



PABLO MARCÍLIO DE CARVALHO

**FUNÇÃO DE AFILAMENTO NA ESTIMATIVA
VOLUMÉTRICA E PROGRAMAÇÃO
MATEMÁTICA NO PROCESSAMENTO
MECÂNICO DE TORAS**

LAVRAS – MG

2010

PABLO MARCÍLIO DE CARVALHO

**FUNÇÃO DE AFILAMENTO NA ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA E
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA NO PROCESSAMENTO
MECÂNICO DE TORAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Natalino Calegário

LAVRAS - MG

2010

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Carvalho, Pablo Marcílio de.

Função de afilamento na estimativa volumétrica e programação matemática no processamento mecânico de toras / Pablo Marcílio de Carvalho. – Lavras : UFLA, 2010.

51 p.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2010.

Orientador: Natalino Calegario.

Bibliografia.

1. Madeira serrada. 2. Programação linear. 3. Volume comercial.
4. Inventário florestal. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 674.2028

PABLO MARCÍLIO DE CARVALHO

**FUNÇÃO DE AFILAMENTO NA ESTIMATIVA VOLUMÉTRICA E
PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA NO PROCESSAMENTO
MECÂNICO DE TORAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Processamento e Utilização da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de agosto de 2010.

Dr. José Reinaldo Moreira da Silva UFLA

Dr. Ricardo Silveira Souza UFF

Dr. Natalino Calegário
Orientador

LAVRAS - MG

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Aos meus pais Luiz e Lourdes; aos professores e profissionais da Universidade Federal de Lavras.

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira.

Do mesmo modo, agradeço a colaboração dos meus orientadores, Natalino Calegário e Ricardo Silveira Souza, pela realização desta tarefa e de diversas outras oportunidades de aprendizagem.

Aos funcionários Carlos Henrique, pela ajuda contínua e ensinamentos na programação, José Francisco (Zé Fazenda), Bernardo (Seu Vico).

Agradeço à FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos e aos colegas e amigos Otávio Augusto, Alexandre Petusk e Rafael Nogueira pelo apoio e amizade prestados nos momentos difíceis.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este estudo investigou a conversão de troncos em toras e destas em madeira serrada com o objetivo principal de aplicar a programação matemática ao desdobro de toras. Para isto, foram utilizados dados de um inventário florestal, realizado em um povoamento de *Pinus Caribaeae*, provenientes de plantações situadas no município de Nova Ponte, MG (empresa Caxuana Ltda). O estudo foi dividido em duas etapas. Na primeira, os dados do inventário florestal foram utilizados para efetuar uma análise volumétrica no povoamento e para o ajuste da equação de afilamento (Kozak, 1969). Com este ajuste estimou-se a quantidade de toras até o diâmetro mínimo de 15 cm. Os resultados do inventário florestal indicaram que 85% da volumetria total do povoamento foram provenientes das toras geradas até o diâmetro mínimo de 15 cm. Na segunda etapa, as toras estimadas foram esquadrejadas e posteriormente foram submetidas à programação matemática, respeitando uma demanda de mercado (produção de 6 tipos de peças com demandas diferentes). Os resultados dos melhores modelos indicaram que seriam produzidas 78322 peças de madeira por hectare, com um aproveitamento médio de 79% do recurso tora esquadrejada e com uma produção bruta de R\$ 274.997,86 por hectare.

Palavras-chave: Madeira serrada. Inventário florestal. Volume comercial. Programação linear.

ABSTRACT

This study investigated the mechanical processing of tree trunks to logs and these to saw timber aiming at applying mathematical programming to the conversion of timber. It was used data from a forest inventory of a forest stand of *Pinus caribaea* located at the Caxuana Company, around the city of Nova Ponte, Minas Gerais. The study it was carried out in two stages. In the first one, data from the forest inventory were used to estimate the forest stand volume and to adjust the taper equation (Kozak, 1969). Then, it was possible to estimate the quantity of logs with a minimum diameter of 15 cm. The forest inventory results indicated that 85% of the stand total volume was made up of logs with a minimum diameter of 15 cm. In the second stage, these logs were cut according to the equation and then submitted to the mathematical programming, considering market demands such as the production of six types of sawn timber with different purposes. Results from the best models indicated that the production could render up to 78322 wood cuts per hectare, with 79% yield of the planks and a gross production estimated in R\$ 274.997, 86/ha for the optimum model.

Keywords: Sawnwood. Forest inventory. Commercial volume. Linear Programming.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	9
2.1	Rendimento de madeira serrada	9
2.2	Qualidade de toras para serraria	11
2.3	Manejo florestal	12
2.4	Inventário florestal	13
2.5	Funções de afilamento	14
2.6	Otimização.....	15
2.7	Pesquisa operacional.....	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1	Coleta de dados	18
3.2	Modelo de afilamento utilizado.....	19
3.3	Produções dos paralelepípedos	22
3.4	Desdobro	23
3.4.1	Modelo M1.....	25
3.4.1.1	Ajustes no modelo M1	28
3.4.2	Modelo M2.....	28
3.4.3	Modelo M3.....	30
3.4.4	Modelo M4.....	31
3.5	Conversão das peças em valores financeiros	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1	Ajuste da equação de volume.....	33
4.2	Ajuste da equação de afilamento	34
4.3	Resumo do inventário florestal	35
4.4	Desdobro das toras.....	37
4.4.1	Processamento primário.....	37
4.4.1.1	Ajustes no modelo M1	38
4.4.2	Processamento secundário	40
4.4.2.1	Modelo M2.....	40
4.4.2.2	Modelo M3.....	42
4.4.2.3	Modelo M4.....	43
4.5	Resultados de todo o processamento	43
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

A participação do setor florestal é de suma importância, representando quase 5% do PIB nacional, gerando US\$3 bilhões em impostos e US\$16 bilhões em exportações (segundo maior em superávit comercial), empregando mais de 2 milhões de pessoas e remunerando seus trabalhadores melhor que as atividades similares (VALVERDE, 2010).

Neste segmento, o setor de madeira serrada se destaca entre os produtos de derivados da madeira, juntamente com a indústria de celulose e carvão vegetal. Esses produtos serrados são utilizados basicamente na construção civil (para fins estruturais e de acabamento), no setor moveleiro e para transformação em embalagens, destacando-se as espécies do gênero *Pinus* e *Eucalyptus*, além de muitas espécies nativas ainda utilizadas.

Desse modo, os inventários florestais dessas espécies precisam cada vez mais ser bem detalhados, pois os processos de produção de madeira quase sempre se destinam a multiprodutos, como a conversão da madeira até certa altura da árvore para serraria. E quando uma árvore será cortada e dividida em toras para serraria, é necessário que se defina o comprimento útil das toras, sendo necessária alguma função que descreva a redução diamétrica da base para o topo para deduzir a altura relativa a um diâmetro mínimo comercial, considerando que uma árvore será cortada e dividida em toras. Assim, a estimativa dessa altura e do seu correspondente volume tornam-se objetos de muito interesse para um eficiente planejamento da produção florestal.

Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar a conversão de troncos em toras e destas em madeira serrada com o objetivo principal de aplicar a programação matemática no desdobro de toras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Rendimento de madeira serrada

Entende-se por desdobro a atividade que processa toras em madeira serrada e/ou laminada. É uma atividade realizada pelas serrarias, geralmente com baixos rendimentos, gerando grandes quantidades de resíduos. Acredita-se que o maior problema enfrentado pela indústria de madeira serrada seja o baixo aproveitamento da matéria-prima, o que acarreta um aumento do custo do produto final, além da grande geração de resíduos. Fontes (1994 citado por BIASI; ROCHA, 2007) demonstra que o índice de aproveitamento das toras de madeiras no processamento industrial sofre variações em função do tipo e tamanho da indústria, equipamentos e espécies utilizadas, indicando que as principais perdas são as costaneiras e o pó-de-serra (serragem). Esse índice pode variar de 25 a 70 % do volume da tora, segundo muitos autores. Nas serrarias, além da serragem e costaneiras, as peças são aparadas para padronizar a largura, o comprimento e a espessura, produzindo aparas, cavacos e/ou maravalhas.

A recuperação de produtos em serraria é determinada pela interação entre diversos fatores, sendo os mais importantes: o diâmetro, o comprimento, a conicidade das árvores e qualidade das toras, a espessura de corte, o número alternativo de produtos, as decisões pessoais, os tipos e as condições de funcionamento e de manutenção dos equipamentos, além dos métodos de processamento (MURARA, 2005).

