

CALIBRAÇÃO DE UMA HEURÍSTICA DE CONSTRUÇÃO POR PARTES PARA OTIMIZAR O SORTIMENTO FLORESTAL EM PLANTIOS DE PINUS TAEDA L.

Rodrigo Freitas Silva

Departamento de Computação – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Alto Universitário, s/nº - Cx Postal 16, Guararema – CEP 29500-000 – Alegre – ES
rodrigo.f.silva@ufes.br

Débora Pinheiro Montes

Curso de Pós Graduação em Biologia Vegetal – Universidade Candido Mendes
Rua Doutor Moacir Birro, 663, Centro – CEP 35170-002 – Coronel Fabriciano – MG
deborapmontes@yahoo.com.br

Gilson Fernandes da Silva

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES - Av. Governador Lindemberg, 316, Centro – CEP 29550-000 – Jerônimo Monteiro – ES
fernandes5012@gmail.com

RESUMO

O sortimento florestal consiste na determinação de um padrão de corte ótimo de um fuste a ser traçado. Este padrão pode ser variável, em função principalmente dos produtos que serão retirados e das variáveis dendrométricas de cada árvore abatida. Este trabalho propõe parametrizar adequadamente uma nova Heurística de Construção por Partes (HCP), criada para otimizar o sortimento durante a exploração de uma floresta formada por *Pinus taeda L.* O desempenho do método foi comparado às meta-heurísticas *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético, utilizadas em trabalho anterior para geração de soluções, ante as receitas da empresa obtidas usualmente pela colheita florestal. Conclui-se, ao final, que a heurística proposta é eficaz, apresentando os melhores resultados em relação aos outros métodos. Além disso, foi capaz de gerar uma receita até 10,22% superior a renda média dos dados da colheita.

PALAVRAS CHAVE. Sortimento Florestal, HCP, Otimização.

Área principal: AG&MA - PO na Agricultura e Meio Ambiente.

ABSTRACT

The forest assortment consists in determining the greatest cutting pattern of a stem wood to be traced. This pattern can be variable, mainly due to the products to be removed and dendrometric variables of each felled tree. This paper proposes an appropriate parameterization of a new Heuristic Construction by Parts (HCP), designed to optimize the assortment during the forest harvest planning consisting of *Pinus taeda L.* The performance of the method was compared to meta-heuristic *Simulated Annealing* and Genetic Algorithm, used in previous work as solutions generated, and compared to the usually company's profit obtained by forest harvest. Finally, the proposed heuristic is effective with the best results compared to other methods. Furthermore, it was able to generate a profit 10.22% higher than the average income the harvest data.

KEYWORDS. Forest Assortment, HCP, Optimization.

Main area: AG&MA - OR in Agriculture and Environment.

1. Introdução

A demanda por multiprodutos florestais é crescente no mercado brasileiro, servindo, inclusive, como subsídio para uma avaliação prévia do sortimento florestal. Essa avaliação depende, dentre outros fatores, do plano de manejo a qual a floresta foi submetida, alinhando as necessidades do mercado consumidor com o objetivo de maximizar a receita proveniente da madeira colhida.

O padrão de corte, ou padrão de sortimento, é a sequência de produtos (toras) que podem ser obtidos a partir de um determinado fuste, podendo ser iguais ou diferentes entre si. Pesquisas em busca por soluções ótimas de sortimento, perante uma explosão combinatória com diversas alternativas, fazem parte de uma categoria específica de problemas conhecida como Problema de Corte e Empacotamento (PCE).

A Figura 1 exemplifica a retirada de diferentes produtos de um fuste fictício de 14 metros de altura. Neste caso, o toco é um resíduo não comercial tipicamente de 0,1 metros. Em seguida, retiram-se, respectivamente, as toras de 3,8, 3,1 e 2,1 metros. Por fim, é possível constatar a sobra de um resíduo viável comercialmente, não aproveitado geralmente em função da escolha do sortimento utilizado, e outro resíduo não comercial.



FIGURA 1 – Exemplo de sortimento feito em um fuste retirando-se produtos comercializáveis definidos por classe de uso.

Exposto o problema a ser estudado, enquadrado em uma classe geral de problemas denominado NP-difícil, e dadas as restrições computacionais para uma busca exaustiva por um padrão de corte ótimo, cabe ao engenheiro florestal superar essa limitação empregando e avaliando diferentes heurísticas no planejamento da exploração florestal.

