

Inspere

João Mendes de Almeida Nogueira

Ciências Econômicas

Adaptação de Modelos Clássicos no Planejamento Operacional de Celulose

São Paulo – SP

2019

João Mendes de Almeida Nogueira

Adaptação de Modelos Clássicos no Planejamento Operacional de Celulose

Trabalho de conclusão de curso de
Ciências Econômicas

Orientador: Professor Vinícius
Picanço Rodrigues

São Paulo

2019

Nogueira, João Mendes de Almeida

Adaptação de Modelos Clássicos no Planejamento Operacional de Celulose / João Mendes de Almeida Nogueira. – São Paulo: Insper, 2019.

26 f.

TCC: Faculdade de Economia e Administração.
Insper Instituto de Ensino e Pesquisa.

RESUMO:

O papel está se mostrando uma alternativa ao plástico para a produção de materiais descartáveis. Com isso, a demanda por celulose no mundo cresce ano após ano. O Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo, e exporta grande parte de sua produção. Esse estudo descreve a cadeia de suprimentos de uma empresa produtora de Papel e Celulose no Brasil. A empresa possui diversas fábricas espalhadas ao redor do país e produz milhões de toneladas de celulose por ano. Um dos grandes desafios de empresas do setor de papel e celulose é a tomada de decisões operacionais, como o quanto produzir, qual o nível ideal do estoque da fábrica, dos portos e dos armazéns externos. Neste estudo, após descrever de forma detalhada a cadeia de suprimentos, serão analisados modelos de otimização e simulação, a partir de programação linear, passíveis de serem aplicados e utilizados para o auxílio na tomada de decisões da empresa. Após isso, um modelo de gestão da cadeia de suprimentos é apresentado, aplicando as especificidades do setor de celulose no modelo: especificações de produção, distribuição e contratos marítimos. Além disso, será discutido como o modelo pode auxiliar no planejamento, pontos de atenção e possibilidades de estudo futuro no setor.

Palavras-chave: 1. Celulose, 2. Cadeia de Suprimentos, 3. Planejamento

SUMÁRIO

1. Introdução	6.
2. Revisão de Literatura	12.
3. Metodologia	15.
4. Modelo Utilizado	18.
5. Discussão do Modelo	22.
6. Conclusão	24.
7. Referências	24.

1. INTRODUÇÃO

1.1. O Mercado da Celulose

O Brasil sempre foi um dos maiores produtores de celulose do mundo, hoje ele ocupa a segunda colocação, atrás somente da China. Segundo dados do IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores), hoje são produzidos mais de 19,5 milhões de toneladas por ano e 67% desse volume é exportado. A celulose brasileira é produzida principalmente de Eucaliptos, o que a caracteriza como uma celulose de fibra curta. Esse tipo de celulose é ideal para produção de papeis finos e lisos, como papeis de impressão e escrita, papel de seda e papelão. Mas também existe outro tipo de celulose, o de fibra longa, que é produzido através de árvores coníferas e é ideal para a produção de papel para embalagens e de papel cartão.

Neste trabalho, uma empresa produtora de celulose foi estudada. Nela, o processo de produção da celulose é complexo e extremamente dependente de componentes químicos da madeira da qual foi produzida. Segundo Costa, Colodette, Gomide e Foelkel (1997), sujidade, alvura, viscosidade e umidade são parâmetros que são importantes na comercialização da celulose e cada tonelada de celulose com diferenciação nesses parâmetros significa um SKU (*Stocking Keeping Unit*) diferente. Dessa forma, uma mesma fábrica pode produzir até 15 SKUs diferentes e é extremamente difícil que fábricas em locais diferentes, com máquinas diferentes e condições climáticas diferentes produzam o mesmo SKU. Portanto, uma empresa com 4 fábricas pode ter até 60 SKUs de celulose. Além disso, Oliveira, Foelkel e Gomide (1980) descrevem que para produzir cada tipo de papel existe um tipo de celulose com componentes químicos diferentes que é o ideal para a produção. Por isso os clientes demandam certos SKUs e podem rejeitar uma celulose com especificações diferentes das que eles necessitam. Segundo os autores é extremamente difícil controlar cada um desses

componentes durante a fase de produção, visto que a produção nem sempre consegue enquadrar a produção da celulose com as melhores especificações. Por isso são produzidas milhares de toneladas de celulose chamada de *downgrade*. Na empresa, muitos clientes, principalmente os clientes de mercado externo rejeitam a compra desse tipo de celulose. Dessa forma, a celulose que não se enquadra nas melhores especificações ocupa uma grande parte do estoque por muito tempo, até ser vendida para o mercado interno, por um preço mais barato que a celulose com as melhores especificações.

Outra característica que dificulta ainda mais o planejamento da cadeia da celulose é o fato de a grande parte das empresas que produzem celulose serem produtores de papel também. A unidade de papel e de celulose competem por recursos logísticos, como caminhões e espaços de estoques. Além disso, existe outra variável no planejamento, principalmente no mercado interno: os concorrentes. Uma decisão a ser tomada é: vender celulose para seus concorrentes de papel? Se a resposta for negativa, como configurar uma cadeia no mercado interno para atender somente regiões específicas do mercado que não apresentem concorrentes com a unidade de papel?

Como na grande maioria das empresas brasileiras de papel e celulose, a celulose é a unidade mais lucrativa e que apresenta os maiores volumes, muitas vezes a unidade de papel que sofre com a competição. Ou seja, a unidade de papel não deve competir com os clientes de celulose do mercado interno, e buscam mercados, muitas vezes distantes das fábricas, para vender seus produtos. Isso acontece porque o mercado interno é de extrema importância para o controle dos estoques da celulose, já que são esses os clientes que solucionam o maior problema da gestão de estoques da celulose: a venda de celulose Downgrade.

