucalyptus grandis* ainda são as preferidas por serrarias e laminadoras. Em razão disto, os preços médios praticados no mercado de toras de eucalipto são reflexos da comercialização desta espécie em predominância.

TABELA 11 – CARTEIRA DE PEDIDOS E PREÇOS POR CENÁRIO - *Eucalyptus grandis*

Nº Prod.	Sortimento	Compr. (m)	Volume Pedido (m³ c.c)	Preço de Mercado R\$/m³ c.c	Preço SupvalorTC		Preço SupvalorTL	
					R\$/m³ c.c	valorz.	R\$/m³ c.c	valorz.
01	[>38]	7,36	4.444	163,0	163,0	0%	250,0	53%
02	[>38]	6,05	7.407	148,0	148,0	0%	240,0	62%
	Subtotal		11.851					
03	[32-38]	7,36	1.111	126,0	126,0	0%	230,0	82%
04	[32-38]	6,05	3.704	128,0	128,0	0%	215,0	68%
05	[32-38]	5,30	370	123,0	123,0	0%	205,0	67%
06	[32-38]	3,70	556	128,0	180,0	41%	128,0	0%
	Subtotal		5.741					
07	[28-32]	3,70	1.852	118,0	175,0	48%	118,0	0%
08	[28-32]	3,05	741	120,0	185,0	54%	120,0	0%
09	[28-32]	2,90	741	122,0	195,0	60%	122,0	0%
10	[28-32]	2,65	185	130,0	198,0	52%	130,0	0%
	Subtotal		3.519					
11	[18-28]	7,36	1.481	94,0	94,0	0%	180,0	48%
12	[18-28]	6,05	2.963	92,0	92,0	0%	170,0	46%
13	[18-28]	5,30	1.111	90,0	90,0	0%	160,0	44%
14	[18-28]	3,70	926	95,0	150,0	58%	95,0	0%
15	[18-28]	3,05	556	95,0	160,0	68%	95,0	0%
16	[18-28]	2,90	370	95,0	170,0	79%	95,0	0%
17	[18-28]	2,65	370	95,0	180,0	89%	95,0	0%
	Subtotal		7.777					
18	[8-18]	7,20	3.704	84,0	84,0	0%	84,0	0%
19	[8-18]	3,60	1.852	90,0	90,0	0%	90,0	0%
20	[8-18]	2,40	741	92,0	92,0	0%	92,0	0%
21	-	1,00	741	1,0	1,0	0%	1,0	0%
	Subtotal		7.038					
	Total		35.926					

FONTE: O autor

7 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliação, comparação e discussão dos resultados gerados pelo sistema, para cada um dos 3 cenários processados por espécie foram definidos os seguintes indicadores:

- Nº de árvores utilizadas por classe diamétrica
- Nº de padrões de corte aplicados por classe diamétrica
- Nº total de padrões de corte por cenário
- Nº de produtos obtidos em cada classe diamétrica
- Volume por produto obtido em cada classe diamétrica

7.1 – Resultados da Otimização para Povoamentos de *Eucalyptus dunnii*

A TABELA 12 apresenta um resumo geral dos resultados otimizados encontrados por cenário para os povoamentos de *Eucalyptus dunnii*.

Observou-se que o número total de padrões de corte designados por cenário foram similares, em torno de 32. Indiscutivelmente, este é um valor alto do ponto de vista operacional. Além disto, para atender a carteira de pedidos o modelo aproveitou apenas cerca de 50% do total de árvores disponíveis para processamento, intensificando o aproveitamento de árvores a partir do centro de classe diamétrica com 27 cm.

Em média, dois padrões de corte distintos foram designados por classe diamétrica. Sete padrões de corte foram designados para o centro de classe diamétrica com 41 cm no cenário mercado atual. Certamente, se uma restrição fosse adicionada ao modelo de PL para restringir o número máximo de padrões de corte designados por classe diamétrica, situações como esta poderiam ser evitadas.

Considerando as características das árvores não usadas, poder-se-ia considerar novos pedidos (produtos), ou mesmo, aumentar as demandas dos pedidos existentes para forçar o processamento de todas as árvores existentes.

TABELA 12 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA *Eucalyptus dunnii*

<i>Eucalyptus dunnii</i>		Cenário Mercado Atual			Cenário Supervalorização de Toras Curtas			Cenário Supervalorização de Toras Longas		
Classe diamétrica	Arvs Disponíveis	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC
7	240		240			240			240	
9	2,971		2,971			2,971			2,971	
11	4,618	2,955	1,663	1		4,618		364	4,254	1
13	4,368		4,368			4,368			4,368	
15	4,642		4,642			4,642			4,642	
17	2,010		2,010			2,010			2,010	
19	2,303		2,303		503	1,800	1	820	1,483	1
21	3,362		3,362			3,362		3,362	0	1
23	3,196		3,196		1,688	1,508	1		3,196	
25	3,296		3,296		854	2,442	1		3,296	
27	4,125	1,807	2,318	1		4,125			4,125	
29	5,016	5,016	0	2	5,016	0	1	5,016	0	2
31	6,199	6,199	0	4	6,199	0	3	6,199	0	4
33	2,716	2,716	0	1	2,716	0	2	2,716	0	2
35	3,981	3,981	0	1	3,981	0	3	3,981	0	5
37	2,075	2,075	0	2	2,075	0	2	2,075	0	1
39	2,410	2,410	0	2	2,410	0	4	2,410	0	1
41	2,177	2,177	0	7	2,177	0	1	2,177	0	2
43	1,244	1,244	0	2	1,244	0	3	1,244	0	3
45	1,171	1,171	0	2	1,171	0	5	1,171	0	4
47	591	591	0	2	591	0	1	591	0	4
49	112	112	0	1	112	0	1	112	0	1
51	196	196	0	4	196	0	3	196	0	1
Total	63,019	32,650	30,369	32	30,933	32,086	32	32,434	30,585	33

FONTE: Protótipo

No GRÁFICO 4, o número de padrões de corte designados por classe diamétrica em cada cenário foram plotados para análise. Pelo comportamento das curvas, imediatamente nota-se que o protótipo mostrou-se altamente sensível às variações nos preços dos produtos florestais.

