

GILBERTO VINICIUS PAULINO NUNES

**ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE PADRÕES DE
CORTE PARALELO E RADIAL NO PROCESSAMENTO
DE TORAS DE MADEIRA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

N972a
2013

Nunes, Gilberto Vinicius Paulino, 1985-

Algoritmos para geração de padrões de corte paralelo e radial
no processamento de toras de madeira / Gilberto Vinicius
Paulino Nunes. – Viçosa, MG, 2013.
x, 77f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: José Elias Claudio Arroyo

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 60-62

1. Otimização matemática. 2. Programação (Matemática).
3. Programação dinâmica. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Informática. Programa de Pós-Graduação em
Ciência da Computação. II. Título.

CDD 22. ed. 005.1

GILBERTO VINICIUS PAULINO NUNES

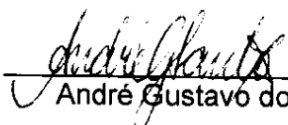
**ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE PADRÕES DE CORTE
PARALELO E RADIAL NO PROCESSAMENTO DE
TORAS DE MADEIRA**

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


APROVADA: 26 de fevereiro de 2013.



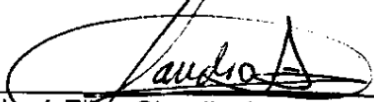
Heleno do Nascimento Santos



André Gustavo dos Santos



Hélio Garcia Leite
(Coorientador)



José Elias Claudio Arroyo
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar, por toda a história, manipulando o acaso em favor das pessoas de bem e trabalhadoras inclusive no decorrer deste trabalho.

Ao professor José Elias Claudio Arroyo pelo acompanhamento, disponibilidade, atenção e orientação desde os meus primeiros momentos como pesquisador em 2007.

Ao professor Hélio Garcia Leite pelas brilhantes contribuições, dicas, informações preciosas sobre áreas que não domino e pela sempre disponibilidade e alegria com que me recebeu durante nossas reuniões.

À minha santíssima trindade familiar: meu pai Gilbeto, minha mãe Maria José e meu irmão Ricardo por terem construído meu caráter, me apoiado durante toda minha jornada escolar e universitária e por estarem sempre presentes em todos os momentos, me protegendo e cuidando do meu bem-estar.

À minha namorada Vanessa por não deixar faltar amor, carinho e companheirismo em nem um dia sequer deste caminho e por ser a mãe deste trabalho ao me apresentar o Departamento de Engenharia Florestal da UFV na figura do professor Hélio possibilitando o nascimento deste projeto.

Ao Altino e demais membros do DPI pela paciência, simplicidade e boa vontade com que conduziram todo processo burocrático da minha pós-graduação.

BIOGRAFIA

GILBERTO VINICIUS PAULINO NUNES, filho de Gilberto Gracinto Nunes e Maria José Paulino Nunes, nasceu em Barbacena, Minas Gerais, a 20 de maio de 1985.

Concluiu o ensino fundamental na Escola Estadual “Adelaide Bias Fortes” e o ensino médio na Escola Estadual “Professor Soares Ferreira”, em Barbacena.

Entre 2002 e 2004 seguiu os estudos no Curso Técnico em Informática pela Escola Agrotécnica Federal de Barbacena.

Em 2006, ingressou no Bacharelado em Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa onde veio a obter o título de bacharel em janeiro de 2010.

Em 2010, ingressou no Mestrado em Ciência da Computação do Departamento de Informática da Universidade Federal de Viçosa (DPI-UFV) submetendo-se à defesa em 26 de fevereiro de 2013.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE SIGLAS	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 - Introdução	1
1.1. O problema e sua importância	2
1.2. Objetivos	8
2 - Revisão de Literatura	9
2.1. O Problema de Corte e Empacotamento	11
2.2. Diagramas de Corte e o PCE	12
2.3. <i>Softwares</i> geradores de Diagramas de Corte	13
3 - Materiais e Métodos	15
3.1. <i>Software</i> MaxiTora para o Corte Paralelo	16
3.1.1. Cadastro de Produtos	16
3.1.2. Otimização de Desdobro	19
3.1.3. Processamento dos dados	20
3.2. <i>Software</i> SawModel para o Corte Paralelo	22
3.2.1. Cadastro de Produtos de Serraria	22
3.2.2. Tela Principal	24
3.2.3. Processamento dos Dados	25

3.3.Algoritmo Proposto	29
3.3.1.Primeira Fase	30
3.3.2.Segunda Fase	31
3.3.3.Terceira Fase	33
3.3.4.Adaptação para o Corte Radial	33
4 - Resultados Computacionais e Análise dos Resultados	37
4.1.Técnica Novak para análise dos resultados	38
4.2.Utilização de <i>Software</i> Gerador de Padrão de Corte	43
4.3.Geração de Resultados	43
4.4.Dados Obtidos para o Corte Tangencial	45
4.5.Dados Obtidos para o Corte Radial	54
5 - Conclusões	58
6 - Trabalhos Futuros	59
Referências Bibliográficas	60
Anexos	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dados da Indústria de Madeira Processada (2008)	4
Tabela 4.1 – Dados de toras em estoque da empresa considerada por Novak (2007)	39
Tabela 4.2 – Dimensões das peças na serraria	40
Tabela 4.3 – Arranjo de peças para a geração de padrões de corte	41
Tabela 4.4 – Valores de custo de produção das peças demandadas	53
Tabela 4.5 – Rendimento Médio - Corte Paralelo (%)	55
Tabela 4.6 – Demanda de peças para o Corte Radial	57
Tabela 4.7 – Dados de quartos de tora em estoque	58
Tabela 4.8 – Rendimento Médio Percentual obtido no Corte Radial	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Corte Tangencial	10
Figura 2.2 – Corte Radial	11
Figura 2.3 – Diagrama de Corte gerado pelo <i>software</i> SawModel	12
Figura 3.1 – Tela de Cadastros de Produtos MaxiTora	17
Figura 3.2 – Tela de Otimização de Desdobro	19
Figura 3.3 – Esquema MaxiTora	20
Figura 3.4 – Tela Produtos de Serraria do SawModel	23
Figura 3.5 – Tela Principal do <i>Software</i> SawModel	24
Figura 3.6 – Representação de um Quarto de Tora	33
Figura 3.7 – Cálculo da altura de uma faixa	35
Figura 4.1 – Diagramas de Corte com e sem a restrição de peças com larguras iguais na mesma coluna de peças	55

LISTA DE SIGLAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIFlorestas – Centro de Inteligência em Florestas

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations

FIEP – Federação das Indústrias do Paraná

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBQP – Instituto Brasileiro de Qualidade e Produtividade

ITA-SP – Instituto Tecnológico de Aeronáutica – São Paulo

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

NBR – Denominação de Norma Brasileira da ABNT

PCE – Problema de Corte e Empacotamento

PD – Programação Dinâmica

PIA – Pesquisa Industrial Anual

PO – Pesquisa Operacional

RAIS – Relação Anual de Informações Sociais

REMADE – Revista da Madeira

SBPO – Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional

SECEX – Portarias da Secretaria de Comércio Exterior

TEM – Ministério do Trabalho e Emprego

VND – Variable Neighborhood Descent

VNS – Variable Neighborhood Search

RESUMO

NUNES, Gilberto Vinicius Paulino, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2013. **Algoritmos Para Geração de Padrões de Corte Paralelo e Radial no Processamento de Toras de Madeira.** Orientador: José Elias Claudio Arroyo. Co-orientador: Helio Garcia Leite

Este estudo abordou o problema de geração de padrões de corte otimizados para o corte de toras em serrarias considerando dois tipos de corte: Paralelo e Radial. Foi proposto um algoritmo baseado em Programação Dinâmica que considera o problema como um Problema de Corte e Empacotamento (PCE). Primeiramente o problema foi resolvido para o Corte Paralelo e comparado com outros dois algoritmos disponíveis na literatura. O algoritmo proposto se mostrou eficiente e assertivo para o tipo de corte em questão. Além disto, foi feita uma adaptação do algoritmo proposto para que este fosse capaz de resolver o problema para o Corte Radial.

ABSTRACT

NUNES, Gilberto Vinicius Paulino, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2013. **Cutting Pattern Generation Algorithms to Plainsawn and Quartersawn Problems.** Adviser: José Elias Claudio Arroyo. Co-adviser: Helio Garcia Leite

This study dealt with the optimized cutting pattern generation problem considering two cutting techniques: Plainsawn and Quartersawn. We proposed an algorithm based on dynamic programming that considers the problem as a Cutting stock problem. Firstly, the problem was solved for Plainsawn and compared with two other algorithms available in the literature. The proposed algorithm was efficient and assertive to this cutting technique. Furthermore, we made an adaptation in this algorithm to solve the Quartersawn problem.

Capítulo 1

Introdução

O uso de algoritmos computacionais, sistemas de informação de apoio a decisão e programas de computador é importante para o atendimento da necessidade industrial de combinar velocidade de produção e qualidade dos produtos.

A combinação entre as necessidades da indústria e sistemas computacionais leva a um ramo da Inteligência Operacional chamado Pesquisa Operacional (PO) como podemos analisar pelas afirmações abaixo:

“Pesquisa Operacional é a aplicação de métodos científicos a problemas complexos para auxiliar no processo de tomadas de decisão, tais como projetar, planejar e operar sistemas em situações que requerem alocações eficientes de recursos escassos.” (Arenales et. al.,2007).

“Tomar uma decisão é fazer uma escolha entre diversas alternativas. A eficiência na tomada de decisão consiste na escolha da alternativa que, tanto quanto possível, ofereça os melhores resultados.” (Cardoso et. al., 2008).

Logo, sempre que nos deparamos com problemas sobre processos industriais e suas atividades ligadas a tomada de decisão, podemos dispor da PO para encontrar boas soluções para os problemas reais.

Nascida em meio a Segunda Guerra Mundial, a PO surgiu quando militares convocaram cientistas para estudar e solucionar problemas estratégicos e táticos associados com a defesa territorial das nações com o objetivo de determinar a melhor utilização efetiva dos recursos militares limitados. (Baldo, 2009).

Ao final da guerra, tanto na Inglaterra como nos Estados Unidos, a Pesquisa Operacional evoluiu consideravelmente. Em 1947, foi implantado um projeto na base militar americana Pentágono, que tinha o objetivo de apoiar decisões operacionais das forças aéreas do país. Neste projeto, trabalhava o matemático George Dantzig que, no decorrer dos trabalhos, criou o método SIMPLEX de resolução de problemas de programação linear. (Montevechi, 2000).

Segundo a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SBPO), o sucesso e credibilidade ganhos durante a Segunda Guerra foram tão grandes que, terminado o conflito, a nova metodologia de abordagem dos problemas se transferiram para as empresas que, com o "boom" econômico que se seguiu, se viram também confrontadas com problemas de decisão de grande complexidade. Seguiram-se então grandes desenvolvimentos técnicos e metodológicos que hoje, com o apoio de meios computacionais de crescente capacidade e disseminação, permitem trabalhar enormes volumes de dados.

No Brasil, a PO começa a ser estudada na década de 60 e em 1968 foi realizado, no ITA-SP, o primeiro simpósio de Pesquisa Operacional brasileiro e fundada a SBPO.

1.1. O problema e sua importância.

Em todo processo industrial existe, em algum momento, a necessidade de se tomar uma decisão. Seja para realizar cálculos de viabilidade de uma

ideia de produto antes mesmo deste novo produto sair do papel, seja para decidir a melhor forma de produzi-lo ou como vendê-lo após a conclusão do processo produtivo.

Na prática, a maioria dos ramos da indústria lança mão de algum método eficiente (geralmente computacional) para obter auxílio nas principais decisões a serem tomadas. Um seguimento industrial importante é a indústria madeireira.

A madeira é uma das matérias-primas de uso geral mais importantes para o homem. Dados de uma pesquisa publicada pela FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) em 2008, comprovam tal importância. Essa pesquisa mostra que o consumo mundial de madeira era de quase quatro toneladas por habitante. A saber: a América do Norte consumia cerca de setecentos quilogramas de madeira per capita, a Oceania consumia mais de quinhentos quilogramas e a América do Sul, juntamente com a África se aproximavam dos quinhentos quilogramas.

Para a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, ABIMCI, a importância do setor madeireiro no Brasil se revela nos dados cedidos por RAIS/TEM, PIA/IBGE, SECEX/MDIC de uma pesquisa elaborada pelo FIEP/IBQP que mostra os números do ano de 2008 e podem ser observados na tabela 1.1.

Na época, o número de empresas da área ultrapassava dezesseis mil, gerando quase duzentos e vinte e cinco mil empregos diretos que movimentavam, considerando apenas o montante destinado ao salário dos empregados, cerca de dois bilhões de reais. A movimentação financeira de venda, exportação e valor da transformação industrial aquecia a economia com quase 25 bilhões de reais.

Empresas	16280
Empregos	224136
Salários (R\$)	2 Bilhões
Valor da Transformação Industrial (R\$)	5,7 Bilhões
Vendas (R\$)	15,7 Bilhões
Exportação (US\$)	3,2 Bilhões

Tabela 1.1 – Dados da Indústria de Madeira Processada (2008)

Realizando uma análise de dados e acontecimentos mais recentes, lembramos que o mercado mundial foi profundamente abalado por crises econômicas geradas pela dívida dos países da zona do Euro, o elevado endividamento público dos EUA, a fragilidade das instituições financeiras em vários países e os sinais, cada vez mais claros, de desaceleração da economia em todo mundo. Juntamente a este cenário, passamos por uma época de desastres naturais de proporções ainda não calculadas, como tremores violentos de terra ao redor do mundo e o grande Tsunami que atingiu o Japão em março de 2011. Apesar desta fase turbulenta da economia no mundo, o mercado por produtos florestais mantém seu crescimento sólido, como mostram dados do Centro de Inteligência em Florestas (CIFlorestas) veiculados em abril de 2011.

Tais dados foram veiculados em uma matéria publicada na mídia Painel Florestal. Nela, o CIFlorestas mostra que, para o segmento de Madeira Processada, as vendas no varejo brasileiro cresceram 8,5% no primeiro trimestre de 2011 em comparação com o mesmo período do ano anterior.

Para o mesmo segmento, as exportações no primeiro trimestre de 2011 tiveram um aumento de 8,8% e as importações cresceram 35,5% em relação ao mesmo período do ano anterior.

Quanto ao segmento moveleiro, no cenário geral, observa-se um crescimento menos acelerado em 2011 se comparado a 2010, 8,9% contra 10,3%. Apesar disto, em Minas Gerais a aceleração deste segmento é surpreendente visto que as exportações de móveis do estado cresceram 165,9% nos primeiros meses de 2011 quando comparado ao mesmo período do ano anterior.

Ainda analisando o cenário atual, há muita expectativa a cerca das mudanças no Código Florestal que afetarão o mercado de madeira processada de maneira significativa, pois utiliza-se também de madeira de florestas nativas e plantadas. Desta forma, o mercado fica ainda mais dependente da forma de processamento dos produtos e do máximo aproveitamento de cada tora processada (utilização ótima de toras).