O controle dos estoques da unidade de celulose é de grande importância para os resultados da empresa, visto que a produção deve ser contínua, e se os estoques estiverem muito altos, uma parada forçada da fábrica pode gerar grandes prejuízos para a empresa. Dessa forma, o planejamento de toda a cadeia de celulose deve ser muito bem estruturado.

1.2. O Processo de Planejamento na Cadeia de Celulose

Carlsson, D'Amours, Martel e Rönnqvist (2009) realizaram um estudo das principais características da cadeia de suprimentos da celulose e se atentam para a alta variabilidade dos prazos de planejamento da cadeia. Visto que devem ser planejados desde o plantio de eucalipto que demoram cerca de 10 anos para se tornarem aptos para a produção de celulose, segundo relatório do IBÁ 2010, até o escoamento de cada fábrica a todo o momento, para garantir que não falte produto em cada etapa da cadeia. O planejamento, então, vai ser realizado em horizontes de mais de 10 anos, até o planejamento diário que pode variar a cada hora/minuto. O estudo conclui que é muito importante as decisões diárias estarem alinhadas com o planejamento estratégico para que a indústria seja sustentável no longo prazo e garantir resultados e eficiência. Para isso os modelos de gestão aplicados em cada etapa da cadeia devem estar alinhados. No Quadro 1 encontramos os diferentes horizontes de planejamento dessa cadeia:

Quadro 1.

	<i>Suprimentos</i>	<i>Produção</i>	<i>Distribuição</i>	<i>Vendas</i>
<i>Estratégico</i>	Aquisição de terras para a plantação de madeira, contratos de plantação e colheita, estratégia e investimento em transportes.	Definição da localidade das fábricas, investimentos tecnológicos e capacidades de produção.	Localização de armazéns e estoques, contratos com fornecedores de transporte (marítimo, ferroviário e rodoviário), Investimentos em tecnologia de planejamento.	Segmentação do mercado, escolha do mercado alvo, estratégia de precificação, estratégia de serviço.
<i>Tático</i>	Plano de plantação, Plano de colheita, definição de rotas de transporte de madeira.	Duração de campanhas de produção, tamanho do lote, meta de estoque sazonal, paradas programadas de fábrica.	Meta de estoques na Fábrica, Armazéns e Portos. Política de administração de Estoques e decisão de rotas (marítima, ferroviário e rodoviário)	Plano de demanda agregada, contratos de venda, estoques de segurança, Rolling Forecast da demanda, alocação de clientes para cada fábrica.
<i>Operacional</i>	Plano detalhado de suprimentos de madeira, plano diário de expedição de madeira da floresta para a fábrica.	Controle do processo, plano de produção diário, expedição diária da fábrica para armazéns externos e portos.	Controle de estoques dos armazéns externos e portos, plano diário de expedição, embarques e carregamento de trens e veículos	Planejamento e controle do estoque dos clientes.

Fonte: Quadro adaptada de Carlsson, D'Amours, Martel e Rönnqvist (2009)

Os autores dividiram o planejamento em 3 fases. A primeira chamada de Planejamento Estratégico, que é o planejamento de longo prazo. É importante ter em mente que na celulose o planejamento de longo prazo é muito longo mesmo. Para planejar o investimento em uma fábrica nova, por exemplo, é necessário

analisar um horizonte de em média 30 anos. Portanto, esse é o nível mais abstrato do planejamento.

A segunda fase do planejamento é o Planejamento Tático. É o planejamento de médio prazo e serve como a ligação entre o planejamento estratégico e o planejamento de curto prazo. É nele em que são definidas as premissas de operação e os fluxos da cadeia. O planejamento tático é uma balança que deve, ao mesmo tempo, garantir a otimização do planejamento de curto prazo e garantir que as estratégias do planejamento de longo prazo estão sendo seguidas. Um exemplo de função do planejamento tático é o calendário de produção de celulose a partir dos dados de disponibilidade de madeira e de demanda. Além disso, uma das funções mais importantes do planejamento tático é o planejamento do orçamento disponível para a logística e investimentos em melhorias na cadeia.

A terceira fase é o Planejamento Operacional, ou planejamento de curto prazo. É nele que são tomadas decisões do dia a dia e são realizados planos de ação para otimizar os custos logísticos. O planejamento operacional é o responsável pela gestão dos estoques, atendimento dos clientes ou navios para exportação. O acompanhamento deve ser em tempo real e com um alto grau de detalhamento nas decisões.

Neste estudo o foco será a tomada de decisões do Planejamento Operacional. Para isso, é necessária uma descrição completa da cadeia de suprimentos de uma empresa típica de Celulose, para a compreensão de todos os pontos de decisão e restrições da cadeia.

1.3. Caracterização da Cadeia de Suprimentos de Celulose

A cadeia de suprimentos da celulose completa, desde a aquisição de madeira até a entrega para o cliente, é complexa e envolve muitos detalhes. Com o Brasil conta com grandes empresas produtoras de celulose, que produzem milhões de toneladas por ano, é de extrema importância para as companhias que o planejamento seja adequado, para evitar gastos desnecessários, que acabam afetando muito a margem EBITDA da empresa.

Como a grande maioria da celulose brasileira é exportada, a cadeia de suprimentos das grandes empresas brasileiras depende da localização dos portos

e dos custos logísticos associados ao transporte da fábrica até o porto. Toda a decisão estratégica das companhias foi tomada tendo em vista por qual porto a celulose vai deixar o Brasil. Um exemplo é um porto do Espírito Santo chamado de Portocel, especializado apenas em celulose. Esse é o porto com a maior produtividade do mundo em celulose, 24 mil toneladas por dia por navio, segundo relatório do Ministério da Infraestrutura. Ao redor do porto, entre o Espírito Santo e o sul da Bahia, estão localizadas diversas fábricas de celulose que exportam todo seu volume por Portocel.