Ao analisar o comportamento dos padrões de corte no cenário “mercado atual” percebe-se que ele distingue-se razoavelmente dos demais cenários, principalmente em razão da escolha de sete padrões de corte para processamento das árvores da classe diamétrica 41 cm e da escolha de 4 padrões de corte para processamento das árvores de 51 cm.

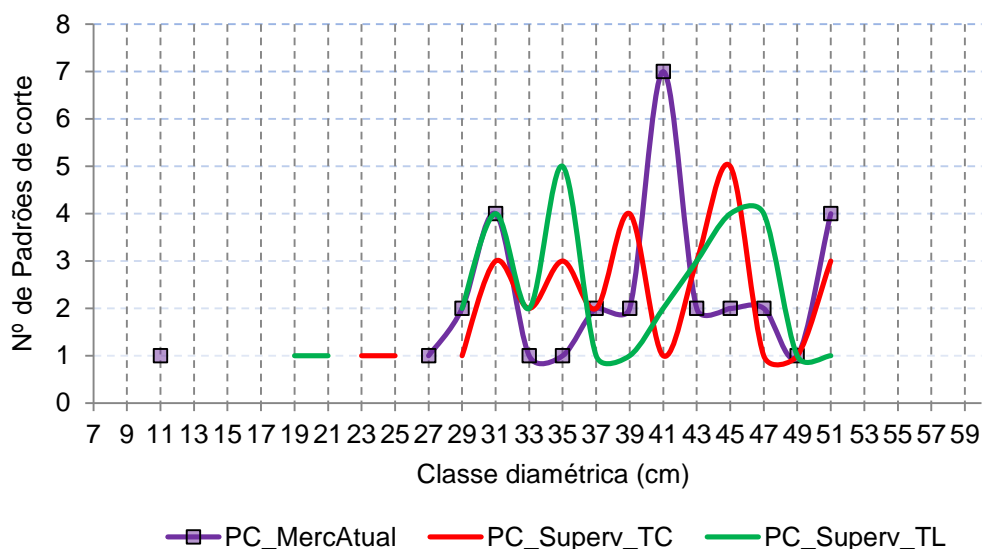


GRÁFICO 4 –NÚMERO DE PADRÕES DE CORTE DESIGNADOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO - *Eucalyptus dunnii*

No cenário “supervalorização de toras longas” o modelo aplicou um número de padrões de corte maior ou igual ao que foi designado para o cenário “supervalorização de toras curtas” para as árvores das classes diamétricas até 35 cm.

Quatro padrões de corte foram aplicados para as árvores da classe diamétrica com 47 cm no cenário “supervalorização de toras longas” contra apenas 1 na mesma classe diamétrica no cenário “supervalorização de toras curtas”.

Um sumário sobre o número de produtos florestais obtidos após o processamento dos padrões de corte designados é apresentado na TABELA 13. Ao analisar esta tabela é possível ter uma noção sobre a realidade operacional que será vivenciada pelas áreas de colheita, carregamento e transporte florestal.

Por exemplo, obter dezoito produtos de uma única classe diamétrica é praticamente inviável. Sendo assim, seria importante adicionar uma restrição ao modelo para limitar o número máximo de produtos a serem obtidos por classe diamétrica.

TABELA 13 –NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO – *Eucalyptus dunnii*

Classe diamétrica (cm)	Cenário Mercado Atual	Cenário SupvalorTC.	Cenário SupvalorTL.
7	-	-	-
9	-	-	-
11	3	-	2
13	-	-	-
15	-	-	-
17	-	-	-
19	-	3	3
21	-	-	4
23	-	3	-
25	-	5	-
27	5	-	-
29	8	3	-
31	8	7	7
33	7	4	6
35	6	10	13
37	9	10	6
39	11	12	7
41	18	7	8
43	11	14	13
45	10	16	11
47	13	8	13
49	8	6	7
51	11	13	6
Média	9	8	8
Mínimo	3	3	2
Máximo	18	16	13

FONTE: Protótipo

As TABELAS 14, 15 e 16 foram elaboradas com o propósito de mapear os volumes por produto que são obtidos em cada classe diamétrica nos diferentes cenários. Desta forma, é possível analisar os reflexos dos padrões de corte aplicados por classe diamétrica em cada cenário. Por exemplo, no cenário “mercado atual”, para atender o pedido de 600 m³ do produto C3-38/2.9, volumes foram produzidos nas classes diamétricas 41, 43 e 47 cm. No cenário “supervalorização de toras curtas” o

mesmo pedido foi atendido utilizando apenas árvores da classe diamétrica 45 cm, enquanto que no cenário “supervalorização de toras longas” este pedido foi atendido com o processamento de arvores das classes diamétricas de 43 e 47 cm.