De acordo com Ponce (1995), a madeira foi um dos primeiros materiais usados pelo homem através dos tempos, na construção de habitações, equipamentos de transporte, barcos, carros, as primeiras armas, como arcos e flechas, ou seja, desde tempos remotos esta matéria-prima tem contribuído decisivamente para o desenvolvimento da humanidade. Atualmente, é usado na construção civil, ferramentas de uso cotidiano, instrumentos musicais e indústria moveleira, estando presente direta ou indiretamente na maior parte das atividades humanas.

A razão deste destaque, em meio a tantos outros materiais, pode ser creditado à quantidade de propriedades e características inerentes à madeira, como facilidade de manuseio e processamento, elevada resistência mecânica, bom isolamento térmico e elétrico, bom desempenho em ambientes, variedade de cores e texturas apresentadas pelas mais diversas espécies.

A madeira é um produto de origem natural e renovável, cujo processo produtivo em relação a outros produtos industrializados, exige baixo consumo energético. Constitui um dos escassos materiais de construção de origem natural, o que proporciona uma série de vantagens em relação aos demais. A madeira de uso corrente não é tóxica, não libera odores ou vapores de origem química, sendo portanto, seguro. Ao contrário de outras matérias-primas, a madeira quando envelhece ou deixa de desempenhar a sua função estrutural, não constitui qualquer perigo para o meio ambiente, já que é facilmente reconvertida (Claro, 2009).

O processo de condução da madeira, desde sua forma bruta na natureza até o produto final que chega ao consumidor, passa por vários estágios e uma típica indústria de madeira serrada trabalha nos seguintes: plantio, condução, colheita e transporte de toras, classificação das toras, processamento, secagem, classificação e comercialização. Este trabalho estuda com maior detalhamento o estágio chamado aqui de “Processamento” que contempla os trabalhos realizados em serrarias, como o desdobro da madeira, criação de subprodutos ou a geração de peças de madeira como tábuas, caibros, vigas, pranchas, entre outros.

A matéria-prima para as serrarias são as toras, que são transportadas de diferentes áreas florestais após a preparação das árvores abatidas. A madeira serrada após passar pela classificação e finalização são então transportadas para o mercado doméstico e industrial (Zanjani et. al., 2009).

Segundo artigo veiculado na Revista da Madeira (REMADE, Edição 70, Mar. 2003), o sucesso da indústria madeireira depende principalmente do processamento de baixo custo da madeira bruta, tratando-se, em primeira linha, de *know-how* e tecnologia – somente máquinas e instalações modernas viabilizam um aproveitamento econômico. Juntamente com a maquinaria, são repassados, entre outros elementos, *softwares* de monitoramento, e o objetivo mais importante da tecnologia de corte é a utilização ótima da tora. Zanjani et.

al. (2009) afirmaram que, no processo prático, que se passa nas unidades de serraria, as toras são classificadas de acordo com alguns atributos como diâmetro, espécie, comprimento, etc. e são desdobradas em diferentes dimensões de peças de madeira, o que significa diferentes padrões ou diagramas de corte. Vital (2008) afirmou ainda que o diagrama de corte afeta a eficiência da serraria, o rendimento e a qualidade da madeira serrada.

Neste ponto tem-se um encontro entre indústria madeireira e Pesquisa Operacional, devido a possibilidade de tratar a busca por diagramas de corte ótimos como um Problema de Corte e Empacotamento (PCE). Como caracterizado por Morabito (1994), o problema de corte (de estoque) consiste, genericamente, em cortar unidades maiores (unidades de estoque) em unidades menores (unidades demandadas) de maneira a otimizar certos objetivos, como por exemplo, minimizar o número de unidades de estoque necessárias para produzir as unidades demandadas, ou minimizar a perda de material ao arranjar geometricamente as unidades demandadas dentro das unidades de estoque.

A otimização ou melhoria contínua nos processos de transformação mecânica da madeira é uma necessidade nas indústrias e deve começar pelo setor de desdobro primário (Neri, 2005). Sendo assim, o interesse maior deste trabalho se concentra na parte do processo que lida com o processamento das toras e o maior aproveitamento da matéria-prima, ou seja, com o processo de corte (ou desdobro) das peças.

O Brasil ainda possui um grande número de serrarias que utilizam o sistema convencional de desdobro, em que as toras são desdobradas de acordo com critérios escolhidos pelo operador da máquina principal, ou seja, é ele quem define a melhor maneira de se desdobrar uma tora. Dessa maneira, podem ocorrer elevadas perdas de matéria-prima, devido à ausência de tecnologias apropriadas para o desdobro das toras, encarecendo o processo (Murara Jr., 2005).

Tal escolha de critérios assume verdadeira importância, tendo em vista que esses operadores estão continuamente tomando decisões que afetam o desempenho da indústria: produtividade, qualidade do produto e o elevado índice de retrabalho para recuperação da matéria-prima. A decisão pessoal de um operador de como seccionar um tronco ou mesmo desdobrar dificilmente obterá um nível ótimo, isso porque ele raramente conseguirá obter a melhor visualização de todas as alternativas no pouco tempo que tem para tomada de decisão (Leite, 1994). Assim, é indicado o emprego de modelos de Pesquisa Operacional (Murara Jr., 2005) ou heurísticas.

1.2. Objetivos

Devido aos fatos apresentados, a importância do tema e sua estreita relação com a Pesquisa Operacional, neste trabalho propôs-se encontrar soluções para o problema de otimização de padrões de corte relacionados à indústria de serraria de toras de madeira, levando-se em conta o estoque de matéria-prima (toras) classificadas, padrões de corte de relevante importância prática e a demanda pelos produtos da madeira. Os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Análise de algoritmos e técnicas utilizadas por *softwares* desenvolvidos no Brasil que tenham eficácia comprovada na resolução do problema para o corte paralelo;
- Desenvolvimento de algoritmo capaz de resolver de forma competitiva o problema do corte paralelo;
- Adaptação do algoritmo desenvolvido para a resolução do problema do corte radial;
- Criação de um projeto de *software* comercial que utilize as técnicas discutidas neste trabalho.

Capítulo 2

Revisão de Literatura

As principais formas de processamento de toras são o Corte Paralelo e o Corte Radial. A principal diferença entre estas formas de corte está na direção do anéis de crescimento da árvore que influenciam diretamente da estabilidade, propensão a curvatura e torção da peça serrada.

O Corte Paralelo é o método mais simples e direto de corte de toras e consiste na realização de uma série de cortes paralelos ao longo da face da tora. (Figura 2.1)



Figura 2.1 – Corte Paralelo (Fonte: amishhandcraftedheirlooms.com)

Devido às características dos anéis de crescimento, à medida que a peça seca, envelhece ou é utilizada, existe grande possibilidade de curvatura, torção e abaulamento da mesma. Em compensação, a aparência de catedral dos desenhos da peça gerada por este corte é bastante admirada.

O Corte Radial consiste em, primeiramente, dividir a face da tora em quatro partes iguais e a partir de cada uma destas, realizar cortes paralelos ao raio da tora. (Figura 2.2)



Figura 2.2 – Corte Radial (Fonte: amishhandcraftedheirlooms.com)

Este método gera peças mais estáveis, menos propensas aos problemas citados para a peça paralelamente cortada além de ter baixa permeabilidade. O uso de madeira serrada desta forma é indicado para situações de uso extremas, como pisos de alto tráfego em restaurantes, bares ou cozinhas e para situações de alta tensão como é o caso de instrumentos de corda. Sua aparência estética ímpar também é muito admirada por artesãos e consumidores finais.

O segundo método de corte, por ser mais complexo e gerar maior desperdício de material, gera peças a serem vendidas por valores mais altos pelas serrarias. Ambos tipos de corte necessitam atenção especial do operador da serra a fim de reduzir desperdícios. Tal redução possibilita a utilização da maior parte da tora disponível necessitando, assim, de menor quantidade de

toras (e conseqüentemente de árvores abatidas) para a produção de uma quantidade demandada de peças. Para isto, é fundamental que o operador seja guiado por algum esquema de corte.

Para realizar um corte guiado de uma tora em uma serraria, ou seja, um corte que siga um desenho previamente estabelecido, são gerados Diagramas de Corte (Figura 2.3). Estes diagramas, nada mais são do que representações gráficas que especificam quais peças e de que pontos da face de tora as peças devem ser retiradas. Utilizando-se deste diagrama, o operador da serraria é guiado na realização do corte.

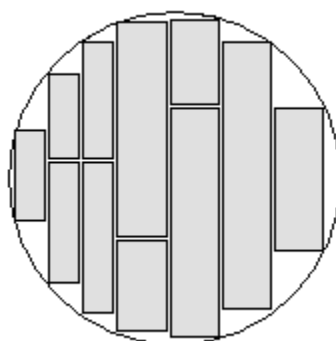


Figura 2.3 – Diagrama de Corte gerado pelo *software* SawModel

A busca por estes diagramas pode ser estudada como um Problema de Corte e Empacotamento (PCE).

2.1. O Problema de Corte e Empacotamento

Os PCEs são amplamente estudados devido ao grande interesse prático e teórico (Dyckhoff et al., 1997 e Lodi et al., 2002).

As mais variadas formas de resolver um PCE podem ser utilizadas, dentre elas metaheurísticas baseadas em construção e busca local, algoritmos

evolutivos e meméticos, Variable Neighborhood Search (VNS) e Variable Neighborhood Descent (VND), algoritmos exatos como Programação Inteira e Linear, Branch-and-Bound, Programação Dinâmica, Geração de Colunas, entre outros como mostram Puchinger (2011) e Andrade (2006).

Geralmente, o estudo de soluções para o PCE se baseia na obtenção de peças retangulares obtidas a partir de objetos retangulares maiores (Problemas de Corte e Empacotamento Retangulares). Existem exceções como o trabalho de Birgin et al.,(2005) onde são encontradas soluções para o corte ou empacotamento de peças retangulares em regiões de formatos arbitrários e o de Birgin et al.,(2003) onde foi estudada a obtenção de peças circulares (ou cilíndricas) através de regiões retangulares.

2.2. Diagramas de Corte e o PCE

Duas restrições específicas para o desenho de diagramas de corte em serrarias devem ser respeitadas. A mais simples e direta é a de que sejam empacotadas peças retangulares (peças de madeira) em regiões circulares (face da tora). Além disto, devido ao fato de as toras serem geralmente desdobradas através de serras de fita e/ou serras circulares, os diagramas de corte devem obedecer uma organização baseada em estágios. Esta organização, por vezes, é também de chamada de organização por níveis ou por faixas. Stoyan e Chugay (2009) estudaram a primeira restrição citada ao tratar do problema de empacotamento de cilindros e paralelepípedos retangulares em regiões arbitrárias. A segunda restrição foi analisada por Ortmann et al., (2010) que apresentam novas e melhoradas heurísticas para corte e empacotamento retangular baseados em estágios.

2.3. *Softwares* geradores de Diagramas de Corte

Em 1972, Pnevmaticos e Mann publicaram um algoritmo para conversão ótima de fuste de árvores em toras. Posteriormente, nas décadas de 70 e 80 surgiram algoritmos e sistemas para a obtenção de diagramas de corte em toras de madeira. Briggs (1977) estudou a utilização de programação dinâmica para transformar toras em peças de madeira. Briggs (1980) estudou o uso da mesma técnica para a conversão de árvores em toras e de toras em madeira serrada.

Reinders (1989), construiu o sistema “Ideas” para avaliação completa da conversão de árvores e de toras, bem como a otimização na comercialização de produtos florestais, constituindo em um dos principais estudos sobre otimização de multiprodutos da década.

Dois exemplos de *softwares* construídos no Brasil para otimização da conversão de toras em madeira serrada são o SawModel, que é um componente do sistema SigmaE, baseado nos trabalhos de Leite (1994) e Leite et. al.,(2000) e o *software* MaxiTora (da empresa Optimber), desenvolvido por pesquisadores da UFPR. Nas duas abordagens, o PCE é dividido em fases resolvidas como Problema da Mochila e, assim como nos algoritmos de Briggs(1977), Briggs (1980) e Reinders (1989), solucionado através de Programação Dinâmica. A otimização do corte é feita em duas dimensões distintas, vertical e horizontal, através de uma equação de recorrência. Mais detalhes sobre o componente SawModel e sobre o *software* Maxitira são vistos na próxima seção deste trabalho.

O sistema SigmaE é um sistema livre e completo de apoio á decisão, que inclui os seguintes módulos: modelagem e projeção de distribuições de diâmetro (Campos e Leite, 2009); método dos ingressos percentuais (Garcia e Leite, 1999); Simulador de desbastes; conversão ótima de fustes em toras

(módulo DynaTree), conversão ótima de toras em madeira serrada, lâminas de madeira ou aglomerados (DynaTree + SawModel), Valuation (método de avaliação econômica de cenários de manejo). Os módulos do SigmaE podem ser usados de modo independente ou em conjunto. O segundo caso se aplica para definições de planos de manejo. O módulo SawModel ou o sistema completo (SigmaE) podem ser obtidos diretamente com os autores (hgleite@gmail.com, hgleite@ufv.br). Para o presente estudo, o módulo de interesse é apenas o SawModel.

A partir da análise do problema abordado, sua simplicidade de requisitos apesar da complexidade das soluções possíveis e tendo em vista as boas soluções obtidas pelos dois últimos trabalhos citados, neste trabalho foi considerada a união de técnicas empregadas nestes sistemas a fim de gerar um sistema que será avaliado na obtenção dos diagramas de corte em questão.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

A fim de gerar um algoritmo eficaz e confiável capaz de gerar Diagramas Otimizados de Corte de toras em serrarias, neste trabalho foi desenvolvido um *software* que considera o Corte Paralelo e, utilizando o método comparativo, contestamos a eficiência do algoritmo proposto em relação ao modelo desenvolvido na UFPR que resultou o *software* comercial MaxiTora, da empresa Optimber, e em relação ao modelo desenvolvido por Leite et. al., (2000) implementados no módulo SawModel do sistema SigmaE. A partir desta contestação, o algoritmo foi adaptado para gerar os Diagramas de Corte para o Corte Radial.

Nesta seção do trabalho, encontram-se o detalhamento das funcionalidades encontradas no *software* MaxiTora e no módulo SawModel, bem como a forma como a otimização é realizada em cada um. Em seguida, detalha-se o processo de otimização do algoritmo proposto para o Corte Paralelo e a adaptação matemática realizada para que o algoritmo seja capaz de gerar padrões do Corte Radial.

3.1. Software MaxiTora para o Corte Paralelo

De acordo com o Guia de Instruções para o Usuário do MaxiTora versão 1.4.0, gentilmente cedido pela empresa OpTimber – Otimização e Informática, o sistema nasceu da união de esforços de profissionais das áreas de Matemática, Engenharia Florestal, Engenharia de Produção, Análise de Sistemas e Programação e Processamento de Dados e é utilizado como ferramenta em indústrias de madeira serrada.

Definido como um programa de simulação de desdobro, o MaxiTora tem o objetivo de realizar a otimização de cortes nas serrarias e permitir uma visualização prévia dos produtos e rendimentos obtidos.

A interface do programa consiste de duas telas básicas: Cadastro de Produtos e Otimização de Desdobro, ambas detalhadas abaixo.