Fatores inerentes às condições operacionais da serra também podem influenciar o rendimento obtido, como tipo de dentes, relação da largura da trava e espessura da lâmina, tensão da lâmina e espaçamento entre os dentes da serra (MURARA, 2005). Ainda de acordo com o mesmo autor, a espessura do corte é outro fator relacionado ao equipamento que muito influencia o rendimento, pois

essa espessura de corte varia normalmente entre 2mm a 6mm e depende, por sua vez, de diferentes fatores: velocidade de alimentação (maior velocidade de alimentação significa maior canal de corte); espécie da madeira utilizada (maior dureza significa menor canal de corte) e acondicionamento da lâmina. Equipamentos que não funcionam ou que não operam adequadamente podem ser a causa dessa interferência negativa. Vidaurre et al. (2008) menciona que um ângulo de corte inadequado gera desvio no processo de desdobro, em razão de a lâmina de serra ser forçada para trás no momento do corte. Eleotério, Storck e Lopes (1996) comentam que esse desvio leva a uma variação dimensional das peças serradas, influenciando significativamente no rendimento. Segundo estes autores, serrarias com maior variação têm rendimentos menores porque quanto maiores as variações, maiores devem ser os acréscimos nas medidas das peças serradas (sobremedida do produto). Ponce (1993) salienta que, para amenizar esse efeito, as guias são peças fundamentais na precisão das serras de fita e serras circulares. Portanto, o sistema integrado de desdobro deverá estar suficientemente equilibrado para produzir pequenas espessuras de fio de serra, cortes alinhados, com ferramentas bem preparadas e bem afiadas, visando à produção de superfícies planas e com velocidade de alimentação em níveis aceitáveis (FONTES, 1994).

O rendimento em madeira serrada pode variar também com a influência da interação entre equipamentos e diâmetro das toras, ou seja, geralmente, quanto maior o diâmetro da tora, maior será o rendimento em madeira serrada e este rendimento tenderá a ser maior se forem utilizados equipamentos que possuam lâminas com menores espessuras. No entanto, como menciona Néri, Furtado e Polese (2005), é importante ressaltar que este rendimento é afetado pela interação dos vários fatores relacionados à madeira, ao maquinário de corte, à mão-de-obra e ao processo, ou seja, analisá-los isoladamente é insuficiente para caracterizar qualquer estudo.

Com relação aos fatores inerentes à madeira, os principais fatores qualitativos que afetam a produção de madeira serrada são a conicidade (afilamento) dos troncos, tortuosidades das toras, nodosidade, pequenos diâmetros e rachaduras (ROCHA, 2001). Portanto, defeitos da madeira comprometem o seu rendimento; quanto maior a incidência e o volume dos defeitos, maior a geração de resíduos (ULIANA, 2005).

2.2 Qualidade de toras para serraria

O controle de qualidade da matéria-prima que ingressa na indústria é de grande importância. Evitar toras com um maior potencial de geração de resíduos permite melhorias substanciais na economia e desempenho operacional da serraria (MURARA, 2005).

Os defeitos da madeira serrada podem ser intrínsecos à matéria-prima ou resultantes do processo de corte, transporte, desdobro e/ou secagem (MUÑIZ, 2002).

De acordo com Tibúrcio (2000), são fatores intrínsecos a conicidade (afilamento) e a tortuosidade:

A conicidade é um defeito no formato do tronco, caracterizando-se pela diminuição excessiva do diâmetro da base para a copa da árvore. Este defeito ocorre, principalmente, em árvores isoladas ou situadas às margens de povoamentos, além de ser uma característica natural de cada espécie e tem, como uma de suas consequências, a geração de grandes desperdícios de madeira sob a forma de costaneiras quando o desdobro da tora é feito com serras de fita (TIBÚRCIO, 2000).

Já a tortuosidade é um defeito na forma do tronco e se caracteriza por um desvio permanente seu eixo, na maioria dos casos, sob a forma de curvas (MURARA, 2005). Segundo este autor, as tortuosidades tanto podem surgir de

fatores genéticos, a partir das características da própria espécie, ou serem ocasionadas por influências externas (solos desfavoráveis, condições climáticas, relevo, por exemplo). Os prejuízos causados pela tortuosidade dependem da forma e da quantidade de curvaturas existentes, produzindo pequenas peças ou um excessivo seccionamento das toras.

2.3 Manejo florestal

A possibilidade da substituição da madeira oriunda de florestas nativas por madeira de plantações de rápido crescimento, como as espécies do gênero *Eucaliptus* e *Pinus* foi considerada vantajosa por diversos motivos, incluindo os problemas ecológicos e o esgotamento das reservas, além de impulsionar diferentes utilizações e empreendimentos no setor madeireiro, como no caso da construção civil e da movelaria, por exemplo. Entretanto, uma grande preocupação ainda é a obtenção de madeiras em toras de melhor qualidade e de maior valor agregado. Desse modo, o manejo florestal, aliado ao melhoramento genético, às técnicas de desdobro e secagem é uma ferramenta importante e indispensável no processo (ASSIS, 2009).

Dentre as técnicas de manejo florestal, destacam-se os desbastes, a exploração florestal, as podas ou desramas, a desbrota ou eliminação das brotações das touças e os espaçamentos de plantio. Segundo Couto (1999), outro aspecto importante é a escolha de talhões de alta produção em sítios privilegiados que priorizem ou otimizem a produção de madeira para serraria.

Em relação ao desbaste, pode-se caracterizá-lo como a remoção de uma proporção de árvores num povoamento florestal com a finalidade de se obter mais espaço de crescimento para as árvores remanescentes, aumentando a produção de madeira de melhor qualidade utilizável durante o ciclo de corte do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2006).

A desrama artificial visa à produção de toras isentas de nós, melhorando as propriedades físicas da madeira serrada, constituindo-se num dos meios mais importantes para valorizar a produção florestal (FINGER et al. 2001). Tal técnica deve ser realizada quando os ramos ainda estiverem verdes, fazendo com que o nó fique persistente, o que não acontece com nó resultante da poda de galho seco (ASSMANN, 1970). Porém, Daniel, Helms e Baker (1979) afirmaram que esse tipo de técnica silvicultural deve ser criteriosa, pois a redução acentuada na proporção da copa viva pode deixar as árvores em desvantagem de competição, já que o crescimento pode reduzir-se temporariamente, em altura e diâmetro.

2.4 Inventário florestal

A importância da madeira para o homem acentua a necessidade de técnicas eficientes para quantificar e qualificar os povoamentos florestais.

Dentre essas técnicas, há o inventário florestal, que pode ser realizado em diferentes níveis de detalhamento para a quantificação do estoque de madeira em campo, além de retratar informações a respeito da cobertura vegetal, como: área, volume e crescimento das árvores, qualidade e quantidade de espécies, distribuídas em florestas naturais ou em plantações (BERTOLA, 2002).

Desse modo, o inventário florestal, aliado ao melhoramento genético, às técnicas de desdobro e à secagem é ferramenta importante e indispensável no processo de quantificação e produção de madeira serrada de alta qualidade (LEITE; ANDRADE, 2002). Isso implica a necessidade de se compreender e de se estudar as árvores existentes em pé -- como é o caso de estudos de crescimento e produção e estudos de afilamento dessas árvores -- para gerenciar florestas, avaliando e prevendo a sua viabilidade para determinado uso.

2.5 Funções de afilamento

A tendência nas operações de colheita de madeira nas florestas é a obtenção de toras com dimensões cada vez mais específicas, precisas e diversificadas. E o emprego de funções de afilamento possibilita tal precisão, além de proporcionar a otimização dos recursos florestais, uma vez que, por este processo, é possível quantificar os multiprodutos da madeira através das dimensões pré-estabelecidas (QUEIROZ et al., 2008.).

Husch, Miller e Beers (1993) afirmaram que tais modelos de afilamento são ferramentas valiosas para este fim (quantificação de multiprodutos), tendo em vista sua flexibilidade para estimar o diâmetro para qualquer altura do tronco, a altura comercial relativa a um diâmetro mínimo, bem como estimar o volume parcial ou total do fuste, via integração da área das seções do tronco.

Entende-se como afilamento do fuste de uma árvore a taxa de decréscimo natural do diâmetro ao longo do fuste da mesma e que tem efeito no seu volume (HUSCH; MILLER; BEERS, 1993) Esses estudos se baseiam em equações que permitem estimar o diâmetro em qualquer altura ao longo do tronco da árvore, a partir das variáveis diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total da árvore.

Leite (1994) mencionou diversos fatores que influenciam na forma da árvore, como o sítio, o comprimento e a largura de copa, a idade e a posição sociológica, dificultando encontrar a maneira certa de estratificação e procedimento dos ajustes dessas funções de afilamento.

Campos e Leite (2002) afirmaram existir diversos modelos de regressão que retratam o perfil do fuste da árvore, mas o melhor modelo depende dos objetivos, pois enquanto um determinado modelo tem melhor performance para estimar diâmetros (d) ao longo do fuste, pode não ser o melhor para calcular alturas comerciais (h) e volume (v), ou seja, a maioria dos modelos de

afilamento não descreve todo o fuste com a mesma precisão. Ainda de acordo com estes autores, diferentes classificações para os modelos de afilamento são encontrados na literatura, por exemplo: modelos simplificados, modelos polinomiais, modelos sigmoidais, modelos trigonométricos e os modelos segmentados. Como modelos simples, aqueles em que uma única função representa a forma desde a base até o ápice, pode-se mencionar os modelos de Demaerschalk (1972), Kozak (1969) e Osmerod (1973). Segundo Mendonça et al (2007), além da vantagem de modelar todo o fuste com uma única expressão, esses modelos são também fáceis de ajustar e de empregar.