1.1. Modelo de Programação Inteira

O modelo de Programação Inteira utilizado neste trabalho é descrito em Campos et al. (2013, 2014) e apresenta a seguinte formulação:

$$\text{Maximizar} \quad Z = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ijk} x_{ij} \geq D_{\min K} \quad \{k = 1, 2, \dots, l\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ijk} x_{ij} \leq D_{\max K} \quad \{k = 1, 2, \dots, l\} \quad (4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

Em que:

Z = valor presente líquido total (R\$);

x_{ij} = variável de decisão, j -ésimo padrão de corte para i -ésima classe de diâmetro;

$c_{i,j}$ = valor presente líquido por cada classe de diâmetro i , seguindo a alternativa de corte j ;

m = número total de classes de diâmetro;

n = número total de alternativas de corte para a i -ésima classe de diâmetro;

$V_{i,j}$ = volume (m^3) produzido por classe de diâmetro, do produto k , pela i -ésima classe de diâmetro adotando-se a j -ésima alternativa de corte;

$D_{\min K}$ e $D_{\max K}$ = demandas volumétricas (m^3) mínima e máxima de cada produto k .

A função objetivo (1) representa a maximização do lucro, ou seja, a soma dos Valores Presentes Líquidos (VPL) dos fustes dado o padrão de corte selecionado. As restrições de classe de diâmetro (2) e (5) garantem a escolha de uma única alternativa de corte j para uma classe de diâmetro i . Por fim, as restrições de demanda (3) e (4) impõem limites ao qual cada produto terá um máximo e um mínimo de volume requerido em um período de tempo.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a calibração de uma nova heurística de geração de soluções proposta para o problema do sortimento florestal. Este método, considerado parcialmente guloso e parcialmente aleatório, foi nomeado como Heurística de Construção por Partes (HCP) e tem por finalidade selecionar a alternativa de corte mais lucrativa em um povoamento florestal de *Pinus taeda* L. Seu desempenho é comparado à receita obtida pela empresa, cujo sortimento é determinado pela experiência do motosserrista, e às meta-heurísticas *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético caso tivessem sido utilizadas, todos estes apresentados em outros trabalhos encontrados na literatura.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados e discutidos os trabalhos relacionados ao sortimento florestal. A Seção 3 caracteriza com detalhes os dados e a área de estudo pesquisados para este problema. Na Seção 4 é descrita a metodologia adotada para a utilização do HCP. Na Seção 5 é avaliado o desempenho do HCP perante diferentes configurações e comparado com outros métodos implementados em trabalhos anteriores. Por fim, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados na Seção 6.

2. Trabalhos Relacionados

Métodos de otimização são naturalmente flexíveis o suficiente para resolver problemas de natureza variada, podendo ser aplicados também em outros problemas como: Problema do Planejamento Florestal (MELO et al., 2013, 2014), exploração da colheita (STRIMBU; INNES, 2010), regulação florestal (PONCE et al., 2009) e alocação de pátios (JUNIOR et al., 2014). A seguir são apresentados alguns trabalhos encontrados na literatura a respeito do sortimento florestal.

Campos et al. (2013) utilizou programação inteira para converter um plantio de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em multiprodutos da madeira. Foi considerado 4 alternativa de comercialização das toras: energia, celulose, escoras e serraria. Por fim, a combinação otimizada dos multiprodutos foi comparada a destinação da floresta a um único produto, podendo concluir, a partir dos resultados obtidos, os benefícios econômicos da conversão do plantio em multiprodutos.

Kohler et al. (2014) estudou a evolução do sortimento de madeira em povoamentos de *Pinus taeda* localizados no estado do Paraná. Foi possível então verificar que sítios melhores produzem toras de maiores dimensões mais cedo, provando assim a influencia do sítio no sortimento. Além disso, a dinâmica do sortimento mostrou que após o 13º ano há uma considerável mudança no sortimento da floresta, representando assim um importante diferencial econômico.

Arce (2000) e Soares et al. (2003) utilizam Programação Dinâmica (PD) para otimizar o sortimento florestal em plantios de *Pinus* no município de Jaguariaíva (PR) e de *Eucalyptus grandis* em Sabinópolis (MG), respectivamente. Ambos trabalhos concluíram que, visando o uso múltiplo, é possível aumentar os rendimentos provenientes da madeira, utilizando para isso a PD como geradora do padrão de corte ótimo. Entretanto, Arce (2004) ressalta que a habilidade do motosserrista em contornar situações difíceis, considerando que alguns fustes possuem defeitos como tortuosidade, bifurcações, dentre outros, é fundamental para atingir, conjuntamente com os padrões ótimos de corte, a maior eficiência nas operações de colheita florestal.