TABELA 14 –VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus dunnii* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)														Total
	11	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	352	210	0	38	0	0	600
C3-38/2.9	0	0	0	0	0	0	0	0	180	370	0	50	0	0	600
C3-38/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	358	0	963	654	186	240	2.400
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	0	0	622	162	0	0	179	38	0	1.000
C2-32/2.90	0	0	0	0	0	1191	0	0	269	278	229	0	32	0	2.000
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	1.057	911	418	778	496	270	0	63	4.000
C1-28/7.36	0	0	0	0	0	0	192	0	0	699	389	48	65	206	1.600
C1-28/6.05	0	0	0	0	0	0	734	415	307	0	271	272	0	0	2.000
C1-28/5.30	0	0	0	0	1.170	0	0	0	30	0	0	0	0	0	1.200
C1-28/3.70	0	0	0	0	0	0	0	838	327	0	0	0	0	36	1.200
C1-28/3.05	0	0	0	376	0	0	0	0	424	0	0	0	0	0	800
C0-18/7.36	0	654	0	0	1.064	3.447	826	1.012	0	469	411	23	0	94	8.000
C0-18/6.05	0	0	1.122	1.946	658	0	0	0	116	0	0	159	0	0	4.000
C0-18/5.30	0	315	1.194	450	0	729	339	0	173	0	0	0	0	0	3.200
C0-18/3.70	0	0	1.343	0	0	0	0	222	294	95	0	0	37	9	2.000
C0-18/3.05	0	0	167	399	246	0	45	120	58	41	119	0	0	4	1.200
Ce-8/7.20	0	0	722	2.528	349	537	98	433	1.128	0	67	93	0	46	6.000
Ce-8/3.60	90	403	122	544	75	113	296	43	178	92	0	27	9	10	2.000
Ce-8/2.40	40	70	125	747	0	0	0	83	13	60	255	1	6	1	1.400
Energia	73	24	64	75	31	43	21	23	20	11	10	4	1	1	400
Total	203	1.467	4.859	4.859	3.593	6.060	3.608	4.722	4.804	3.103	3.210	1.818	374	710	45.600

FONTE: Protótipo

TABELA 15 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus dunnii* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)																Total
	19	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	180	203	0	167	50	600
C3-38/2.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	600	0	0	0	600
C3-38/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	836	369	206	734	0	253	2.400
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	0	0	194	456	141	0	0	0	201	0	9	1.000
C2-32/2.9	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	1.268	129	220	0	102	206	2.000
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	0	863	424	1.068	0	898	443	304	0	0	4.000
C1-28/7.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	1.201	43	196	0	0	48	1.600
C1-28/6.05	0	0	0	0	0	0	0	0	326	822	0	385	138	272	0	56	2.000
C1-28/5.3	0	0	0	0	0	0	0	1.200	0	0	0	0	0	0	0	0	1.200
C1-28/3.7	0	0	0	0	0	0	0	170	732	224	0	0	74	0	0	0	1.200
C1-28/3.05	0	0	0	0	0	800	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800
C0-18/7.36	0	0	0	0	3.478	0	0	2.235	533	83	862	695	16	0	60	39	8.000
C0-18/6.05	0	0	0	0	0	0	2.559	133	0	1.129	0	0	0	179	0	0	4.000
C0-18/5.3	0	341	205	0	0	2.414	0	0	0	0	0	16	210	0	0	14	3.200
C0-18/3.7	0	0	100	0	0	0	0	0	418	591	282	83	497	0	20	10	2.000
C0-18/3.05	0	0	71	0	0	64	0	456	303	0	0	94	204	0	0	8	1.200
Ce-8/7.2	0	0	185	0	1.297	3.486	651	0	0	63	0	121	87	105	0	6	6.000
Ce-8/3.6	142	0	0	0	0	33	351	683	224	370	0	53	83	19	24	17	2.000
Ce-8/2.4	21	555	0	0	0	186	0	0	168	92	333	23	23	0	0	0	1.400
Energia	12	27	13	0	83	82	31	51	23	27	22	11	11	4	1	2	400
Total	174	923	574	923	4.858	4.858	7.064	6.060	3.608	4.722	4.804	3.100	3.210	1.818	374	717	45.600

FONTE: Protótipo

TABELA 16 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus dunnii* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS LONGAS

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)															Total
	11	19	21	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	284	317	0	0	0	600
C3-38/2.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	301	0	299	0	0	600
C3-38/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	836	0	677	283	186	417	2.400
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	0	0	727	0	0	0	273	0	0	0	1.000
C2-32/2.9	0	0	0	0	0	0	844	0	0	0	589	0	448	0	118	2.000
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	183	0	1469	1.174	401	683	0	90	0	4.000
C1-28/7.36	0	0	0	0	0	0	6	0	1344	0	0	0	249	0	0	1.600
C1-28/6.05	0	0	0	0	0	0	265	984	0	0	125	534	0	0	92	2.000
C1-28/5.3	0	0	0	0	0	632	254	0	0	0	270	0	0	44	0	1.200
C1-28/3.7	0	0	0	0	644	0	512	0	0	0	0	0	44	0	0	1.200
C1-28/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	401	255	0	144	0	0	800
C0-18/7.36	0	0	0	0	697	991	1.291	1.511	1004	1.536	241	468	197	0	64	8.000
C0-18/6.05	0	0	0	1.747	0	1.306	0	0	533	0	381	0	0	33	0	4.000
C0-18/5.3	0	0	0	0	3.171	0	7	0	0	0	0	0	21	0	0	3.200
C0-18/3.7	0	0	423	0	0	0	1.341	0	0	215	0	0	21	0	0	2.000
C0-18/3.05	0	0	0	0	1.124	0	0	0	0	0	0	68	8	0	0	1.200
Ce-8/7.2	0	0	872	2.025	886	332	613	300	306	552	20	75	0	18	0	6.000
Ce-8/3.6	11	85	93	940	0	0	554	63	0	0	179	63	13	0	0	2.000
Ce-8/2.4	0	173	0	54	453	297	121	0	42	62	47	41	83	2	24	1.400
Energia	14	26	69	91	88	35	68	23	24	28	12	11	5	1	2	496
Total	25	283	1.457	4.858	4.858	3.592	6.060	3.608	4.722	4.804	3.105	3.210	1.815	374	717	45.600

FONTE: Protótipo

A TABELA 17 foi elaborada com o objetivo de demonstrar a composição dos diferentes padrões de corte designados por classe diamétrica. A título de demonstração, utilizou-se apenas o cenário “mercado atual” rodado para os povoamentos de *Eucalyptus dunnii*.