3.1.1. Cadastro de Produtos

Na tela de cadastro são inseridas as informações utilizadas como dados de entrada para o processamento da otimização e geração dos referentes Diagramas de Corte (Figura 3.1).

Através de nove colunas, o usuário é capaz de fornecer os dados condizentes à situação real que deseja simular.

A coluna “Id” corresponde a uma identificação de rápido acesso para o produto.

A coluna “Nome” corresponde a uma identificação mais específica ao produto de acordo com o que for mais adequado para o usuário.

Na coluna “Espessura”, o usuário define a primeira das duas dimensões do produto que se deseja extrair da tora, com valores em milímetro.

Cadastro de Produtos

Id	Nome	Espessura	Largura	Valor	Virar	Livre	SemiBloco	Costaneira
1	TÁBUA 27X55	27,0	55,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	TÁBUA 27X100	27,0	100,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	TÁBUA 27X75	27,0	75,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	TÁBUA 27X80	27,0	80,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5	TÁBUA 41X55	41,0	55,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6	TÁBUA 41X85	41,0	85,0	1,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7	TÁBUA 41X110	41,0	110,0	2,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
8	TÁBUA 41X115	41,0	115,0	2,00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
*					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Opcoes:
 Espessura Serra Vertical
 Espessura Serra Horizontal
 Percentual Casca
 Otimizar por Volume Valor

Figura 3.1 – Tela de Cadastros de Produtos MaxiTora (Fonte: Guia de Instruções para o Usuário)

Analogamente à coluna anterior, a coluna “Largura” é utilizada para definir, em milímetros, a segunda dimensão dos subprodutos da madeira a serem gerados.

Em “Valor”, o usuário informa ao sistema o valor monetário de determinada peça.

A coluna “Virar”, quando marcada, permite que o sistema considere um giro de 90° nos produtos de forma a possibilitar a aparição de peças no sentido horizontal no diagrama ótimo de corte. Se esta coluna não for marcada, os produtos são considerados na vertical.

A coluna “Livre”, sendo marcada, permitirá ao programa a utilização da peça no tipo de otimização Livre, onde o mesmo irá definir a disposição

das peças e seus respectivos cortes para o maior rendimento possível da classe diamétrica testada.

A coluna “Semi-bloco” define que a otimização seja realizada simulando um sistema de semi-bloco no corte da tora. Este sistema consiste na retirada de duas costaneiras paralelas na tora tornando mais fácil o manuseio do produto na serra.

Por fim, a coluna “Costaneira” é marcada para definir se a peça poderá ser utilizada pelo programa para preencher costaneiras verticais ou horizontais (caso a coluna “Virar” esteja marcada).

Além destas colunas, o *software* ainda possui uma região na tela de cadastros intitulada “Opções” que permite a informação de mais quatro detalhes importantes para o processamento: “Espessura da Serra Vertical”, “Espessura da Serra Horizontal”, “Percentual Casca”, “Otimizar por”.

Nos dois primeiros campos “Espessura da Serra Vertical” e “Espessura da Serra Horizontal”, devem ser inseridas, em milímetros, as espessuras das serras que possivelmente executarão cortes na vertical e na horizontal, respectivamente. Este valor é importante para que se defina o correto espaçamento entre uma peça e outra no diagrama.

Em “Percentual Casca” o operador do programa informa a porcentagem, em relação ao diâmetro, de casca presente na tora a ser cortada. O valor zero nesse campo define uma tora previamente descascada.

O último campo da tela de Cadastros de Produtos, “Otimizar por” permite a escolha entre as opções “Volume” e “Valor” sendo que a otimização por volume indica que será definido um melhor aproveitamento do volume da tora, minimizando o desperdício e a otimização por valor indica que será definido o melhor rendimento baseado no valor de cada subproduto informado na coluna “Valor” detalhada acima.

3.1.2. Otimização de Desdobro

A tela de exibição dos resultados da otimização exibe diversas opções de configurações para o usuário e é a tela de principal interesse para o operador de serras de uma serraria. A Figura 3.2 mostra um exemplo desta tela.

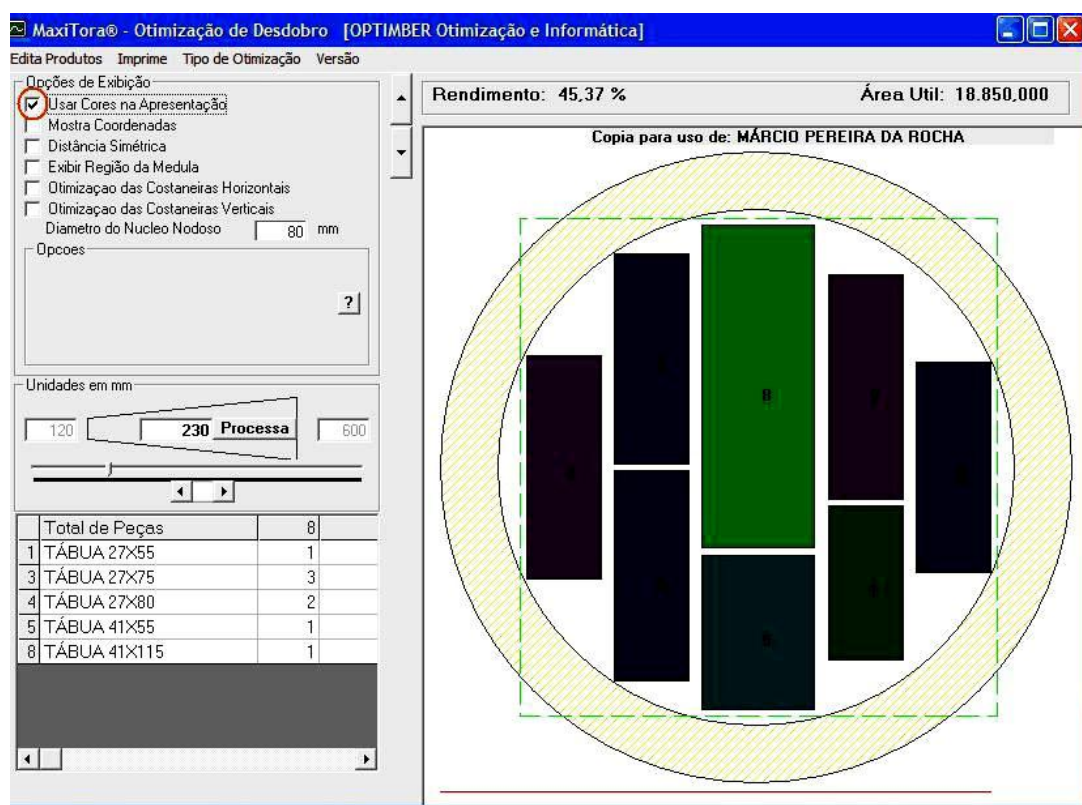


Figura 3.2 – Tela de Otimização de Desdobro (Fonte: Guia de Instruções para o Usuário)

A região “Opções de Exibição” permite ao usuário modificar a apresentação do Diagrama de Corte. “Usar Cores na Apresentação” é utilizada para que cada diferente produto informado na tela Cadastro de Produtos seja exibido numa cor específica.

Os campos “Mostra Coordenadas” e “Distância Simétrica” são utilizados em conjunto para que, na exibição do diagrama, os valores das coordenadas matemáticas x e y sejam exibidas próximas ao ponteiro do mouse.

Caso o usuário deseje que a região da medula central da tora seja marcada no diagrama a fim de visualizar quais peças serão retiradas desta área, clica-se em “Exibir Região da Medula”.

Finalmente, nas “Opções de exibição”, as duas últimas caixas correspondem às opções de “Otimização das Costaneiras Verticais” e “Otimização das Costaneiras Horizontais”. Ao marcá-las o usuário dará o comando ao programa para que o mesmo busque inserir peças nas costaneiras verticais e horizontais.

Também é exibida, na região inferior esquerda desta tela, uma representação textual do Diagrama de Corte gerado pelo sistema.

3.1.3. Processamento dos dados

Como este é um *software* comercial, o detalhamento do processamento utilizado no MaxiTora não está amplamente disponível na literatura. Uma pequena descrição é feita por Novak (2007), como se segue:

Por ser baseado em Programação Dinâmica, o sistema faz a análise de estágios e utiliza-se de uma equação de recorrência. Os estágios são posições que variam de 1 em 1 milímetro, a partir de uma posição zero e alcançam o diâmetro da face da tora (Figura 3.3).

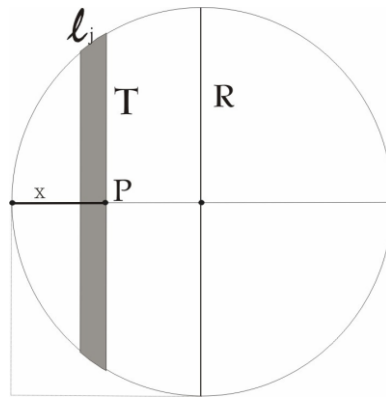


Figura 3.3 – Esquema MaxiTora. (Fonte: Novak, 2007)

Utiliza-se, como equação de recorrência, a expressão

$$f(x) = \max\{f(x - 1), f(x - l_j) + C_j\} \quad (1)$$

Onde a função $f(x)$ representa o ganho obtido com a porção da tora de tamanho x e C_j é o ganho obtido com fatia de espessura l_j . A obtenção de C_j é através da otimização unidimensional de um comprimento

$$2\sqrt{2Rx - x^2} \quad (2)$$

como descrito a seguir:

Analisando a figura 3.3, temos que

$$(R - x)^2 + T^2 = R^2$$

$$T^2 = R^2 - (R - x)^2$$

$$T = \sqrt{2Rx - x^2}$$

como T diz respeito a apenas metade da circunferência, a equação (2) é encontrada realizando a multiplicação por 2. Ainda segundo Novak (2007),

esta otimização é feita por Programação Dinâmica antecipadamente para as várias dimensões l_j e armazenada na memória.

3.2. Software SawModel para o Corte Paralelo

Desenvolvido no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa pelos professores Helio Garcia Leite e José Carlos Lopes Ribeiro, e registrado nesta mesma instituição federal em 2002, o SawModel é definido pelos próprios autores como um *software* de otimização de corte em serrarias.

Com o objetivo de exibir uma estrutura ótima de corte de toras no desdobro em serrarias, o módulo SawModel é composto por uma tela principal híbrida que funciona como tela de cadastros de toras e como tela de exibição de resultados e uma segunda tela de cadastro das peças que serão extraídas da tora cadastrada.

3.2.1. Cadastro de Produtos de Serraria

A tela “Produtos de serraria” exibe uma interface como a mostrada na figura 3.4. Na região “Otimizar serraria maximizando” é possível escolher entre “volume recuperado” e “lucro obtido”. Marcando a primeira opção, o sistema devolverá o Diagrama de Corte que melhor aproveita a área da face da tora, região de extração dos produtos, minimizando a área não utilizada. Marcando a segunda opção, o usuário garante que o sistema irá exibir o padrão de corte mais rentável para a serraria de acordo com os valores de cada peça cadastrados posteriormente.

Logo abaixo, encontra-se a região “Espessura da serra” com os campos Skx e Sky . Nestes campos, são informados os valores das espessuras

das serras que irão extrair os produtos realizando cortes na vertical (Skx) e na horizontal (Sky).

O cadastro de peças propriamente dito é feito no quadro localizado ao lado direito da tela onde existem três colunas. Cada linha diz respeito a uma peça diferente. Na primeira coluna, “Espessura Lx ”, o usuário informa quantos milímetros os produtos possuem de largura. Já na segunda coluna, “Espessura Ly ”, o número em milímetros da altura das peças.

Além destas regiões encontram-se botões auxiliares para os cadastros.

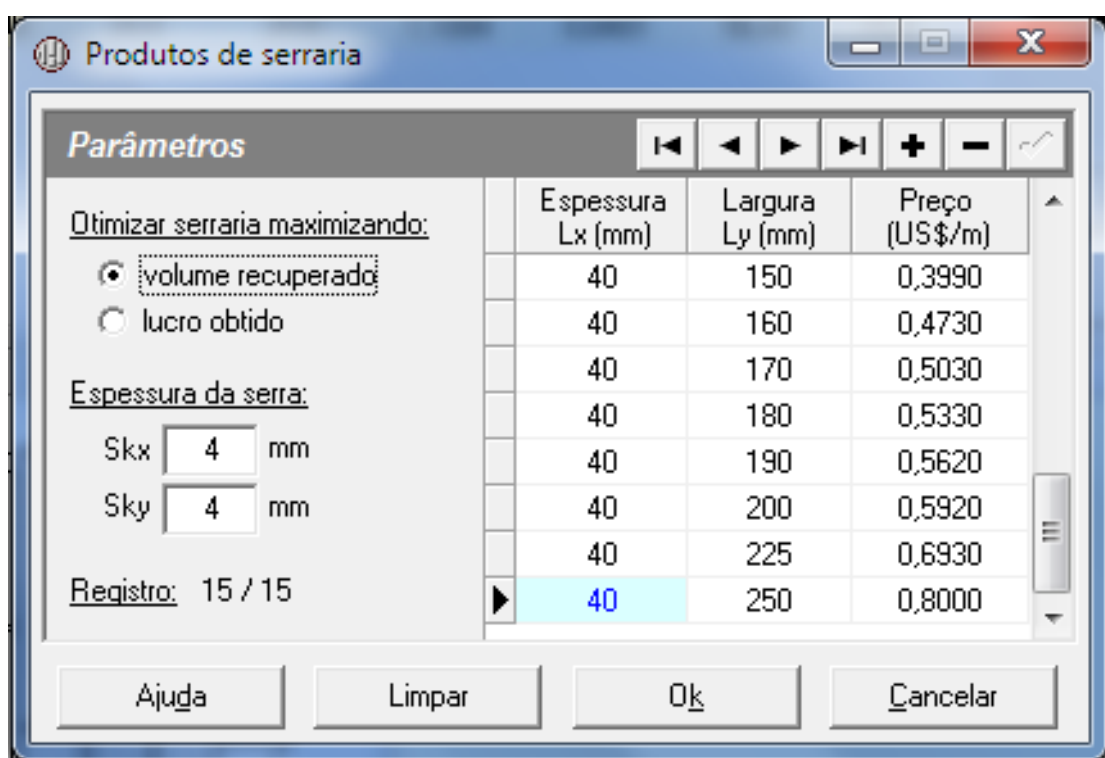


Figura 3.4 – Tela Produtos de Serraria do SawModel (Fonte: SawModel)

3.2.2. Tela Principal

Esta é a tela onde são inseridos e informados os dados da tora no quadro da parte superior (Figura 3.5).

As colunas referentes ao cadastro são:

“Tora n°” que é usada para informar uma identificação rápida para o material;

“Comp. (cm)” para a informação do comprimento total da tora;

“Maior diam. (cm)” com o valor do diâmetro maior e “Menor diam. (cm)” com o valor do diâmetro menor da tora. Estes campos dizem respeito ao formato cônico das árvores e conseqüentemente das toras retiradas de tais espécies;

“Volume total (m³)” e “Volume recup. (m³)” não são campos de inserção de dados, o próprio sistema calcula estes valores e exhibe ao usuário.