No Brasil, o uso de modelos de afilamento, em sua maior parte, está relacionado a florestas equiâneas puras, como nos trabalhos de Assis et al. (2001), Figueiredo Filho, Borders e Hitch (1996), Fischer et al. (2001), Guimarães e Leite (1992), Lima (1986), Mctague, Batista e Steiner (1989), Schneider et al. (1996), Silva et al. (1997), entre outros. Estes modelos são pouco usados em espécies nativas, como os trabalhos de Chichorro, Resende e Leite (2003) que estudaram o *Didymopanax morototonii* (morototó), conforme Mendonça et al. (2007).

2.6 Otimização

Diversas indústrias têm como parte integrante de seus processos produtivos o corte de peças para a obtenção de produtos intermediários ou finais, como acontece nas indústrias madeireiras que produzem peças retangulares que serão matérias-primas para outras atividades. Esta operação geralmente implica perda de matéria-prima, com conseqüente aumento nos custos. Esse fato pode comprometer a competitividade desse tipo de indústria, pois uma pequena redução no custo dessas operações implica uma economia de recursos financeiros que favorece a competitividade da indústria no mercado (TEMPONI, 2007).

O conceito de otimização envolve a colocação estratégica de quantidades limitadas de recursos entre atividades competitivas, de forma que a solução produzida seja a melhor possível (NOVAK, 2007). E para que a resolução de tais problemas de otimização seja possível, é necessário que se faça a modelagem matemática desses problemas que, dependendo de suas características, podem ser resolvidos por métodos da Programação Linear, Programação Dinâmica, Programação inteira, entre outros.

Os processos de corte da madeira -- com baixos rendimentos -- evidenciam a importância do desenvolvimento e da aplicação de modelos de otimização na conversão de toras em madeira serrada, pois o objetivo das serrarias de obter um melhor aproveitamento das toras só será possível com o uso de sistemas informatizados de análise, simulações e otimização no desdobro (LEITE, 1994).

2.7 Pesquisa operacional

Desenvolvida no final da década de 1940, a pesquisa operacional teve como objetivo inicial resolver problemas relacionados à logística das tropas aliadas na guerra. Para Scheitt (2003), o termo Pesquisa Operacional foi usado para descrever um método nascido de grupos interdisciplinares de pesquisadores que pretendiam resolver problemas estratégicos e táticos da administração militar. O marco definitivo da Pesquisa Operacional (PO) foi publicado por Dantzig, em 1947 (Algoritmo Simplex), (PUCCINI; PIZZOLATO, 1987). Com o desenvolvimento do computador, passou a ser utilizada como ferramenta importante nos processos produtivos, no auxílio das tomadas de decisões (Koth, 2005), utilizando por exemplo, a Programação Linear.

A Programação Linear é uma técnica da Pesquisa Operacional, utilizada para otimizar (maximizar ou minimizar) uma função linear de variáveis, chamada de função objetivo, sujeita a uma série de equações (ou inequações)

lineares, chamadas restrições (LEITE, 1994). São essas restrições que representam as limitações dos recursos disponíveis (capital, mão-de-obra, recursos materiais, etc.) ou então exigências e condições que devem ser cumpridas no problema. Assim, ela engloba técnicas que visam encontrar a solução ótima de problemas, desde os mais simples aos mais complexos, com o objetivo de auxiliar o planejador na tomada de decisões.

Soares (2002) relatou que nas últimas décadas o setor florestal tem buscado formas de melhorar o aproveitamento de uso da madeira em razão da necessidade, cada vez maior, da estabilidade da produção. Nesse sentido, o interesse em modelos de programação matemática tem crescido de forma significativa, especialmente no manejo florestal e na indústria madeireira de transformação, utilizando as programações linear, não-linear, programação dinâmica e por metas, que formam a programação matemática e, ainda, simulação e redes de operação PERT-COM.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta de dados

Os dados de inventário florestal para realização deste estudo são provenientes da empresa Caxuana, unidade localizada no município de Nova Ponte, MG. Foi utilizado um povoamento desbastado de *Pinus Caribaea*, de 34 anos de idade, totalizando uma área total de 146,32 hectares, divididos em 4 talhões. O espaçamento inicial de plantio foi de 3 x 3 m. Neste povoamento, foram lançadas unidades amostrais, sendo mensurados todos os diâmetros à altura do peito (DAP) e todas as alturas das árvores. A cubagem rigorosa das árvores foi feita nas alturas de 0.12 metros do chão, a 0.24 metros, a 1.30 metros e a partir dessa altura, a cubagem foi feita a cada 1.20 metro até a altura total de cada árvore. O cálculo do volume das seções foi feito empregando-se o método de Smalian. Já as estimativas para volume das demais árvores foram determinadas através do modelo desenvolvido por Schumacher e Hall (1933):

$$\ln(V_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(dap_i) + \beta_2 \cdot \ln(H_i) + \varepsilon \quad (1)$$

em que:

V_i = volume por árvore;

H_i = altura total de cada árvore;

dap_i = diâmetro à altura do peito;

$\beta's$ = Parâmetros de regressão;

ε = Erro aleatório, sendo $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$.

O modelo volumétrico proposto (Schumacher; Hall, 1933) foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), tendo sido considerados o coeficiente de determinação ajustado ($\overline{R^2}$) e a análise gráfica dos resíduos para a sua validação.

3.2 Modelo de afilamento utilizado

Para este trabalho, foi utilizado o modelo de Kozak, Munro e Smith (1969):

$$\left(\frac{\hat{d}_{ij}^2}{dap_i^2} \right) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{h_{ij}}{H_i} \right) + \beta_2 \cdot \left(\frac{h_{ij}^2}{H_i^2} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

em que:

d_{ij} = Diâmetro na altura h , geralmente com ou sem casca;

dap_i = Diâmetro, com casca, medido à altura do peito;

h_{ij} = Distância do solo até o ponto onde o diâmetro d é considerado;

H_i = Altura total da árvore;

$\beta' s$ = Parâmetros de regressão;

ε_{ij} = Erro aleatório, $\varepsilon - N(0, \sigma^2)$.

Com as transformações algébricas no modelo de Kozak, Munro e Smith (1969), foram estimadas a altura comercial em relação ao diâmetro mínimo de 15 centímetros, a quantidade de toras com comprimento de 3 metros em cada árvore e o volume de cada tora.

Desse modo, através das seguintes expressões, estimou-se a altura comercial (3) a um diâmetro mínimo considerado (no caso deste trabalho igual a 15cm) e o volume (4) a uma altura qualquer, respectivamente:

$$\hat{h} = \frac{-\beta_1 \cdot H_i \pm \sqrt{(\beta_1^2 \cdot H_i^2) - 4 \cdot \beta_2 \cdot \left(\beta_0 \cdot H_i - \frac{d^2 \cdot H_i^2}{dap^2}\right)}}{2 \cdot \beta_2} \quad (3)$$

$$\hat{V} = \frac{\pi}{40000} \cdot dap^2 \left[\beta_0 \cdot (h_2 - h_1) + \frac{\beta_1}{2 \cdot H_i} \cdot [(h_2)^2 - (h_1)^2] + \frac{\beta_2}{3 \cdot H_i^2} \cdot ((h_2)^3 - (h_1)^3) \right] \quad (4)$$

Assim, considere como exemplo o modelo ajustado:

$$\left(\frac{\hat{d}_{ij}^2}{dap^2} \right) = 0,8992 - 1,0552 \left(\frac{h_{ij}}{H_i} \right) + 0,1772 \left(\frac{h_{ij}^2}{H_i^2} \right)$$

Considerando como exemplo uma árvore com 21 m de altura, DAP de 21 cm, diâmetro mínimo de 15 cm e comprimento das toras com 4 m, qual é sua altura comercial estimada para um diâmetro mínimo de 15 cm?

$$\hat{h} = \frac{1,0552 \cdot 21 \pm \sqrt{(1,0552^2 \cdot 21^2) - 4 \cdot 0,1772 \cdot \left(0,8992 \cdot 21 - \frac{15^2 \cdot 21^2}{21^2}\right)}}{2 \cdot 0,1772}$$

$$\hat{h} = 8,30m$$

Portanto, até a altura comercial de 8,30 m e considerando a perda do toco remanescente de 30 cm após a colheita e o comprimento da tora de 4

metros, seriam estimadas duas toras de 4 m de comprimento. Assim sendo, os diâmetros dessas toras seriam:

$$\left(\frac{\hat{d}_{ij}^2}{d_{api}^2}\right) = 0,8992 - 1,0552\left(\frac{h_{ij}}{H_i}\right) + 0,1772\left(\frac{h_{ij}^2}{H_i^2}\right)$$

Tora da base:

- a) Diâmetro maior igual a 19,75 cm;
- b) Diâmetro menor igual a 17,45cm.

