

Otimização do Uso de Matéria-Prima: O Caso de uma Indústria Madeireira

Autoria: Fabrizio Almeida Marodin, Claudio Bezerra, Antonio Mauricio Pitangueira, Eduardo Ribas Santos

Resumo

Este trabalho partiu da necessidade de obter melhoria no processo de manufatura da empresa MPB S.A., atuante no setor da indústria madeireira, em relação aos aspectos de custos para a obtenção de vantagem competitiva. O objetivo foi analisar o processo de produção de molduras de madeira propondo um modelo matemático formal para a otimização de parte dos seus subprocessos utilizando-se técnicas de Pesquisa Operacional, particularmente às de Programação Linear. Para atingir a meta estabelecida para esta pesquisa, foram coletados dados reais de produção e estatísticas de aproveitamento de matéria-prima, elaborado um cálculo de desperdício de cada tipo de material e implementado um modelo relativo ao problema. Serão apresentados uma visão geral da empresa e seus processos, a construção do modelo e um exemplo de ilustração do seu funcionamento com os resultados encontrados. Finalmente, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado e as possibilidades de futuras pesquisas.

Palavras – Chave

Pesquisa Operacional Aplicada - Programação Linear – Indústria Madeireira – Otimização da Produção

1. Introdução

Em praticamente todos os processos de produção de larga escala são utilizados modelos matemáticos para a obtenção de rendimento ótimo das atividades. Em muitos casos, a construção destas abstrações e sua utilização sistemática influem positivamente, podendo motivar alterações drásticas nos processos e práticas anteriores, resultando em sistemas de produção mais eficientes. Geralmente estes modelos racionalizam o uso de recursos limitados ou até escassos tais como, tempo e matérias-primas (WAGNER, 1986).

Na indústria madeireira, assim como em todas as manufaturas em geral, a necessidade do melhor aproveitamento das matérias-primas é um fator de constante preocupação, por proporcionar uma vantagem competitiva de custo (SLACK, 1993). Os retornos sobre investimento (*Return of Investment* - ROI) em custos têm de ser consistentes para que se possa justificar a adoção de alterações nos sistemas produtivos.

A madeira, utilizada como principal matéria-prima desta indústria, se classifica como fator de influência direta no custo de produção, compondo grande parte dos custos variáveis deste tipo de indústria (MANDARINO, 1969). Em um ambiente de produção competitivo, é constante a preocupação com a redução do custo unitário do produto final. Algumas das estratégias utilizadas no que tange ao melhor aproveitamento dos insumos são: tratamento de refugos, de unidades defeituosas, redução do desperdício e de sobras (ROBLES, 1994).

O refugo pode ser definido o material rejeitado, por não satisfazer às especificações determinadas, que não poderia ser reaproveitado para a finalidade original, o que não ocorre com unidades defeituosas que poderiam em tese ser consertadas. O desperdício de insumos de manufatura acontece dentro do processo de produção durante operações de manuseio, no armazenamento e no transporte dos mesmos, enquanto a criação de sobras se dá pela geração de resíduos de materiais ao fim da produção (ROBLES, 1994).

A problemática é acentuada porque as árvores, únicas fontes do principal insumo, têm um ciclo de crescimento de vários anos. Além disto, as áreas liberadas para cultivo de mudas de árvores e para sua extração direta da natureza são restritas e limitadas, o que gera um quadro crônico de escassez de recursos parcialmente contornável através do seu aproveitamento ótimo (DYKSTRA, 1984).

Este trabalho mostrará a construção de um modelo de programação linear realizado no campo da indústria de produtos manufaturados de madeira com a finalidade de aumentar o aproveitamento dos recursos até o nível ótimo. O modelo baseia-se em restrições de estoque relacionadas com a demanda e o grau de aproveitamento de cada tipo de matéria-prima para cada produto. Todas estas informações são tratadas através da construção e aplicação de um modelo formal de programação linear. O mesmo foi construído em cima da realidade de uma empresa madeireira brasileira. A fim de identificação, esta empresa será denominada no trabalho como MPBⁱ.