Gálvez (2014), por sua vez, desenvolveu e avaliou dois métodos de solução para o problema de cortar peças de madeira retangulares regular a partir de estoques de toras: um através da programação linear inteira e outro usando a meta-heurística *Simulated Annealing*. Foi então observado que as perdas de madeira foram reduzidas em 6,2% em relação ao método manual utilizado por uma serraria do Rio Grande do Sul. Além disso, o *Simulated Annealing*, embora mais eficiente, resultou em soluções em média com 25,82% da otimalidade.

Dusberger (2015) utilizou *Variable Neighborhood Search* (VNS) juntamente com a PD para gerar padrões de corte ótimos quando aplicado ao PCE de 2 dimensões. Os padrões de corte foram representados por uma árvore de corte e ao final, dados os resultados experimentais, foi provado que o método híbrido teve um desempenho melhor para determinadas instâncias quando comparado puramente ao VNS.

Por último, Menon (2005) utilizou as meta-heurísticas *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético para gerar, por classe diamétrica, sortimentos de um povoamento de *Pinus taeda L.* em Santa Catarina. A escolha por utilizar algoritmos aproximados foi decorrente da inviabilidade da aplicação de PD e programação inteira ao problema, dado a ampla variedade de produtos aceitáveis comercialmente. O autor então comparou seus resultados à renda média dos dados da colheita obtida pela empresa, cujo sortimento era escolhido manualmente pelo motosserrista. Em seguida, concluiu-se que o Algoritmo Genético e o *Simulated Annealing* seriam 9,55% e 7,85% mais rentáveis, respectivamente, caso tivessem sido utilizados para selecionar o sortimento mais apropriado.

3. Área de Estudo e Dados

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos de Menon (2005). Segundo o autor, são provenientes da Região Sul do Brasil, do município de Correia Pinto – SC, de propriedade das Indústrias Klabin. Foi utilizado o Talhão 18 de *Pinus taeda L.*, com 11,5 hectares e plantio realizado em 1978, da Fazenda Capela I. Foram encontradas 453 árvores na área de estudo demarcada, das quais 408 foram colhidas e 31 delas cubadas para a construção da relação hipsométrica e da função de afilamento a ser utilizada.

A Tabela 1 apresenta as classes de diâmetro do povoamento estudado. Pode ser observado que o Centro de Classe (C.C.) mínimo foi 18,5 cm de diâmetro e o máximo foi de 81,5 cm, apesar de alguns C.C. inclusos apresentarem frequência zero.

3.1. Relação Hipsométrica e Função de Afilamento

Os modelos necessários para estimar a altura total da árvore e os seus diâmetros ao longo do fuste foram fornecidos pela empresa, já ajustados, e suas respectivas equações foram:

Relação Hipsométrica:

$$h = DAP^2 / (b_0 + b_1 * DAP + b_2 * DAP^2)$$

Em que: h = altura total (m); DAP = diâmetro medido a 1,3 m de altura do solo (cm); $b_0 = 7,19827$; $b_1 = -0,24839$; e $b_2 = 0,03447$.

Função de Afilamento:

$$dcc = DAP * (b_0 + b_1 * (h_i/h) + b_2 * (h_i/h)^2 + b_3 * (h_i/h)^3 + b_4 * (h_i/h)^4 + b_5 * (h_i/h)^5)$$

Em que: d_{cc} = diâmetro com casca ao longo do fuste (cm); h_i = altura de corte (m); h = altura total (m); (h_i/h) = altura relativa (m); DAP = diâmetro medido a 1,3 m de altura do solo (cm); $b_0 = 1,19837$; $b_1 = -4,87173$; $b_2 = 22,56860$; $b_3 = -50,29490$; $b_4 = 50,20750$ e $b_5 = -19,00690$.

Tabela 1 – Distribuição de diâmetros do povoamento estudado, em que DAP é Diâmetro à Altura do Peito.

Classe de DAP							
C.C.	Frequência	C.C.	Frequência	C.C.	Frequência	C.C.	Frequência
...		28,5	19	40,5	10	52,5	1
17,5	0	29,5	18	41,5	19	53,5	5
18,5	1	30,5	22	42,5	17	54,5	3
19,5	0	31,5	18	43,5	6	55,5	1
20,5	3	32,5	23	44,5	9	56,5	5
21,5	4	33,5	17	45,5	8	57,5	2
22,5	5	34,5	18	46,5	9	58,5	0
23,5	2	35,5	21	47,5	9	59,5	0
24,5	5	36,5	20	48,5	7	...	
25,5	9	37,5	20	49,5	6	80,5	0
26,5	11	38,5	18	50,5	5	81,5	1
27,5	10	39,5	19	51,5	2	...	