Tora superior:

- a) Diâmetro maior igual a 17,45cm;
- b) Diâmetro menor igual a 15,00 cm.

Por exemplo, o diâmetro maior da tora da base:

$$\hat{d}_{ij} = 21 \cdot \sqrt{0,8992 - 1,0552\left(\frac{0,30}{21}\right) + 0,1772\left(\frac{0,30^2}{21^2}\right)}$$

$$\hat{d}_{ij} = 19,75cm$$

3.3 Produções dos paralelepípedos

A geometria menciona que a área máxima de um retângulo inscrito em uma seção circular é a área de um quadrado e a largura (lado) desse quadrado é determinada pelo produto do raio dessa seção circular, pela raiz quadrada de 2. Portanto, visando a um melhor aproveitamento das toras no processo de desdobro, deve-se desdobrar-las com uma seção quadrada (paralelepípedo com seção quadrada). Assim, a partir do diâmetro da menor extremidade de cada tora, estimou-se o lado do paralelepípedo (bloco sem as costaneiras):

$$L = D \min \sqrt{2} \quad (5)$$

Em que:

L é o lado do paralelepípedo em cm;

Dmin é o diâmetro da menor extremidade da tora em cm;

O processamento das toras visou à obtenção de 6 tipos de peças de mercado, cada uma com um preço e valor demandado, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 Peças produzidas, seus respectivos preços e demandas

Peças (cm) Espessura x largura	R\$/m.	Demanda de mercado (%)								
1,5 x 5,0	0,66	15 - 25								
3,0 x 5,0	1,35	30 - 40								
5,0 x 5,0	2,2	40 - 50								
5,0 x 7,0	3,3									
5,0 x 11,0	4,84									
5,0 x 15,0	6,6									
		<table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>0 -- 10</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>20 -- 30</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>20 -- 30</td> </tr> <tr> <td style="font-size: 2em;">{</td> <td>40 -- 50</td> </tr> </table>	{	0 -- 10	{	20 -- 30	{	20 -- 30	{	40 -- 50
{	0 -- 10									
{	20 -- 30									
{	20 -- 30									
{	40 -- 50									

Fonte: Serrarias do município de Lavras, MG

Primeiramente, simulou-se o processamento primário dos paralelepípedos em três tipos de peças, ou seja, simulando o processamento em serra de fita com espessura de corte média de 2,4 mm. Assim, foram produzidas peças com espessuras de 1.5 cm, 3 cm e 5 cm. Posteriormente, em cada uma dessas peças seriam alocadas as peças descritas na Tabela 1, simulando um processamento secundário com espessura de corte média de 4 mm. Por exemplo, para produzir peças de 5 cm de espessura por 7 cm de largura, primeiramente seriam produzidas peças com 5 cm de espessura, para posteriormente processadas em peças de 5 cm por 7cm, as quais possuem preço unitário de R\$3,30 para cada 1 metro de comprimento.

3.4 Desdobro

Para a obtenção das peças de mercado, duas etapas foram utilizadas: o processamento primário e o processamento secundário, como apresentado nas figuras a seguir:

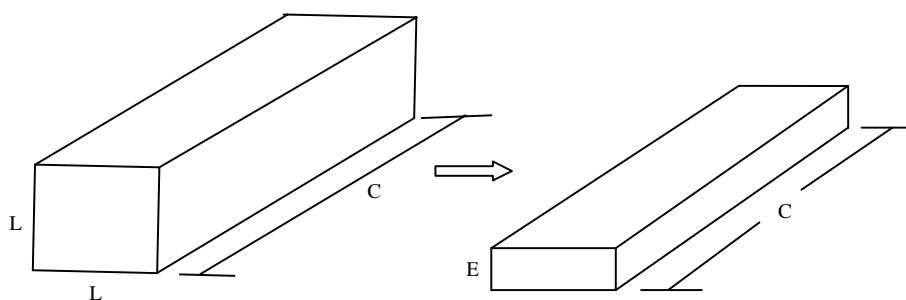


Figura 1 Processamento primário

Em que:

L é o lado do paralelepípedo esquadrejado e da peça desdobrada (cm);

E é a espessura das peças processadas no desdobro primário, podendo assumir valores 1,5 cm, 3cm e 5cm;

C é o comprimento da tora (m).

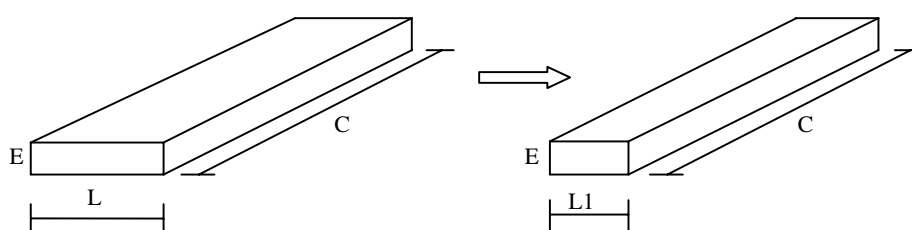


Figura 2 Processamento secundário

Em que:

L é a largura das peças advindas do desdobro primário (cm);

L 1 é a largura das subpeças pós desdobro secundário, podendo ter 5, 7, 11 e 15 cm;

E é a espessura das peças processadas no desdobro primário e secundário, podendo assumir valores 1,5 cm, 3cm e 5cm;

C é o comprimento da tora (m).

O processamento primário retrata o corte dos paralelepípedos em 3 tipos de peças (Figura 1), considerando uma espessura média de corte de 2.4mm, enquanto o processamento secundário (na Figura 2) retrata o refilo desses 3 tipos de peças, ou seja, retrata a produção das peças de mercado que apresentam larguras de 5cm, 7 cm, 11cm e 15cm, dependendo da espessura, conforme foi mencionado na Tabela 1.

Assim, tanto o processamento primário, quanto o processamento secundário foram retratados por simulações em modelos matemáticos utilizando o software de programação linear CPLEX 12.2. Foram utilizados modelos que retratariam um melhor aproveitamento do recurso, além de buscar satisfazer a produção dos 6 tipos de peças de acordo com a demanda de mercado. A seguir serão retratados esses modelos:

3.4.1 Modelo M1

O modelo M1 descreve o processamento primário com espessura média de corte de 2.4mm, ou seja, retrata a produção otimizada X_{1j} , X_{2j} e X_{3j} das peças de 5, 3 e 1.5 cm de espessura respectivamente, nos n paralelepípedos de lado L_j . Tais peças são descritas como Tipo 1, 2 e 3 respectivamente.

$$Z = \sum_{j=1}^n 5,24X_{1,j} + 3,24X_{2,j} + 1,74X_{3,j} \quad (M1)$$

Sujeito a:

$$5,24X_{1,j} + 3,24X_{2,j} + 1,74X_{3,j} \leq L_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{1,j} \geq A_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{2,j} \geq B_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{3,j} \geq C_j$$

A alocação desses 3 tipos de peças obedecem a uma quantidade mínima de produção, de acordo com a demanda de mercado. Assim, tais quantidades -- chamadas de limitantes inferiores A_j , B_j e C_j para as peças Tipo 1, 2 e 3 respectivamente -- foram determinadas com as expressões a seguir:

a) Limitante inferior A_j :

$$A_j = \left\lceil \left(\frac{L_j}{5,24} \right) \cdot 0,45 \right\rceil$$

Assim, imaginando um paralelepípedo com largura L de 22cm, seriam alocadas no mínimo 2 duas peças Tipo 1 para cada unidade de comprimento do paralelepípedo, de modo que no mínimo 45% da dimensão L_j fossem para que as peças de 5 cm de espessura fossem produzidas.

b) Limitante inferior B_j e C_j :

Primeiramente, determinou-se o quanto de cada paralelepípedo j estaria disponível para que as peças Tipo 2 e 3 fossem alocadas, como demonstra a equação a seguir e a Figura 3:

$$S_j = L_j - (A \cdot 5,24)$$

Desse modo, S_j representa o tamanho máximo que as peças Tipo 2 e 3 terão para que possam ser alocadas. Assim, para o paralelepípedo com 22 cm de largura, em que seriam alocadas pelo menos 2 peças Tipo 1 para cada unidade de comprimento do paralelepípedo, 11,52cm da largura ficariam disponíveis para que as peças Tipo 2 e 3 fossem alocadas.