Outro exemplo é o porto de Santos, que também movimentava quantidades elevadas de celulose por ano: 3,8 milhões de toneladas em 2018, segundo o relatório anual do porto. E apresenta diversas fábricas e empresas que desenham sua cadeia de suprimentos para exportar a carga por Santos.

Atualmente na empresa estudada, toda a madeira utilizada na produção de celulose vem de florestas de eucaliptos próximas a cada uma das fábricas. Existem estoques de madeira nas florestas e nas fábricas. O transporte das florestas para as fábricas é feito em grande parte das empresas por rodovias. Como pode-se observar na Figura 1, existem diversos meios de se transportar a celulose até o porto, e diversos pontos de estoque para se levar em conta no planejamento. Além disso, todo o volume vendido para mercado interno é feito através de transporte rodoviário saindo das fábricas e chegando ao cliente. Cabe aos planejadores decidir de qual fábrica vai sair o volume vendido para cada cliente.

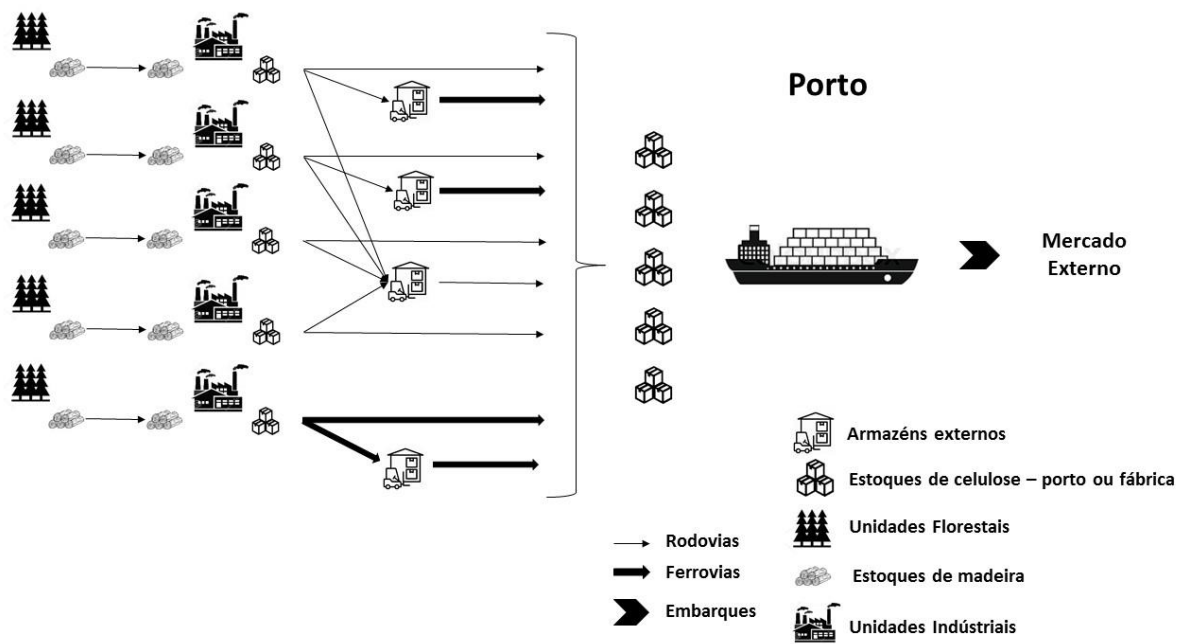


Figura 1: A cadeia de suprimentos da empresa estudada.

Os embarques no porto de Santos são constantes e são carregadas grandes quantidades de celulose. Os terminais em Santos têm uma capacidade média de 40 mil toneladas e um navio pode sair do porto após ter carregado mais de 50 mil toneladas. Por isso, é muito comum que navios operem em mais de um terminal e praticamente zerem os estoques no porto após sua operação. Também é comum que navios cheguem no porto antes de todo o volume planejado para a operação estar no estoque. Isso gera uma série de multas e atrasos na cadeia e deve ser evitado ao máximo. A operação no porto, portanto, é o que gere praticamente toda a cadeia. Todos os fluxos devem ser adequados para garantir o atendimento dos navios na hora prevista e os modelos de otimização devem garantir que sejam minimizados esses atrasos.

Pela Figura 1 é possível perceber que em quatro das cinco fábricas apenas são carregados caminhões e em uma delas são carregados apenas trens. Esses são os tipos de transportes mais utilizados em cada terminal, entretanto, nada impede que em uma fábrica que atualmente carrega apenas trens passe a carregar carga via transporte rodoviário caso esse tipo de transporte apresente mais vantagens para a companhia. Além disso, a logística de carregamentos e destinos se torna um desafio na medida que os estoques devem ser muito bem controlados para

garantir o menor custo possível para o atendimento completo no porto e, ao mesmo tempo, deve-se garantir sempre que os clientes de mercado interno sejam atendidos para controle de estoques de celulose *downgrade*.

Atualmente, na empresa estudada, não existem modelos que auxiliam a planejar os fluxos da cadeia. O carregamento, por exemplo, da fábrica A para o porto B depende, principalmente, da projeção de estoques de A e B, da previsão de embarques para mercado externo em B e da previsão de produção de celulose em A, mas não existe um modelo claro que otimize o carregamento e leva em consideração todas as especificidades dessa cadeia por completo.

Enquanto o Planejamento Operacional deve estabelecer a melhor opção de níveis de estoque, expedição e garantir que todos os embarques aconteçam com o menor nível de atrasos possível, a área também deve guiar a produção e garantir que as fábricas não parem em nenhum momento. Um aumento do nível de estoques que force uma parada na fábrica gera um custo muito grande para empresa e precisa ser evitado.