Para realizar a leitura desta tabela, primeiro, deve-se verificar o número de padrões de corte designados dentro de cada classe diamétrica, representado como colunas da TABELA 17. A seguir, pode-se verificar os respectivos produtos que foram produzidos percorrendo as linhas assinaladas com um “x”. Como exemplo, é possível observar que sete padrões de corte distintos foram aplicados sobre a classe diamétrica de 41 cm e um total de dezoito produtos foram produzidos nesta classe.

TABELA 17 – MAPEAMENTO DOS PADRÕES DE CORTE DESIGNADOS POR CLASSE DIAMÉTRICA PARA O CENÁRIO MERCADO ATUAL – *Eucalyptus dunnii*

Código do Produto	Mapa dos padrões de corte designados por classe diamétrica (cm)																			
	11	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51						
C3-38/3.05									x		x									
C3-38/2.9									x		x									
C3-38/2.65									x		x									
C2-32/3.05									x	x										
C2-32/2.9									x		x									
C2-32/2.65									x	x										
C1-28/7.36																				
C1-28/6.05									x	x										
C1-28/5.3									x											
C1-28/3.7									x	x										
C1-28/3.05																				
C0-18/7.36																				
C0-18/6.05																				
C0-18/5.3																				
C0-18/3.7																				
C0-18/3.05																				
Ce-8/7.2																				
Ce-8/3.6																				
Ce-8/2.4																				
Energia																				
Total por Classe	3	5	5	6	3	4	4	6	7	6	5	6	7	7	6	7	7	6	6	7

FONTE: O autor

7.2 – Resultados da Otimização para Povoamentos de *Eucalyptus saligna*

Para atender as demandas definidas na carteira de pedidos para produtos de *Eucalyptus saligna* o sistema utilizou cerca de 50% das árvores disponíveis no cenário mercado atual. Ao aplicar um aumento relevante nos preços das toras curtas ou nos preços de toras longas, o protótipo reduziu o número de árvores utilizadas, aproveitando apenas cerca de 37 a 40% das árvores. A quantidade total de padrões de corte prescritos foi similar entre os cenários simulados, conforme observado na TABELA 18.

TABELA 18 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA *Eucalyptus saligna*

<i>Eucalyptus saligna</i>		Cenário Mercado Atual			Cenário Supervalorização de Toras Curtas			Cenário Supervalorização de Toras Longas		
Classe diamétrica	Arvs Disponíveis	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC
7	168		168			168			168	
9	1.947	1.947	0	1	1.947	0	1	1.947	0	1
11	4.446	4.446	0	1	3.032	1.414	1	4.446	0	1
13	5.645	5.645	0	1		5.645			5.645	
15	4.584	2.149	2.435	2		4.584			4.584	
17	4.160		4.160			4.160			4.160	
19	3.753		3.753		3.753	0	1	3.753	0	1
21	2.838		2.838			2.838			2.838	
23	2.346	262	2.084	1		2.346			2.346	
25	2.191		2.191			2.191			2.191	
27	1.375		1.375			1.375			1.375	
29	1.180		1.180			1.180			1.180	
31	1.152		1.152			1.152			1.152	
33	580	580	0	2	580	0	3	580	0	1
35	830	830	0	3	830	0	2	830	0	1
37	338	338	0	1	338	0	2	338	0	1
39	1.250	1.250	0	3	1.250	0	6	1.250	0	3
41	467	467	0	3	467	0	2	467	0	2
43	723	723	0	4	723	0	6	723	0	2
45	693	693	0	2	693	0	3	693	0	4
47	219	219	0	4	219	0	1	219	0	3
49	662	662	0	3	662	0	3	662	0	6
51	1.427	1.427	0	4	1.427	0	3	1.427	0	8
Total	42.974	21.638	21.336	35	15.921	27.053	34	16.540	26.434	34

FONTE: Protótipo

A TABELA 19 demonstra que o número médio de produtos obtidos por classe diamétrica foi similar nos diferentes cenários. O número máximo observado de produtos extraídos de uma mesma classe diamétrica foi de dezesseis. Novamente, demonstrando a oportunidade de inserir restrições no modelo principal para limitar o número de padrões de corte designados por classe diamétrica.

TABELA 19 – NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA EM CADA CENÁRIO – *Eucalyptus saligna*

Classe diamétrica (cm)	Cenário Mercado Atual	Cenário SupvalorTC.	Cenário SupvalorTL.
7	-	-	-
9	2	1	1
11	3	2	2
13	3	-	-
15	3	-	-
17	-	-	-
19	-	4	4
21	-	-	-
23	5	-	-
25	-	-	-
27	-	-	-
29	-	-	-
31	-	-	-
33	9	7	4
35	11	7	4
37	6	6	4
39	10	12	10
41	12	4	8
43	15	13	8
45	11	9	13
47	16	4	11
49	12	12	15
51	12	7	16
Média	9	7	8
Mínimo	2	1	1
Máximo	16	13	16

FONTE: O autor

Os volumes estimados por produto em cada classe diamétrica são apresentados nas TABELAS 20, 21 e 22. Em todos os cenários concebidos para *Eucalyptus saligna* nota-se que as toras de grandes dimensões (Classe 3, classificadas como C3) são obtidas de árvores em classes diamétricas acima de 43 centímetros, enquanto os demais produtos são obtidos predominantemente a partir de árvores com 35 centímetros.