Calculado S_j , determinou-se o limitante inferior para as peças Tipo 2 e 3 (B_j e C_j):

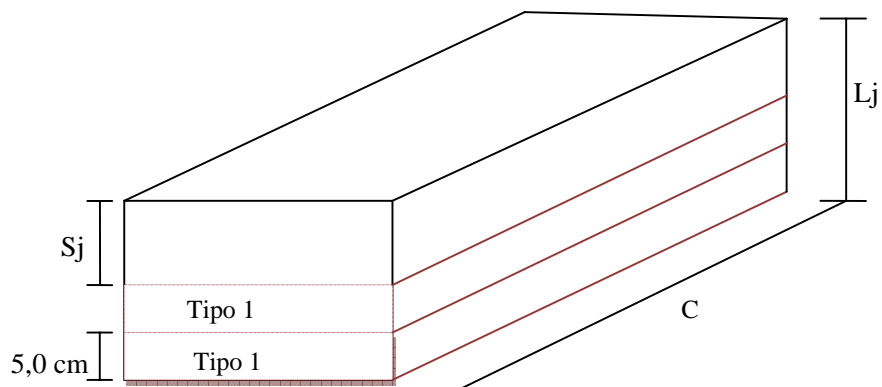


Figura 3 Representação de S_j disponível para as peças. Tipo 2 e 3

$$B_j = \left\lfloor \left(\frac{S_j}{2} \right) / 3,24 \right\rfloor$$

$$C_j = \left\lfloor \left(\frac{S_j}{2} \right) / 1,74 \right\rfloor$$

Assim, para o paralelepípedo com 22 cm de largura, seriam alocadas pelo menos um (1) tipo de peça do Tipo 2 e três (3) peças do Tipo 3 para cada unidade de comprimento do paralelepípedo.

3.4.1.1 Ajustes no modelo M1

a) 1º ajuste:

Diminuir menos uma unidade a cada valor encontrado no limitante inferior para as peças do Tipo 3 (C_j), com os demais limitantes sem alterações.

b) 2º ajuste:

Para os paralelepípedos com valores de $L_j < 15\text{cm}$, arredondar os limitantes inferiores A_j e B_j ao número inteiro abaixo.

Para os paralelepípedos com valores de $L_j \geq 15\text{cm}$, arredondar os limitantes inferiores A_j e B_j ao número inteiro acima.

Eliminou-se a equação que determina o limitante inferior C_j , ou seja, igualando-o a zero.

3.4.2 Modelo M2

Como já fora mencionado, o processamento secundário retrata a padronização das larguras (refilar) das peças advindas do processamento primário, utilizando uma espessura média de corte de 0,40 cm.

O modelo M2 retrata o processamento das peças Tipo 1 que foram refiladas em quantidades X_{1j} , X_{2j} , X_{3j} e X_{4j} , correspondentes às larguras de 5, 7, 11 ou 15 cm respectivamente.

Assim, a função objetivo a seguir retrata a maximização ou a alocação desses 4 tipos de peças que possuem preços unitários de R\$2.20, R\$3.30, R\$4.84, R\$6.60 respectivamente, para cada unidade de comprimento da peça a ser produzida:

$$Z = \sum_{j=1}^n 2,2 \cdot X_{1,j} + 3,3 \cdot X_{2,j} + 4,84 \cdot X_{3,j} + 6,6 \cdot X_{4,j} \quad (M2)$$

Sujeito a:

$$5,4 \cdot X_{1,j} + 7,4 \cdot X_{2,j} + 11,4 \cdot X_{3,j} + 15,4 \cdot X_{4,j} \leq L_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{1,j} \geq P_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{2,j} \geq Q_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{3,j} \geq R_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{4,j} \geq S_j$$

Desse modo, percebe-se neste modelo que a dimensão L_j não é mais a do lado do paralelepípedo e, sim, as larguras das peças Tipo 1. Assim, do mesmo modo que o modelo M1, o modelo M2 possui restrições mínimas de produção de peças de 5, 7, 11 e 15 cm a serem atendidas, ou seja, os limitantes inferiores P_j , Q_j , R_j e S_j respectivamente. Esses limitantes inferiores foram obtidos por meio de tentativas, como descritas a seguir:

a) Tentativa 1:

$L_j \geq 20.80$ cm: fixar em 1 o limitante inferior S_j (correspondente às peças de 15 cm de largura) do modelo e fixar em 0 os outros limitantes inferiores (P_j, Q_j, R_j);

$16.40 \leq L_j < 20.80$ cm: fixar em 1 o limitante inferior R_j (correspondente às peças de 11cm de largura) do modelo e fixar em 0 os outros limitantes inferiores (P_j, Q_j, S_j);

$L_j < 16.40$ cm: fixar todos os limitantes inferiores em 0.

b) Tentativa 2:

$L_j \geq 15.40$ cm: fixar em 1 o limitante inferior S_j (correspondente às peças de 15 cm de largura) do modelo e fixar em 0 os outros limitantes inferiores (P_j, Q_j, R_j);

$14.80 \leq L_j < 15.40$ cm: fixar em 1 o limitante inferior Q_j (correspondente às peças de 7cm de largura) do modelo e fixar em 0 os outros limitantes inferiores (P_j, R_j, S_j);

$11.40 \leq L_j < 14.80$ cm: fixar em 1 o limitante inferior R_j (correspondente às peças de 11cm de largura) do modelo e fixar em 0 os outros limitantes inferiores (P_j, Q_j, S_j);

$L_j < 11.40$ cm: fixar todos os limitantes inferiores em 0.

Desse modo, imaginando uma peça Tipo 1, com largura L_j igual a 20cm, na primeira tentativa seriam alocadas uma peça de 11 cm de largura e uma peça de 7 cm de largura para cada unidade de comprimento da peça Tipo 1. Já na segunda tentativa, seria alocada apenas uma peça de 15 cm de largura para cada unidade de comprimento da peça Tipo 1.

3.4.3 Modelo M3

O modelo M3 retrata o processamento secundário das peças Tipo 2 que foram refiladas com espessura média de corte de 0.40 cm, em quantidades X_{1j} ,

correspondentes às peças com 5 cm de largura e que possuem preço unitário de R\$1,35 para cada unidade de comprimento da peça a ser produzida. O modelo M3 é retratado por:

$$Z = \sum_{j=1}^n 1,35 \cdot X_{1j} \quad (M3)$$

Sujeito a:

$$5,4 \cdot X_{1,j} \leq L_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{1,j} \geq 0$$

Neste modelo, a unidade L_j corresponde às larguras das peças Tipo 2 e como apenas um tipo de peça foi alocado nas mesmas, o limitante inferior é maior ou igual a 0.

Assim, imaginando uma peça Tipo 2 com L_j igual a 18 cm, seriam alocadas 3 peças de 5 cm de largura para cada unidade de comprimento da peça Tipo 2.

3.4.4 Modelo M4

O modelo M4 retrata o processamento secundário das peças Tipo 3 que foram refiladas com espessura média de corte de 0.40 cm, em quantidades X_{1j} , correspondentes às peças com 5 cm de largura e que possuem preço unitário de R\$0,66 para cada unidade de comprimento da peça a ser produzida. O modelo M4 é retratado por:

$$Z = \sum_{j=1}^n 0,66 \cdot X_{1j} \quad (M4)$$

Sujeito a:

$$5,4 \cdot X_{1,j} \leq L_j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{1,j} \geq 0$$

Neste modelo, a unidade L_j corresponde às larguras das peças Tipo 3 e como apenas um tipo de peça foi alocado nas mesmas, o limitante inferior é maior ou igual a 0.

Assim, imaginando uma peça Tipo 3 com L_j igual a 18 cm, seriam alocadas 3 peças de 5 cm de largura para cada unidade de comprimento da peça Tipo 3.

Após calculados todos os limitantes inferiores para os modelos M1, M2, M3 e M4, foi utilizado o software de programação linear CPLEX 12.2.

3.5 Conversão das peças em valores financeiros

Após a produção de peças ter sido estimada, estas foram convertidas em valores financeiros, conforme a equação a seguir:

$$V = \sum_{j=1}^n P_i Q_i C_i \quad (6)$$

Em que:

V é o total financeiro (em reais) proporcionado pela produção de todas as peças de mercado;

P_i é o valor em reais de cada peça produzida;

Q_i é a quantidade de cada peça produzida;

C é o comprimento de cada peça produzida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ajuste da equação de volume

A equação volumétrica ajustada de Schumacher e Hall (1933), com seu coeficiente de determinação ajustado, além dos gráficos pertinentes a interpretação dos desvios residuais estão apresentados a seguir.

$$V_i = \exp(-10.5484 + 2.0453 \cdot \ln(dapi) + 0.9399 \cdot \ln(H_i)) \quad R^2 = 0,9854$$

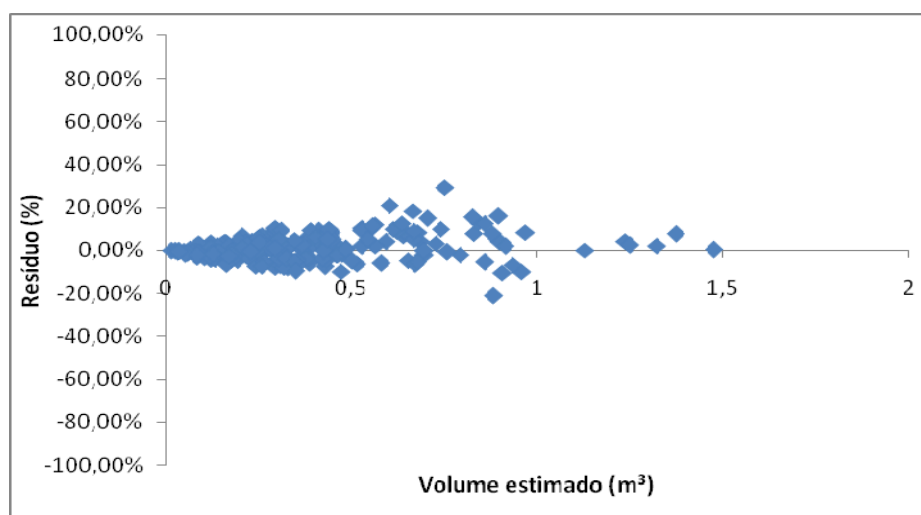


Gráfico 1 Distribuição gráfica dos resíduos em relação ao volume estimado

O modelo apresentou um ajuste com valores $\overline{R^2}$ acima de 98%, o que indica um alto grau de associação das variáveis explicativas com a variável dependente. Quanto aos resíduos, o Gráfico 1 comprova uma proximidade entre os volumes estimados e observados, uma vez que eles se distribuem bem próximos à linha de tendência apresentada. Mas, para as árvores de porte mediano, as estimativas estão mais dispersas.