As demais colunas não referem-se ao cadastro das toras, são campos informativos para os resultados obtidos com o cálculo do Diagrama de Corte, são elas:

“Lucro(US\$)” que mostra a soma dos valores dos produtos que compõem o padrão de corte;

“Rend.(%)” que é o percentual de rendimento do mesmo padrão de corte.

No quadro “Esquema”, é exibida a informação visual do Diagrama de Corte enquanto em “Estrutura da toragem” é exibida a informação textual do diagrama calculado.

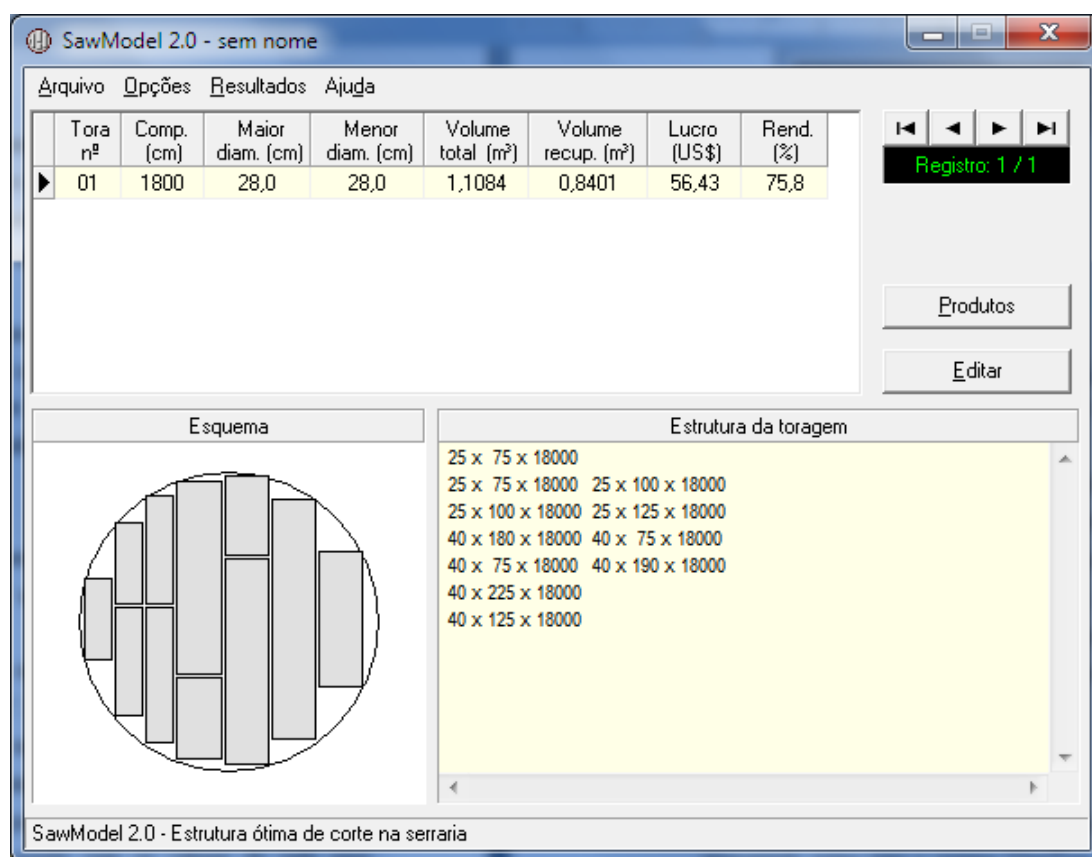


Figura 3.5 – Tela Principal do *Software* SawModel (Fonte: SawModel)

3.2.3. Processamento dos Dados

O método utilizado no sistema SawModel pode ser dividido em dois níveis.

A saber, numa serraria, a tora é repousada sobre a esteira da máquina de serrar e são realizados cortes sistemáticos uns paralelos aos outros. Esta divisão da tora a transforma em produtos chamados “tábuas-mãe”. No primeiro nível, é simulada esta primeira seção de cortes das toras.

O nível seguinte consiste em uma rotação de 90° nas tábuas-mãe que são submetidas novamente à máquina de cortar que finaliza a produção das peças demandadas. Sendo assim, a programação dinâmica funciona de forma análoga para os dois níveis em questão, bastando utilizar, no segundo nível, as

variáveis do algoritmo de forma perpendicular ao nível anterior. Em outras palavras, a PD é realizada considerando um eixo horizontal no primeiro nível e, em seguida, considerando um eixo vertical para o segundo nível.

No trabalho de Leite (1994) as equações 3 e 4 referentes ao primeiro e ao segundo nível, estabelecidos com base nos trabalhos de Briggs (1977 e 1980) e Reinders (1989), são apresentadas da seguinte forma:

Sendo:

N_x = número de estágios no nível 2 (eixo x);

k_x = intervalo de estágio no nível 2;

$n_x k_x$ = variável de estado no nível 2, em mm;

s_{kx} = espessura de corte no nível 2;

$l_x[z]$ = variável decisória no nível 2, correspondente à espessura a ser cortada entre dois estágios consecutivos ou não, em mm;

Z = número total de produtos;

z = subgrupo de Z , com largura $\geq n_x k_x$ e/ou largura $\geq n_y k_y$;

N_y = número de de estágios no nível 3 (eixo y);

k_y = intervalo de estágio no nível 3, em mm;

$n_y k_y$ = variável de estado no nível 3, em mm;

s_{ky} = espessura de corte no nível 3;

$l_y[z]$ = variável decisória no nível 3, correspondente à largura a ser cortada entre dois estágios, consecutivos ou não, no nível 3, em mm;

$F_{n_x}(n_x k_x)$ = valor máximo da seção da tora entre os estágios 0 e n_x , com intervalos k_x no nível 2;

w = número do produto;

$G_{n_y}(n_y k_y, n_x k_x, n_x k_x - l_x[z])$ = máximo valor da função para a espessura definida entre os estágios n_x e $n_x - \frac{l_x[z]}{k_x}$, como função da variável de estado $n_y k_y$, no nível 3;

$G_{n_x}(n_y k_y, n_x k_x, n_x k_x - l_x[z])$ = máximo valor no estágio n_y da seção da tora, entre os estágios n_x e $n_x - \frac{l_x[z]}{k_x}$ no nível 2 e entre os estágios 0 e n_y no nível 3;

$V(w, n_x k_x, n_y k_y, l_x[z], l_y[z])$ = valor do produto w , obtido nas coordenadas $n_x k_x$ e $n_y k_y$, de espessura $l_x[z]$ e de largura $l_y[z]$;

tem-se,

Primeiro Nível - Equação (3)

$$F_{n_x}(n_x k_x) = \max \left\{ G_{n_y}(n_y k_y, n_x k_x, n_x k_x - l_x[z]) + F_{n_x - \frac{l_x}{k_x}}(n_x k_x - l_x[z] - k_x) \right\}$$

onde $0 \leq n_x \leq N_x, z \in Z, f_o = 0$;

Segundo Nível - Equação (4)

$$G_{n_y}(n_y k_y, n_x k_x, n_x k_x - l_x[z]) = \max \left\{ V(w, n_x k_x, n_y k_y, l_x[z], l_y[z]) + G_{n_y - \frac{l_y[z]}{k_x - s_{ky}}}(n_y k_y - l_y[z] - s_{ky}) \right\}$$

onde, $0 \leq n_y \leq N_y, G_o = 0$.

A avaliação dos produtos nos estágios é feita em ordem crescente do valor de espessura $l_x[z]$ e largura $l_y[z]$. Isto acontece pois, se num estágio não é possível inserir uma peça de uma determinada espessura ou largura, não será possível inserir nenhuma peça cujas dimensões sejam de tamanho maior que a peça citada anteriormente, sendo desnecessária a avaliação.

Pode-se perceber que apesar de apresentarem diferenças na forma, as equações de recorrência do sistema MaxiTora e do sistema SawModel são equivalentes e foram estabelecidas conforme Briggs (1977, 1980), Reinders (1989) e Leite (1992).

No primeiro sistema, a cada iteração x por um estágio da PD, é avaliado o valor $F(x)$ do encaixe de cada uma das peças a serem avaliadas comparando com o valor obtido no estágio anterior $F(x - 1)$. Se $F(x - l_j) > F(x - 1)$, as peças escolhidas em $F(x - 1)$ são imediatamente removidas para dar lugar a peça escolhida em $F(x)$, caso contrário, $F(x) = F(x - 1)$, ou seja, não há alteração no diagrama de corte.

Por sua vez, o sistema SawModel, não leva em consideração o estágio $F(x - 1)$, avaliando apenas o estágio $F(x)$, escolhendo encaixar a peça que gerar valor máximo ao corte. Porém, é importante lembrar que nos dois sistemas, a avaliação do estágio $F(x)$ considera também o valor de $F(x - l_j)$, onde l_j é a espessura da peça que se está decidindo encaixar ou não no estágio x . Desta forma, no momento que acontece esta última avaliação, os dois modelos se equivalem, uma vez que a mesma alteração no diagrama de corte é realizada. A comparação com o estágio anterior $F(x - 1)$ gera um ganho em eficiência computacional, mas a não utilização desta comparação não afeta o resultado final obtido. Então, para o problema em questão, as equações de recorrência dos sistemas MaxiTora e SawModel são equivalentes. Uma diferença considerável entre os sistemas está no intervalo de estágio: enquanto o MaxiTora avalia a otimização de milímetro em milímetro, o SawModel

encontra tal intervalo através do mínimo divisor comum (MDC) entre o comprimento dos produtos e os esquemas de corte de estágio.

3.3. Algoritmo Proposto

Teoricamente, as abordagens dos sistemas MaxiTora e SawModel gerariam os mesmos resultados, porém ao executar os testes, diferenças são percebidas nos valores retornados por cada sistema, deixando claro que as diferenças intrínsecas a cada sistema na forma de implementação e manejo computacional das variáveis, influenciam diretamente nos resultados. Desta forma, foi desenvolvido um terceiro algoritmo a ser detalhado nesta seção.

Lançando mão da familiaridade do leitor neste ponto com a otimização para o problema de Corte Paralelo (discutido na apresentação dos sistemas MaxiTora e SawModel), primeiramente, o algoritmo será detalhado para este mesmo problema e em seguida é apresentada a otimização para o Corte de Quarto de Tora.

Como dados de entrada, são informados, em milímetros, o raio r da tora e as dimensões (altura h e largura l) de cada peça que se deseja obter a partir do corte. A partir destes, é função do algoritmo informar, como dados de saída, o Diagrama de Corte, o valor total (soma do valor de todas as peças do diagrama), o volume recuperado e o rendimento obtido em relação ao volume total da tora.

Assim como acontece nos modelos SawModel e Maxitora, o algoritmo proposto para este trabalho será dividido em duas fases, vertical e horizontal. Além disto, uma terceira fase, de pós-otimização também é realizada durante o processamento.

3.3.1. Primeira Fase

Na primeira fase, é realizada uma otimização unidimensional para uma barra de comprimento igual ao diâmetro D da face da tora. Os estágios da PD percorrem esta barra em variações de 1 em 1 milímetro e, para cada uma destas posições, é feita a otimização unidimensional através da altura h de cada uma das peças a serem produzidas.

A equação de recorrência utilizada, é a mesma do *software* MaxiTora (Equação 1), ou seja:

$$\begin{aligned}f(0) &= 0 \\f(x) &= \max\{f(x - 1), \max_j\{f(x - l_j) + C_j\}\} \\j &= 1, \dots, n = \text{total de peças}\end{aligned}$$

Na tabela da PD, as linhas variam de zero a D , e em cada uma é armazenado o valor do ganho obtido e as peças que geraram tal ganho. Como a otimização visa o maior aproveitamento da área da face da tora, o valor de cada peça é obtido multiplicando sua altura pela sua largura, ou seja, a área da peça. Desta forma, o ganho obtido em cada estágio da otimização é calculado somando o valor (área) de cada peça escolhida. É importante notar que, mesmo sendo esta fase de otimização unidimensional, o valor de cada peça é considerado em duas dimensões (área da peça). As razões para tal consideração serão melhor entendidas após o detalhamento da segunda fase do algoritmo.

Uma vez completa, a tabela da PD é facilmente lida: para saber-se quais peças otimizam uma posição x do diâmetro, tal que $0 \leq x \leq D$, basta ler a linha x da tabela, onde estão armazenadas as informações necessárias. Como já mencionado, as linhas armazenam as peças que geram o ganho

obtido. Considerando essas peças dispostas uma acima da outra, temos que cada linha da tabela possui o que será chamado de “coluna de peças”.

Outro detalhe importante desta fase é a criação de novas peças. Cada coluna de peças é considerada como uma nova peça criada de altura igual a soma das alturas das peças inseridas na coluna e de largura igual a maior largura dentre as peças inseridas em tal estágio. Estas, e não as peças definidas como dados de entrada, serão as consideradas pela fase 2 do algoritmo.

Neste ponto da fase 1, nenhuma tentativa de inserção é descartada, ou seja, a cada tentativa de inserção, uma nova peça é criada, inserida em uma lista que armazena as peças que serão consideradas para a segunda fase e somente então são feitos os testes de otimização da equação de recorrência. Desta forma, sem comprometer a eficiência computacional do sistema, a segunda fase passa a ter um maior leque de escolha entre peças do que teria se apenas as peças ótimas da otimização unidimensional fossem consideradas.

3.3.2. Segunda Fase

A segunda fase do algoritmo, a exemplo do algoritmo desenvolvido por Leite (1994), é feita considerando um giro de 90° na face da tora, ou seja, é feita a otimização perpendicular à primeira fase. Considerando apenas as peças novas criadas na primeira fase, usando a Equação (1) de recorrência e percorrendo-se o diâmetro da tora em estágios de 1 mm, uma nova tabela de PD é criada levando em conta algumas restrições.

Assim como feito pelos algoritmos usados como base, cada estágio tem uma altura T calculada através do Teorema de Pitágoras que gera a Equação (2)

$$T = 2\sqrt{2Rx - x^2}$$

já detalhada neste trabalho. A cada iteração da PD, verifica-se se a peça cabe, em altura, no valor T daquele estágio e evita-se cálculos desnecessários para peças impossíveis de serem encaixadas no determinado ponto.

A nova tabela gerada nesta segunda fase traz, em cada linha x ($0 \leq x \leq D$), a coluna de peças mais interessantes a serem encaixadas no ponto x . Quando $x = D$, a linha da tabela informa o valor final da otimização, as peças que melhor aproveitam a área total da tora e em que ponto do diâmetro as peças devem ser encaixadas, gerando, assim, a solução do problema.

Como a segunda fase utiliza as peças criadas na primeira fase, é de grande importância que a otimização unidimensional leve em conta também a largura dos objetos analisados. Sem esta consideração, peças de largura exagerada poderiam ser encaixadas na barra de comprimento D se a relação entre altura e valor da peça fosse interessante para tal otimização. Isto faria com que grande parte da face da tora fosse populada, na segunda fase do algoritmo, com poucas peças de grande largura, não aproveitando de maneira eficiente a área disponível. Por conta deste fato, na primeira fase, o valor de cada peça é calculado como a multiplicação entre altura e largura, a área da peça.