Neste artigo, serão apresentados uma visão geral da empresa e seus processos, a construção do modelo, e um exemplo de ilustração do seu funcionamento com os resultados encontrados. Finalmente, são apresentadas as conclusões sobre o trabalho realizado e as possibilidades de futuras pesquisas.

2. Revisão Bibliográfica

A literatura sobre o tema é rica e aborda os problemas de gerenciamento florestal, de beneficiamento da madeira e de ecologia e meio ambiente sob um enfoque matemático ou computacional centrado na aplicação de métodos formais quantitativos (DYKSTRA, 1984; BUONGIORNO e GILLESS, 1987), a visão do processo de extração e da transformação da matéria-prima e suas subpartes (MUSCH et. al., 1998) e a vertente de viés ecológico, que visa modelar e compreender os *trade-offs* e relacionamentos entre a exploração dos recursos do ambiente em relação aos ganhos a curto, médio e longo prazos e a necessidade de se preservar os recursos naturais (DOHERTY et al., 1999, BRANG et al., 2002). Na verdade, esta classificação tem característica subjetiva, uma vez que em muitas das fontes pesquisadas há características de mais de uma categoria.

2.1 Abordagem Matemática no Gerenciamento Florestal

Esta literatura se concentra na construção ou aplicação de modelos matemáticos formais com grau variado de complexidade, podendo também abranger a adoção ou criação/aprimoramento de algoritmos (LIU, 2001) ou heurísticas computacionais (LOEHLE, 2000). São utilizadas técnicas de auxílio à tomada de decisão tais como Programação Linear (LIU, 2001) e não linear, métodos estocásticos, simulação (PUKKALA, 1998) e heurística relacionados aos problemas madeireiros, florestais e ecológicos. Em certas situações, o problema abordado é relativamente simples, bastando para a sua resolução a aplicação quase direta de técnicas de pesquisa operacional.

São particularmente interessantes os artigos que envolvem a aplicação conjunta de várias técnicas ou a comparação entre resultados obtidos com a comparação entre formalismos diferentes na resolução da mesma classe de problemas (LOEHLE, 2000). Vale a pena destacar a diversidade, profundidade e relevância da produção acadêmica no que tange à aplicação de simulações (RAUTIAINEN et. al., 2000; PUKKALA, 1998).

2.2 Literatura da Indústria Madeireira

A busca de melhoria nos processos do setor, desde o manejo de áreas de plantio (MABVURIRA e PUKKALA, 2002) até o transporte final do produto gerou literatura que engloba inclusive periódicos dedicados exclusivamente a esse tipo de pesquisa. Um ponto importante a destacar é o grande número de estudos realizados para melhorar o tratamento da matéria-prima no processo de secagem. Há uma série de estudos visando conciliar da melhor forma possível o gasto de energia, a necessidade de produtos de qualidade, o tempo de secagem e a necessidade de se conhecer o mecanismo pelo qual a secagem se realiza (NIJDA et. al., 2000; CRONIN et. al., 1996; MUSCH et. al., 1998). As demais etapas dos processos da indústria madeireira também têm recebido alguma atenção por parte da comunidade acadêmica (BROWN et. al., 2002).

2.3 Modelagem de Ecossistemas

A necessidade da sociedade de compreender e detalhar as complexas relações entre a ocupação humana e o meio ambiente fomentou a elaboração de vasta literatura. Com base nos modelos propostos é possível orientar mudanças no processo de gerenciamento e preservação de recursos naturais conciliando exploração econômica e preservação ambiental (BOLTZ et. al., 2001). A publicação de artigos envolvendo a modelagem quantitativa e qualitativa de ecossistemas tem crescido em número e em sofisticação e empregado técnicas avançadas de pesquisa operacional tais como simulação e heurísticas como a *Tabu Search* e a *Simulated Annealing* (GRASSO, 1998; LIU et. al., 2000; BRANG et. al., 2002).