4.2 Ajuste da equação de afilamento

A equação de afilamento de Kozak, Munro e Smith (1969), ajustada, com seu coeficiente de determinação ajustado ($\overline{R^2}$), erro padrão da estimativa em percentagem (Syx%), além dos gráficos pertinentes a interpretação dos desvios residuais são apresentados a seguir:

$$\left(\frac{\hat{d}_{ij}^2}{dap_i^2}\right) = 0,7881 - 1,1303\left(\frac{h_{ij}}{H_i}\right) + 0,3473\left(\frac{h_{ij}^2}{H_i^2}\right) \quad R^2 = 0,8555 \quad Syx = 10,93\%$$

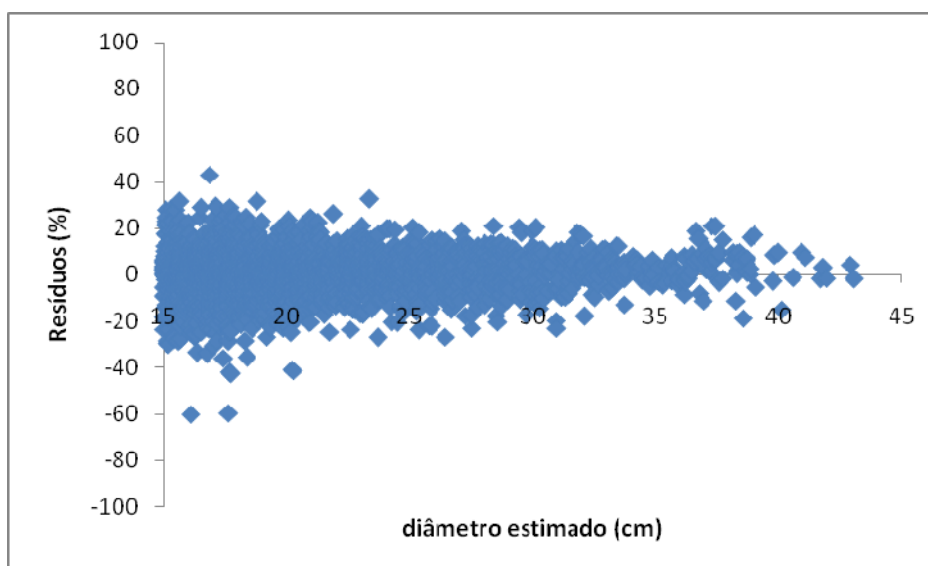


Gráfico 2 Distribuição gráfica dos resíduos em relação aos diâmetros estimados

Como o diâmetro mínimo considerado neste trabalho foi de 15 cm, estimativas superiores a esta altura foram desconsideradas. Assim, percebe-se pelo Gráfico 2 que o ajuste às porções mais elevadas foi menos preciso, ou seja, há uma maior associação das variáveis explicativas com a variável dependente

nas porções menores e medianas dos troncos das árvores. Esta afirmação é corroborada por muitos autores quando mencionam que uma dispersão maior a grandes alturas é esperada nos modelos de afilamento, pois a taxa de decréscimo do diâmetro no topo da árvore é mais acentuada.

4.3 Resumo do inventário florestal

Em um povoamento florestal de 146.32 hectares, com espaçamento inicial de 3 metros entre as árvores e de 3 metros entre as linhas das mesmas, estima-se um total de 162.577 árvores. Porém, como o povoamento sofreu desbastes, estimou-se que o povoamento teria 87.792 árvores, já que a frequência foi de 600 árvores por hectare, com diâmetro médio (q) de 26,07 cm. As volumetrias do povoamento, por talhão (TH), são apresentadas a seguir:

Tabela 2 Resumo do inventário florestal

	Talhão Florestal			
	TH01	TH14	TH15	TH16
Área (ha)	36,19	36,84	39,02	34,27
U.A (m ²)	600	600	600	600
m ³ /UA	12,04	10,35	14,15	12,35
m ³ /ha	200,71	172,55	235,91	205,83
VolumeTotal (m ³)	7263,82	6356,68	9205,3	7053,68

* U.A refere-se unidade de amostra (parcelas); ha é a unidade hectare

Percebe-se que, em média, foram estimados 203,75 m³ de madeira por hectare, com o talhão (TH) 15 apresentando a maior produtividade.

A Tabela 3 descreve a volumetria das toras gerada pelo modelo de Kozak.

Tabela 3 Volumetria das toras estimadas pelo modelo de Kozak

	Talhão Florestal			
	TH01	TH14	TH15	TH16
Área (ha)	36,19	36,84	39,02	34,27
U.A (m ²)	600	600	600	600
toras/ha	1442	1217	1558	1458
vol toras (m ³) / ha	167,34	147,31	202,52	172,97
Nº toras	52186	44835	60794	49966
Volume (m ³) total	6056,035	5426,9	7902,33	5927,682

* U.A refere-se unidade de amostra (parcelas); ha é a unidade hectare

Foram estimadas 207.781 toras nas 87.792 árvores do povoamento, o que daria em média de 2 a 3 toras por árvore até o diâmetro mínimo de 15cm, ou seja, 119.989 toras com comprimento de 3m e 87792 toras com comprimento abaixo de 3 m, em função de o diâmetro mínimo estar fixo em 15cm. O talhão em que houve a maior estimativa no número de toras foi o talhão (TH) 15 com 60794 unidades, que representam um volume total de 7902m³.

A volumetria das toras por talhão representa a maior parte da volumetria total, como apresentado pela Tabela 4.

Tabela 4 Percentual médio de volumetria das toras

Talhão	Volumetria total (m ³)		
	Toras	Geral	%
TH01	6056,0346	7263,8256	83,37
TH14	5426,9004	6356,6796	85,37
TH15	7902,3304	9205,3040	85,85
TH16	5927,6819	7053,6799	84,04
Média			84,66

Assim, percebe-se que cerca de 85% da volumetria do povoamento são representados por madeiras que podem ser destinadas para a serraria. Ainda

pode-se perceber que o percentual é quase uniforme em todos os talhões, demonstrando que os desbastes foram feitos na mesma intensidade, em todo o povoamento.

4.4 Desdobro das toras

4.4.1 Processamento primário

Através de modelos matemáticos, as 207781 toras estimadas foram esquadrejadas e processadas em peças de mercado descritas na Tabela 1.

Primeiramente, utilizou-se o modelo M1 que retrata o processamento primário, obtendo-se as peças Tipo 1, 2 e 3, como apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 Solução obtida das peças tipo 1, 2 e 3

Talhão	Área (ha)	Peças/ha			Total/ha	Total
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3		
TH01	36,19	27116	9450	21625	58191	2105932
TH14	36,84	24341	6926	18774	50041	1843510
TH15	39,02	23958	6426	18774	49158	1918145
TH16	34,27	22758	5309	17108	45175	1548147
Total						7415735
Média/ha		24543	7027	19070	50641	

Analisando a Tabela 5, percebe-se que, do total de 7.415.735 peças estimadas, o modelo M1 produziu próximo de 48%, 14% e 38% de peças Tipo 1, 2 e 3 respectivamente. Porém, o mercado requer entre 40 e 50%, 30 e 40% e entre 15 e 25% respectivamente, ou seja, o modelo estimou muito mais peças do Tipo 3 do que deveria e poucas do Tipo 2, com apenas uma produção viável de peças do Tipo 1.

Quanto ao aproveitamento do processamento dos paralelepípedos, em média, 94% destes foram convertidos em peças do Tipo 1, 2 e 3. No entanto, quando este aproveitamento foi analisado em relação ao volume total das toras, obteve-se um rendimento pós-desdobro de 48%, próximo ao rendimento encontrado na literatura, como mencionado por Olandoski et al. (1997), que encontraram 51% em *Pinus*, e Borges (1993), que encontrara 47,73%.