Ainda nesta fase, é realizada uma validação de largura das colunas de peças que serão encaixadas. Se uma coluna de peças possui largura l , altura h e está sendo avaliada a viabilidade de encaixá-la na posição x do diâmetro da tora, verifica-se se a faixa $x - l$ possui altura maior ou igual a h . Se isto não for verdadeiro, esta coluna de peças é descartada para o estágio x . Esta avaliação evita cálculos desnecessários durante o processo. Porém, é possível que sejam encaixadas colunas de peças que não aproveitem ao máximo, na segunda fase, a área disponível, gerando espaços vazios no diagrama de corte.

Por isto, uma terceira fase foi considerada para o algoritmo desenvolvido neste trabalho, uma fase de pós-otimização.

3.3.3. Terceira Fase

Nesta terceira fase, é considerado o retângulo cuja altura é o valor que vai da parte superior de uma coluna de peças até tocar o limite da circunferência da face da tora e largura igual a largura da coluna de peças. Neste retângulo, é feita uma otimização semelhante a feita nas fases 1 e 2, considerando as peças disponibilizadas como dados de entrada e, se possível, uma ou mais peças são encaixadas neste espaço.

De posse do diagrama de corte final, calcula-se o volume recuperado como a soma dos volumes das peças encaixadas e calcula-se, como razão entre volume recuperado e volume total da tora, o rendimento obtido na otimização.

Esta fase é diferencial entre os métodos descritos na literatura e o método proposto.

3.3.4. Adaptação para o Corte Radial

Além do algoritmo para resolver o problema do Corte Paralelo, foi considerado ainda um algoritmo que gere soluções para o problema de Corte Radial. Este problema consiste em cortar a face da tora em quatro partes iguais e retirar os subprodutos de madeira da peça obtida, o quarto de face de tora.

Para a obtenção de tal objetivo, foram realizadas adaptações geométricas no algoritmo apresentado anteriormente a fim de garantir a consistência das soluções.

Primeiramente, o quarto de círculo é considerado na posição apresentada na Figura 3.6, com o raio da tora na vertical.

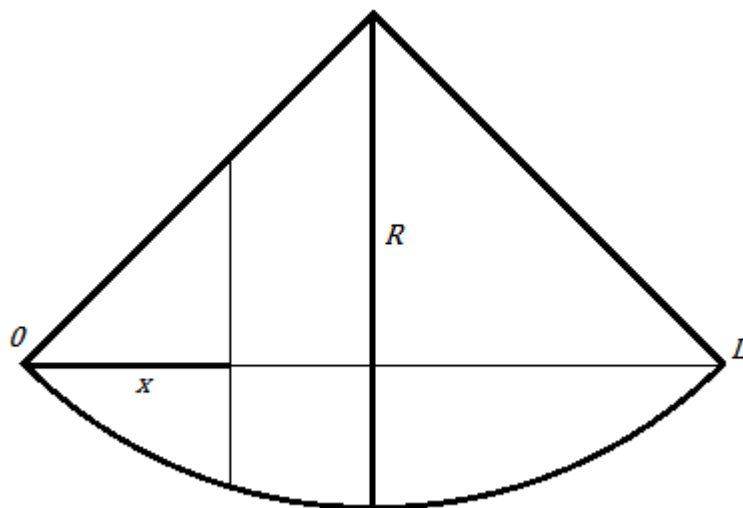


Figura 3.6 – Representação de um Quarto de Tora

A partir desta posição, a tora é dividida em estágios de 1 mm paralelos ao raio da tora, começando do ponto O (zero), chegando até o ponto L .

A exemplo do algoritmo que resolve o problema do Corte Paralelo, a primeira fase consiste na otimização unidimensional através da Equação (1) de recorrência. Porém, para o caso do Corte Radial, a barra unidimensional passa a ter o comprimento igual ao raio da tora e a partir da tabela de PD encontrada, é possível avaliar a otimização para cada faixa da tora a ser analisada na próxima fase do algoritmo.

Na segunda fase, a tora é percorrida na horizontal do ponto O até o ponto L e é avaliada como na segunda fase do algoritmo proposto para o Corte Paralelo.

Outra adaptação importante é a do valor T da altura de cada faixa encontrado pela Equação (2), que passa a ser referido por H e calculado da seguinte forma:

Considere a Figura 3.7, onde são especificados o valor x da posição da faixa que se deseja saber a altura H , R é o valor do raio da tora e Y é um cateto do triângulo retângulo de hipotenusa R .

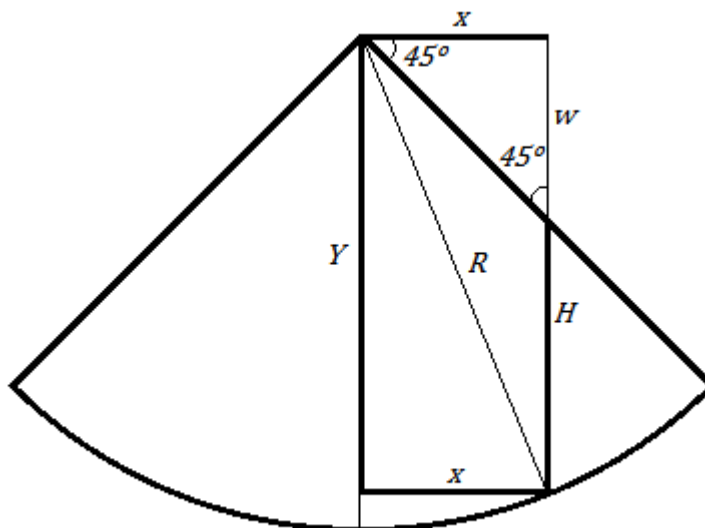


Figura 3.7 – Cálculo da altura de uma faixa

Pelo Teorema de Pitágoras,

$$R^2 = x^2 + Y^2$$

$$Y = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (5)$$

Note que, $Y = H + w$ e que o triângulo retângulo de catetos w e x é isósceles (ângulos internos de 45°), logo seus catetos são iguais, ou seja, $w = x$.

Assim, $Y = H + x$ e, pela Equação (5) temos que a medida da altura H da faixa que corta a tora numa posição x é dada por

$$H = \sqrt{R^2 - x^2} - x \quad (6)$$

Consideremos agora $x = L$. Neste caso, podemos calcular o valor de L através do cosseno do ângulo de 45° . Seja,

$$\cos 45 = \frac{L}{R}$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{L}{R}$$

$$L = \frac{R\sqrt{2}}{2} \quad (7)$$

Sendo assim, temos que o valor de x que percorre o quarto de tora em questão, varia entre 0 e $\frac{R\sqrt{2}}{2}$, ou seja, $-\frac{R\sqrt{2}}{2} \leq x \leq \frac{R\sqrt{2}}{2}$.

A terceira fase, pós-otimização é semelhante à apresentada para o algoritmo do Corte Paralelo, bastando apenas atentar para o fato de que o retângulo considerado passa a ter o valor de sua altura como sendo a dimensão que vai do ponto mais alto da coluna de peças e alcança a linha onde a tora sofreu o corte que a transformou em quarto de tora.

É importante ressaltar que todo o algoritmo proposto (para corte paralelo e corte radial) considera em suas três fases a espessura da serra realizando, assim, um desenho mais próximo à realidade de uma indústria.

Capítulo 4

Resultados Computacionais e Análise dos Resultados

Como apontado anteriormente, o algoritmo desenvolvido neste trabalho contempla propriedades dos algoritmos utilizados nos sistemas MaxiTora e SawModel. Desta forma, foram gerados resultados para os três sistemas (MaxiTora, SawModel e o algoritmo proposto) a fim de se realizar a comparação entre os valores obtidos.

É importante salientar que o algoritmo proposto gera resultados para o Corte Tangencial e para o Corte Radial, porém, não foram encontrados disponíveis na literatura, resultados para a otimização do Corte Radial que possibilitassem comparação, de forma que a análise qualitativa dos valores obtidos para este tipo de corte foi feita através de observações matemáticas.

No trabalho de Novak (2007), foi feito um vasto estudo sobre os impactos da utilização do *software* MaxiTora em situações práticas da indústria de madeira serrada. Através de dados reais de uma serraria, modelos matemáticos e geração exaustiva de padrões de corte no *software* mencionado, foram levantados os custos de produção de peças demandadas e otimizados

tais valores de forma a encontrar a distribuição de toras versus padrões que minimizava o valor gasto pela empresa.

Utilizando a técnica implantada para geração dos resultados de Novak (2007), foram analisados os padrões de corte gerados pelo *software* SawModel bem como os padrões de corte gerados pelo algoritmo proposto.

4.1. Técnica Novak para análise dos resultados

Na resolução do problema de minimização de custos do trabalho de Novak (2007), foram colhidos dados de demanda e estoque de uma empresa situada na cidade de Corbélia, Paraná, com mais de 40 anos de experiência no ramo de manejo florestal.

Para o estoque, foram consideradas toras de diâmetros variados separadas em classes diamétricas de 30 a 40 centímetros variando de dois em dois centímetros, num total de 950 unidades. O volume das amostras foi calculado através da aplicação direta da equação de volume do cilindro e o custo de cada amostra calculado multiplicando-se volume por valor de mercado.

Foram separadas duzentas toras de 30 centímetros de diâmetro, com volume de $0,2119 \text{ m}^3$, que custam para a serraria, cada uma, R\$12,70. Com diâmetro de 32 centímetros, foram consideradas cento e cinquenta toras, com volume de $0,2411 \text{ m}^3$ e custo de R\$14,50 cada uma. Cento e trinta toras de 34 centímetros foram utilizadas no estudo, cada uma custando R\$16,40 e ocupando um volume de $0,2725 \text{ m}^3$. Custando R\$ 18,40 a amostra, foram separadas na classe diamétrica de 36 centímetros, cento e vinte toras com $0,3052 \text{ m}^3$. Com diâmetro de 38 centímetros, valor de custo de R\$ 20,40, volume de $0,3400 \text{ m}^3$, foram consideradas cento e oitenta toras. E, por fim,

170 toras de 0,3768 m³, 40 centímetros de diâmetro e custo R\$22,50 foram analisadas. A tabela 4.1 resume estes dados.

Classe Diamétrica (cm)	Quantidade em Estoque (unidade)	Volume (m³)	Custo unitário (R\$)
30	200	0,2119	12,70
32	150	0,2411	14,50
34	130	0,2725	16,40
36	120	0,3052	18,40
38	180	0,3400	20,40
40	170	0,3768	22,50

Tabela 4.1 – Dados de toras em estoque da empresa considerada por Novak (2007)

Para a demanda, foram observados dois pedidos já disponíveis a serem entregues para o cliente. Destes dois pedidos, apenas um foi estudado e suas características são: 1000 peças de 2,5 centímetros de largura por 12,5 centímetros de altura, 1000 peças de 7,5 centímetros de largura por 7,5 centímetros de altura, 1000 peças de 5 centímetros de largura por 6 centímetros de altura e 500 peças de 5 centímetros de largura por 15 centímetros de altura (Tabela 4.2).

Dimensões das peças (cm)	Quantidade demandada (unidade)
2,5 x 12,5	1000
7,5 x 7,5	1000
5 x 6	1000
5 x 15	500

Tabela 4.2 – Dimensões das peças na serraria

De posse dos dados de estoque e demanda, é necessário descobrir a quantidade de toras a serem cortadas necessárias para a obtenção do número de peças demandadas. O número de toras retiradas do estoque gera o custo final de produção da demanda. Este número de toras depende dos padrões de corte utilizados em cada uma. Um tora, cortada de acordo com determinado padrão de corte, é transformada em um número de peças da carteira de demanda. Utilizar a restrição de cortar todas as toras seguindo o mesmo padrão de corte é inviável, devido aos diferentes diâmetros de cada amostra e às diferentes dimensões de cada demanda. Desta forma, vários padrões diferentes são utilizados no desdobro e quanto maior o número de padrões, maior o número de opções e conseqüentemente melhor a utilização de cada classe diamétrica.

Seguindo este fato, foi estipulado que cada padrão de corte seria gerado considerando todas as combinações de peças possíveis, ou seja, 2^n padrões, onde n é o número de diferentes peças demandadas, resultado em 2^4 , 16 padrões de corte para cada classe diamétrica. Atentando para o fato que das 16 combinações possíveis, uma é aquela que não considera nenhuma peça e observando que esta combinação não faz sentido para o estudo, tem-se 15 combinações para 6 classes diamétricas, 90 padrões de corte a serem gerados

utilizando o *software* MaxiTora, o módulo SawModel e o algoritmo proposto, totalizando 270 padrões a serem estudados.

Na tabela 4.3, onde P1, P2, P3 e P4 representam as peças descritas na tabela 4.2, o campo marcado com \otimes mostra uma peça não considerada no cálculo do padrão de corte e o campo marcado com \checkmark mostra que a peça foi considerada no cálculo do padrão de corte, podemos observar detalhadamente as 16 combinações que Novak (2007) considerou.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
P1	\checkmark	\otimes	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\otimes	\otimes	\otimes	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\otimes	\otimes	\otimes	\otimes
P2	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\checkmark	\otimes	\otimes	\checkmark	\otimes	\checkmark	\otimes	\otimes	\otimes
P3	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\otimes	\checkmark	\otimes	\otimes	\otimes	\checkmark	\otimes	\otimes
P4	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\checkmark	\otimes	\checkmark	\otimes	\otimes	\otimes	\otimes	\otimes	\checkmark	\otimes

Tabela 4.3 – Arranjo de peças para a geração de padrões de corte

Para encontrar o melhor conjunto de relações entre padrões de corte e classes diamétricas, foi criado um modelo matemático baseado em Programação Linear que minimiza os custos de produção. Considerando K os tipos de toras separados em classes diamétricas, c_k representa o custo de toras do tipo $k \in K$, x_j^k é a variável de decisão e representa o número de toras do tipo k que serão cortadas segundo o padrão de corte $j \in J$, onde J são os padrões de corte gerados. O Modelo Matemático MM1 de Novak (2007) é descrito como se segue:

$$\text{Min } F = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{NP_k} c_k x_j^k$$

s.a.

1. $\sum_k \sum_j a_{ij}^k x_j^k = q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, J$
2. $\sum_j x_j^k \leq E_k, \quad k = 1, 2, \dots, K$

onde:

a_{ij}^k são os padrões de corte j da tora de tipo (diâmetro) k ;

x_j^k é o número de toras tipo k que serão cortadas segundo o padrão j ;

q_i é a quantidade da demanda do tipo i , (matriz $m \times 1$);

E_k é a quantidade em estoque de toras do tipo k (matriz $m \times 1$);

c_k é o custo da tora do tipo k , (matriz $1 \times n$);

$NP_k = n^\circ$ de padrões de corte para a tora tipo k , (índice).

A primeira restrição do modelo diz respeito ao atendimento da demanda: sendo a_{ij}^k o número de peças do tipo i produzidas pelo padrão de corte j gerado para toras do tipo k e q_i a quantidade de peças do tipo i demandada, o número de peças produzidas deve ser igual ao número de peças demandadas.

A segunda restrição visa atender ao estoque, ou seja, a quantidade de toras disponíveis: o número de toras do tipo k que serão cortadas segundo o padrão de corte j (x_j^k) deve ser menor que o número E_k de toras estocadas.