Nesse estudo todos os fluxos serão transformados em equações lineares e mapeados para gerar um modelo de produção, níveis de estoque, expedição e embarques, na tentativa de minimizar os custos logísticos do processo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta revisão de literatura serão apresentados outros estudos e modelos gerais de planejamento operacional, apresentando diferentes técnicas de planejamento e tomada de decisões complexas. Por último o foco será em estudos sobre o planejamento operacional da indústria da celulose.

2.1. Modelos de Gestão de Estoque

Clark e Scarf (1960) introduziram na literatura um dos *papers* mais clássicos sobre gestão de estoques em cadeias de suprimentos complexas. Diversos autores utilizam o modelo proposto por eles para resolver problemas de planejamento operacional até hoje. Eles utilizaram a programação linear inteira mista na gestão de estoques. Neste tipo de programação o problema é simplificado para uma função-objetivo, na maioria delas a redução dos custos logísticos, e para

restrições. Tanto a função objetivo quanto as restrições são lineares e, como nem todas as variáveis são inteiras, o modelo é chamado de programação linear inteira mista. Clark e Scarf propuseram políticas de otimização para uma cadeia de suprimentos com estoques em diversas posições da cadeia e sob revisão periódica em um horizonte finito e uma demanda incerta. No modelo eles levam em consideração os custos de estoque, de trânsito e de produção. O modelo proposto neste estudo será uma adaptação do modelo de Clark e Skarf para as especificidades da cadeia de suprimentos de celulose.

2.2. Modelos de Planejamento Operacional para Cadeia de Suprimentos

Grande parte dos estudos de Planejamento Operacional são resolvidos com modelos de programação linear inteira mista. Nesta sub-seção, serão apresentados, de forma resumida, três modelos de planejamento operacional para cadeia de suprimentos.

Poltroniere, Araujo e Poldi (2016) propôs um modelo de combinação linear para minimizar os custos de produção de uma empresa brasileira de papel, programando qual SKU de papel deve ser produzido de acordo com a demanda e levando em consideração o custo de estoque de matéria prima e de material final.

Bilgien e Ozkarahan (2007) modelaram a cadeia marítima de uma companhia de grãos na Turquia. O problema era o carregamento de navios do porto de origem até o porto de destino, com restrições para os respectivos estoques e os tipos de navios a serem contratados. O problema foi formulado a partir de um modelo de programação linear mista e tinha como função-objetivo minimizar os custos incluindo o carregamento, o transporte de navios e o custo dos estoques. O resultado mostrava à empresa a quantidade total de cada produto a ser carregada em cada terminal em cada um dos navios contratados e para qual terminal de destino será encaminhado.

Belvaux e Wolsey (2001) fazem um estudo generalizado sobre os modelos de programação linear simples para analisar problemas de gestão de estoques em uma cadeia de suprimentos. Os autores descrevem diversos tipos de modelos, desde modelos básicos de produção de apenas um produto em determinado período, até modelos complexos de vários produtos sendo produzidos em diversas fábricas e distribuídos em diversas localidades ao longo do tempo.

Apesar de não estarem relacionados com o setor de celulose, todos os modelos acima descritos apresentam características e conceitos importantes da cadeia de suprimentos da celulose. Poltroniere, Araujo e Poldi (2016) observaram sob ótica da produção, Bilgien e Ozkarahan (2007) analisaram e estudaram as rotas marítimas e custos de embarques e Belvaux e Wolsey (2001) fazem uma revisão completa de gestão de estoques que podem ser utilizados tanto em fábricas quanto em portos. O modelo proposto nesse estudo, portanto, irá absorver características dos três modelos acima citados, já que vai abordar desde a produção, passando pela gestão de estoques até o embarque de navios no porto.

2.3. Planejamento Operacional no Setor de Celulose

Breadström et al. (2007) estudou o planejamento de produção na cadeia da celulose em três fábricas da Suécia. O modelo é amplo e leva em consideração desde todas as formas de fonte de madeira até a demanda agregada por celulose. O maior desafio do autor foi combinar as campanhas de produção com a otimização dos fluxos da cadeia e, para isso, ele utilizou um modelo de programação linear inteira mista que, ao resolvê-lo, conseguiu uma combinação de campanhas de produção que reduzia custos logísticos e de estocagem, mas que variava mais do que o planejamento manual previamente utilizado nessas fábricas.

Gunnarsson et al. (2006) estuda a segunda parte da cadeia da celulose: da fábrica para os consumidores. O modelo levava em consideração rotas diferentes de navios e localizações distintas de terminais, mas em apenas um período de tempo. Gunnarsson et al. (2007) amplia seu estudo anterior e modela a cadeia de suprimentos com um todo, desde a produção até a distribuição, mas continua a levar em consideração apenas um período e dessa vez utiliza-se de rotas marítimas mais simples.

Esses dois autores são muito citados quando se trata de planejamento operacional de celulose. Ambos estudam companhias de celulose nórdicas que apresentam características de cadeia de suprimentos um pouco diferentes das companhias brasileiras. No caso das duas empresas estudadas pelos autores, as fábricas de celulose ficam ao lado dos portos, portanto, o transporte da fábrica até o porto não foi abordado nos estudos. Entretanto, os três modelos consideram

características importantes da celulose: Breadström et al. (2007) incorpora características das campanhas de produção em seu modelo e Gunnarsson et al. (2006) descreve as características de contratos com armadores e agências marítimas para exportação de celulose, como multas com atrasos e falta de carga no porto. Por isso, são importantes de se considerar para criação de um modelo adequado à realidade das companhias brasileiras.