3.2. Multiprodutos Considerados

As receitas da madeira comercializada, por classe de uso, obtidas pela empresa são apresentadas na Tabela 2. Para exemplificar, considere a classe de uso 0, cujo destino das toras são a serraria própria da empresa. Neste caso, os comprimentos de toras permitidos são somente 3,10 e 3,80 metros (m), sendo que o diâmetro da ponta fina (d_{pf}) de cada tora deve estar entre 18 a 23,9 centímetros (cm) e, como retorno financeiro, será arrecadado R\$ 61,85 para cada metro cubico (m^3) de madeira da tora produzida.

Tabela 2 – Produtos comercializáveis.

Classe de Uso	Comprimento (m)	d_{pf} (cm)	R\$/ m^3
Classe 0 – serraria própria	3,10 e 3,80	18 a 23,90	61,85
Classe 1 – venda	2,60; 3,10 e 3,80	24 a 29,90	92,15
Classe 2 – venda	2,60; 3,10 e 3,80	30 a 39,90	113,59
Classe 3 – venda	2,60; 3,10 e 3,80	≥ 40	139,77
Classe 4 – celulose	1,00 a 4,00	8 a 17,90	52,80

Seja N_{pc} o número potencial de padrões de corte, L a quantidade de produtos diferentes considerados e T o número máximo de toras que podem ser retiradas do fuste, em função da altura útil do mesmo e dos comprimentos de cada produto. Assim, tem-se que $N_{pc} = L^T$ (ARCE, 2000).

Como exemplo, suponha uma árvore com 25 metros de altura útil a ser traçada de modo a obter os produtos descritos na Tabela 2. Seja a existência de 42 produtos distintos, na qual a Classe 4 contribuiria com 31 destes produtos, levando em consideração os comprimentos admissíveis de 1 a 4 metros de 10 em 10 cm, e os outros 11 produtos restantes sendo provenientes das outras classes de uso conjuntamente. Seriam então retiradas no máximo 25 toras de 1 metro cada e, neste caso, o $N_{pc} = 42^{25}$. Teriam-se então aproximadamente $3,8 \cdot 10^{40}$ potenciais padrões de corte alternativos a serem avaliados.

4. Heurística de Construção por Partes (HCP)

A heurística proposta consiste em um procedimento iterativo de construção e seleção do melhor padrão de corte em 2 fases construtivas. Primeiramente, constroem-se várias soluções de forma gulosa e seleciona-se a melhor delas. Em seguida, na segunda fase, ignora-se a parte final da solução selecionada e termina-se a construção dela utilizando aleatoriedade.

Durante a primeira fase de construção da solução, a partir da base do fuste, verificam-se quais são os diferentes produtos candidatos a serem retirados inicialmente, dados suas restrições de comprimento, dpf e as características do fuste. Assim, para a retirada da primeira tora, dentre todos os produtos admissíveis de serem retirados, seleciona-se apenas os n produtos mais rentáveis para serem avaliados e posteriormente processados pela heurística.

Em seguida, para cada um desses n produtos selecionados inicialmente, simula-se individualmente sua retirada, iniciando-se, portanto, n diferentes sortimentos. Contando com o restante do fuste, para cada um dos n sortimentos iniciados, parte-se para a retirada da segunda tora. Avalia-se então novamente quais são os próximos n melhores produtos a serem retirados, simula-se também a retirada de cada um deles, obtendo, conseqüentemente, n^2 sortimentos distintos até então. Dessa forma, o processo continua até que não se possa mais extrair toras viáveis comercialmente do que sobrou do fuste. Ao final, obtêm-se n^1 soluções distintas a partir de uma combinação com os n melhores produtos retirados em cada parte do fuste, sendo T o número máximo de toras que podem ser retiradas. Por último, seleciona-se o sortimento mais lucrativo como solução gulosa inicial do HCP.

É válido ressaltar que um valor muito grande atribuído a n implicaria na transformação deste procedimento inicial em outro equivalente de força bruta, inviabilizando assim sua execução, dado a existência de 42 produtos distintos.

A Tabela 3 apresenta, por exemplo, alguns dos melhores sortimentos calculados para um fuste com DAP de 18,5 cm e n igual a 3. Dessa forma, selecionando o sortimento mais lucrativo, constata-se que o fuste é avaliado em R\$ 13,43 e possui volume de 0,2578 m³. Quando traçado, deve-se retirar primeiramente uma tora de 3,8 metros a partir da base do fuste, seguidamente por outra tora de 3,8 metros e duas de 4 metros, e assim por diante, atendendo ao padrão de corte estabelecido para esse centro de classe.