TABELA 20 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus saligna* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)															Total
	9	11	13	15	23	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/7.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	669	0	132	0	800
C3-38/6.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	189	552	2.858	3.600
C3-38/5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	214	0	121	0	65	400
C2-32/3.7	0	0	0	0	0	0	202	138	126	275	198	0	58	555	48	1.600
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	96	37	0	0	0	0	159	91	0	16	400
C2-32/2.9	0	0	0	0	0	71	0	0	177	0	152	0	0	0	0	400
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	132	48	0	0	99	27	14	320
C1-28/3.7	0	0	0	0	0	68	0	103	146	167	0	247	21	31	16	800
C1-28/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	112	287	0	0	0	0	400
C1-28/2.9	0	0	0	0	0	0	225	0	0	22	52	0	0	89	12	400
C1-28/2.65	0	0	0	0	0	0	25	64	0	0	207	15	10	0	0	320
C0-18/7.36	0	0	0	0	0	467	319	249	0	0	0	0	106	59	0	1.200
C0-18/6.05	0	0	0	0	62	0	0	0	0	133	498	818	0	489	0	2.000
C0-18/5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	759	0	26	0	15	0	0	800
C0-18/3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	110	65	12	0	7	6	0	200
C0-18/3.05	0	0	0	0	0	39	73	0	0	13	41	27	7	0	0	200
C0-18/2.9	0	0	0	0	22	30	0	0	0	14	0	0	0	58	476	600
C0-18/2.65	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	103	55	46	0	21	320
Ce-8/7.2	0	0	433	151	66	114	313	0	1.239	218	132	18	23	82	2.013	4.800
Ce-8/3.6	0	137	133	204	0	0	8	0	43	0	8	55	11	0	0	600
Ce-8/2.4	31	65	0	0	4	14	79	52	12	4	20	33	7	0	75	400
Energia	52	120	120	42	3	5	8	3	12	4	6	6	2	4	10	400
Total	84	322	686	397	157	904	1381	608	2.755	1.075	1.957	2.102	814	2.085	5.626	20.960

FONTE: Protótipo

TABELA 21 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus saligna* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)													Total
	9	11	19	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/7.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	800
C3-38/6.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	585	226	567	2221	3600
C3-38/5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	337	50	0	13	0	400
C2-32/3.7	0	0	0	0	0	0	24	561	124	735	0	15	140	1600
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	400
C2-32/2.9	0	0	0	0	33	0	366	0	0	0	0	0	0	400
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	321	0	320
C1-28/3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	800	0	800
C1-28/3.05	0	0	0	217	0	0	20	0	158	0	0	5	0	401
C1-28/2.9	0	0	0	0	0	0	98	0	25	274	0	0	0	400
C1-28/2.65	0	0	0	0	203	0	82	0	35	0	0	0	0	320
C0-18/7.36	0	0	0	0	0	0	1004	0	0	0	0	196	0	1.200
C0-18/6.05	0	0	0	18	0	328	653	0	282	0	0	0	720	2.000
C0-18/5.3	0	0	0	0	720	0	5	0	27	0	0	48	0	800
C0-18/3.7	0	0	0	0	0	67	0	133	0	0	0	0	0	200
C0-18/3.05	0	0	0	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200
C0-18/2.9	0	0	0	297	0	118	0	0	41	107	0	37	0	600
C0-18/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	319	0	0	0	0	320
Ce-8/7.2	0	0	1.090	155	146	29	417	374	580	104	579	0	1.324	4.800
Ce-8/3.6	0	0	130	0	101	0	46	0	7	237	0	78	0	600
Ce-8/2.4	0	68	58	6	166	60	21	0	12	1	5	3	0	400
Energia	84	152	64	10	11	6	19	4	9	6	3	5	24	400
Total	84	220	1.342	904	1.380	608	2.755	1.073	1.957	2.099	814	2.088	5.629	20.960

FORNE: Protótipo

TABELA 22 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus saligna* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS LONGAS

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)													Total
	9	11	19	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/7.36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	509	0	291	0	800
C3-38/6.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	205	176	419	2800	3.600
C3-38/5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	189	0	0	208	3	400
C2-32/3.7	0	0	0	0	0	138	0	149	790	168	0	231	125	1.600
C2-32/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	400
C2-32/2.9	0	0	0	0	253	0	56	0	0	0	12	80	0	400
C2-32/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	132	43	30	115	320
C1-28/3.7	0	0	0	0	0	190	0	35	328	0	9	117	121	800
C1-28/3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	400	400
C1-28/2.9	0	0	0	0	0	0	171	0	0	229	0	0	0	400
C1-28/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	320	0	0	0	320
C0-18/7.36	0	0	0	0	0	0	182	509	408	0	0	100	0	1.200
C0-18/6.05	0	0	0	0	0	0	1.966	0	0	34	0	0	0	2.000
C0-18/5.3	0	0	0	0	0	0	0	204	0	0	176	23	397	800
C0-18/3.7	0	0	0	0	0	0	0	0	56	93	0	19	33	200
C0-18/3.05	0	0	0	0	0	0	21	0	0	102	15	0	61	200
C0-18/2.9	0	0	0	0	0	0	5	32	0	0	0	0	562	600
C0-18/2.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	271	1	320
Ce-8/7.2	0	0	1090	856	1.101	273	230	40	170	295	321	166	261	4.800
Ce-8/3.6	0	0	130	28	0	0	74	100	0	4	4	50	211	600
Ce-8/2.4	0	68	58	12	17	0	33	0	9	3	6	72	123	400
Energia	84	152	64	8	11	7	17	6	8	9	5	8	18	400
Total	84	220	1342	904	1.381	608	2.755	1.075	1.957	1.387	638	1.375	2.830	20.960

FONTE: Protótipo

7.3 – Resultados da Otimização para Povoamentos de *Eucalyptus grandis*

Os principais resultados apresentados para os cenários mercado atual e supervalorização de toras foram sintetizados na TABELA 23. A solução para o cenário mercado atual utilizou apenas cerca de 30% das árvores enquanto a solução para o cenário supervalorização de toras longas utilizou em torno de 41% das árvores disponíveis.