3. METODOLOGIA

Antes da apresentação do modelo, deve-se ter em mente que existem duas estratégias muito utilizadas para solucionar problemas em uma cadeia de suprimentos: a simulação e a otimização. O modelo proposto utilizará de ambas as estratégias, mas antes será necessário diferenciá-las.

3.1. Diferenças entre Simulação e Otimização

Tanto a simulação quanto a otimização são estratégias muito utilizadas para planejar e estruturar uma cadeia de suprimentos. *Analytical Optimization* ou simplesmente “otimização” é provavelmente a forma mais utilizada para aprimorar a cadeia de suprimentos: é a simplificação dos fluxos da cadeia através de uma série de equações lineares que são solucionadas para tomar as melhores decisões de configurações da cadeia, como níveis de estoques de segurança, lotes econômicos, localização de fábricas e centros de distribuição, quanto produzir, etc. Usualmente, esses modelos servem para tomada de decisões que necessitam de uma abstração maior, como a definição da configuração da cadeia e dos fluxos ótimos de produtos e serviços. Essa estratégia é também a mais utilizada em estudos e *papers* que descrevem cadeias de suprimentos, principalmente quando os autores propõem modelos de programação linear.

Por ser uma simplificação da realidade, existem muitos problemas que a otimização não consegue solucionar e, por isso, muitas empresas iniciaram o desenvolvimento de técnicas de *Dynamic Simulation*, ou apenas “simulação”. Essa técnica permite que os gestores da cadeia simulem a realidade em um programa de computador que vai demonstrar como que a cadeia reage a certas mudanças com o passar do tempo. Dessa forma os gestores podem simular qualquer mudança e verificar quais as suas consequências ao longo dos dias. O nível de detalhamento é muito superior e os gestores conseguem compreender como a

cadeia reage a inovações e novos fluxos, mitigar riscos, e compreender como uma mudança em um fator afeta todo o resto da cadeia. As simulações, portanto, servem para tomada de decisões em um nível muito mais detalhado.

É importante deixar claro que não existe um método melhor que o outro, eles apenas estão resolvendo problemas diferentes. Na busca pela excelência operacional é necessário utilizar-se dos dois métodos e saber em qual momento é melhor utilizar um ou o outro. A Tabela 1 deixa claro essa diferença. No nível do planejamento estratégico, decisões analíticas de otimização são muito mais eficientes. Entretanto, quando entramos no nível de detalhamento do planejamento operacional, é muito importante a utilização de técnicas de simulação avançadas para a resolução de problemas operacionais.

Tabela 1:

	Decisões		Nível de Detalhamento
Planejamento Estratégico	Onde construir Armazéns e estocar produtos, Planejamento Macro.	Metodos de Otimização Analítica	Localização, Fluxos, Dependência Linear. Grande abstração e poucos detalhes.
Planejamento Tático	Plano de transportes, Plano de estoques, Otimização dos transportes, Nível de Serviços, Capacidades.		Dinamicas de tempo, Aleatoridade, Detalhamento de Parâmetros, Integração de Processos.
Planejamento Operacional	Planejamento de produção, Expedição diária, Plano de embarques.	Métodos de Simulação Dinâmica	Detalhamento nas dinamicas de tempo, SKU, volumes. Maior nível de detalhamento e pouca abstração.

Fonte: tabela adaptada de *Anylogistix: Supply Chain Optimization and Simulation – Technological Overview*

Assim como na maioria dos estudos de modelagem de gestão de estoques, neste estudo será utilizado um modelo de otimização. Entretanto alguns

parâmetros serão simplificados: a demanda será sempre definida e os custos não se alteram entre os períodos. Mesmo que, para a granularidade de detalhes do planejamento operacional, seja recomendado a simulação como método mais assertivo, neste e em diversos outros estudos são utilizados modelos de otimização. Isso porque os modelos descritos são simplificações feitas para guiar os planejadores da cadeia de suprimentos e seus resultados não devem ser seguidos como um axioma.

Com isso, para que o modelo seja o mais assertivo possível é recomendado que o modelo seja simulado diversas vezes para compreender as mudanças na cadeia devido a alterações repentinas da demanda ou nos custos associados. Para tanto, um modelo clássico de gestão de estoques será adaptado para as especificidades da celulose.

3.2. O Modelo de Diaby e Martel (1992)

Diaby e Martel (1992) adaptaram o modelo de Clark e Scarf (1960) para que o modelo auxiliasse em decisões da cadeia de suprimentos de um produto específico. Otimizando decisões importantes como a quantidade a ser comprada, nível de estoque e quantidade a ser transferida para outros estoques e armazéns. No modelo uma previsão de demanda deve ser dada. O modelo de Diaby e Martel (1992) servirá de apoio para a confecção de um modelo com as especificidades da cadeia de suprimentos de celulose ao final deste estudo. A função-objetivo dos autores é dada por:

$$\text{Min} \left(\sum_j \sum_w \sum_t (c_{wtj} u_{wtj} + f_{wtj} \delta_{wtj}) + \sum_w \sum_t h_w I_{wt} \right) \quad (1)$$

A função-objetivo (1) do modelo dos autores minimiza, na primeira parte, os gastos com a compra e transporte de produtos. c_{wtj} é o preço de compra de uma unidade do produto j que vai para o armazém w no período t . u_{wtj} é o total de unidades do produto j que vai para o armazém w no período t . f_{wtj} é o custo fixo do pedido/transferência do produto j para o armazém w no período t . δ_{wtj} é uma variável binária relacionada a ter ou não transporte de carga. Na segunda parte o

modelo minimiza o custo de estocagem. h_w é o custo de se manter uma unidade do produto no armazém w e I_{wt} é o nível de estoque do armazém w no período t .