4.2. Utilização de *Software* Gerador de Padrão de Corte

Anteriormente à geração de resultados, é importante explicitar o uso dos *softwares* geradores de padrão de corte.

Para o usuário comum, um *software* desse tipo se mostra bastante simples, pois possui apenas o caso de uso “gerar padrão de corte”. Este caso de uso é subdividido em três tarefas: informar o diâmetro da tora; informar as dimensões das peças a serem produzidas; acionar o cálculo do Diagrama. Desta forma, nota-se que os sistemas geram um padrão de corte para cada conjunto de peças e diâmetro de toras.

Sendo assim, caso o operador desejar visualizar um Diagrama de Corte para a produção de três peças com dimensões 4,5 cm X 10 cm, 7 cm X 7 cm e 5 cm X 6 cm em uma tora de 38 cm de diâmetro, basta informar estes dados e o cálculo será realizado. Porém, se o operador desejar saber o resultado para o mesmo diâmetro de tora e para duas das três peças citadas, é necessário que a peça excedente seja removida do conjunto de peças do sistema e acionar um novo cálculo.

Dados adicionais podem ser, e é bastante encorajado que sejam, considerados, como a espessura das serras e a espessura da casca da tora a ser cortada. Através destas informações e das dimensões de peças e de tora, o sistema é capaz de realizar, com boa eficiência, a otimização desejada.

4.3. Geração de Resultados

Como o método de avaliação dos resultados gerados é a comparação entre sistemas, a geração de resultados seguiu passos bem definidos que foram

sistematicamente executados diferindo apenas no momento da escolha do gerador de padrão de cortes (MaxiTora, SawModel ou Algoritmo Proposto). Seguem abaixo os passos executados:

Passo 1 – De acordo com a tabela 4.3 e usando as peças da tabela 4.2, gerar 15 padrões de corte para cada classe diamétrica (30, 32, 34, 36, 38 e 40 cm) utilizando o sistema SawModel e o Algoritmo Proposto, gerando o total de 180 padrões;

Passo 2 – Criação de 18 matrizes (*arrays* bidimensionais), uma para cada classe diamétrica. Cada matriz com valores a_{ij} = número de peças i (tabela 4.2) produzidas de acordo com o arranjo j (tabela 4.3) obtidos pelos padrões calculados para os sistemas MaxiTora, Sawmodel e o algoritmo proposto (6 matrizes para cada sistema);

Passo 3 – Alimentar o Modelo Matemático MM1 com os *arrays* bidimensionais criados no passo 2 e calcular a otimização;

É importante ressaltar que o passo 1 não foi repetidos no *software* MaxiTora, pois este é um *software* comercial e não nos foi cedida a sua utilização. Sendo assim, foram considerados os padrões apresentados por Novak (2007) em seu trabalho.

Ao final destes passos, o modelo MM1 retorna o número de toras de cada classe diamétrica que devem ser cortadas usando determinado padrão de corte afim de atender a demanda:

$$\begin{aligned}
 x_1(i_1, j_1) &= n_1 \\
 x_2(i_2, j_2) &= n_2 \\
 &\vdots \\
 x_n(i_n, j_n) &= n_n
 \end{aligned}$$

Onde x é a variável de decisão,

i_n é a classe diamétrica (1 = 30 cm, 2 = 32cm, ..., 6 = 40cm)

j_n é o padrão de corte de acordo com a tabela 4.3 ($1 \leq n \leq 15$)

n_n é o número de toras

Além destes valores, ainda é calculado o valor objetivo F , custo total da produção das peças. Os dados obtidos foram modelados no *software* Xpress.

4.4. Dados Obtidos para o Corte Paralelo

Após a realização dos passos descritos, os seguintes valores foram obtidos como resultados:

Para os dados utilizados por Novak (2007):

$$F = 4553.62$$

$$x(1, 1) = 164.474$$

$$x(4, 8) = 13.1579$$

$$x(5, 1) = 62.5$$

$$x(6, 9) = 46.0526$$

- 164, 474 toras de 30 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 13,1579 toras de 36 cm de diâmetro cortadas de acordo com o padrão de corte 8;
 - 62,5 toras de 38 cm de diâmetro cortadas de acordo com o padrão de corte 1;
 - 46,0526 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
- o que gera um custo de R\$ 4553,62.

Para os dados obtidos pelo *software* SawModel:

$$F = 4349.83$$

$$x(2, 12) = 6.85714$$

$$x(4, 1) = 20$$

$$x(5, 11) = 36$$

$$x(6, 1) = 140$$

- 6,85714 toras de 32 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 12;
 - 20 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 36 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 11;
 - 140 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
- o que gera um custo de R\$ 4349,83.

Para os dados obtidos pelo Algoritmo Proposto:

$$F = 4345.45$$

$$x(2, 12) = 45.4545$$

$$x(3, 9) = 15.1515$$

$$x(6, 3) = 60.6061$$

$$x(6, 5) = 90.9091$$

- 45, 4545 toras de 32 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 12;
 - 15, 1515 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
 - 60,6061 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 3;
 - 90,9091 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 5;
- o que gera um custo de R\$ 4345, 45.

Em seu trabalho, Novak (2007) não restringe a variável de decisão a ser do conjunto dos números inteiros, devido a este fato, nota-se valores fracionários no número de toras a serem cortadas. Para contornar esta situação, os resultados foram arredondados, ou seja, necessitou-se de 165 toras de 30 cm de diâmetro, 14 toras de 36 cm de diâmetro, 63 toras de 38 cm de diâmetro e aproximadamente 46 toras de 40 cm de diâmetro. Utilizando valores da tabela 4.1 temos um custo de

$$165 \times \text{R\$ } 12,70 + 14 \times \text{R\$ } 18,40 + 63 \times \text{R\$ } 20,40 + 46 \times \text{R\$ } 22,50$$

totalizando um custo de R\$ 4673,30.

Com esta abordagem, temos que o custo total que a serraria teria usando padrões de corte gerados pelo *software* SawModel seria:

$$7 \times \text{R\$ } 14,50 + 20 \times \text{R\$ } 18,40 + 36 \times \text{R\$ } 20,40 + 140 \times \text{R\$ } 22,50$$

totalizando um custo de R\$ 4353,90.

E ainda, o *software* do Algoritmo Proposto geraria um custo de $46 \times \text{R\$ } 14,50 + 15 \times \text{R\$ } 18,40 + 61 \times \text{R\$ } 22,50 + 91 \times \text{R\$ } 22,50$ ou seja, R\$ 4363,00.

É possível notar que esta abordagem traz um óbvio aumento no custo e, na prática, um desperdício de matéria prima.

Adaptando o modelo matemático adicionando a restrição de que a variável de decisão seja um número inteiro, temos:

Para o esquema MaxiTora:

$$F = 4556.10$$

$$x(1, 1) = 166$$

$$x(1, 9) = 3$$

$$x(4, 3) = 1$$

$$x(4, 7) = 1$$

$$x(4, 8) = 10$$

$$x(5, 1) = 61$$

$$x(6, 1) = 1$$

$$x(6, 9) = 45$$

- 166 toras de 30 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 3 toras de 30 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
 - 1 tora de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 3;
 - 1 tora de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 7;
 - 10 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 8;
 - 61 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 1 tora de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 45 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
- o que gera um custo de R\$ 4556,10.

Para o esquema SawModel:

$$F = 4350.70$$

$$x(2, 12) = 1$$

$$x(4, 1) = 3$$

$$x(4, 9) = 14$$

$$x(5, 4) = 1$$

$$x(5, 5) = 4$$

$$x(5, 11) = 39$$

$$x(6, 1) = 139$$

- 1 tora de 32 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 12;
- 3 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
- 14 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
- 1 tora de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 4;
- 4 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 5;
- 39 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 11;

- 139 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1; o que gera um custo de R\$ 4350,70.

Para o esquema do Algoritmo Proposto:

$$F = 4347.80$$

$$x_1 (2, 12) = 47$$

$$x_2 (4, 9) = 6$$

$$x_3 (4, 11) = 1$$

$$x_4 (5, 3) = 2$$

$$x_5 (5, 9) = 6$$

$$x_6 (6, 3) = 60$$

$$x_7 (6, 5) = 90$$

- 47 toras de 32 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 12;
 - 6 toras de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
 - 1 tora de 36 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 11;
 - 2 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 3;
 - 6 toras de 38 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 9;
 - 60 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 3;
 - 90 toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 5;
- o que gera um custo de R\$ 4347,80.

A tabela 4,4 resume os valores de custo obtidos nas três abordagens.

Custos	MaxiTora	SawModel	Algoritmo Proposto
Abordagem 1	4553,62	4349,83	4345,45
Abordagem 2	4673,30	4353,90	4363,00
Abordagem 3	4556,10	4350,70	4347,80

Tabela 4.4 – Valores de custo de produção das peças demandadas

Observando os dados, percebe-se que o a produção de peças guiada pelo diagrama de corte gerado pelo Algoritmo Proposto seguindo a Abordagem 1, ou seja, aceitando valores fracionários para o número de toras a serem cortadas, tem um custo 4,57 % menor que a produção cujos diagramas de corte foram estabelecidos pelo *software* MaxiTora e 0,1 % em relação a produção guiada pelos diagramas do sistema SawModel.

Pode-se também, observar que a utilização da Abordagem 2, que faz um arredondamento do número de toras removidas do estoque, prejudica consideravelmente a otimização utilizada no processo. Ora, se o objetivo dos sistemas é minimizar o número de toras a serem utilizadas, pode-se facilmente perceber que arredondar para cima este número após a sistematização de tal otimização acarreta em perda de funcionalidade do processo como um todo. Tal abordagem foi considerada neste presente trabalho devido ao método comparativo de avaliação de qualidade das soluções. Mesmo entendendo esta abordagem como crítica para os sistemas, percebe-se que a produção de peças utilizando os padrões de corte do algoritmo proposto possui um custo 6,64% menor que a produção através do MaxiTora e que o *software* SawModel alcança um custo 0,2% menor que o algoritmo proposto.

Através da Abordagem 3, que insere no modelo matemático MM1 a restrição que garante que os valores encontrados para as variáveis de decisão (número de toras a serem cortadas) sejam do conjunto dos números inteiros, o custo mínimo alcançado pela produção das peças de demanda através do Algoritmo Proposto foi 4,15% menor que através do MaxiTora e 0,07% menor que através do SawModel.

Além desta comparação, foi ainda realizada uma comparação entre o rendimento obtido pelo *software* SawModel e pelo algoritmo deste trabalho. O *software* MaxiTora não foi considerado nesta comparação pois o cálculo de rendimento é feito de maneira distinta neste sistema.

O rendimento é a porcentagem do volume recuperado pelo padrão de corte em relação ao volume total da tora. Para saber o volume recuperado pelo padrão de corte, basta multiplicar a altura e a largura de cada peça obtida e multiplicar, ainda, o comprimento da tora. A soma dos resultados destas multiplicações de cada peça é o volume recuperado.

Usando os 90 padrões de corte gerados para cada um dos dois sistemas, foi feita uma média do rendimento obtido para cada classe diamétrica por cada algoritmo. Os valores são apresentados na Tabela 4.5 onde cada célula de valor representa a porcentagem de rendimento média obtida e a linha “Diferença” mostra a subtração do rendimento percentual médio obtido pelo Algoritmo Proposto do rendimento percentual médio obtido pelo SawModel, neste caso, valores negativos significam maior aproveitamento da face da tora por parte do Algoritmo Proposto e valores positivos melhor aproveitamento por parte do SawModel.

Analisando os resultados, temos que o *software* SawModel apresentou um rendimento médio de 64,98% para todas as toras e o algoritmo proposto apresentou 65,72% de rendimento, ou seja, uma melhora de 1,14%.

	30 cm	32 cm	34 cm	36 cm	38 cm	40 cm
SawModel	59,8802	66,3915	64,3163	62,5755	67,1782	69,5396
Algoritmo Proposto	60,8914	66,9237	64,0882	66,5217	66,7450	69,1578
Diferença	-1,01	-0,53	0,23	-3,95	0,43	0,38

Tabela 4.5 – Rendimento Médio – Corte Paralelo (%)

Adicionalmente, foram realizados testes removendo uma restrição importante presente nos algoritmos dos *softwares* MaxiTora e SawModel. Tal restrição diz respeito a se encaixar, em uma mesma coluna de peças, apenas produtos de larguras iguais. Esta restrição é de extrema importância prática pois possibilita que as serrarias extraiam os produtos realizando apenas duas fases de cortes. Se peças de larguras diferentes puderem ocupar a mesma coluna de peças, cortes adicionais deverão ser realizados dificultando o processo.

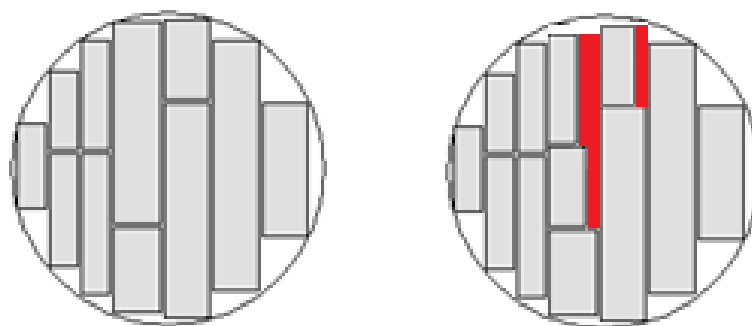


Figura 4.1 – Diagramas de Corte com e sem a restrição de peças com larguras iguais na mesma coluna de peças

A Figura 4.1 mostra dois Diagramas de Corte. O da esquerda foi gerado com a restrição e o da esquerda sem. Nota-se que, no primeiro, as todas as colunas de peças são compostas de produtos de mesma largura, enquanto no segundo, as colunas centrais possuem peças de diferentes larguras. A marcação em vermelho mostra o espaço gerado que evidencia a dificuldade que seria encontrada pelo profissional operador da serra em uma empresa.

Os testes geraram resultados melhores para os dados de entrada considerados.

Utilizando a variável de decisão pertencente ao conjunto dos números inteiros, foi obtido um valor mínimo de custo de R\$ 4327,41, ou seja, 5% menor que o resultado obtido pelo MaxiTora e 0,51% menor que o obtido pelo SawModel.

Com a variável de decisão não inteira, o custo mínimo foi de R\$ 4324,90, que significa 4,66% de melhoria em relação ao Maxitora e 0,6% de melhoria em relação ao SawModel.

4.5. Dados Obtidos para o Corte Radial

Através da análise dos dados obtidos para o Corte Paralelo, foi atestada a eficiência do Algoritmo Proposto em sua função de obter diagramas de corte otimizados para peças retangulares em faces circulares de toras. Sendo assim, o algoritmo foi adaptado para gerar padrões para o Corte Radial, como detalhado na seção 3 deste trabalho.

Para obtenção dos resultados foi utilizada a “Técnica Novak” já detalhada anteriormente e seguidos os passos da Geração de Resultados para o Corte Paralelo, porém, uma importante alteração nos dados de entrada deve ser considerada.