TABELA 23 – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO POR CENÁRIO PARA *Eucalyptus grandis*

<i>Eucalyptus grandis</i>		Cenário Mercado Atual			Cenário Supervalorização de Toras Curtas		
Classe diamétrica	Arvs Disponíveis	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC	Arvs Usadas	Arvs Não Usadas	Nº de PC
7	311		311			311	
9	2.007		2.007			2.007	
11	3.091	2.553	538	1	3.091	0	1
13	4.163		4.163		4.163	0	1
15	5.001		5.001		833	4.168	1
17	3.532		3.532			3.532	
19	3.357		3.357			3.357	
21	3.912		3.912			3.912	
23	1.938		1.938			1.938	
25	1.581		1.581			1.581	
27	980	980	0	1		980	
29	1.284		1.284			1.284	
31	1.457		1.457			1.457	
33	862		862			862	
35	938		938		938	0	4
37	752	752	0	3		752	
39	1.465	1.465	0	3	1.465	0	7
41	903	903	0	6	903	0	3
43	1.328	1.328	0	4	1.328	0	3
45	1.000	1.000	0	3	1.000	0	2
47	995	995	0	2	995	0	2
49	947	947	0	2	947	0	2
51	2.732	2.732	0	5	2.732	0	5
Total	44.536	13.655	30.881	30	18.395	26.141	31

FONTE: O autor

Em ambos os cenários, o sistema utilizou predominantemente as árvores a partir do centro de classe diamétrica de 39 centímetros. A solução para o cenário “supervalorização de toras curtas” proporcionou um melhor aproveitamento das árvores apesar do número total de padrões de corte serem similares.

Observando os resultados apresentados na TABELA 24 verifica-se que o número médio de produtos obtidos por classe diamétrica foram similares. As árvores dentro da classe diamétrica 47 centímetros foram as que produziram mais produtos florestais distintos, 14 no cenário “mercado atual” e 11 no cenário “supervalorização de toras curtas”.

TABELA 24 – NÚMERO DE PRODUTOS OBTIDOS POR CLASSE DIAMÉTRICA POR CENÁRIO – *Eucalyptus grandis*

Classe diamétrica (cm)	Cenário Mercado Atual	Cenário SupvalorTC.
7	-	-
9	-	-
11	1	-
13	2	-
15	2	-
17	-	-
19	-	2
21	-	-
23	3	-
25	-	-
27	-	-
29	-	-
31	-	-
33	7	5
35	9	5
37	4	4
39	8	10
41	10	3
43	13	11
45	9	7
47	14	2
49	11	10
51	10	6
Média	7	6

Mínimo	1	2
Máximo	14	11

FONTE: O autor

As TABELAS 25 e 26 apresentam os volumes obtidos por produto em cada classe diamétrica nos cenários.

TABELA 25 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus grandis* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO MERCADO ATUAL

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)										Total
	11	27	37	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/7.36	0	0	0	0	0	0	735	0	2.145	1.564	4.444
C3-38/6.05	0	0	0	0	0	1.129	316	1.778	0	4.185	7.407
C2-32/7.36	0	0	0	0	0	0	0	0	579	532	1.111
C2-32/6.05	0	0	23	0	746	205	0	185	127	2.419	3.704
C2-32/5.3	0	0	0	0	0	0	370	0	0	0	370
C2-32/3.7	0	0	0	0	0	0	0	536	0	22	556
C1-28/3.7	0	0	0	799	0	49	567	0	438	0	1.852
C1-28/3.05	0	0	0	0	221	0	0	353	0	168	741
C1-28/2.9	0	0	0	0	0	0	565	0	0	176	741
C1-28/2.65	0	0	185	0	0	0	0	0	0	0	185
C0-18/7.36	0	640	35	0	0	0	0	181	0	626	1.481
C0-18/6.05	0	0	0	0	0	948	203	173	236	1.402	2.963
C0-18/5.3	0	0	0	0	355	371	0	385	0	0	1.111
C0-18/3.7	0	0	6	0	0	805	0	0	0	114	926
C0-18/3.05	0	0	0	221	204	51	0	0	80	0	556
C0-18/2.9	0	0	0	0	257	49	0	0	0	65	370
C0-18/2.65	0	0	39	18	95	0	123	0	0	96	370
Ce-8/7.2	0	169	11	2.279	54	159	494	148	101	291	3.704
Ce-8/3.6	0	50	1.241	0	364	53	0	0	0	144	1.852
Ce-8/2.4	93	39	33	113	118	38	9	16	246	37	741
Energia	51	11	9	89	19	18	23	16	23	420	680
Total	144	909	1.582	3.519	2.434	3.875	3.405	3.770	3.977	12.258	35.867

FONTE: Protótipo

TABELA 26 – VOLUMES POR PRODUTO DE *Eucalyptus grandis* PROCESSADOS EM CADA CLASSE DIAMÉTRICA – CENÁRIO SUPERVALORIZAÇÃO DE TORAS CURTAS