3. O Modelo Proposto

O modelo proposto foi construído através da análise dos processos de produção da indústria MPB, a qual revelou diversos pontos onde a alteração de práticas vigentes permitiria a obtenção de melhores resultados. Com base no levantamento feito, foi desenvolvido um modelo e sua formalização matemática visando o aproveitamento ótimo de recursos dentro do ambiente de manufatura da madeira.

3.1 O Processo de Produção

O presente trabalho analisou o processo de produção da Divisão de Madeiras da empresa MPB S.A. a partir de uma visita às instalações, elaborando o modelo apresentado na Figura 1. Procurou-se destacar as questões relativas ao aproveitamento da matéria-prima e de acúmulo de estoques intermediários.

As principais etapas do processo são:

1. *Extração*: produz toras verdes para a serraria a partir da extração de florestas replantadas. As toras podem ser classificadas em 5 classes de diâmetro. O processo é planejado de acordo com um Plano de Manejo Florestal, realizado para um prazo longo que visa sempre o melhor aproveitamento da floresta em termos de volume (m^3) produzidos ao longo do tempo. Os volumes a serem produzidos em cada classe de diâmetro são, portanto, estabelecidos dentro deste plano. Historicamente, toras de maior diâmetro apresentam maior valor econômico. Porém, características intrínsecas do manejo estabelecem que um determinado volume mínimo de toras de classes de diâmetro pequeno será necessariamente produzido dentro do período de crescimento da floresta.
2. *Serragem*: a empresa possui três serrarias, que são alimentadas por toras provenientes do processo de Extração, classificadas em 5 classes de diâmetro, e toras compradas de terceiros,

de diâmetros maiores. O processo de Serragem também busca maximizar o aproveitamento de volume serrado a partir das toras, produzindo tábuas verdes de diferentes bitolas. Podem ser produzidas aproximadamente 40 bitolas diferentes de tábuas, dependendo do diâmetro, dos defeitos e características das toras utilizada no processo. O volume esperado de cada bitola pode ser estimado a partir da classe de diâmetro serrada, porém nunca será um dado totalmente determinístico por depender de características muito variáveis da matéria-prima.

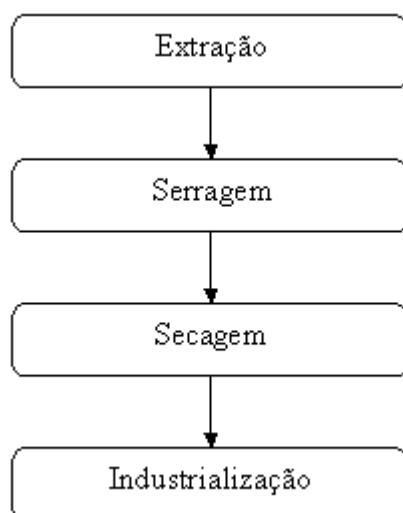


Figura 1: Processo de produção da madeira

3. *Secagem*: as tábuas verdes provenientes da Serragem são secadas em estufas na quase totalidade dos casos ou a céu aberto, dependendo da disponibilidade de espaço nas estufas. Apenas a madeira seca poderá ser processada uma vez que a umidade natural do insumo interfere nos resultados obtidos (MUSCH et. al., 1998). A madeira seca é mais leve, mais forte, mais resistente a ataque de fungos e insetos e gera produtos melhores (CRONIN et. al., 1996). A secagem estufa na empresa MPB leva em média de 4 a 5 dias. São produzidas tábuas secas, que ficam armazenadas no estoque até o momento da Industrialização.

4. *Industrialização*: Este processo permite que cada produto possa ser obtido a partir de diferentes tipos de matéria-prima, com taxas de aproveitamento distintas. Denomina-se plano de corte a escolha de que matéria-prima será utilizada para cada produto, e a sequência cronológica de processamento. A industrialização é feita com base numa carteira de pedidos já vendida pelo departamento comercial. No momento da pesquisa, a empresa trabalhava com uma carteira preenchida para um período de seis semanas adiante. A programação de produção, incluindo o plano de corte e o cronograma das operações, é especificada semanalmente, levando em conta a posição do estoque do momento e as demandas da carteira de pedidos. Ajustes eventuais que incluem pequenos atrasos ou adiantamentos não são incomuns, devido a falta no estoque de uma matéria-prima que possibilite o melhor aproveitamento. Em situações críticas, quando o cliente não tolera atraso, o produto é manufaturado com a matéria-prima que estiver disponível no estoque, mesmo que este não apresente um bom aproveitamento. Após esta fase são efetuados a embalagem e o despacho dos produtos manufaturados.