No Corte Radial, as peças retangulares são retiradas de uma região com formato de quarto de círculo e, devido a este fato, não é possível produzir peças de altura maior ou igual ao raio da tora circular, logo, as peças produzidas por este tipo de corte tem menor altura que as produzidas pelo Corte Tangencial. Observando este fato, novas dimensões para as peças demandadas foram consideradas neste estágio do trabalho, como mostra a tabela 4.6.

Peças (cm) $w_i \times l_i$	Quantidade de peças Q_n
3 x 6	1000
6 x 6.5	1000
7.5 x 7.5	1000
3 x 10	500

Tabela 4.6 – Demanda de peças para o Corte Radial

A quantidade de peças demandadas é a mesma estabelecida para a serraria usada como base de dados em Novak (2007). Já as dimensões das peças foram geradas seguindo a norma NBR 7203 (1982) da ABNT que define dimensões de peças de madeira processadas mecanicamente (vide Anexo 11). Das dimensões definidas nesta norma, foram escolhidas as que garantiam maior diversidade dos produtos, a fim de realizar uma melhor avaliação do algoritmo proposto e ainda restringiu-se a escolha a dimensões possíveis de ser produzidas uma vez que o raio considerado para as toras em estoque continuou sendo o mesmo utilizado para a análise do Corte Paralelo.

Deve-se notar, ainda sobre os dados referentes ao estoque, que para este tipo de corte diferenciado, cada tora se transforma em quatro regiões distintas para obtenção de peças possuindo, cada região, um custo equivalente

a um quarto do custo da tora completa. A Tabela 4.7 mostra um esquema com os novos valores de regiões em estoque.

Classe Diamétrica (cm)	Quantidade em Estoque (unidade)	Custo unitário (R\$)
30	800	3,0425
32	600	3,625
34	520	4,125
36	480	4,575
38	720	5,10
40	680	5,625

Tabela 4.7 – Dados de quartos de tora em estoque

Após a repetição dos passos para geração de resultados utilizando a nova adaptação do Algoritmo Proposto na geração de padrões de corte para o Corte Radial, os resultados obtidos foram:

$$F = 4905.63$$

$$x(1, 1) = 500$$

$$x(5, 14) = 250$$

$$x(6, 1) = 250$$

$$x(6, 13) = 125$$

- 500 quartos de toras de 30 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 1;
 - 250 quartos de toras de 38 cm de diâmetro cortados de acordo com o padrão de corte 14;
 - 250 quartos de toras de 40 cm de diâmetro cortados de acordo com o padrão de corte 1;
 - 125 quartos de toras de 40 cm de diâmetro utilizando o padrão de corte 13;
- o que gera um custo de R\$ 4905,63.

Não foram encontrados na literatura dados para avaliação comparativa dos resultados obtidos para o Corte Radial. Desta forma, e a exemplo do exposto na tabela 4.5, é mostrado o rendimento médio percentual obtido para os resultados acima apresentados (tabela 4.8)

	30 cm	32 cm	34 cm	36 cm	38 cm	40 cm
Rendimento Percentual	41,90	44,31	45,68	46,98	50,16	52,69

Tabela 4.8 – Rendimento Médio Percentual obtido no Corte Radial

Capítulo 5

Conclusões

Os resultados obtidos pela metodologia utilizada permitem as seguintes conclusões:

- A utilização de *softwares* de otimização de corte de toras para auxiliar o operador de máquina em uma serraria facilita, otimiza e torna eficiente o processo de criação de peças de madeira demandadas e pode diminuir o custo de produção da empresa.
- O algoritmo proposto neste trabalho, que reúne características dos algoritmos utilizados nos *softwares* MaxiTora e SawModel gera resultados consistentes e eficientes na obtenção do objetivo proposto.
- O método usualmente utilizado para a geração de Diagramas de Corte Otimizados para o Corte Paralelo é eficiente para a geração de tais diagramas para o Corte Radial através de adaptações matemáticas na estrutura do algoritmo.
- O algoritmo adaptado para o Corte Radial é eficaz na otimização do corte e para minimização dos custos de produção das serrarias.

Capítulo 6

Trabalhos Futuros

A partir dos resultados deste trabalho é possível que:

- Seja criado um *software* comercial para a geração de Diagramas de Corte para os tipos de corte Paralelo e Radial (os anexos de 1 a 6 contemplam projeto base de programa de computador com casos de uso baseados nos *softwares* SawModel e Maxitora);
- De posse deste *software*, seja realizada uma avaliação prática dos resultados obtidos pelo algoritmo na indústria madeireira considerando dados de demanda e estoque de uma serraria e comparando com o aproveitamento e/ou custo de extração de subprodutos feita manualmente pelo operador de maquinaria.
- Utilizar os resultados apresentados na seção 4 como base de comparação para novos algoritmos que minimizem o custo de produção de peças utilizando o Corte Radial.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, C.E.; Um algoritmo exato para o Problema de Empacotamento Bidimensional em Faixas, Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2006.
- Amish Made Heirlooms Furniture and Cabinets. Disponível em <<http://amishhandcraftedheirlooms.com/>>
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. Pesquisa operacional para cursos de engenharia. Editora Campus, 2007.
- BALDO, T.A.; Pesquisa Operacional I, Apostila auxiliar para a disciplina. Instituto de Ciências Matemáticas e Computação, USP, 2009.
- BIRGIN, E.G., MARTÍNEZ, J.M., RONCONI, D.P., Optimizing the Packing of Cylinders into a Rectangular Container: A Nonlinear Approach. European Journal of Operational Research, 160, 19-33, 2003.
- BIRGIN, E.G., MARTÍNEZ, J.M., NISHIHARA, F.H., RONCONI, D.P. Orthogonal Packing of Rectangular items within Arbitrary Convex Regions by Nonlinear Optimization, European Journal of Operational Research, 33, 3535-3548, 2005.
- BRIGGS, D. G. Tropical forest utilization systems: A dynamic programming model for bucking tree stems into logs. College of Forest Resources, University of Wash. Seattle, 1977.
- BRIGGS, D.G., A dynamic programming approach to optimizing stem conversion, Tese de Phd, University of Washington, Seattle, WA, 1980.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. Mensuração florestal: Perguntas e respostas. 3.ed. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2009. p. 548.

- CARDOSO, A. A. J.; Inovação tecnológica na obtenção de madeira serrada de pinus com uso de programa otimizador de desdobro, Tese Doutorado, Universidade Federal do Paraná, 2008.
- CIFLORESTAS, [2011] Análise Conjuntural. Disponível em <http://www.ciflorestas.com.br/arquivos/ana_n24_solidos_20384.pdf>
- CLARO, A. [2009] Propriedades Físicas (Qualidades e Defeitos). disponível em <http://www.arq.ufsc.br/arq5661/trabalhos_2009-1/casa_madeira/cortes.html>
- DYCKHOFF, H, SCHEITHAUER, G., TERNO, J., Cutting and Packing. Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization [edited by M. Amico, F.Maffioli and S. Martello], John Wiley & Sons, New York, 393-414, 1997.
- GARCIA, S.L.R.; LEITE, H.G. Uso do ingresso percentual para determinação da idade técnica de desbaste em plantações de eucalipto. Revista árvore, Viçosa-MG, 1999
- LEITE, H.G., Conversão de Troncos em Multiprodutos da Madeira Utilizando Programação Dinâmica. Tese Doutorado, Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA JUNIOR, G. G. Emprego de um modelo de programação dinâmica para conversão de troncos em multiprodutos da madeira. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 19, n. 4, p. 447-465, 1995.
- LODI, A., MARTELLO, S., MONACI, M., Two-dimensional packing problems: A survey, 2002.
- MONTEVECHI, J.A.B. Pesquisa Operacional (Programação Linear) EPR05 – Pesquisa Operacional II. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.
- MORABITO, R.; Modelos de otimização para o problema de corte nas indústrias de papel e papelão e de móveis, Gestão & Produção, v. 1, n. 1, p. 59-76, abr. 1994.
- MURARA Jr, M.I. [2005] Revista da Madeira – Edição nº 99 – Desdobro. Disponível em <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_capa.php?edicao=99&button2=OK>

- NERI, A. C. [2005] Revista da Madeira – Edição nº 88 – Desdobro. disponível em
<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=708&>
- NOVAK, R.S., Um Sistema de Otimização Aplicada ao Desdobro de Madeira, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2007.
- ORTMANN, F.G., NTHABISENG, N., VAN VUUREN, J.H., New and Improved Level Heuristics for the Rectangular Strip Packing and Variable-sized Bin Packing Problems, European Journal of Operational Research, 203, 306-315, 2010.
- PNEVMATICOS, S. M.; MANN, S. H. Dynamic programming in tree bucking. Forest Products Journal, vol. 22, nº 2, February, 1972.
- PONCE, R.H. Madeira serrada de Eucalipto: desafios e perspectivas. In: Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria, São Paulo, p.50-58, 1995.
- PUCHINGER, J.; Combining Metaheuristics and Integer Programming for Solving Cutting and Packing Problems, Tese de Doutorado, Viena University of Technology, 2011.
- REINDERS, M.P. Ideas, for integral logistics in centralized wood processing. Netherlands: Thesis (Ph.D.). Wageningen Agricultural University, 1989.
- SOBRAPO [2010] O que é pesquisa operacional. Disponível em
<http://www.sobrapo.org.br/o_que_e_po.php>
- STOYAN, Y., CHUGAY, A., Packing Cylinders and Rectangular Parallelepipeds with Distances Between them into a Given Region, European Journal of Operational Research, 197, 446-455, 2009.
- VITAL, B. R. Planejamento e operação de serrarias. Viçosa, MG: UFV, p. 211, 2008.
- ZANJANI, M.K.; AIT-KADI, D.; NOURELFATH, M. Robust production planning in a manufacturing environment with random yield: A case in sawmill production planning. European Journal of Operational Research, v. 201(3), p. 882-891, 2009.

ANEXOS

Anexo 1: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Visao Geral

Sistema de Corte de Toras

É proposto o desenvolvimento de um sistema para geração de diagramas de corte otimizados para o corte paralelo e radial a serem usados em serrarias.

O objetivo deste sistema é auxiliar o operador de serraria a transformar uma tora em peças de madeira da forma a aproveitar ao máximo a área da tora e assim evitar o desperdício.

Essas peças e toras serão previamente informadas podendo ser salvas em banco de dados ou não, de acordo com a preferência do usuário. As peças e toras salvas poderão ser cadastradas, consultadas, editadas e deletadas.

Ao final do cálculo, deve ser exibida uma imagem contendo o desenho da tora com as peças a serem produzidas encaixadas de acordo com a otimização e uma lista informando quais peças são essas. Além disto, um valor de rendimento percentual obtido e volume recuperado também devem ser exibidos.

Será considerada apenas otimização em duas dimensões. As peças terão dimensões de altura e largura enquanto a tora possuirá raio menor e comprimento.

Anexo 2: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Documento de Requisitos

Requisitos Funcionais e Não-Funcionais

F1 – Calcular Otimização da Tora				Evidente ()
				Oculto (X)
<p>Descrição: O sistema deve calcular de forma otimizada quais peças e em que posições da tora estas peças devem ser retiradas de forma a aproveitar ao máximo a área da tora.</p>				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF1.1 Tempo de Cálculo	O cálculo da otimização não deve ser maior que 2 segundos	Performance	Desejável	Permanente
NF1.2 Escolha de toras	A tora deve ser escolhida em uma checkbox disponível na consulta de toras. Estilo Carrinho de Compras.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF1.3 Escolha de Peças	Cada peça deve ser escolhida marcando-se uma checkbox referente a esta peça em um tela de consulta de peças. Estilo carrinho de compras.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF1.4 Número de toras a serem escolhidas	Apenas uma tora poderá ser escolhida por cálculo	Interface	Obrigatório	Permanente
NF1.5 Número de peças a serem escolhidas	Devem ser escolhidas tantas peças quantas foram necessárias.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF1.6 Peças não cadastradas	Deve ser possível ao usuário, usar peças informadas no momento do cálculo e que não serão salvas em banco de dados	Interface	Obrigatório	Transitório
NF 1.7 Tipo de Cálculo	Deve ser informado se o cálculo será baseado no corte paralelo ou no corte radial	Interface	Obrigatório	Permanente
NF 1.8 Tela de Cálculo	Deve existir uma tela que mostre as peças e tora escolhidas, botões que levem a telas que possibilitem a escolha, botão de tipo de cálculo (NF1.7) e botão “Calcular”			

F2 – Cadastrar Toras				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve ser capaz de cadastrar toras de vários tipos. (Tipo de tora = diâmetro + comprimento)				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 2.1 Identificação da tora	Cada tora deve ter um valor de diâmetro e um valor de comprimento, em centímetros.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF 2.2 Dimensões da tora	Não serão aceitas dimensões com valores menores ou iguais a zero, nem valores maiores que 2000 centímetros	Interface	Obrigatório	Transitório

F3 – Cadastrar Peças				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve ser capaz de cadastrar peças de vários tipos. (Tipo de peça = largura + altura)				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 3.1 Identificação da peça	Cada peça deve ter um valor de largura e um valor de altura, em centímetros.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF 3.2 Dimensões das peças	Não serão aceitas peças com valores de dimensões menores ou iguais a zero nem maiores que 2000 centímetros	Interface	Obrigatório	Transitório

F4– Consultar Toras				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de consulta das toras cadastradas				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 4.1 Tela de Consulta	Todas as toras devem aparecer em uma única tela informando um código numérico, diâmetro, comprimento e um checkbox para indicar se esta será usada ou não no cálculo.	Interface	Obrigatório	Permanente

F5 – Consultar Peças				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de consulta das peças cadastradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 5.1 Tela de Consulta	Todas as peças devem aparecer em uma única tela informando um código numérico, largura, altura e um checkbox para indicar se esta será usada ou não no cálculo.	Interface	Obrigatório	Permanente

F6 – Alterar Toras				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de alteração das dimensões das toras cadastradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 6.1 Tela de Alteração	A partir da tela de consulta, deve existir um botão de alteração que abre uma janela no estilo pop-up com as informações atuais da tora (somente leitura), caixas de texto para informar as novas dimensões e um botão de salvar.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF 6.2 Validação de Dimensões	Não serão aceitos cadastros de dimensões menores ou iguais a zero nem maiores que 2000 centímetros	Interface	Obrigatório	Transitório

F7 – Alterar Peças				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de alteração das dimensões das peças cadastradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 7.1 Tela de Alteração	A partir da tela de consulta, deve existir um botão de alteração que abre uma janela no estilo pop-up com as informações atuais da peça (somente leitura), caixas de texto para informar as novas dimensões e um botão de salvar.	Interface	Obrigatório	Permanente
NF 7.2 Validação de Dimensões	Não serão aceitos cadastros de dimensões menores ou iguais a zero nem maiores que 2000 centímetros	Interface	Obrigatório	Transitório

F8 – Deletar Toras				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de deleção de toras cadastradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 8.1 Tela de Deleção	A partir da tela de consulta, deve existir um botão de deleção que abre uma janela no estilo pop-up com uma pergunta de confirmação.	Interface	Obrigatório	Permanente