Tabela 3 – Sortimentos avaliados de um fuste com DAP de 18,5.

Sortimento					Valor (R\$)	Volume (m ³)
4.0	4.0	4.0	4.0	1.0	13.42	0.2578
3.9	4.0	4.0	4.0	1.0	13.40	0.2573
3.8	4.0	4.0	4.0	1.0	13.37	0.2568
4.0	3.9	4.0	4.0	1.0	13.40	0.2573
3.9	3.9	4.0	4.0	1.0	13.37	0.2568
3.8	3.9	4.0	4.0	1.1	13.37	0.2568
4.0	3.8	4.0	4.0	1.1	13.39	0.2573
3.9	3.8	4.0	4.0	1.2	13.38	0.2573
3.8	3.8	4.0	4.0	1.4	13.43	0.2578
4.0	4.0	3.9	4.0	1.1	13.42	0.2578
4.0	4.0	3.8	4.0	1.2	13.42	0.2578

A segunda fase do algoritmo utiliza aleatoriedade para reconstruir a parte final da solução selecionada na primeira fase. Considerando então a escolha inicial da solução obtida, a HCP mantém a primeira parte dessa solução inalterada e elimina o restante da solução. Essa primeira parte da solução consiste na quantidade x de toras consecutivas a partir da base do fuste mantidas inalteradas. Em seguida, reconstrói a parte final dessa solução através de uma busca aleatória por novos produtos a serem retirados, agora dentre todos os admissíveis, até que não seja mais possível extrair nenhum produto do que sobrou do fuste, gerando assim uma nova solução. Se essa nova solução for melhor do que a inicial, ela será então armazenada; caso contrário, ela será descartada.

Essa segunda parte de construção da heurística é executada k vezes, ou seja, a parte final da solução obtida pela primeira fase da HCP é reconstruída k vezes, gerando potencialmente k novas soluções, todas elas com as mesmas x primeiras toras a partir da base. Portanto, o critério de parada estabelecido para a HCP é o número k de vezes que a segunda fase desse algoritmo será executada.

Nesta heurística, a solução obtida de maneira gulosa na primeira fase do algoritmo é inserida simplesmente como um bom palpite inicial para a HCP. Ela então reconstrói a parte final dessa solução utilizando aleatoriedade na busca por novos produtos admissíveis em cada parte do fuste, na esperança que uma mudança leve a outras e ao final, maximize a renda daquele fuste analisado por meio da redução dos resíduos comerciais.

A intenção de não alterar as x primeiras toras da solução inicial consiste no fato de que estas são geralmente as de maior valor, sendo responsáveis pela maior parte da rentabilidade do fuste. Além disso, existem poucos produtos candidatos a serem retirados próximo a base do fuste, dos quais atendam suas características de dpf máximo e mínimo. Portanto, a aleatoriedade do algoritmo se concentra em gerar novas soluções alternando as toras mais próximas a ponta do fuste. A expectativa é que algum dos novos sortimentos gerados reduza significativamente os resíduos comerciais, aumentando assim o volume aproveitável do fuste e, conseqüentemente, seu valor.

A Figura 2 apresenta o pseudocódigo da HCP implementada, em que:

- calcularAltura: retorna a altura total do fuste para um determinado centro de classe;
- primeiraFase: retorna a solução mais rentável após construir de maneira gulosa até n^T soluções distintas;
- MAX_ITERACOES: número de vezes que a segunda fase da HCP será executada;
- segundaFase: método que reconstrói a solução inicial mantendo as x primeiras toras do fuste inalteradas e obtém o restante das toras de modo aleatório;
- CalcularValor: calcula o valor do fuste para um determinado sortimento.

1	Procedimento HCP(DAP, H_i , Produtos);
2	Entrada
3	DAP – vetor diâmetro à altura do peito de todos centros de classe i ;
4	H_i – altura comercial inicial do centro de classe i ;
5	Produtos – multiprodutos cadastrados;
6	Início
7	Para cada centro de classe i faça
8	$H_t = \text{calcularAltura}(\text{DAP}[i]);$
9	Classificar produtos em ordem decrescente de rentabilidade;
10	Definir quantos produtos n serão avaliados para a retirada de cada tora;
11	Solução[i] = primeiraFase(DAP[i], H_t , H_i , Produtos, n);
12	Definir quantas toras x serão mantidas da solução inicial;
13	Para $k = 1$ até MAX_ITERACOES faça
14	$\text{novaSolução} = \text{segundaFase}(\text{Solução}[i], x);$
15	Se CalcularValor(novaSolução) > CalcularValor(Solução[i]) então
16	Solução[i] = novaSolução ;
17	Fim-Para
18	Mostrar Solução[i];
19	Fim-Para
20	Fim.