3.2 Desenvolvimento do Modelo

Dentro do ambiente da serraria, correspondente à fase de industrialização, a escolha de que matéria-prima será utilizada para que tipo de produto é o fator que determina se a produção aproveitará de forma ótima o recurso extraído da natureza, uma vez que diferentes

tipos de toras têm diferentes índices de aproveitamento para a geração de cada produto. A criação de um modelo para este tipo de decisão racionaliza o processo melhorando a eficiência manufatureira da empresa. Embora a literatura cite o uso de resíduos do processo de produção como insumo para a alimentação das estufas de secagem (CRONIN et. al., 1996), esta solução é parcial e não eliminaria a necessidade de se minimizar a perda de madeira durante a sua industrialização.

Os recursos poupados com melhores práticas de decisão se reverteriam em redução de custos e conseqüentemente melhor desempenho por parte da organização. No entanto, a construção deste modelo preocupou-se mais com o melhor aproveitamento da madeira em si do que com a questão de gerenciamento de custos de produção. Desta forma, define-se o objetivo como:

Minimizar a perda de volume de madeira utilizado para a produção de produtos a partir de matérias-primas, considerando o estoque disponível e a demanda do momento.

A formulação matemática do modelo de otimização por programação linear, pode ser assim definida:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar } Z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (1 - a_{ij}) x_{ij} \\
 \text{Sujeito a } &\sum_{j=1}^m \alpha a_{ij} x_{ij} \geq D_i, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n. \\
 &\sum_{i=1}^n x_{ij} \leq E_j, \text{ para } j = 1, 2, \dots, m. \\
 &x_{ij} \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n, \forall j = 1, 2, \dots, m
 \end{aligned}$$

Onde:

i = índice de produtos

j = índice de matéria-prima

a_{ij} = aproveitamento na produção do produto i para a matéria-prima j no que concerne a espessura e largura

x_{ij} = volume consumido da matéria-prima j na produção do produto i

$(1 - a_{ij})$ = perda na produção do produto i para a matéria-prima j no que concerne a espessura e largura

α = perda média normal para todas as matérias-primas no que concerne ao comprimento das tábuas

D_i = demanda do produto i

E_j = estoque da matéria-prima j

Em relação às unidades de medida, tem-se que o volume consumido, a demanda e o estoque devem ser expressos na mesma unidade volumétrica, por exemplo, metros cúbicos. A estimativa de perda média e o aproveitamento da matéria-prima e um coeficiente normalizado com valor entre zero e um.

4. O Caso da Empresa MPB

A MPB S.A. é uma indústria madeireira fundada em 1972, que, desde o seu início, vem buscando ativa participação nos mercados internacionais. Em 1974 inaugura uma moderna planta industrial para beneficiamento de madeira. A partir de 1991 a empresa deixa de processar matérias-primas oriundas de florestas nativas e inicia a industrialização de produtos a partir de florestas plantadas.

A Divisão de Madeiras trabalha com um *mix* de produtos que inclui molduras, marcos de portas, painéis e componentes especiais em sua maioria voltados para o mercado norte-americano. A matéria-prima básica utilizada são toras de *pinus taeda* e *araucaria augustifolia* provenientes de reflorestamento próprio ou de terceiros. Apresentou, de acordo com dados de 1999, um consumo anual de toras de 290.000 m³, uma produção anual de manufaturados de 65.000 m³ dentro de uma área industrial de 39.000 m².