F9 – Deletar Peças				Evidente (X)
				Oculto ()
Descrição: O sistema deve prover um mecanismo de deleção de peças cadastradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 9.1 Tela de Deleção	A partir da tela de consulta, deve existir um botão de deleção que abre uma janela no estilo pop-up com uma pergunta de confirmação.	Interface	Obrigatório	Permanente

F10 – Desenhar diagrama de corte				Evidente ()
				Oculto (X)
Descrição: O sistema deve fornecer uma saída gráfica mostrando de que parte da tora as peças devem ser retiradas.				
Requisitos Não-Funcionais				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
NF 10.1 Tela de Diagrama	Após realizar o cálculo, o sistema deve exibir uma tela contendo uma imagem do diagrama da tora com as peças acomodadas da forma como deverão ser cortadas, uma lista com as dimensões das peças, o valor do volume obtido e o rendimento percentual daquele corte.	Interface	Obrigatório	Permanente

Requisitos Suplementares

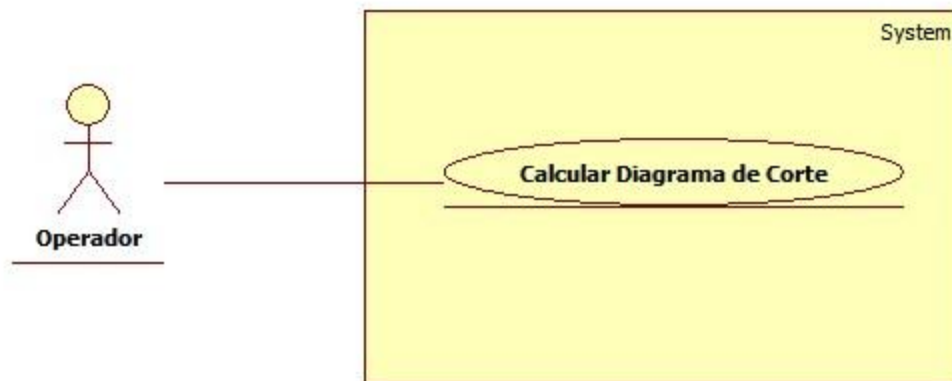
REQUISITOS SUPLEMENTARES				
Nome	Restrição	Categoria	Obrigatório / Desejável	Permanente / Transitório
S1 Acessibilidade	Todas as telas devem ter fontes e imagens em tamanho que possibilitem boa visualização	Interface	Obrigatório	Permanente

Anexo 3: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Documento de Casos de Uso

Casos de Uso

Nome	Atores	Descrição	Referências Cruzadas
Calcular Diagrama de Corte	Operador	O Operador informa a Tora e as Peças que deseja envolver no cálculo e obtém a resposta em formato de diagrama	F1, F2, F3, F4, F5, F10



Anexo 4: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Documento de Conceitos

Listagem de Conceitos

Conceito	I	A	E	C	Observação	Ref. Cruzadas
Tora	X	X	X	X		F2, F4, F6, F8
Peça	X	X	X	X		F3, F5, F7, F9
Diagrama			X	X	A inclusão de diagramas deve ocorrer no caso de uso "Calcular Diagrama de Corte"	F10

Anexo 5: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Documento de Planejamento

Planejamento de Ciclos Iterativos

Ciclo	Casos de Uso	Manutenção Informações	Consultas	Observações	Esforço
1	Calcular Diagrama de Corte	-	-		57 hrs
2	-	Tora (8) Peça (8) Diagrama (8)	-	Implementação mecanismo de persistência (48)	72 hrs

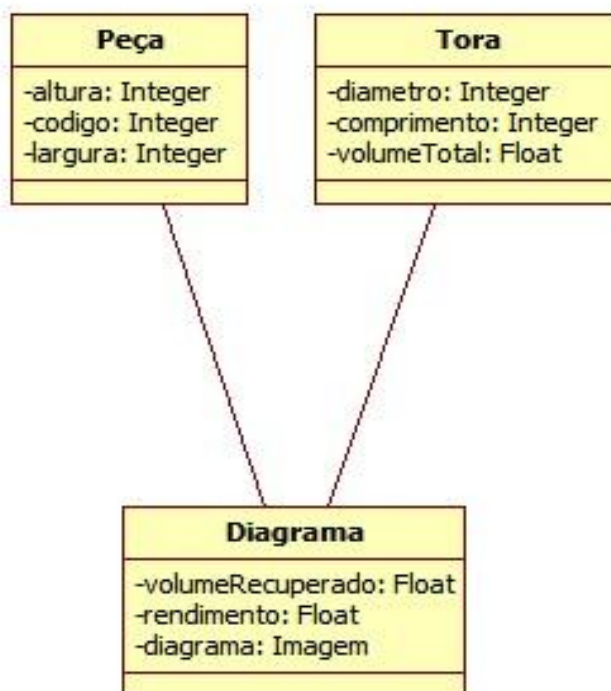
Cronograma de Desenvolvimento

Dias	1-3	4-7	8-17	18-19	20-22	23-26	27-35	36-37
Ciclo 1	Análise	Projeto	Implem.	Testes				
Ciclo 2					Análise	Projeto	Implem.	Testes

Anexo 6: Documentação de Concepção do *Software* que gera Diagramas de Corte utilizando o algoritmo proposto

Modelo Conceitual

Sistema de Corte de Toras



Anexo 7: Volumes Recuperados pelo Algoritmo Proposto e pelo SawModel
separados por Classe Diamétrica

1	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0736	0,0875	0,1033	0,1168	0,1298	0,1469
Alg. Prop.	0,0740	0,0900	0,0981	0,1161	0,1301	0,1433
2	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0716	0,0844	0,0999	0,1134	0,1283	0,1458
Alg. Prop.	0,0736	0,0844	0,0945	0,1161	0,1275	0,1404
3	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0740	0,0875	0,1033	0,1166	0,1330	0,1487
Alg. Prop.	0,0731	0,0866	0,1004	0,1163	0,1328	0,1487
4	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0698	0,0799	0,0956	0,1125	0,1260	0,1384
Alg. Prop.	0,0698	0,0799	0,0878	0,1125	0,1215	0,1373
5	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0727	0,0824	0,0927	0,1107	0,1303	0,1411
Alg. Prop.	0,0740	0,0828	0,0936	0,1125	0,1248	0,1496
6	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0702	0,0864	0,0999	0,1134	0,1296	0,1458
Alg. Prop.	0,0702	0,0864	0,0999	0,1134	0,1296	0,1458
7	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0641	0,0742	0,0911	0,1080	0,1215	0,1350
Alg. Prop.	0,0641	0,0743	0,0878	0,1046	0,1215	0,1316
8	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0688	0,0796	0,0918	0,1107	0,1215	0,1404
Alg. Prop.	0,0736	0,0824	0,0918	0,1040	0,1215	0,1337
9	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0664	0,0833	0,0990	0,1125	0,1249	0,1384
Alg. Prop.	0,0664	0,0833	0,0990	0,1125	0,1260	0,1418
10	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0641	0,0743	0,0911	0,1080	0,1215	0,1350
Alg. Prop.	0,0641	0,0743	0,0878	0,1046	0,1215	0,1316
11	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0675	0,0788	0,0900	0,1080	0,1237	0,2041
Alg. Prop.	0,0675	0,0776	0,0968	0,1125	0,1215	0,2041
12	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0619	0,0788	0,0844	0,0956	0,1069	0,1125
Alg. Prop.	0,0619	0,0788	0,0844	0,0956	0,1069	0,1125
13	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0608	0,0709	0,0810	0,1013	0,1215	0,1316
Alg. Prop.	0,0608	0,0709	0,0911	0,1013	0,1215	0,1316
14	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0648	0,0810	0,0918	0,1134	0,1188	0,1296
Alg. Prop.	0,0648	0,0864	0,0972	0,1134	0,1188	0,1296
15	VOLUME RECUPERADO					
	28	30	32	34	36	38
SawModel	0,0540	0,0540	0,0810	0,0945	0,1080	0,1350
Alg. Prop.	0,0540	0,0540	0,0810	0,0945	0,1080	0,1350

Anexo 8: Esquema do Diagrama de Cortes gerado pelo *software* SawModel

	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª
25x125															
30 cm	3	0	5	1	2	0	0	0	7	7	3	11	0	0	0
32 cm	5	0	5	1	6	0	0	0	10	6	5	14	0	0	0
34 cm	3	0	3	2	4	0	0	0	8	4	7	15	0	0	0
36 cm	3	0	2	2	0	0	0	0	8	1	3	17	0	0	0
38 cm	1	0	3	2	3	0	0	0	3	6	4	19	0	0	0
40 cm	5	0	1	3	3	0	0	0	3	3	1	20	0	0	0
75x75															
30 cm	0	2	0	5	5	0	5	2	0	0	5	0	6	0	0
32 cm	0	3	0	6	0	0	6	2	0	0	5	0	7	0	0
34 cm	0	0	0	3	0	0	5	0	0	0	5	0	8	0	0
36 cm	4	0	0	6	4	0	8	4	0	0	9	0	10	0	0
38 cm	0	6	0	10	8	0	4	12	0	0	10	0	12	0	0
40 cm	4	0	0	8	8	0	8	8	0	0	13	0	13	0	0
50x60															
30 cm	8	7	6	0	2	8	0	9	0	6	0	0	0	12	0
32 cm	6	5	0	0	9	11	0	11	0	9	0	0	0	15	0
34 cm	6	6	6	0	13	11	0	17	0	13	0	0	0	17	0
36 cm	1	6	2	0	13	6	0	13	0	20	0	0	0	21	0
38 cm	8	5	4	0	6	9	0	0	0	17	0	0	0	22	0
40 cm	7	7	9	0	8	7	0	11	0	22	0	0	0	24	0
50x150															
30 cm	1	1	1	1	0	2	1	0	2	0	0	0	0	0	4
32 cm	2	2	2	1	0	2	1	0	2	0	0	0	0	0	4
34 cm	4	5	4	4	0	3	3	0	4	0	0	0	0	0	6
36 cm	4	6	7	3	0	6	2	0	5	0	0	0	0	0	7
38 cm	6	3	7	1	0	6	6	0	8	0	0	0	0	0	8
40 cm	3	8	7	3	0	8	4	0	8	0	0	0	0	0	10

Anexo 9: Esquema do Diagrama de Cortes gerado pelo algoritmo proposto (com a restrição de produtos de mesma largura em uma coluna de peças)

25x125	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª
30 cm	2	0	1	1	2	0	0	0	7	3	3	11	0	0	0
32 cm	1	0	1	1	2	0	0	0	10	1	3	14	0	0	0
34 cm	1	0	2	0	2	0	0	0	8	2	1	15	0	0	0
36 cm	0	0	1	2	2	0	0	0	8	1	2	17	0	0	0
38 cm	2	0	2	0	3	0	0	0	8	2	0	19	0	0	0
40 cm	1	0	1	1	2	0	0	0	6	2	1	20	0	0	0
75x75															
30 cm	3	3	0	5	3	0	5	3	0	0	5	0	6	0	0
32 cm	3	3	0	6	6	0	6	6	0	0	6	0	7	0	0
34 cm	3	0	0	6	6	0	6	8	0	0	9	0	9	0	0
36 cm	4	4	0	10	10	0	9	6	0	0	10	0	10	0	0
38 cm	8	7	0	12	8	0	12	12	0	0	12	0	12	0	0
40 cm	8	8	0	13	11	0	13	10	0	0	13	0	13	0	0
50x60															
30 cm	6	3	10	0	6	8	0	8	0	10	0	0	0	12	0
32 cm	5	5	10	0	2	11	0	4	0	14	0	0	0	16	0
34 cm	4	10	4	0	4	11	0	2	0	16	0	0	0	18	0
36 cm	4	4	3	0	0	6	0	8	0	20	0	0	0	21	0
38 cm	2	8	5	0	5	9	0	0	0	21	0	0	0	22	0
40 cm	3	6	9	0	5	7	0	6	0	23	0	0	0	24	0
50x150															
30 cm	0	2	1	1	0	2	1	0	2	0	0	0	0	0	4
32 cm	2	2	2	1	0	2	1	0	2	0	0	0	0	0	4
34 cm	3	3	5	2	0	3	2	0	4	0	0	0	0	0	6
36 cm	4	4	7	0	0	6	1	0	5	0	0	0	0	0	7
38 cm	2	1	7	0	0	6	0	0	6	0	0	0	0	0	8
40 cm	3	2	7	0	0	8	0	0	8	0	0	0	0	0	10

Anexo 10: Esquema do Diagrama de Cortes gerado pelo algoritmo proposto (sem a restrição de produtos de mesma largura em uma coluna de peças)

25x125	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª	10ª	11ª	12ª	13ª	14ª	15ª
30 cm	7	0	7	6	2	0	0	0	7	11	3	11	0	0	0
32 cm	6	0	6	10	4	0	0	0	10	14	4	14	0	0	0
34 cm	3	0	3	8	6	0	0	0	8	14	6	15	0	0	0
36 cm	2	0	2	8	2	0	0	0	8	17	2	17	0	0	0
38 cm	3	0	3	8	8	0	0	0	8	19	8	19	0	0	0
40 cm	6	0	6	6	5	0	0	0	6	20	5	20	0	0	0
75x75															
30 cm	0	2	0	2	5	0	5	3	0	0	5	0	6	0	0
32 cm	0	0	0	0	6	0	7	6	0	0	6	0	7	0	0
34 cm	0	0	0	0	6	0	5	0	0	0	6	0	9	0	0
36 cm	0	0	0	0	10	0	2	0	0	0	10	0	10	0	0
38 cm	0	0	0	0	8	0	4	12	0	0	8	0	12	0	0
40 cm	0	0	0	0	11	0	0	8	0	0	11	0	13	0	0
50x60															
30 cm	1	7	1	0	2	8	0	8	0	0	0	0	0	12	0
32 cm	2	11	2	0	0	11	0	4	0	0	0	0	0	16	0
34 cm	3	11	3	0	0	11	0	18	0	2	0	0	0	18	0
36 cm	2	6	2	0	0	6	0	21	0	0	0	0	0	21	0
38 cm	4	9	4	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	22	0
40 cm	6	7	6	0	1	7	0	11	0	0	0	0	0	24	0
50x150															
30 cm	2	1	2	1	0	2	1	0	2	0	0	0	0	0	4
32 cm	3	2	3	2	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	4
34 cm	5	3	5	4	0	3	3	0	4	0	0	0	0	0	6
36 cm	7	6	7	5	0	6	6	0	5	0	0	0	0	0	7
38 cm	7	6	7	6	0	6	6	0	6	0	0	0	0	0	8
40 cm	6	8	6	8	0	8	10	0	8	0	0	0	0	0	10

Anexo 11: Norma NBR 7203 (1982) da ABNT

Peças	Espessura (cm)	Largura (cm)
Pranchão	> 7,0	> 20,0
Prancha	4,0 – 7,0	> 20,0
Vigas	> 4,0	11,0 – 20,0
Vigota	4,0 – 8,0	8,0 – 11,0
Caibros	4,0 – 8,0	5,0 – 8,0
Tábuas	1,0 – 4,0	> 10,0
Sarrafos	2,0 – 4,0	2,0 – 10,0
Ripa	< 2,0	< 10,0