Figura 2 – Pseudocódigo do algoritmo HCP sendo executado para todos os centros de classe disponíveis na Tabela 1.

A calibração da HCP para um determinado conjunto de dados consiste basicamente em descobrir quantos produtos n devem ser avaliados em cada parte do fuste, quantas toras x devem

ser mantidas inalteradas da solução obtida em sua primeira fase e, por último, saber quantas vezes k a parte final da solução inicial será reconstruída.

5. Resultados

A maneira com que a HCP é calibrada determina, dentre outras características, a qualidade do sortimento gerado. Portanto, uma configuração correta de seus parâmetros pode alcançar maior rentabilidade financeira sem perda de eficiência, comprovando os benefícios de sua utilização.

Após a implementação da HCP, passou-se para a fase de análise dos casos de teste. Optou-se, então, por investigar inicialmente o método guloso da HCP, primeira fase de construção da solução, responsável por gerar uma solução inicial para o problema. A Tabela 4 mostra os resultados das simulações dessa análise, alternando em cada execução a quantidade n dos produtos mais rentáveis aferidos em cada parte do fuste, todos eles avaliados combinatoriamente para produzir um melhor sortimento. Além disso, é importante mencionar que as receitas e os volumes mostrados são resultantes da soma de todas as receitas e todos os volumes, respectivamente, calculados para cada centro de classe.

Ao analisar os resultados computados cabe observar que, à medida que o número de produtos candidatos n avaliados aumenta, naturalmente melhoram-se as rendas e os volumes obtidos, embora isso também prejudique a eficiência do algoritmo com o tempo de execução crescendo consideravelmente. Apesar de existirem 42 produtos distintos, é inexecutável computacionalmente a realização de testes para um n maior que 14, explicado pelo crescimento exponencial de combinações a serem avaliadas.

Tabela 4 – Resultados experimentais após a execução da primeira fase construtiva da HCP.

n	Receita (R\$)	Volume (m ³)	Tempo
1	56141,94	576,21	1 seg.
2	56689,55	576,39	1 seg.
3	56851,72	576,44	15 seg.
4	56856,42	576,52	25 seg.
5	56857,74	576,54	36 seg.
6	56858,41	576,54	54 seg.
7	56859,66	576,56	1 min. 15 seg.
8	56859,66	576,56	1 min. 46 seg.
9	56860,61	576,57	2 min. 30 seg.
10	56860,75	576,57	3 min. 33 seg.
11	56861,22	576,57	5 min. 12 seg.
12	56861,47	576,57	8 min. 7 seg.
13	56861,71	576,57	13 min. 2 seg.
14	56862,12	576,57	21 min. 59 seg.

Considerando o mesmo problema estudado, para que a HCP não seja ineficiente em relação a outros métodos implementados na literatura, optou-se pela escolha de um n igual a 4 para dar continuidade a sua execução. Ainda é importante destacar que, independente das próximas buscas aleatórias a serem feitas, a solução final nunca será inferior a R\$ 56856,42.

O próximo cenário estudado foi em função do critério de parada, quantidade k de vezes que a segunda fase da HCP será executada, ou seja, a quantidade k de novas soluções geradas. Também do número x de toras mantidas inalteradas da solução inicial. Foram executadas 10 rodadas de simulação para cada configuração de k e de x obtendo-se, ao final, para todas as simulações, um coeficiente de variação inferior a 0,01%.

Pode-se observar, através da Tabela 5, que uma configuração mais apropriada para calibrar a HCP seria manter as medidas das $x = 4$ primeiras toras provenientes da sua primeira fase de construção inalteradas. Dessa forma, as novas soluções geradas seriam a partir de modificações do sortimento no restante dos fustes, visto que, dependendo do sortimento adotado, é possível a retirada de mais de 10 toras em cada fuste. A única exceção constatada é para quando o número de iterações k é igual a 100, explicado pelo fato de poucas soluções adicionais serem avaliadas, valendo a pena preservar a maior parte da solução inicial. Neste caso, os respectivos volumes não foram informados por serem praticamente os mesmos $576,57 \text{ m}^3$ na maior parte dos resultados, evidenciando, a partir de um certo ponto, a importância do sortimento para a obtenção de maior rentabilidade.