4.1 O Problema

A empresa apresenta uma certa dificuldade no que tange ao aproveitamento das matérias primas. Para cada tipo e quantidade de produto a ser processada, existe uma perda natural de material, a qual pode ser grande, ultrapassando os 50% em boa parte das situações. Além disso, a escolha da matéria-prima e do plano de corte utilizado para gerar cada produto é feita de forma intuitiva pelo departamento de produção, baseada na experiência em processos anteriores, o que nem sempre possibilita o melhor aproveitamento da matéria-prima.

O fato de haver uma grande variedade de produtos possíveis e um certo número de tipos de cortes de madeira disponíveis para a produção de cada produto, já justificaria uma maior sistematização do processo. Um decisor humano não poderia considerar todas as alternativas de forma racional, ainda mas quando a escolha envolve a interação entre centenas ou milhares de variáveis. Certamente as perdas ocorridas na serragem poderiam ser reduzidas com a melhoria da sistemática de decisão. O montante de matéria-prima poupado, dependendo do conjunto produto demandado, dos tipos de madeira em estoque e do tipo de madeira escolhido seria bastante variável, podendo assumir valores relativamente significativos levando-se em conta a quantidade que se perde.

Para um melhor aproveitamento dos insumos, boa parte do resíduo do processamento da madeira é utilizada como combustível nas estufas de secagem, porém esta solução não reduz a necessidade do melhor aproveitamento da matéria-prima.

Levando-se em conta que os níveis de estoque não permitem que sempre esteja disponível, em quantidade suficiente, a matéria-prima com o aproveitamento ótimo para cada produto, há a necessidade adicional de realizar relações rápidas entre o que se deseja produzir e o que há no estoque para a obtenção do máximo de aproveitamento. Evidencia-se por estes argumentos que a utilização de um sistema de apoio à decisão para a programação de produção pode trazer grandes benefícios.

Com base nesta constatação, justifica-se a formulação e aplicação de um modelo indicando qual seria a escolha correta das matérias primas e suas quantidades para cada produto demandado, de forma a minimizar o desperdício de matéria-prima.

A tabela 1 apresenta um exemplo de taxas de aproveitamento típicas na produção de cada produto N a partir de uma matéria-prima M.

Tabela 1 - Taxas de aproveitamento produto x matéria-prima

	Matéria-prima 1	Matéria-prima 2	...	Matéria-prima M
Produto 1	0	0,4113		0,4880
Produto 2	0	0,3724		0,3990
...				
Produto N	0,5455	0,5845		0,3839

O cálculo do aproveitamento leva em conta o número de peças que podem ser obtidos a partir de cada tábua, tanto na largura quanto na espessura. O aproveitamento é definido como a razão entre volume produzido e o volume de matéria-prima consumido. O valor nulo significa que a matéria-prima correspondente não se presta à obtenção de determinado produto.

4.1 A Aplicação do Modelo

Com o problema formulado e de posse dos dados reais da empresa (tabela de produtos, estoque e demanda num certo instante), passou-se a buscar a maneira mais correta de tratar esta informação, de forma a implementar o modelo e validá-lo. O processo seguiu as etapas abaixo:

1. *Obtenção de dados primários* - Foi criada uma base de dados com as informações sobre o aproveitamento de cada matéria-prima na construção de cada tipo de produto. Os dados originais apresentavam informações de espessura e largura de 991 produtos e 20 tipos de matéria-prima. Com base nestas informações foi criada uma nova tabela, denominada *produtoMP*, englobando os dados de cada matéria-prima relacionados com cada produto, formando um produto cartesiano. Desta forma foram concentrados em uma única tabela todos os dados necessários ao cálculo de aproveitamento das matérias-primas por produto. A tabela resultante tinha 19820 registros.
2. *Tratamento dos dados* - Foi criado um programa para calcular o índice de aproveitamento com base nos dados da tabela *produtoMP*, utilizando a constante α e outras duas constantes de desperdício por corte. Os resultados encontrados foram armazenados em base de dados.
3. *Implementação do Modelo* - Foram utilizados os dados tratados da base e informações adicionais extraídas da posição de estoque da empresa em um determinado momento T_0 como parte das restrições do problema. A implementação do modelo foi efetuada em uma planilha eletrônica comercial de uso genérico. Foram considerados, para efeitos de simplificação, apenas dois produtos quaisquer na demanda.
4. *Execução do Modelo com os dados do sistema* - O modelo final desenvolvido contemplava todos os 20 tipos de matérias primas e a demanda de até dois produtos, totalizando 40 variáveis. Foram executadas e registradas várias situações, utilizando dados reais de estoque e várias situações de demanda.
5. *Análise dos resultados* - A aplicação do modelo permitiu compreender a forma da distribuição ótima das matérias-primas para a composição dos produtos minimizando-se o desperdício de acordo com a posição do estoque. Foram feitos vários testes, com produtos e quantidades diferentes de matérias-primas no estoque até que se chegasse numa compreensão adequada de como o sistema resolvia o problema. Os resultados mais interessantes são obtidos quando se trabalha com níveis mínimos de estoque, pois o modelo distribui os planos de corte por diversas matérias-primas, esgotando primeiro as de maior aproveitamento, levando em conta a carteira de demanda. Desta forma se assegura o melhor aproveitamento do potencial de transformação das tábuas.

5. Exemplo de Solução

Analisaremos para fins de maior compreensão do modelo um exemplo baseado em dados reais de produção. As restrições do modelo representam a oferta do estoque, a demanda do consumidor final e as percentagens de aproveitamento de matéria-prima para a construção de cada produto final. Todos os valores volumétricos são expressos em metros cúbicos.

Para fins de simplificação, foram utilizados dois produtos denominados Produto 001 e Produto 002 e foi fixado o valor do coeficiente α como 1. Na tabela 3, estão os dados de perda de cada produto extraído em cada matéria-prima. Cada célula da tabela que relaciona produto e matéria-prima equivale ao valor do fator $(I - a_{ij})$ na função-objetivo.

A tabela 4 apresenta a posição do estoque de cada matéria-prima num determinado momento, com dados obtidos dos registros da empresa MPB. As células da tabela 4 representam o fator (E_j) das restrições do modelo. A posição de estoque utilizada nos cálculos

é a mesma em todos os exemplos apresentados. Os valores de demanda apresentados são ilustrativos, visando uma melhor compreensão do modelo.

5.1 Primeira Aplicação

Em uma primeira aplicação do modelo estipula-se arbitrariamente a demanda do produto 001 igual a 12 m³, zerando a do Produto 002, a fim de identificar qual o tipo de matéria-prima alocada para o mesmo. Executando-se o modelo com estes parâmetros, a matéria-prima 010, que apresentava o melhor índice de aproveitamento, foi escolhida como a melhor opção e seus recursos foram utilizados até o esgotamento do estoque disponível. A partir daí o sistema alocou a matéria-prima 014 como complemento, até atingir a demanda solicitada.

O desperdício em metros cúbicos e os valores retirados do estoque para cada tipo de madeira estão no quadro abaixo:

Tabela 2. Resultados da Primeira Aplicação

Z	X1 10	X1 14
10,26	19,24	3,02

Tabela 3. Dados de perda

Matéria-prima	Produto 001	Produto 002
001	1	1
002	0,58867302	0,62753016
003	0,70619501	0,73395011
004	0,55929252	0,60092517
005	0,66777436	0,69915897
006	0,76269597	0,78511355
007	0,69797669	0,72650816
008	0,54537544	0,58832281
009	0,67526817	0,70594486
010	0,45445053	0,50598737
011	0,51290226	0,55891729
012	0,58670494	0,62574801
013	0,41548271	0,47070075
014	0,50344405	0,55035258
015	0,61609481	0,65236148
016	0,72578201	0,75168677
017	0,58867302	0,62753016
018	0,65099529	0,68396498
019	0,58068608	0,62029773
020	0,51198493	0,55808663