Código do Produto	Volume disponibilizado por produto em cada classe de diâmetro (m3 c.c)											Total
	11	13	15	35	39	41	43	45	47	49	51	
C3-38/7.36	0	0	0	0	0	0	0	349	0	0	4093	4444
C3-38/6.05	0	0	0	0	0	0	1128	645	1733	1747	2155	7407
C2-32/7.36	0	0	0	0	0	0	112	0	0	0	999	1111
C2-32/6.05	0	0	0	0	0	697	723	864	0	168	1252	3704
C2-32/5.3	0	0	0	0	27	0	0	343	0	0	0	370
C2-32/3.7	0	0	0	154	267	0	135	0	0	0	0	556
C1-28/3.7	0	0	0	0	953	676	0	180	0	15	30	1852
C1-28/3.05	0	0	0	0	551	0	190	0	0	0	0	741
C1-28/2.9	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	693	741
C1-28/2.65	0	0	0	0	185	0	0	0	0	0	0	185
C0-18/7.36	0	0	0	0	48	262	0	641	0	0	530	1481
C0-18/6.05	0	0	0	0	313	580	75	103	0	1803	89	2963
C0-18/5.3	0	0	0	0	230	0	0	0	86	16	777	1111
C0-18/3.7	0	0	0	453	38	32	216	0	0	8	180	926
C0-18/3.05	0	0	0	546	10	0	0	0	0	0	0	556
C0-18/2.9	0	0	0	43	91	47	0	0	5	84	100	370
C0-18/2.65	0	0	0	32	27	0	103	62	0	0	147	370
Ce-8/7.2	0	0	0	0	545	115	21	96	1871	9	1048	3704
Ce-8/3.6	0	180	111	119	142	1	1054	90	0	72	83	1852
Ce-8/2.4	113	0	0	360	10	9	82	7	61	46	53	741
Energia	62	243	23	10	34	15	34	25	14	9	25	495
Total	175	422	134	1717	3519	2434	3872	3405	3770	3977	12254	35681

FONTE: Protótipo

7.4 – AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO SISTEMA

Os valores das funções objetivo provenientes das soluções ótimas em cada cenário rodado por espécie são apresentados na TABELA 27.

TABELA 27 – VALOR DA FUNÇÃO OBJETIVO POR CENÁRIO E ESPÉCIE

Espécie/ Povoamento	Cenário Mercado Atual	Cenário Supervalorização de Toras Curtas	Cenário Supervalorização de Toras Longas
<i>Eucalyptus dunnii</i>	R\$ 4.628.661	R\$ 6.741.213	R\$ 6.790.778
<i>Eucalyptus saligna</i>	R\$ 2.433.100	R\$ 3.530.736	R\$ 3.508.827
<i>Eucalyptus grandis</i>	R\$ 4.766.677	R\$ 6.683.799	-

FONTE: O autor

Os tempos decorridos para o sistema encontrar uma solução ótima foram inferiores a 5 minutos em 8 cenários, demonstrando que a abordagem matemática utilizada foi eficiente para resolver os problemas de traçamento e alocação ótima de toras de povoamentos de *Eucalyptus spp.*

Não foi encontrada solução ótima para o cenário “supervalorização de toras longas” em *Eucalyptus grandis*. O sistema ficou rodando durante horas e não encontrou uma solução. Até o presente momento não foi possível entender as causas, mas provavelmente estão associadas aos parâmetros de preços e demandas atribuídas para os produtos desta espécie.

8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1 – Conclusões

- Em função dos baixos tempos decorridos para obtenção das soluções ótimas e dos resultados sobre o aproveitamento de árvores nos povoamentos por cenário, pode-se concluir que a abordagem matemática adotada no protótipo tem alto potencial para solucionar problemas reais de traçamento e alocação ótima de toras de povoamentos de *Eucalyptus spp.*
- O número máximo de padrões de corte designados por classe diamétrica deve ser limitado através de restrições no modelo principal.
- O número máximo de produtos obtidos de cada classe diamétrica também deve ser limitado através de restrições específicas.
- O método de geração de colunas implementado através ao método *Simplex* revisado mostra-se eficiente para solucionar o sub-problema da mochila e produzir novos padrões de corte a cada iteração.
- A adaptação do algoritmo de programação dinâmica concebido por ARCE (2000) para geração de estimativas de produção por padrão de corte por classe diamétrica tornou o protótipo rápido e versátil.

8.2 – Recomendações

- Recomenda-se implantar as restrições lineares e os ajustes necessários para tornar o sistema mais coerente com o contexto operacional.
- Recomenda-se explorar oportunidades de construir parcerias com empresas especializadas em tecnologias móveis ou embarcadas em computadores de bordo para desenvolvimento de uma solução embarcada em máquinas de colheita florestal.
- Recomenda-se às universidades e entidades de pesquisa avançarem em pesquisas aplicadas ao desenvolvimento de tecnologias de silvicultura de precisão.
- Recomenda-se usar o modelo conceitual desenvolvido nesta tese como “motor” de um sistema de suporte a decisão completo para o agendamento operacional de equipes de colheita no setor florestal brasileiro.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, S. **Approaches to Integrated Strategic/Tactical Forest Planning**. Department of Forest Resource Management and Geomatics, Umea (Sweden). Licentiate thesis, Swedish University of Agricultural Science, 29 p, 2005.

ARCE, J.E. **Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte**. Curitiba, 2000. 125 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências agrárias, Universidade Federal do Paraná.

ARENALES, M. N. ; MORABITO, R. N. . An And/Or-Graph Approach To The Solution Of Two-Dimensional non-Guillotine Cutting Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 84, n. 1, p. 599-617, 1995.

BATEMAN, T.S.; SNELL, S.A. **Administração: construindo vantagem competitiva**. São Paulo: Atlas. 539p.

BASKENT, E.Z.; KELES, S. Spatial forest planning: a review. **Ecological Modelling**, Kidlington, v.188, p.145-173, 2005.

BOSTON, K. e BETTINGER, P. An analysis of Monte Carlo integer programming, simulated annealing, and tabu search heuristics for solving spatial harvest scheduling problems', **Forest Science** 45(2), 292–301, 1999.

CARLSSON, D e RÖNNQVIST, M. **Supply chain management in forestry – case studies at Södra Cell AB**, *European Journal of Operational Research*, Vol 163, p 589-616, 2005.

CARNIERI C.; MENDOZA G.A.; GAVINHO L.G.. Solution procedures for cutting lumber into furniture parts. **European Journal of Operational Research** 73, p 495-501, 1994a.