O modelo está sujeito a algumas restrições. São elas

$$I_{wt-1} + R_{wt} - I_{wt} = d_{wt} \quad (2)$$

$$I_{wt-1} + R_{wt} - I_{wt} - \sum_v R_{v,t+\tau(v)} = 0 \quad (3)$$

$$u_{wt} - b_{wt}\delta_{wt} \leq 0 \quad (4)$$

Segundo a restrição (2) o nível de estoques do período t é o nível de estoques em $t - 1$ somado do recebimento de produtos do armazém w no período t (R_{wt}) menos a demanda total por produtos do armazém w no período t (d_{wt}).

Assim como a restrição (2), a restrição (3) também é um balanço de massas. v representa o conjunto de armazéns e pontos de demanda e $\tau(v)$ é o tempo de trânsito até cada um desses pontos. Portanto, segundo a igualdade (3), o nível de estoque no período t é o nível de estoque em $t - 1$ somado do recebimento em w no período t subtraído do recebimento de todos os outros armazéns ou pontos de demanda em um período a frente (representado pelo tempo de trânsito).

Segundo a restrição (4) a quantidade comprada u_{wt} deve ser sempre inferior à quantidade máxima b_{wt} que se pode comprar o produto em questão pelo preço c_{wt} vezes a variável binária δ_{wt} . Ou seja, sempre que houver compra, existirá transporte da carga para o armazém w , e a variável binária assume o valor 1.

Ao resolver o modelo as quantidades e o número de pedidos de cada um dos produtos são otimizados. Esse modelo será adaptado ao setor de celulose, para isso, a modificação e a inclusão de uma série de variáveis deverá acontecer.

4. MODELO UTILIZADO:

4.1. Adaptando o Modelo de Diaby e Martel (1992)

Antes de descrever o modelo deve-se realizar uma análise crítica de porque apenas o modelo de Diaby e Martel (1992) não se encaixa na cadeia da celulose. Algumas características da cadeia da celulose em especial deverão ser

consideradas ao modelar os fluxos da cadeia afim de minimizar os custos. Primeiramente, toda a celulose é produzida nas fábricas, então não será considerado custo de compra de matéria prima, este será incluído no custo de produção. Além disso, é necessário incluir no modelo de Diaby e Martel o volume máximo de estocagem, para não ultrapassar o máximo permitido em cada armazém. Outro ponto importante é a inclusão de transferências entre os armazéns da empresa, da fábrica até o porto, por exemplo e as vendas para o mercado interno. Por fim, é importante incluir na função objetivo as multas quando um armazém do porto não tem a quantidade necessária de carga para atender a demanda e os navios devem permanecer esperando que toda a carga seja encaminhada aos armazéns.

4.2. O Modelo para o Planejamento Operacional de Celulose

A função-objetivo do modelo proposto é dada por:

$$\text{Min} \left(\sum_w \sum_t c_{wt} p_{wt} + \sum_{w_i} \sum_{w_f} \sum_t e_{w_i w_f} q_{w_i w_f t} + \sum_w \sum_t h_w I_{wt} + \sum_w \sum_t m \beta_{wt} \right) \quad (5)$$

Na primeira parte da função-objetivo (5) são minimizados os custos de produção. c_{wt} é o custo de produção de uma tonelada de celulose na fábrica do armazém w no período t . p_{wt} é o volume total de celulose produzida na fábrica do armazém w no período t . Na segunda parte, são minimizados os custos de transporte entre os armazéns: $e_{w_i w_f}$ é o custo de expedição de uma tonelada de celulose do armazém inicial w_i até o armazém final w_f e $q_{w_i w_f t}$ é a quantidade de toneladas de celulose expedida do armazém inicial w_i até o armazém final w_f no período t . Na terceira parte da função objetivo são minimizados os custos de estocagem. h_w é o custo de se manter uma tonelada de celulose no armazém w . I_{wt} é o nível de estoque do armazém w no período t . Por fim, na quarta parte da função, são minimizadas as multas quando não existe carga suficiente no porto para atender os navios. m é o preço das multas e β_{wt} é uma variável binária que assume o valor de 1 quando não há prontidão de carga no armazém w do porto para atender os embarques programados D'_{wt} de navios no período t .

$$\beta_{wt} = \begin{cases} 1, & I_{wt} < D'_{wt} \\ 0, & I_{wt} \geq D'_{wt} \end{cases} \quad (6)$$

Neste modelo é minimizado o custo total da cadeia, desde a etapa de produção até o embarque no porto. É importante deixar claro que a princípio não há distinção se w representa o armazém de uma fábrica ou porto, a diferença será dada nos parâmetros relacionados, por exemplo: o custo de se produzir celulose em lugares que atualmente não tem máquinas para tal será muito maior que o custo de se produzir na fábrica. Portanto não é necessário se preocupar com a distinção de fábricas e portos, o modelo nunca irá otimizar os custos indicando que o melhor seria produzir celulose no porto, por exemplo.

Como todo modelo de programação linear mista, este também está sujeito a restrições:

$$I_{wt} = I_{wt-1} + R_{wt} - E_{wt} - S_{wt}\delta_{wt} \quad (7)$$

$$R_{wt} = \sum_{w_i} q_{w_i wt} + p_{wt} \quad (8)$$

$$E_{wt} = \sum_{w_f} q_{w w_f t} + M I_{wt} \quad (9)$$

$$I_{wt} \leq C_w \quad (10)$$

$$E_{wt} \leq I_{wt-1} \quad (11)$$

$$D'_{wt} = D_{wt} + \beta_{wt-1} D'_{wt-1} \quad (12)$$

$$S_{wt} = D'_{wt}\delta_{wt} \quad (13)$$

$$Pmin_{wt} \leq p_{wt} \leq Pmax_{wt} \quad (14)$$

Segundo a restrição (7) o nível de estoques do período t é o nível de estoques em $t - 1$ somado do recebimento de produtos do armazém w no período t (R_{wt}) menos a expedição total de celulose do armazém w no período t (E_{wt}) menos um componente que mostra os embarques totais de celulose do armazém w no período t ($S_{wt}\delta_{wt}$). Sendo que S_{wt} são os embarques realizados de celulose do armazém w no período t e δ_{wt} é uma variável binária que é oposta ao β , ou seja, recebe o valor de 1 quando, de fato, existe carga suficiente para embarcar o que foi previsto.