 Tabela 5 – Renda total (R\$) para k novas iterações.

Iterações (K)	Toras fixadas (x)						Tempo de Execução
	1	2	3	4	5	6	
100	56858,27	56858,41	56858,55	56859,43	56860,20	56860,47	25 seg.
1000	56859,68	56860,08	56860,51	56861,61	56861,45	56861,22	35 seg.
10000	56861,72	56861,92	56862,07	56862,47	56862,22	56862,06	2 min. 22 seg.
100000	56862,83	56862,88	56863,10	56863,51	56863,21	56862,62	19 min. 48 seg.

Em seguida, os resultados da otimização são comparados a Menon (2005), quando aplicados à mesma base de dados e as meta-heurísticas Algoritmo Genético e o *Simulated Annealing*. Além disso, considerando os dados das fichas de campo, as receitas obtidas por esses diferentes métodos são comparadas a respectiva renda média calculada dos dados da colheita obtidos pela empresa. Na Tabela 6 é apresentada uma síntese dos dados obtidos e dos resultados das simulações executadas.

 Tabela 6 – Produção e receita por alternativa de uso, em que os resultados dos métodos Algoritmo Genético, *Simulated Annealing* e Colheita são obtidos de Menon (2005).

Método	Receita (R\$)	Volume (m^3)	Tempo de Execução(s)
Média dos Dados da Colheita	51590,76	577,25	-
Algoritmo Genético	56519,40	576,32	20,82 seg.
<i>Simulated Annealing</i>	55639,76	575,46	97,73 seg.
HCP ($k = 1000$)	56861,61	576,57	35 seg.
HCP ($k = 100000$)	56863,51	576,57	19 min. 48 seg.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos pelo sortimento dos fustes em multiprodutos, observa-se que, dentre todos os métodos avaliados, a HCP foi aquele que apresentou os melhores rendimentos. Levando em consideração a HCP executada com 1000 iterações, a receita média obtida foi de R\$ 56861,61. Se comparado com a renda média dos dados da colheita, isso equivale a um acréscimo da ordem de 10,22%, além de ter sido 0,61% mais eficaz que o Algoritmo Genético e 2,2% eficaz que o *Simulated Annealing*. Nota-se, ainda, que a HCP sempre conseguiu melhorar o sortimento gerado em sua primeira fase de construção, posto como solução de entrada para a execução de sua segunda fase.

Embora seja complicado comparar o tempo de execução de diferentes algoritmos, implementados e executados em diferentes momentos, ainda assim, é possível crer que a HCP seja mais eficiente. Isso se deve principalmente pela forma com que foi projetada, proposta para atender mais precisamente ao problema do sortimento florestal. A primeira parte da solução, da base do fuste para sua ponta, foi projetada para selecionar as toras de maior rentabilidade. Já a segunda parte da solução foi projetada para reduzir os resíduos comerciais, gerando assim, no final, um sortimento mais lucrativo.

Considerando a produção volumétrica obtida pela HCP de 576,57 m³, apesar de ter sido 0,1% inferior proporcionalmente ao da colheita, sua maior rentabilidade mostrou um melhor aproveitamento proporcionado pelo corte das toras no comprimento recomendado pela HCP como ótimo. Contudo, observa-se que o aproveitamento volumétrico da HCP foi maior quando comparados ao Algoritmo Genético e ao *Simulated Annealing*, com 576,32 m³ e 575,46 m³ cada, respectivamente, resultado da redução dos resíduos comerciais.

Pode-se observar ainda que, a HCP consegue maximizar a receita para até R\$ 56863,51. Foi evidente que a escolha do critério de parada faz diferença em relação aos resultados obtidos, sendo que quanto maior o número de novas soluções a processar, maior será a receita auferida, embora isso também implique em perda de eficiência. Apesar da execução da HCP com 100000 iterações acarretar em um maior tempo de processamento, é fato que isso não traz oneração adicional para empresa. Sendo assim, é vantajosa sua utilização devido ao lucro adicional alcançado, já que esse aumento de renda também poderia ser aplicado a todos os outros talhões do povoamento.

6. Conclusões

Este trabalho apresentou a calibração de uma heurística alternativa como geradora de soluções para resolver o problema do sortimento florestal. Foi constatado que para um melhor uso da HCP, o número de produtos a serem avaliados em cada parte do fuste deveria ser 4, a quantidade x de toras afixadas da solução gerada pela primeira fase da HCP deveria ser 4, e a segunda fase poderia ser executada de 1000 a 100000 vezes.