4.4.1.1 Ajustes no modelo M1

a) 1º ajuste:

O primeiro ajuste diminuiu em menos uma unidade cada valor encontrado no limitante inferior para as peças do Tipo 3 (Cj). Assim, conseguiu-se a diminuição na produção de peças do Tipo 3, como demonstrado na Tabela 6:

Tabela 6 Solução obtida das peças tipo 1, 2 e 3

Talhão	Área (ha)	Peças/ha			Total/ha	Total
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3		
TH01	36,19	32299	6967	11433	50699	1834797
TH14	36,84	27124	6817	11041	44982	1657137
TH15	39,02	26133	6909	11308	44350	1730537
TH16	34,27	24049	6750	10708	41507	1422445
Total						6644916
Média/ha		27401	6861	11122	45384	

A maior flexibilidade imposta ao modelo não foi suficiente para distribuir as peças do Tipo 1 e 2 em condições ideais, ou seja, o modelo deu maior liberdade principalmente para que as peças do Tipo 1 fossem produzidas naqueles “espaços” que antes foram alocados por peças do Tipo 3. Assim, percebe-se que mais de 60% da produção total das peças foram do Tipo 1, que

requer uma produção entre 40 e 50%. Já para as peças do Tipo 2 e 3, que demandam entre 30 e 40% e entre 15 e 25% respectivamente, o modelo alocou algo em torno de 15 e 25% na sequência, ou seja, o ajuste foi suficiente apenas em enquadrar-se a produção de peças do Tipo 3.

Quanto ao aproveitamento do processamento dos paralelepípedos, em média 95% dos mesmos foram convertidos em peças do Tipo 1, 2 e 3, uma melhora em relação ao resultado anterior de 1% , ocasionada pela maior flexibilidade imposta ao modelo. Entretanto, quando este aproveitamento em relação ao volume total das toras foi analisado, obteve-se um rendimento pós-desdobro próximo de 49%.

b) 2º ajuste:

Este ajuste propôs a eliminação da equação que determina o limitante inferior C_j e, para aqueles paralelepípedos com valores de $L_j < 15cm$, propôs que os limitantes inferiores A_j e B_j fossem arredondados para o número inteiro abaixo. Já para os paralelepípedos com valores de $L_j \geq 15cm$, foi proposto que os limitantes inferiores A_j e B_j fossem arredondados para o número inteiro acima. Desse modo, conseguiu-se enquadrar as produções das peças Tipo 1, 2 e 3 nos valores de mercado, como apresentado na Tabela 7:

Tabela 7 Solução obtida das peças tipo 1, 2 e 3

Talhão	Área	Peças/ha			Total/ha	Total
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3		
TH01	36,19	16634	15916	8350	40900	1480171
TH14	36,84	15784	15199	7833	38816	1429981
TH15	39,02	15425	14758	7258	37441	1460948
TH16	34,27	14167	13599	6366	34132	1169704
Total						5540804
Média/ha		15502	14868	7452	37823	

Assim, percebe-se pela Tabela 7 que, do total de 5.540.804 peças produzidas pelo modelo, cerca de 41%, 39% e 20% foram peças dos Tipos 1, 2 e 3, respectivamente

Quanto ao aproveitamento do processamento dos paralelepípedos, em média, 94% destes foram convertidos em peças dos Tipos 1, 2 e 3, uma pequena piora em relação ao resultado anterior, já que foi imposto uma maior restrição ao modelo, principalmente em se produzir mais peças do Tipo 2. Por exemplo, no ajuste anterior, em um paralelepípedo de lado L_j igual a 10.60 cm, eram alocadas 2 peças de 5 cm de espessura, com aproveitamento próximo a 99%. Porém as restrições deste ajuste impôs a produção de 1 peça para os Tipos 1, 2 e 3, com aproveitamento médio de 96%. Quanto ao rendimento ou ao aproveitamento em relação ao volume das toras, em média, 48% destas foram convertidas em peças.

4.4.2 Processamento secundário

As peças provenientes do desdobro primário foram reprocessadas com uma espessura média de corte de 4 mm, de forma a produzir os 6 tipos de subpeças de mercado, conforme descrito na Tabela 1 e representado na Figura 2. Os modelos M2, M3 e M4 retratam esse processamento, conforme será descrito a seguir:

4.4.2.1 Modelo M2

c) Tentativa 1:

As peças do Tipo 1 (5 cm de espessura), oriundas do processamento primário (em média 15.502/ha), foram refileadas em 4 tipos de subpeças com larguras de 5, 7, 11 e 15 cm. A tabela 8 descreve o processamento dessas peças:

Tabela 8 Solução obtida das peças de 5 cm de espessura

Talhão	Área (ha)	Peças/ha				Total/ha
		A	B	C	D	
TH01	36,19	7317	15667	7150	1233	31367
TH14	36,84	7183	15217	39102	1100	62602
TH15	39,02	7266	14608	7152	1183	30209
TH16	34,27	6933	13750	7153	850	28686
Média/ha		7.175	14.810	15.139	1.091	38.215

A, B, C e D referem-se às peças de 5, 7, 11 e 15 cm de largura, respectivamente

Analisando a Tabela 8, percebe-se que a primeira tentativa de ajuste do modelo M2 não foi satisfatória, ou seja, do total de peças/ha refiladas, 19%, 39%, 39% e 3% foram de peças de 5, 7, 11 e 15 cm de largura, respectivamente, enquanto o mercado requer entre 0-10%, 20-30%, 20-30% e entre 40-50% na sequência. Assim, as peças que detêm as menores demandas foram as que mais foram priorizadas pelo modelo, proporcionando uma renda bruta de R\$ 221.448,00 por hectare.

Quanto ao aproveitamento, em média, 88% das peças do Tipo 1 foram convertidas em peças de 5, 7, 11 e 15 cm de largura, com um aproveitamento pior para as peças Tipo 1 de menores larguras. Por exemplo, para uma peça Tipo 1 com 10,60 cm de largura e 3 metros de comprimento, alocou-se 3 peças de 7 cm de largura, proporcionando um aproveitamento de apenas 69%.

d) Tentativa 2:

Esta tentativa promoveu resultados satisfatórios no processamento das peças do Tipo 1, como é apresentado na Tabela 9:

Tabela 9 Solução obtida das peças de 5 cm de espessura

Talhão	Área (ha)	Peças/ha				Total/ha
		A	B	C	D	
TH01	36,19	1967	6350	4416	9033	21766
TH14	36,84	1825	5900	4416	8867	21008
TH15	39,02	1958	5292	4418	9000	20668
TH16	34,27	1975	4433	4414	9033	19855
Média/ha		1931	5494	4416	8983	20824

A, B, C e D referem-se às peças de 5, 7, 11 e 15 cm de largura, respectivamente

Analisando a Tabela 9, percebe-se que todas as peças produzidas pelo modelo M2 estão de acordo com a demanda de mercado. Assim, do total de peças por hectare produzidas, 9%, 26%, 21% e 44% foram de 5, 7, 11 e 15 cm de largura, proporcionando uma renda bruta de R\$ 210.811,00 por hectare, mas com uma queda na renda em relação ao ajuste anterior, em consequência da queda na produção do número de peças.

Quanto ao aproveitamento, este ficou próximo de 79%, uma queda de mais de 9% em relação ao ajuste anterior, proporcionado pelo maior esforço do modelo em alocar as peças de acordo com as restrições de demanda. Por exemplo, na tentativa anterior, em uma peça do Tipo 1, com 20.40 cm de largura e 3 m de comprimento, o modelo alocou 3 peças de 7 cm de largura e 3 peças de 11 cm de largura, acarretando um aproveitamento próximo de 92% . Já neste ajuste, as restrições levaram à produção de apenas 3 peças de 15 cm de largura, gerando uma perda maior, ou um aproveitamento próximo de 75%.

4.4.2.2 Modelo M3

Este modelo retratou o processamento das peças do Tipo 2 (3 cm de espessura) em peças de 5 cm de largura por 3 cm de espessura, conforme é apresentado na tabela a seguir:

Tabela 10 Solução obtida das peças de 3 cm de espessura

Talhão	Área (ha)	Peças/ha
TH01	36,19	39.00
TH14	36,84	38.00
TH15	39,02	38.00
TH16	34,27	36.00
Média/ha		38.00

O processamento produziu em média 38 peças de 3 cm de espessura por 5 cm de largura por hectare, proporcionando uma renda bruta de R\$ 51.336,00 por hectare, com aproveitamento médio de 76%.