$$\delta_{wt} = \begin{cases} 0, & I_{wt} < D'_{wt} \\ 1, & I_{wt} \geq D'_{wt} \end{cases} \quad (15)$$

A restrição (8) define o Recebimento como a somatória de todo o volume que chegou de todos os outros armazéns em w mais a produção total de celulose em w no período t .

Já a restrição (9) define que a Expedição é a somatória de todo o volume que saiu do armazém w para todos os outros armazéns mais todo o volume vendido para mercado interno (MI_{wt}).

A restrição (10) define que o nível de estoques em qualquer armazém deve ser menor que a sua capacidade máxima C_w .

Segundo a restrição (11) a expedição total do armazém w no período t não pode ser maior que o estoque total de w no período $t - 1$.

As restrições (12) e (13) são relativas aos embarques. Em (12) tem-se a diferenciação de D'_{wt} e D_{wt} . D_{wt} representa a previsão inicial de embarques para o armazém w no período t no horizonte relevante. Já D'_{wt} é a previsão de demanda modificada por um componente de memória, ou seja, D'_{wt} é a demanda de embarques prevista no armazém w no período t somado de toda a demanda de períodos de tempo anteriores que não foi embarcada ainda ($\beta_{wt-1} D'_{wt-1}$) por não existir carga suficiente no porto. Já em (13) temos que os embarques realmente realizados S_{wt} serão a previsão modificada de demanda se existir carga suficiente para o embarque, garantida pela variável binária δ_{wt} .

Por fim, a restrição (14) estabelece que a produção de cada armazém deve estar entre o intervalo pré-definido por cada fábrica como a máxima capacidade de produção da fábrica ($P_{max_{wt}}$) e mínimo necessário para que a fábrica não pare ($P_{min_{wt}}$). Dessa forma é garantido que a fábrica siga a programação de produção considerada ideal para cada intervalo de tempo.

5. DISCUSSÃO DO MODELO

Para o completo funcionamento do modelo são necessárias algumas informações importantes: os custos de todos os transportes da cadeia, o custo de produção e o custo de estocagem em todos os armazéns, previsão de vendas de mercado interno e previsão de embarques assertiva. Tais informações são difíceis de se conseguir, principalmente a previsão dos embarques, que depende muito do ETA (*Estimated Time of Arrival*) de cada navio, informação que pode ter um desvio grande dependendo da operação de cada navio antes de chegar no terminal de celulose. É por isso que o recomendado é que esse modelo de otimização seja simulado diversas vezes, sob diversas hipóteses de embarques, para que se aumente ao máximo a eficácia do modelo e para que os riscos sejam evitados.

Os resultados do modelo serão quantidades otimizadas de produção, expedição e nível de estoques em toda a cadeia. Porém, foram realizadas algumas simplificações que devem ser levantadas como pontos de atenção. Primeiro, não foram levadas em consideração os diferentes tipos de SKUs da celulose. Apenas um produto foi tratado para fins de simplificação do modelo, porém, caso a diferenciação de SKUs seja muito necessária, os planejadores podem se utilizar dos resultados otimizados desse modelo para se guiarem na tomada de decisão. Outra forma de se considerar diferentes SKUs é adaptando a estratégia de Diaby e Martel (1992) descrita na seção 3.2. No modelo, os autores inserem uma variável j que pode representar cada SKU de celulose. O excessivo detalhamento de SKUs, entretanto, causaria problemas na assertividade da previsão de demanda e embarques, que deverão ser muito mais específicos, dificultando a precisão.

Além disso, nesse modelo é considerado que os custos de transporte de todo o volume vendido para mercado interno não são arcados pela companhia, ou seja, todos os clientes são FOB. Isso não é sempre verdade, e os planejadores da cadeia devem ter esse custo em mente. É possível incluir esse custo no modelo a

partir da função-objetivo. Com uma variável para custo de transporte de cada armazém até cada cliente de mercado interno. Entretanto, o mapeamento desses custos nem sempre é uma tarefa fácil, e como a demanda por celulose no mercado interno é exógena e o modelo considera que tudo será entregue, o custo de entrega é um custo inevitável. Por isso, pode ser desnecessário incluí-lo no modelo.

Outro ponto de atenção do modelo é o fato de que, como não se tem diferenciação de SKUs, não é possível diferenciar o que é celulose *Downgrade* do que é celulose disponível para exportação. Ou seja, quando a fábrica não produz a celulose com as melhores especificações de alvura, sujidade, viscosidade e umidade, não é possível diferenciar a produção no modelo e, conseqüentemente, no nível de estoques. Os planejadores da cadeia de suprimentos devem sempre saber o quanto de *downgrade* está sendo produzido para deixar essa celulose disponível para a compra em mercado interno e não disponibilizar o volume para embarques de mercado externo. Com a celulose *downgrade*, entretanto, não se pode incluir uma variável j para diferenciar celulose boa de celulose *downgrade*. Isso porque a celulose com as piores especificações é um desvio de produção que gera perda de valor da celulose e deve ser evitada ao máximo. Se a variável j for utilizada, por mais que exista demanda em mercado interno para ela, a empresa nunca deve ter como meta de otimização a produção de uma celulose com especificações ruins. Por isso que, no modelo descrito nesse estudo, é considerado que toda a produção é de celulose com as melhores especificações. Quando a fábrica tiver uma performance ruim e ocorrer a produção de celulose *downgrade*, os planejadores da cadeia devem trabalhar para disponibilizá-la para mercado interno o mais rápido possível, influenciando o mínimo possível o nível de estoques da cadeia.

6. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo adaptar um modelo clássico da literatura para a realidade da cadeia de suprimentos da celulose. Com isso, os planejadores da cadeia podem simular diversos custos e demandas diferentes para decidir qual a melhor opção de produção, estocagem e movimentação de carga. Diversos autores e *papers* foram estudados e o modelo ideal foi escolhido adaptando uma

programação linear inteira mista de Diaby e Martel (1992) para a cadeia de suprimentos de celulose. Foram utilizadas, também, características do modelo de otimização de produção de Breadström et al. (2007), de gestão de estoques de Belvaux e Wolsey (2001) e de gestão de embarques de Bilgien e Ozkarahan (2007).

Entretanto, estudos mais profundos podem ser realizados para aumentar a eficiência das recomendações do modelo. Alternativas como diferenciar os diversos tipos de SKU e aplicar os custos de transportes de mercado interno quando as vendas forem para clientes que os custos de transporte são arcados pela companhia de celulose (CIF), são alguns dos exemplos de melhorias a serem feitas.

É importante ter em mente que os resultados da otimização são uma simplificação da realidade e servem para guiar os planejadores da cadeia de suprimentos. Além disso, algumas características importantes não foram tratadas, mas devem ser consideradas na gestão da cadeia, como a produção de celulose *downgrade* e possíveis atrasos de navios.

7. REFERÊNCIAS:

B. Bilgen and I. Ozkarahan, A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping, *International Journal of Production Economics* 107 (2007) 555–571.

B. Karami, S.M.T. Fatemi Ghomi and J.M. Wilson (2003). The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms, *Omega* 31: 365–378

Belvaux, G., L. Wolsey. 2001. Modelling practical lot-sizing problems as mixed-integer programs. *Management Sci.* 47 993–1007.

C. Merce and G. Fontan (2003). MIP-based heuristics for capacitated lotsizing problems, *International Journal of Production Economics* 85 97–111

Chen, F. 1998, “Stationary Policies in Multi-Echelon Inventory Systems with Deterministic Demand and Backlogging”, *Operations Research*, Vol. 46, No. 3, pp. S26-S34.

Cheung, K.L., and Lee, H.L. 2002, “The Inventory Benefit of Shipment Coordination and Stock Rebalancing in a Supply Chain”, *Management Science*, Vol.48, No.2, pp.300–306.

Clark, A.H. and H. Scarf. 1960, "Optimal Policies for a Multi-Echelon Inventory Problem", *Management Science*, Vol. 6, pp. 475-490.

D. Bredström, D. Carlsson, J.T. Lundgren, A. Mason, and M. Rönnqvist, Supply chain optimization in the pulp mill industry – IP models, column generation and novel constraint branches, *European Journal of Operational Research* 156 (2004) 2–22.

D. Bredström, J.T. Lundgren, M. Rönnqvist, D. Carlsson and A. Mason (2001). Supply chain optimization in the pulp mill industry, *Proceedings of the Logistics Research Network 6th Annual Conference*, Heriot-Watt University, 13-14 September, 67–74

D. Carlsson, S. D'Amours, A. Martel and M. Rönnqvist, Supply chain management in the pulp and paper industry, Working paper DT-2006-AM-3, Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT), Université Laval, Québec, G1K 7P4, Canada, 2006.

Diaby, M., and Martel, A., 1993, "Dynamic Lot-Sizing for Multi-Echelon Inventory Systems with Transportation and Purchasing Price Discounts", *Operations Research*, Vol. 41, No. 1. pp. 48-59.

H. Gunnarsson, M. Rönnqvist and D. Carlsson, A combined terminal location and ship routing problem, *Journal of the Operational Research Society* 57 (2006) 928–938.

H. Gunnarsson, M. Rönnqvist and D. Carlsson, Integrated production and distribution planning for Södra Cell AB, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 6(1) (2007) 25–45.

H. Stadtler, Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges, *European Journal of Operational Research* 163 (2005) 575-588.

J.F. Shapiro (ed) (2001) *Modeling the Supply Chain*. Duxbury

Kleywegt, A.J., Nori, V.S., and Savelsbergh, M.W. 2002, "The Stochastic Inventory Routing Problem with Direct Deliveries", *Transportation Science*, Vol. 36, No. 1, pp. 94–118.

L.H. Appelgren (1971). Integer programming methods for a vessel scheduling problem, *Transportation Science* 5: 64–78

M.M. Costa; J.L. Colodette; J.L. Gomide; C.E.B. Foelkel "Avaliação preliminar do potencial de quatro madeiras de eucalipto na produção de polpa solúvel branqueada pela sequência" *OA(ZQ)P. Revista Árvore* 21(3): 385 – 392. (1997)

R.C. Oliveira; C.E.B. Foelkel; J.L. Gomide; "Propriedades físico-mecânicas de celuloses kraft obtidas por cozimentos conjuntos de madeira de *Pinus strobus* var.

chiapensis e *Eucalyptus urophylla* de origem híbrida. Revista *Árvore* 04(2): 188 – 202. (1980)

Speranza, M.G., and Ukovich, W. 1994, "Minimizing Transportation and Inventory costs for Several Products on a Single Link", *Operations research*, Vol 42. No. 5, pp. 879-894

Wisner, J.D., G.K. Leong and L. Tan, "Principles of Supply Chain Management: A Balanced Approach, Thompson/South-Western, U.S.A., 2005