O Algoritmo Genético e o *Simulated Annealing* já foram utilizados em trabalho anterior para este problema, considerando os mesmos dados estudados. Porém, a HCP apresentou soluções de melhor qualidade em relação aos dois métodos e, inclusive, uma renda até 10,22% superior a média dos dados da colheita.

Portanto, a HCP cumpriu seu objetivo conseguindo otimizar o sortimento florestal, sendo que uma calibração adequada torna-a eficiente, capaz de obter rendimentos satisfatórios e minimizar os resíduos comerciais.

Essa heurística pode ser flexibilizada o suficiente para resolver problemas de natureza variada, podendo ser aplicada também alternativamente a outros problemas de otimização como: alocação de pátios florestais (MARTINHAGO, 2012), regulação florestal e roteamento de veículos para o transporte florestal (CAMPOS, 2013).

Com base nas informações extraídas deste trabalho, propõe-se como trabalhos futuros a avaliação de outras meta-heurísticas como Busca Tabu (GLOVER; LAGUNA, 1997), *Clustering Search* (OLIVEIRA; LORENA, 2007) e GRASP (FEO; RESENDE, 1995), aplicadas ao problema do sortimento florestal.

Referências

Arce, J. E. Um sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e dos custos de transporte. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2000.

Arce, J. E., MacDonagh, P. e Friedl, R. A. (2004). Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. *Revista Árvore*, 28, 207-217.

Campos, J. C. C. e Leite, H. G., Mensuração Florestal, Editora UFV, Viçosa (MG), 2013.

Campos, B. P. F., Binoti, D. H. B., Silva, M. L., Leite, H. G. e Binoti, M. L. M. (2014). Efeito do modelo de afilamento utilizado sobre a conversão de fustes de árvores em multiprodutos. *Scientia Florestalis*, 42, 513-520.

Campos, B. P. F., Binoti, D. H. B., Silva, M. L., Leite, H. G. e Binoti, M. L. M. (2013). Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação inteira. *Revista Árvore*, 37, 881-887.

Dusberger, F. e RAIDL, G. R. (2015). Solving the 3-staged 2-dimensional Cutting Stock Problem by dynamic programming and Variable Neighborhood Search. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47, 133-140.

Feo, T. A. e Resende, M. G. C. (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization*, 6, 109-133.

Gálvez, L. A. P., Abordagem do Problema de Cutting Stock na indústria florestal. Tese de Doutorado em Administração – Programa de Pós-graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRG, 2014.

Glover, F., Laguna, M., Tabu Search. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1997.

Junior, M. A. I., Gomide, L. R., Silva, P. H., Alves, J. A. A. e Figueiredo, E. O. (2014). Alocação de pátios de armazenamento de madeira em um plano de manejo florestal na Amazônia ocidental. *Anais do XLVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO*.

Kohler, S. V., Wolf, N. I., Filho, A. F. e Arce, J. E. (2014). Dynamic of assortment of Pinus taeda L. plantation in different site classes in Southern Brazil. *Scientia Florestalis*, 42, 403-410.

Martinhago, A. Z., Otimização para alocação de pátios de estocagem para exploração de impacto reduzido na Amazônia Brasileira. Tese de Doutorado em Engenharia Florestal – Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2012.

Melo, R. S., Barros Junior, A. A. e Mauri, G. R. (2013) Clustering search com iterated local search para resolução do problema de planejamento florestal. *Anais do XLV SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO*.

Melo, R. S., Barros Junior, A. A. e Mauri, G. R. (2014) Resolução de um problema de planejamento florestal via clustering search utilizando a meta-heurística grasp como geradora de soluções, *Anais do XLVI SBPO - Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SBPO*.

Menon, M. U. Meta-heurísticas na Otimização do Sortimento Florestal. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2005.

Oliveira, A. C. M. e Lorena, L. A. N. (2007). Hybrid evolutionary algorithms and clustering search. *Studies in Computational Intelligence*, 75, 77-99.

Ponce, Y. R., Tagle, M. R. e Robredo, F. G.(2009) Multiple-use forest planning model for second-growth forests of roble-raulí-coihue (genus Nothofagus). *European Journal of Forestry Research*, 129, 947-960.

Soares, T. S., Vale, A. B., Leite, H. G. e Machado, C. C. (2003). Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. *Revista Árvore*, 27, 811-820.

Strimbu, B. M., Innes, J. L. e Strimbu, V. F. (2010). A deterministic harvest scheduler using perfect bin-packing theorem. *European Journal of Operational Research*, 129, 961-974.