CARVALHO, J.M.V. Exact solution of bin-packing problems using column generation and branch-and-bound, **Annals of Operations Research**, pp. 629-659, 1999.

CARVALHO, J.M.V. LP models for bin-packing and cutting stock problems, **European Journal of Operational Research**, pp.253-273, 2002.

CONNELLY, W.A. A definition for hierarchical analysis for forest planning. In: Proceeding of Hierarchical Approaches to Forest Management in Public and Private Organizations. **Proceedings**...1996. p1.

COSENS, G. P.. **Optimization of short term log allocation**, Master of applied science thesis, Lincoln University, 1996.

DANTZIG, G. B. & WOLFE, P. Decomposition principles for linear programs, *Operations Research*, 8, 1960

DANTZIG, G. B. Linear programming and extensions. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, p 241, 1963.

DEADMAN M.W.; GOULDING C.J.. A method for assessment of recoverable volume by log types. **N. Z. For. Sci.** 9(2), p 225-239, 1978.

ENG G.; DAELLENBACH H.G.; WHYTE A.G.D.. Bucking tree-length stems optimally. **Can. J. For. Res.** 16, p 1030-1035, 1986.

EPSTEIN R.; MORALES R.; SERÓN J.; WEINTRAUB A.. Use of OR Systems in the Chilean Forest Industries. **Interfaces** 29(1), p 7-29, 1999.

GILMORE P.C.; GOMORY R.E.. A linear programming approach to the cutting stock problem. **Op. Res.** 9: p 848-859, 1961.

GILMORE P.C.; GOMORY R.E.. A linear programming approach to the cutting stock problem, Part II. **Op. Res.** 11: p 863-888, 1963.

GILMORE P.C.; GOMORY R.E.. Multi-stage stock cutting problems of two or more dimensions. **Op. Res.** 13: 94-120, 1965.

Glover, F. & Laguna, M.. Tabu search, in C. R. Reeves, ed., 'Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems', Blackwell Scientific Publications, Oxford, pp. 70–150, 1993.

HAESSLER R.W.; SWEENEY P.E.. Cutting stock problems and solution procedures. **European Journal of Operational Research** 54: 141-150, 1991.

KANTOROVICH L. V. mathematical methods of organizing and planning production. Leningrad state university. 1939.

KANTOROVICH L. V. AND ZALGALLER V. A.. Calculation of rational cutting of stock. Lenizdat, Leningrad, 1951.

KARLSSON, J., RÖNNQVIST, M. E BERGSTRÖM, J. **An optimization model for annual harvest planning**, *Canadian Journal of Forest Research*, Vol 34, No. 8, pp. 1747-1754, 2004.

LAROZE, A. & GREBER, B.. Multi-level harvest planning and log merchandising using goal programming, in Buford, pp. 24–30, 1991.

LAROZE, A. & GREBER, B.. Using Monte-Carlo simulation to generate rule-based bucking patterns, in Paredes, pp. 153–165, 1993.

LAROZE A.J.; GREBER B.J.. Using tabu search to generate stand-level, rule-based bucking patterns. **For. Sci.** 43(2): 157-169, 1997.

LAROZE A.J.. A linear programming, tabu search method for solving forest-level bucking optimization problems. **For. Sci.** 45(1): 108-116, 1999.

MCGUIGAN, B. N. A log resource allocation model to assist forest industry managers in process selection and location, wood allocation and transportation and production planning. *APPITA* 37(4), 289–296, 1984.

MARTELLO S., TOTH P., Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations, Wiley, New York, 1990.

MENDOZA G.A.; BARE B.B. A two-stage decision model for log bucking and allocation. **For. Prod. J.** 36(10): 70-74, 1986.

MITCHEL, S.A. **Operational forest harvest scheduling optimization: a mathematical model and solution strategy**. 2004. 278p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de Produção, Universidade de Auckland, Auckland, 2004.

MURPHY, G. (1998). Allocation of stands and cutting patterns to logging crews using tabu search heuristics, **Journal of Forest Engineering** 9, 31–37, 1998.

OGWENO, D. C. O. **Integrated Optimization of Operational and Tactical Planning for Log Production**, Phd thesis in forestry, University of Canterbury, 1995.

PNEVMATICOS S.M.; MANN S.H.. Dynamic programming in tree bucking. **For. Prod. J.** 22(2): 26-30, 1972.

SALKIN,H.M. **Integer programming**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1975.

SCHRAGE L.. **Optimization modeling with LINDO. 5th Edition**. Duxbury Press, USA. 470 p, 1997.

SESSIONS J. GARLAND J.; OLSEN E.. Testing Computer-aided bucking at the stump. **J. For.** 89(4): 43-46, 1989a.

SESSIONS J. OLSEN E.; GARLAND J.. Tree bucking for optimal stand value with log allocation constraints. **For. Sci.** 35(1): 271-276, 1989b.

SESSIONS, J., OLSEN, E. & GARLAND, J.. 'Tree bucking for optimal stand value with log allocation constraints', **Forest Science** 35(1), 271–276, 1989.

WANG P.Y.. Two algorithms for constrained two-dimensional cutting stock problem. **Op. Res.** 31: 573-586, 1983.

WEINTRAUB A.; CÓRDOVA F.; MORALES R.; MERCADER J.M.; TABENSKY N.; MAGENDZO A.. **An expert systems approach to short term forest management.** Manuscrito inédito, 1990.

WEINTRAUB A.; EPSTEIN R.; MORALES R.; SERON J.. Un sistema de asignación al transporte de productos forestales. **Ingeniería de Sistemas** 7(1): 73-81, 1990.

VANCE P., BARNHART C., JOHNSON G.L, NEMHAUSER G., Solving binary cutting stock problems by column generation and branch and bound, *Computational Optimization and Applications* 3, p. 111-130, 1994.

ZIONTS, S. **Linear and integer programming.** Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1974.