Tabela 4. Posição de Estoque

Matéria-prima	Estoque
001	63,52
002	453,32
003	348,27
004	4,02
005	10,65
006	5,79
007	0
008	20,52
009	59,79
010	19,24
011	220,09
012	71,69
013	0
014	129,98
015	13,26
016	6,35
017	90,64
018	39,52
019	131,98
020	5,04

5.2 Segunda Aplicação

Na segunda aplicação do modelo, inverte-se a situação anterior, fixando-se a demanda do produto 002 igual a 12 m³ e zerando a do Produto 001. Executando-se o modelo com estes parâmetros, a matéria-prima 010 novamente foi escolhida como a melhor opção e mais uma vez esgotou-se seu estoque. A partir daí o sistema alocou a matéria-prima 014 como complemento, até atingir a demanda solicitada, porém com um aproveitamento menor que o da primeira aplicação.

O desperdício em metros cúbicos e os valores retirados do estoque para cada tipo de madeira estão no quadro abaixo:

Tabela 5. Resultados da Segunda Aplicação

Z	X2 10	X2 14
12,78	19,24	5,54

5.3 Terceira Aplicação

Nesta aplicação do modelo, fixa-se a demanda do produto 001 igual a 6 m³ e a do produto 002 igual a 6 m³. Como resultado, mesclou-se para os dois tipos de produto a ser gerado, duas matérias-primas (010 e 014) em diferentes quantidades. O estoque da matéria prima 010 foi integralmente consumido, enquanto que do insumo 014 foi apenas parcialmente utilizado.

O desperdício em metros cúbicos e os valores retirados do estoque para cada tipo de madeira estão no quadro abaixo:

Tabela 6. Resultados da Terceira Aplicação

Z	11,52
X1 10	7,76
X1 14	3,55
X2 10	11,47
X2 14	0,73

6. Conclusão

O modelo proposto mostrou que é possível minimizar as perdas de produção dentro do ambiente madeireiro mediante a aplicação de técnicas de programação linear. Como benefícios adicionais o modelo desenvolvido acena com ganhos de tempo de resposta na tomada de decisão no plano operacional, redução de custos, incremento do controle de estoque e produção em si.

O trabalho de pesquisa realizado tem caráter eminentemente exploratório e experimental tendo sido testado apenas em ambiente laboratorial. Ainda não foi feita sua aplicação na linha de produção da empresa estudada. Conseqüentemente, seria muito interessante a utilização deste modelo em paralelo em uma típica semana de produção da empresa e envolvendo não apenas dois produtos, mas todos os pedidos dos clientes e as posições de estoque do período. Desta forma, se obteria uma noção mais clara de quanto a otimização atingida com o modelo se distancia dos procedimentos da realidade atual da empresa, podendo-se avaliar a sua aplicabilidade prática.

O modelo proposto pode servir como um ponto de partida ou para a extensão do uso de modelos formais a toda a cadeia produtiva em qualquer indústria madeireira. O uso de técnicas como a simulação e heurísticas pode permitir uma análise mais sofisticada da problemática estudada incluindo relações ambientais nos extremos da cadeia, tais como flutuações de oferta de matéria-prima e demanda por parte dos clientes finais. A extensa produção científica na área corrobora estas afirmações e deixa pistas de que é um campo ainda em expansão.

A respeito da resolução matemática do modelo, o uso de planilha eletrônica de uso geral limitou as possibilidades da exploração de análise de sensibilidade. A adoção de ferramentas de cálculo numérico mais sofisticadas e completas permitiria uma análise de resultados mais profunda e a exploração de novas e maiores possibilidades de tratamento de dados em relação aos níveis de estoque.

Para trabalhos futuros, existe ainda a possibilidade de integrar a estrutura tecnológica da empresa, incluindo sistemas de informação de ERP com uma ferramenta que implementasse o modelo aqui proposto, com a avaliação dos efeitos causados na produção. Pode-se citar ainda a possibilidade do desenvolvimento de métodos e processos sistemáticos prescritivos para a obtenção de dados mais precisos a respeito dos índices de aproveitamento de cada matéria-prima em relação à geração de cada produto.