4.4.2.3 Modelo M4

Este modelo retratou o processamento das peças do Tipo 3 (1.5 cm de espessura) em peças de 5 cm de largura por 1.5 cm de espessura, conforme apresentado na tabela a seguir:

Tabela 11 Solução obtida das peças de 3 cm de espessura

Talhão	Área (ha)	Peças/ha
TH01	36,19	21.00
TH14	36,84	20.00
TH15	39,02	20.00
TH16	34,27	17.00
Média/ha		19.00

O processamento produziu em média 19 peças de 1,5 cm de espessura por 5 cm de largura, por hectare, proporcionando uma renda bruta de R\$ 12.850,86 por hectare, com aproveitamento médio de 81%.

4.5 Resultados de todo o processamento

Todo o resumo dos processamentos primário e secundário das toras/ha está especificado na Tabela 12.

Tabela 12 Descrição geral do processamento das toras em subpeças de 5, 3 e 1,5 cm de espessura

	Peças							
Espessuras (cm)	1,5	3	5					
Espessura x largura	1,5 x 5,0	3,0 x 5,0	5,0 x 5,0	5,0 x 7,0	5,0 x 11,0	5,0 x 15	Média	Total/ha
Aproveitamento (%)	81%	76%	79%				79%	
Totais peças/ha	7.451	14.868	15.502					37.821
Totais sub-peças/ha	19.00	38.00	1.931	5.494	4.416	8.983		78.322
R\$/ha	2.378,78	7.692,60	633,6	2.875,02	5.720,88	12.256,21		274.997,86
Toras/ha								1.420

Percebe-se que do total de 1.420 toras por hectare processadas, 37.821 peças por hectare resultaram do pós-desdobro primário, gerando um rendimento de 48% (em relação ao volume total das toras). Um rendimento dentro do esperado por Fontes (1994), ao mencionar que praticamente metade do volume da tora não é utilizado em forma de peças e sim em formas de costaneiras, aparas, refilos e serragem. Contudo, quando o volume das costaneiras (bloco esquadrejado) foi desconsiderado, percebe-se que, em média, 79% do volume dos blocos ou paralelepípedo foram convertidos em peças demandadas pelo mercado, ou seja, 1.420 toras / ha produziram 78.322 peças / ha, que, convertidas em valores financeiros, geraria uma renda bruta de quase R\$ 275.000,00 / ha. Como menciona Fontes (1994), caso os rejeitos que saíram do processo fossem reutilizados, como por exemplo, como matéria-prima para a produção de pasta e celulose e chapas de composição, bem como para promover a autossuficiência energética da própria indústria, esta renda poderia ser mais significativa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados do inventário florestal mencionaram que, em média, foram produzidas, aproximadamente, 204 m³ de madeira / ha, com 85% da volumetria total representados por toras, ou seja, cerca de 1420 toras / ha.

O desdobro das 1420 toras / ha estimadas produziu 37821 peças / ha (Tipo 1, 2 e 3), representando um rendimento pós-desdobro de 48%.

As 37821 peças / ha foram refiladas com espessura média de corte de 4 mm, produzindo 78322 peças / ha, o que representa uma renda bruta próxima de R\$ 275.000 por hectare e aproveitamento médio de 78% do volume dos blocos esquadrejados.

Sugere-se que estudos futuros possam ser feitos através de um modelo de corte bidimensional, mais complexo, para que em seguida procedimentos heurísticos sejam desenvolvidos para resolvê-los.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, A. L. et al. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não-segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Revista Cerne**, Lavras, v.7, n.1, p. 20-40, 2001.
- ASSIS, T. F. **Estratégias de melhoramento para a obtenção de madeira de qualidade para laminação e serraria**. 2009. Disponível em:<<http://www.celso-foelkel.com.br>>. Acesso em: 7 jul. 2010.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon, 1970. 506 p.
- BERTOLA, A. **Uso de fotografias digitais para quantificar o volume sólido de madeira empilhada**. 2002.85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.
- BIASI, C. P.; ROCHA, M. P. Rendimento em madeira serrada e quantificação de resíduos para três espécies tropicais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 37, n. 1, jan./abr. 2007.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 407 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 407 p.
- CHICHORRO, J. F.; RESENDE, J. L. P.; LEITE, H. G.. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 799-809, 2003.
- COUTO, H. T. Z. . Manejo de florestas e sua utilização em serraria. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, 1., 1995, São Paulo. **Anais...** Piracicaba : IPEF/USP, 1995.
- DANIEL, T. W.; HELMS, J. A.; BAKER, F. S. **Principles of silviculture**. 2nd ed. New York: Mc Graw Hill, 1979. 500 p.
- DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Amsterdam, v. 18, n. 3, p. 241-245, 1972.

- ELEOTÉRIO, J. R.; STORCK, L., LOPES, S. J. Caracterização de peças de madeira produzidas em serraria visando o controle de qualidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 89-99, 1996.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L.. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Leuven, n. 83, p. 39-46, 1996.
- FINGER, C. A. G. et al. Efeito da intensidade de desrama sobre o crescimento e a produção de *Eucalyptus saligna* Smith. **Revista Cerne**, Lavras, v. 7, n. 2, p. 53-64, 2001.
- FISCHER, F. et al. Exatidão dos modelos polinomiais não-segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 167-188, 2001.
- FONTES, P. J. P. **Auto-suficiência energética em serraria de *Pinus* e aproveitamento dos resíduos**. 1994. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná, 1994.
- GUIMARÃES, D. P.; LEITE, H. G. Um novo modelo para descrever o perfil do tronco. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 16, n. 2, p. 170-180, 1992.
- HUSCH, B.; MILLER, C. I.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. New York: The Ronald, 1993. 410 p.
- KOTH, M. R. **Programação linear para a elaboração do plano mestre de produção na indústria de móveis**. Curitiba. 2005. 102 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forest Chronicle**, Ottawa, v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.
- LEITE, H. G. **Conversão de troncos em multiprodutos da madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.
- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 3, p. 321- 328, 2002.

LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. 1986. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

MCTAGUE, J. P.; BATISTA, J. L. F.; STEINER, L. H. Equações de volume total, volume comercial e forma do tronco para plantações de *Eucalyptus* nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro. **Ipef**, Piracicaba, n. 41/42, p. 56-63, 1989.

MENDONÇA, A. R. et al. Avaliação de funções de afilamento visando à otimização de fustes de *Eucalyptus SP* para multiprodutos. **Revista Cerne**, Lavras, v. 13, p. 71-82, jan./mar. 2007.

MUÑIZ, G. I. B. Fatores que limitam a utilização da madeira de *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO SÓLIDO DE EUCALIPTO: AVANÇOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS, 2002, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2002. p. 30-63.

MURARA, M. I. J. **Desdobro de toras de pinus utilizando diagramas de corte para diferentes classes diamétricas**. 2005. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NÉRI, A. C.; FURTADO, F. C.; POLESE, R. C. Desdobro: avaliação do rendimento de madeira serrada de *Pinus*. **Revista da Madeira 88**, Caxias do Sul, n. 88, p. 96-100, mar. 2005.

NOVAK, R. S. **Um sistema de otimização aplicada ao desdobro de madeira**. Curitiba. 2007. 140 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de tecnologia e Ciências Exatas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

OSMEROD, D. W. A simple bole model. **Forest Chronicle**, Ottawa, v. 49, n. 3, p. 136-138, 1973.

PONCE, R. H. Novas tecnologias de desdobro e beneficiamento de madeira: a busca da competitividade. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBS/SBEF, 1993. p. 310-314.

PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. D. **Programação linear**. São Paulo: LTC, 1987. 248 p.

QUEIROZ, D. et al. Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos para a região metropolitana de Curitiba. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, abr./jun. 2008.

ROCHA, M. P. **Técnicas e planejamento em serrarias**. 5. ed. Curitiba: UFPR, 2001. 105 p. Série didática.

ROCHA, M. P.; TOMASELLI, I. Efeito do modelo de corte nas dimensões de madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 94-103, 2001.

SCHEITT, L. C. **Otimização na industrialização e comercialização de frango**. Curitiba, 2003. 133 p. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de tecnologia e Ciências Exatas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SCHNEIDER, P. R. et al. Forma do tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria v. 6, n. 1, p. 79-88, 1996.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, New Zealand, v. 47, n. 9, p. 719-734, 1933.

SILVA, G. F. et al. Uso de métodos estatísticos para comparar alternativas de estimação do volume comercial. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 21, n. 1, p. 99-111, 1997.

SOARES, T. S. et al. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 6, p. 811-820, 2002

TEMPONI, E. C. C. **Uma proposta de resolução do problema de corte bidimensional via abordagem metaheurística**. 2007. 80 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

TIBÚRCIO, G. T. **Processamento da madeira**. Bauru: São Paulo, 2000.

ULIANA, L. R. **Diagnóstico da geração de resíduos na produção de móveis: subsídios para a gestão empresarial**. 2005. 102 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2005.

VALVERDE, S. R. **As plantações de eucalipto no Brasil**. Disponível em: <http://sbs.org.br/destaques_plantacoesnobrasil.htm>. Acesso em: 9 jul. 2010.

VIDAURRE, G. B. et al. Efeito da geometria dos dentes da serra de fita na produção de madeira serrada de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 939-947, 2008.