Referências Bibliográficas

Boltz, F., Carter, D. R., Holmes, T. P., Pereira Jr., R. 2001. **Financial Returns Under Uncertainty for Conventional and Reduced-Impact Logging in a Permanent Production Forests of The Brazilian Amazon** – Ecological Economics – Vol. 39 – 387-398. Elsevier.

Brang, P., Courbaud, B., Fischer A., Kissling-Näf I., Pettenella D., Shönenberger W., Spörk J., Grimm V. 2002. **Developing indicators for the sustainable management of mountain forests using a modeling approach** – Forest Policy and Economics – Vol. 4 – 113-123. Elsevier.

Brown N., Parkin N. M., Jackson M. R. 2002. **Simulation of a Modified Rotary Timber Machining Process to Improve Surface Form** – Mechatronics – Vol. 12 – 489-502. Pergamon.

Buongiorno, J e Gilles, J. 1987. **Forest Management and Economics: A Primer in Quantitative Methods**. Macmillian Publishing Company, New York.

Cronin K., Norton B., Taylor J. 1996. **Development of a Simulation Tool to Enable Optimization of the Energy Consumption of the Industrial Timber-Drying Process** – Applied Energy – Vol. 53 – 325-340. Elsevier

Doherty P. F., Marschall E. A., Grubb Jr. T. C. 1999. **Balancing Conservation and Economic Gain: a Dynamic Programming Approach** – Ecological Economics – Vol. 29 – 349-358. Elsevier.

Dykstra, D. P. 1984. **Mathematical Programming For Natural Resource Management**. McGraw-Hill, New York.

Grasso M. 1998. **Ecological-economical Model for Optimal Mangroove Trade off Between Forestry and Fishery Production: Comparing a Dynamic Optimization and a Simulation Model** – Ecological Modelling – Vol. 112 – 131-150. Elsevier.

Liu C. 2001. **Primal-Dual Methods for Sustainable Harvest Scheduling Problems** - Computers and Operations Research – Vol. 28 – 733-749. Pergamon.

Liu G., Nelson J. D., Wardman W. D. 2000. **A Target-Oriented to Forest Ecosystem Design – Changing the Rules of Forest Planning** – Ecological Modelling – Vol. 127 – 269-281. Elsevier.

Loehle, C. 2000. **Optimal Control of Spatially Distributed Process Models** – Ecological Modelling – Vol. 131 – 79-95. Elsevier.

Mabvurira, D., Pukkala, 2002. T. **Optimizing the Management of Eucalyptus Grandis (Hill) Maiden Plantations in Zimbabwe** – Forest Ecology and Management – Vol. 166 – 149-157. Elsevier

Mandarino, U. 1969. **Custos**. Atlas, São Paulo

Musch H. E., Barton G. W., Langrish T. A. G., Brooke A. S. 1998. **Nonlinear Model Predictive Control of Timber Drying** – Computers Chemical Engineering – Vol. 22 No 3 – 415-425. Pergamon

Nijda J. J., Langrish T. A. G., Keey R. B. 2000. **A High-Temperature Drying Model for Softwood Timber** - Chemical Engineering Science – Vol. 55 – 3585-3598. Pergamon.

Pukkala T. 1998. **Multiple Risks in Multi-Objective Forest Planning: Integration and Importance** – Forest Ecology and Management – Vol. 111 – 265-284. Elsevier.

Rautiainen O., Pukkala T., Miina J. 2000. **Optimizing the Management of Even-Aged Shorea Robusta Stands in Southern Nepal Using Individual Tree Growth Models** – Forest Ecology and Management – Vol. 126 – 417-429. Elsevier.

Robles Júnior, Antônio. 1994. **Custos de Qualidade: uma estratégia para a competição global**. Atlas, São Paulo

Slack, N. 1993. **Vantagem Competitiva em Manufatura: Atingindo Competitividade nas Operações Industriais**. Atlas do Brasil. São Paulo

Wagner, H. M. 1986. **Pesquisa Operacional**. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro.

ⁱ O nome real da empresa foi alterado por razões de privacidade.